

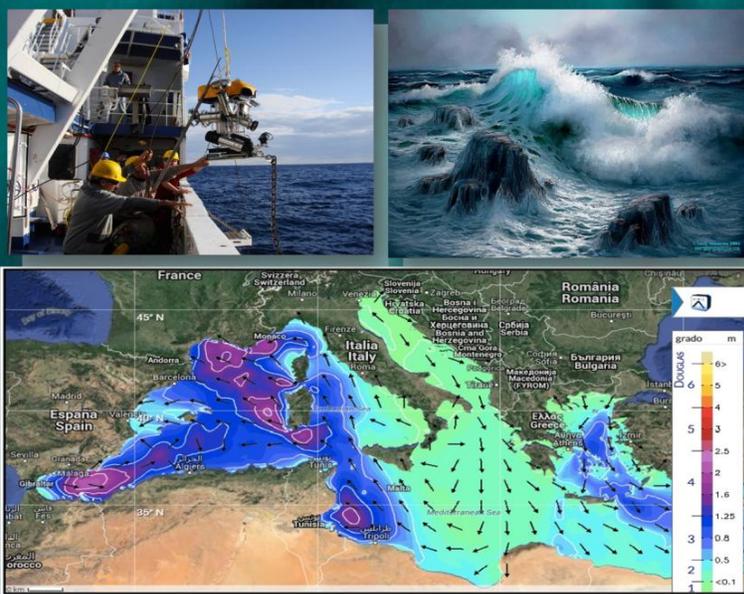
RACCOLTA DI CONTRIBUTI SCIENTIFICI

CORSO DI FORMAZIONE "OTTIMA"

Oceanografia operativa e Tecnologie Informatiche per la sicurezza Marittima

A cura di

Gemma Aiello e Roberto Sorgente



Organizzato da



Progetto PON01_02823 finanziato da



investiamo nel vostro futuro

INDICE

| | |
|------------|---|
| Prefazione | I |
|------------|---|

Sezione di Oceanografia Fisica e Meteorologia

| | |
|--|----|
| Applicazione di procedure di quality control a dati CTD e loro riduzione a formati standard europei (SEADATANET) | 1 |
| <i>C. Abbamondi, F. Bignami, C. Tronconi</i> | |
| Quality control e riduzione a formati standard europei seadatanet di dati oceanografici rilevati con profilatore ctd | 9 |
| <i>C. Abbamondi, F. Bignami</i> | |
| Studio della correlazione tra le strutture di circolazione a mesoscala e la distribuzione di <i>Balaenoptera physalus</i> nel Tirreno centrale | 17 |
| <i>V. Andreotti, A. Olita., L. Bittau, R. Manconi</i> | |
| Caratterizzazione idrologica del Canale di Sicilia | 27 |
| <i>C. Buonocore, R. Sorgente, G. Basilone</i> | |
| Individuazione di sorgenti sottomarine nel Golfo di Policastro (Mar Tirreno) ed effetti sulle caratteristiche fisiche della colonna d'acqua | 37 |
| <i>F. Ciccone, F. Basilone, B. B. Nardelli</i> | |
| Progettazione e implementazione di un sistema previsionale di allerta inondazione per le coste del Comune di Napoli | 48 |
| <i>D. Di Luccio, G. Budillon, R. Montella, E. Pugliese Carratelli, F. Dentale</i> | |
| Implementazione di una catena operativa per il controllo di qualità di misure radar in banda X | 55 |
| <i>V. Mazzarella, V. Capozzi, G. Budillon,</i> | |

| | |
|---|-----|
| Analisi climatologica con dati XBT | 61 |
| <i>F. Orilia, A. Ribotti</i> | |
| Previsione numerica della dispersione di idrocarburi nel Mar di Sardegna e Mar Tirreno | 67 |
| <i>C. Tedesco, R. Sorgente</i> | |
| Valutazioni della corrente mareale nel Golfo di Napoli da dati radar in HR | 79 |
| <i>R. Di Lemma, B. Buonocore, P.P. Falco, I. Iermano, E. Zambianchi</i> | |
| Validazione del sistema di previsione TSCRM mediante osservazioni CTD | 90 |
| <i>F. Pessini, L. Fazioli, R. Sorgente</i> | |
| Forze idrodinamiche indotte da onde irregolari su condotte sottomarine: analisi sperimentale | 99 |
| <i>G. Tripepi, F. Aristodemo</i> | |
| Distribuzione e densità di micro litter nel Mare di Sardegna in relazione alla formazione di strutture di meso-scala | 108 |
| <i>F. Serrentino, G. A. De Lucia</i> | |
| Individuazione di eventi grandigeni nell'area urbana di Napoli attraverso misure radar in banda X | 114 |
| <i>M.Moccia, V. Capozzi, G. Budillon</i> | |

Sezione di Geologia

| | |
|---|-----|
| Assetto morfo-strutturale dei Golfi di Patti e di Milazzo (Sicilia) in base a dati morfo-batimetrici e sismici di alta risoluzione. | 120 |
| <i>A. Iannotta, S. Passaro</i> | |
| Studio geochimico dei sedimenti e delle acque superficiali del fiume Sele finalizzato alla modellazione matematica della diffusione degli inquinanti in mare. (Golfo di Salerno) | 129 |
| <i>A. Frunzo, G. Nardi, M. Race, L.Frunzo</i> | |

Metodologie geologiche-geofisiche per lo studio delle strutture sedimentarie di fondo mare rilevate in ambiente marino costiero per una definizione morfologica delle forme di fondo da analisi di backscatter e batimetria multibeam 141

R. Laterza, S. Iannangi, G. Di Martino, R. Tonielli

Studio per la valutazione del rischio legato alla stabilità di un tratto della falesia di Miliscola (Litorale flegreo – Napoli). 155

A. Sgrosso, M. Sacchi, D. Campolo

Evoluzione della linea di costa in area flegrea e sue implicazioni 164

A. Sgrosso, M. Sacchi

Sezione di Biologia

Applicazione di tecniche istologiche e di analisi d'immagine per lo studio dell'ecologia riproduttiva di Acciuga europea (*Engraulis encrasicolus*) 177

C. Buonocore, G. Basilone

Impatto ambientale delle attività di maricoltura sulle comunità macrozoobentoniche in un sito confinato 186

S. Ciancimino, P. Fasciglione, L. M. Valiante

Reef Ball: Stato dell'arte 197

M. Consoli, F. Pasanisi

Caratterizzazione e mappatura di habitat bentonici: esempi dall'offshore settentrionale dell'Isola di Capri (Golfo di Napoli, Tirreno meridionale) 206

M. De Lauro, C. Violante

Valutazione della qualità delle acque e dello stato di conservazione delle biocenosi bentoniche di fondo duro dell'Area Marina Protetta di Capo Carbonara (Sardegna) 216

F. Ferrigno, I. Guala

| | |
|--|-----|
| Analisi di interazioni preda-predatore in organismi zooplanctonici mediante un approccio lagrangiano | 227 |
| <i>A. Maffia, M. Uttieri, Ai Nihongi, J. R. Strickler</i> | |
| Applicazione di un modello di qualità delle acque alla foce del fiume Sarno | 237 |
| <i>E. Scarpa, D. Cianelli, E. Zambianchi</i> | |
| Messa a punto di un sistema per il rilievo di correnti di fondo in acque basse mediante sensori idrofonici | 249 |
| <i>M. Sposato, V. Di Fiore</i> | |
| Marine Litter nell'ambito della strategia marina | 253 |
| <i>F. Serrentino, G. A. De Lucia</i> | |

PREFAZIONE

OTTIMA (*Oceanografia operativa e Tecnologie Informatiche per la sicurezza Marittima*) è un corso di formazione che, nell'ambito del progetto di innovazione tecnologica TESSA – Tecnologie per la Cognizione dell'Ambiente a Mare (finanziato dal MIUR nell'ambito del Programma PON "Ricerca & Competitività (R&C) 2007-2013), ha avuto l'obiettivo di predisporre e di erogare un percorso formativo che consentisse ai borsisti di acquisire la padronanza degli aspetti metodologico-operativi delle scienze di base dell'oceanografia operativa, della tecnologia e dell'ingegneria applicati agli oceani ed ai mari. Tali competenze, che non possono essere facilmente acquisite mediante gli attuali percorsi formativi erogati in Italia, presentano numerose ricadute in molteplici settori industriali (trasporto marittimo, turismo, sicurezza marittima), che avranno in futuro notevoli potenzialità di sviluppo.

Presso il CNR-IAMC Sede di Napoli sono stati svolti due corsi di formazione nell'ambito del progetto OTTIMA, cioè l'Edizione 2013, durante la quale è stato attuato l'Obiettivo 2 – ***Tecnologie Informatiche per la Sicurezza Marittima*** e l'Edizione 2014, durante la quale è stato eseguito l'Obiettivo 1 – ***Oceanografia operativa e sicurezza***. I corsi sono stati organizzati in modo da suddividere l'attività di formazione in due "momenti": in una prima fase i borsisti hanno seguito delle lezioni teoriche, durante le quali hanno potuto affrontare le tematiche principali previste dagli Obiettivi del corso; una seconda fase è consistita nello svolgimento di attività di tirocinio svolte presso diversi enti e/o sedi dell'istituto IAMC, decise in accordo coi borsisti, in funzione delle loro competenze e dei loro interessi.

Nel corso dello svolgimento dell'Obiettivo 2- Tecnologie Informatiche per la sicurezza marittima- i borsisti hanno maturato una dettagliata conoscenza delle tecniche informatiche nel campo dell'analisi dei dati ambientali marini, dell'oceanografia operativa, sia da sistemi osservativi che da modelli, dei sistemi di supporto alle decisioni per la sicurezza marittima, della protezione dell'ambiente marino e dello sfruttamento sostenibile delle risorse del mare.

Nel corso dello svolgimento dell'Obiettivo 1 – Oceanografia operativa e sicurezza, i borsisti hanno sviluppato abilità nella conoscenza dei metodi, delle tecniche, degli apparati, dei sistemi operativi e delle infrastrutture fondamentali per la comprensione della dinamica degli oceani e dei mari, per il loro monitoraggio e per lo sfruttamento delle risorse marine e per la sicurezza marittima.

Le attività didattiche svolte hanno incluso l'insegnamento dell'oceanografia fisica e della meteorologia di base, dell'ingegneria costiera, dei sistemi di osservazione dell'oceano in situ e da satellite, dei metodi numerici per la modellistica idrodinamica e degli ecosistemi marini, delle tecniche di analisi statistica dei dati multidisciplinari marini, delle tecniche di assimilazione dei dati, dei sistemi informativi per la gestione dei dati e della legislazione che disciplina la sicurezza marittima e l'inquinamento marino.

Questo volume raccoglie i contributi di alcuni borsisti che hanno frequentato il corso di formazione OTTIMA (cicli didattici 2013/2014 e 2014/2015) presso l'Istituto per l'Ambiente Marino Costiero

(IAMC) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) di Napoli, acquistando notevoli abilità nel campo dell'oceanografia fisica ed operativa, della biologia e della geologia marina. Il volume si articola in tre sezioni, una sezione *oceanografica*, una *geologica* ed una *biologica*. In ciascuna sezione sono stati inseriti gli articoli dei borsisti, frutto dei lavori di approfondimento svolti durante il periodo di tirocinio previsto dal corso.

Docenti del corso **Tecnologie Informatiche per la sicurezza marittima**, Napoli 2012/2013:

| Docente | Affiliazione | Insegnamento |
|---------------------------------------|---|--|
| Prof. Giorgio Budillon | Università degli Studi di Napoli "Parthenope" | Oceanografia Fisica |
| Prof. Roberto Sandulli | Università degli Studi di Napoli "Parthenope" | Biogeochimica marina e modellistica numerica |
| Prof. Stefano Pierini | Università degli Studi di Napoli "Parthenope" | Tecniche di analisi statistica dei dati |
| Prof. Stefano Pierini | Università degli Studi di Napoli "Parthenope" | Modellistica oceanografica numerica |
| Dott. Pierpaolo Falco | Università degli Studi di Napoli "Parthenope" | Oceanografia operativa |
| Ing. Aniello Coppola | Libero Professionista, Napoli | Normativa inquinamento e sicurezza marittima |
| Dott. Yuri Cotroneo | Università degli Studi di Napoli "Parthenope" | Tecniche di visualizzazione ed analisi dei dati |
| Dott. Yuri Cotroneo | Università degli Studi di Napoli "Parthenope" | Dati satellitari |
| Dott. Pietro Patrizio Ciro Aucelli | Università degli Studi di Napoli "Parthenope" | Risk assessment and management |
| Dott. Umberto Robustelli | Università degli Studi di Napoli "Parthenope" | Data transmission technologies |
| Dott. Silvio Magnosi | Università degli Studi di Napoli "Parthenope" | Trasporto marittimo (legislazione) |
| Dott. Francesco Lalli | ISPRA, Roma | Ingegneria costiera |
| Dott. Giuseppe Manzella | ENEA, La Spezia | Sistemi informativi e data management |
| Dott. Diego Vicinanza | Seconda Università degli Studi di Napoli, Aversa (CE) | Monitoraggio idrodinamico e morfodinamico della fascia costiera. |

Docenti del corso *Oceanografia operativa e sicurezza*, Napoli 2013/2014:

| Docente | Affiliazione | Insegnamento |
|---------------------------|---|--|
| Dott. Roberto Sorgente | CNR-IAMC, Oristano | Oceanografia Fisica |
| Prof. Roberto Sandulli | Università degli Studi di Napoli "Parthenope" | Biogeochimica marina e modellistica numerica |
| Dott. Francesco Lalli | ISPRA, Roma | Ingegneria costiera |
| Dott.ssa Antonia Di Maio | CNR-INSEAN, Roma | Strumenti e metodi osservativi in situ |
| Dott. Yuri Cotroneo | Università degli Studi di Napoli "Parthenope" | Oceanografia da satellite |
| Prof. Giorgio Budillon | Università degli Studi di Napoli "Parthenope" | Meteorologia |
| Dott. Leopoldo Fazioli | CNR-IAM, Oristano | Oceanografia Operativa |
| Dott.ssa Barbara Sorgente | Area Marina di La Maddalena | Inquinamento Marino |
| Dott.ssa Giannetta Fusco | Università degli Studi di Napoli "Parthenope" | Tecniche di analisi statistica dei dati |
| Prof. Stefano Pierini | Università degli Studi di Napoli "Parthenope" | Modellistica oceanografica numerica |
| Dott. Raffaele Montella | Università degli Studi di Napoli "Parthenope" | Sistemi informativi e data management |
| Prof.ssa Luisa D'amore | Università degli Studi di Napoli Federico II | Analisi numerica e simulazioni |
| Dott.ssa Daniela Cianelli | Università degli Studi di Napoli Parthenope, Napoli | Simulazioni lagrangiane e di dispersione di inquinanti |
| Dott.ssa Ilaria Iermano | Università degli Studi di Napoli Parthenope, Napoli | Tecniche di assimilazione dati per le previsioni |

OTTIMA è stato per noi un viaggio nell'oceanografia operativa che ci ha dato grandi soddisfazioni non solo professionali ma anche umane, per aver visto la crescita di ragazzi e ragazze.

Auguriamo a tutti i borsisti di OTTIMA che l'aver frequentato questi corsi di formazione abbia dato loro un biglietto da visita di prim'ordine nel campo della conoscenza delle scienze marine.

Gemma Aiello (1) e Roberto Sorgente (2)

(1) Ricercatore presso CNR-IAMC Sede di Napoli –
Responsabile del progetto di formazione OTTIMA

(2) Ricercatore presso CNR-IAMC Sezione di Oristano –
Responsabile CNR del progetto di ricerca TESSA

*Oceanografia fisica
e Meteorologia*

Applicazione di procedure di quality control a dati CTD e loro riduzione a formati standard europei (SEADATANET)

Chiara Abbamondi
Istituto Ambiente Marino Costiero – CNR
Napoli, Italia
chiarabba@libero.it

Francesco Bignami, Cristina Tronconi
Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima –
CNR, Unità Operativa di Supporto Roma, Italia
f.bignami@isac.cnr.it; c.tronconi@isac.cnr.it

Sommario - Il procedimento di Quality Control (QC) consiste nell'utilizzo di controlli da effettuare sui dati idrologici al fine di validarli e di eliminare eventuali errori dovuti alla mancanza di informazioni obbligatorie inerenti la campagna oceanografica o la presenza di valori anomali (spikes) sul profilo di una variabile acquisita. I dati oceanografici analizzati sono stati acquisiti con sonda multiparametrica CTD e su di essi è stata effettuata la riduzione a formati standard europei SeaDataNet, al fine di renderli accessibili nei database internazionali in corso di allestimento.

In particolare i dati qui analizzati e processati sono inerenti la campagna oceanografica "NORBAL 1", svoltasi nel Golfo del Leone (Mediterraneo nord-occidentale) dal 24/03/2000 al 9/04/2000 dal Gruppo di Oceanografia da Satellite (GOS, responsabile Dr. Rosalia Santoleri) dell'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del CNR (CNR-ISAC), Unità Operativa di Supporto di Roma. Lo scopo di tale campagna è stato quello di definire la caratterizzazione e variabilità fisica, dinamica e biogeochimica del North Balearic Front (un fronte termico zonale quasi permanente a nord delle isole Baleari) e del bloom fitoplanctonico primaverile a nord di esso tramite dati satellitari ed in situ. Il presente lavoro, è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness'-TESSA".

INTRODUZIONE

SeaDataNet [1.1] è un progetto europeo in cui viene sviluppato un sistema standardizzato per effettuare il controllo di qualità dei dati oceanografici in situ (ad es. raccolti mediante sonde oceanografiche CTD) e per la loro archiviazione e gestione in databases consultabili dal pubblico internazionale. Il progetto è di grande utilità, in quanto i dati in situ, spesso, non sono né facilmente accessibili né adeguatamente convalidati e "puliti" da errori, o sono controllati in maniera differente da Ente a Ente, compromettendone quindi la fruibilità da parte della comunità scientifica internazionale.

Il presente lavoro è consistito nel QC e riduzione a formato standard SeaDataNet del data set di profili idrologici da sonda CTD, relativo alla campagna oceanografica "NORBAL 1" svoltasi su nave oceanografica Urania del CNR nel Golfo del Leone (Mediterraneo nord-occidentale) dal 24/03/2000 al 09/04/2000 (Fig. 1), periodo di massima fioritura fitoplanctonica primaverile nel Mediterraneo occidentale.

Il lavoro è stato svolto in ambiente di programmazione IDL per l'implementazione del Quality Control e mediante i software NEMO e MIKADO, forniti dal progetto SeaDataNet, per la riduzione a formato standard.

Il Motivo della ricerca in mare, qui trattata, è stata la valutazione dell'influenza delle strutture oceaniche a mesoscala (vortici e instabilità di corrente) e della loro variabilità sulla produttività biologica del North Balearic Front (NBF) e del bloom fitoplanctonico tra il NBF e il Golfo del Leone a nord.

Il NBF è uno dei fronti più estesi del Mediterraneo ed è situato a nord-est delle isole Baleari, separa le acque fredde della zona a sud del Golfo del Leone da quelle, più calde, del Mediterraneo sud occidentale. Si ricorda poi che la zona di mare a nord del NBF, detta anche MEDOC (da "MEDiterranean OCCidentale"), è la sede di formazione della Western Mediterranean Deep Water [1], [2], [3] dunque di immensa rilevanza per l'ossigenazione degli strati abissali del Mediterraneo.

Inoltre l'analisi dei dati del sensore satellitare Coastal Zone Color Scanner (CZCS, ad 1km di risoluzione) [4] e in seguito degli altri satelliti di colore oceanico più recenti (SeaWifs, Modis, Meris), conferma che in corrispondenza del fronte termico NBF, esiste una separazione tra acque meno oligotrofiche a nord e più oligotrofiche a sud e mostra come il bloom tra il fronte e la costa nord sia la fioritura più importante dell'intero Mediterraneo [5].

I dati raccolti durante la campagna NORBAL 1, assieme ai dati satellitari relativi alla zona e periodo di misure (temperatura e clorofilla superficiali), vengono usati anche per implementare modelli per calcolare la produzione primaria da dati satellitari. Il confronto tra questi ultimi e i dati in situ, permette di convalidare e migliorare gli algoritmi per ottenere la clorofilla dalle

radiazioni superficiali misurate dai satelliti SeaWiFS e MODIS.

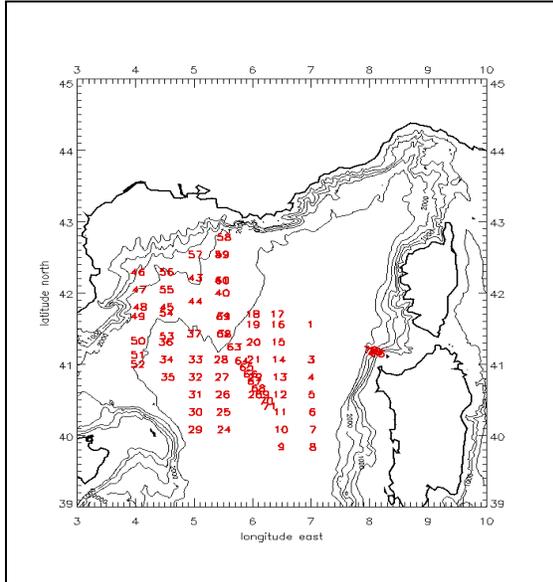


Figura 1. Mappa delle stazioni idrologiche della campagna NORBAL 1 (nave Urania 23/03/2000-09/04/2000)

I. MATERIALI E METODI

A. Acquisizione dati

I valori delle variabili prese in esame sono stati acquisiti tramite sonda multiparametrica CTD (Conductivity-Temperature-Depth) Sea Bird 911 plus abbinato a un sistema Rosette, di bottiglie Niskin per campioni d'acqua a quote desiderate a chiusura pilotata durante l'acquisizione ed elaborati con il relativo software SEASOFT versione 4.217, [2.1].

Il software SeaSoft si compone di vari moduli nei quali i dati sono processati per ottenere come output finale il dato mediato ad 1 dbar di pressione (circa 1 m; Fig.2). I moduli comprendono:

SEASAVE: per l'acquisizione misure idrologiche del CTD (pressione, temperatura, conducibilità, ossigeno, fluorescenza, trasmittività della luce) a 24Hz (si hanno 24 data lines al, cioè in circa 1 m di discesa del CTD). Si producono i files .dat o, nelle versioni più aggiornate del sw, .hex., assieme ad alcuni files ausiliari (.bl con dati in corrispondenza chiusura bottiglie Niskin, .hdr con header file dati).

DATCNV: converte le frequenze e voltaggi registrati dai sensori in unità fisiche (ad es. temperatura, conducibilità, etc.) producendo i files in .cnv (profilo) e .ros (data lines chiusura Niskin).

FILTER: viene applicato un filtro passa-basso di 0.03 sec sul sensore di conducibilità (primario e secondario) ed i 0.15 sec sulla pressione.

ALIGNCTD: anticipa di 0.073 sec il sensore secondario di conducibilità rispetto la pressione e di 3 sec quello dell'ossigeno, dato che una particella d'acqua incontra prima il sensore di conducibilità poi quello di ossigeno, nel percorso nel tubo di tygon che

collega i sensori, poiché l'acqua viene convogliata ai sensori attraverso questi tubi, tramite una pompa che garantisce uniformità di velocità dell'acqua, che sarebbe compromessa e.g. dal moto ondoso. In questo modo i valori conducibilità e ossigeno su un a riga del file .cnv diventano appartenenti alla stessa particella d'acqua.

CELLTM: correzione dell'effetto dell'inerzia termica della cella di conducibilità in vetro sulla conducibilità stessa. I tipici valori che si applicano nella procedura sono: anomalia dell'ampiezza termica ($\alpha = 0.03$) e dell'anomalia termica con tempo costante ($1/\beta = 7$).

LOOPEDIT: fissa il minimo di velocità (0.25 m/s) del CTD per avere buone misurazioni. Se la velocità del CTD è inferiore al minimo specificato o la pressione è minore o uguale del precedente valore (in discesa), la misurazione è segnata con un valore non buono (flag).

BINAVG: i dati vengono mediati a 1 dbar.

DERIVE: calcola la salinità, la densità e gli altri parametri oceanografici non misurati direttamente dai sensori.

SPLIT: separa i profili di discesa (downcast) e salita (upcast) della sonda, poiché il file dati .dat o .hex è unico. Fin qui i dati sono in formato binario e il file prodotto a questo punto è il .cnv, che ad ogni passo del presente processamento viene sovrascritto con il risultato dell'applicazione del modulo pertinente.

ASCIIOUT: crea i file .asc a 1db, versione in formato ASCII del file .cnv uscente dal sw Split.

BOTTLE SUMMARY: legge i dati .ros estratti dal file .hex in corrispondenza della chiusura delle bottiglie Niskin e produce il file .btl contenenti le informazioni sulla data, ora e i dati CTD in corrispondenza della chiusura delle bottiglie. I dati di CTD del file .btl vengono usati ad es. per la calibrazione del sensore di ossigeno, assieme ai dati corrispondenti di ossigeno disciolto misurati dall'acqua delle bottiglie Niskin con il metodo chimico Winkler.

Ogni modulo SeaSoft di cui sopra modifica il file di dati da esso processato, aggiungendo informazioni nell'intestazione del file relative al singolo modulo di processamento, al fine di consentire un monitoraggio dell'intera sequenza.

Infine, le misure di ossigeno sono state confrontate con i dati da campione d'acqua Rosette ottenuti con il metodo chimico di Winkler e i dati CTD sono stati corretti di conseguenza. Parimenti, i dati CTD di salinità sono stati confrontati con le misure ottenute, tramite salinometro Portasal, dai campioni d'acqua prelevati con sistema Rosette, sempre al fine di individuare le opportune correzioni da apportare.

```

Cruise: NORBAL 1
Station: NB001
0000126
62226
41 30.02
007 00.11
8706
Sea-Bird SBE 9 Raw Data File:
Software Version 4.217

```

| P | T | Theta | S | Dens | Sigth | Sigt | Sigt1 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 5.00000 | 13.9433 | 13.9426 | 38.0502 | 28.5793 | 28.5574 | 28.5573 | 32.9124 |
| 6.00000 | 13.9397 | 13.9388 | 38.0507 | 28.5800 | 28.5535 | 28.5533 | 32.9082 |
| 7.00000 | 13.9800 | 13.9790 | 38.0503 | 28.5804 | 28.5494 | 28.5494 | 32.9039 |
| 8.00000 | 13.9606 | 13.9594 | 38.0506 | 28.5894 | 28.5541 | 28.5538 | 32.9088 |
| 9.00000 | 13.9401 | 13.9478 | 38.0502 | 28.5959 | 28.5562 | 28.5559 | 32.9112 |
| 10.0000 | 13.9500 | 13.9485 | 38.0504 | 28.6003 | 28.5562 | 28.5559 | 32.9111 |
| 11.0000 | 13.9499 | 13.9483 | 38.0504 | 28.6049 | 28.5563 | 28.5560 | 32.9113 |
| 12.0000 | 13.9513 | 13.9495 | 38.0503 | 28.6086 | 28.5560 | 28.5556 | 32.9109 |
| 13.0000 | 13.9558 | 13.9539 | 38.0503 | 28.6123 | 28.5550 | 28.5546 | 32.9099 |
| 14.0000 | 13.9446 | 13.9425 | 38.0482 | 28.6176 | 28.5558 | 28.5554 | 32.9109 |
| 15.0000 | 13.9296 | 13.9274 | 38.0466 | 28.6239 | 28.5578 | 28.5574 | 32.9132 |
| 16.0000 | 13.9048 | 13.9024 | 38.0423 | 28.6302 | 28.5599 | 28.5594 | 32.9157 |
| 17.0000 | 13.8701 | 13.8676 | 38.0366 | 28.6379 | 28.5630 | 28.5624 | 32.9195 |
| 18.0000 | 13.8352 | 13.8326 | 38.0313 | 28.6458 | 28.5664 | 28.5659 | 32.9236 |
| 19.0000 | 13.7966 | 13.7938 | 38.0269 | 28.6530 | 28.5713 | 28.5707 | 32.9292 |
| 20.0000 | 13.7790 | 13.7761 | 38.0242 | 28.6611 | 28.5730 | 28.5724 | 32.9313 |
| 21.0000 | 13.7435 | 13.7404 | 38.0217 | 28.6713 | 28.5787 | 28.5781 | 32.9377 |
| 22.0000 | 13.6873 | 13.6841 | 38.0204 | 28.6886 | 28.5897 | 28.5890 | 32.9498 |
| 23.0000 | 13.6495 | 13.6462 | 38.0231 | 28.7013 | 28.5999 | 28.5992 | 32.9606 |
| 24.0000 | 13.6383 | 13.6348 | 38.0262 | 28.7104 | 28.6047 | 28.6040 | 32.9656 |
| 25.0000 | 13.6386 | 13.6330 | 38.0270 | 28.7159 | 28.6057 | 28.6050 | 32.9667 |
| 26.0000 | 13.6279 | 13.6241 | 38.0323 | 28.7263 | 28.6117 | 28.6109 | 32.9728 |
| 27.0000 | 13.6127 | 13.6088 | 38.0375 | 28.7382 | 28.6190 | 28.6182 | 32.9804 |
| 28.0000 | 13.6044 | 13.6003 | 38.0401 | 28.7462 | 28.6228 | 28.6219 | 32.9843 |
| 29.0000 | 13.5961 | 13.5919 | 38.0414 | 28.7534 | 28.6256 | 28.6247 | 32.9872 |
| 30.0000 | 13.5908 | 13.5865 | 38.0445 | 28.7615 | 28.6292 | 28.6283 | 32.9909 |
| 31.0000 | 13.5824 | 13.5779 | 38.0538 | 28.7749 | 28.6382 | 28.6372 | 33.0000 |
| 32.0000 | 13.5763 | 13.5717 | 38.0595 | 28.7850 | 28.6439 | 28.6430 | 33.0058 |
| 33.0000 | 13.5694 | 13.5646 | 38.0678 | 28.7972 | 28.6518 | 28.6508 | 33.0138 |
| 34.0000 | 13.5692 | 13.5643 | 38.0694 | 28.8031 | 28.6529 | 28.6521 | 33.0151 |
| 35.0000 | 13.5675 | 13.5624 | 38.0719 | 28.8098 | 28.6555 | 28.6544 | 33.0174 |
| 36.0000 | 13.5651 | 13.5599 | 38.0754 | 28.8175 | 28.6588 | 28.6577 | 33.0208 |
| 37.0000 | 13.5634 | 13.5580 | 38.0808 | 28.8269 | 28.6626 | 28.6616 | 33.0258 |
| 38.0000 | 13.5578 | 13.5523 | 38.0835 | 28.8342 | 28.6666 | 28.6655 | 33.0287 |
| 39.0000 | 13.5561 | 13.5505 | 38.0842 | 28.8395 | 28.6676 | 28.6664 | 33.0297 |
| 40.0000 | 13.5537 | 13.5499 | 38.0842 | 28.8440 | 28.6674 | 28.6664 | 33.0298 |
| 41.0000 | 13.5506 | 13.5447 | 38.0873 | 28.8521 | 28.6712 | 28.6699 | 33.0334 |
| 42.0000 | 13.5416 | 13.5355 | 38.0910 | 28.8612 | 28.6760 | 28.6747 | 33.0383 |
| 43.0000 | 13.5322 | 13.5260 | 38.0928 | 28.8691 | 28.6794 | 28.6781 | 33.0420 |

Figura 2. Esempio di file CTD ASCII mediato ad 1 dbar (stazione NB001, campagna NORBAL 1)

B. Procedure di Quality Control

Le procedure di Quality Control (QC) sono una serie di controlli da effettuare sui dati idrologici al fine di validarli e di eliminare eventuali errori casuali o sistematici. Esse riguardano sia controlli automatici di base, inerenti le informazioni prettamente legate alla campagna oceanografica (nome crociera, data, coordinate, etc..) presenti nell'intestazione del file (file header) che controlli scientifici eseguiti sui parametri campionati che dipendono dal tipo di dato analizzato. Alla fine delle procedure si individua un valore (secondo la scala di QC SeaDataNet) indicante la qualità del dato, da abbinare al dato stesso affinché l'utente ne conosca il livello di qualità.

Il codice per il Quality Control è stato scritto usando il software di programmazione IDL (versione 8.2.1) e per le procedure è stato usato come riferimento il manuale di Quality Control di SeaDataNet [6] al quale sono poi state aggiunte altre procedure più specifiche. Elenchiamo di seguito le procedure di QC implementate nel codice ed applicate ai dati NORBAL 1, ove non specificato, le procedure si intendono come standard prescritto nel manuale QC di SeaDataNet.

Procedure Quality Control – controlli automatici:

Controllo su data ed orario: questo tipo di controllo evidenzia se ci sono anomalie nel formato delle informazioni di intestazione. L'anno deve essere composto da quattro cifre, il mese deve essere compreso tra 1 e 12, il giorno deve ricadere nell'intervallo mensile, l'ora deve essere compresa tra 0 e 23 ed i minuti e i secondi tra 0 e 59.

Controllo sulle coordinate: la latitudine deve essere compresa tra -90 e 90 mentre la longitudine deve essere compresa tra -180 e 180.

Test della posizione delle stazioni: viene effettuato al fine di evidenziare la corretta posizione delle stazioni a mare, cioè che latitudini e longitudini nell'header non siano fuori dalla zona di studio a causa di errori di acquisizione dal sistema GPS della nave e/o

di digitazione manuale della posizione. Inoltre, viene prodotta una mappa delle stazioni.

Test su range globale e regionale dei valori dei parametri analizzati che devono ricadere nell'intervallo dei valori limite (minimo e massimo) globali e regionali. Ad. es. una temperatura di 50° C viene classificata come errata, dato un range globale ad es. tra -2°C e 35° C o un range per il Mar Mediterraneo tra 4° C (es. Adriatico in inverno) e 30°C (es. Bacino Levantino in estate). I range sono ottenuti dalla letteratura scientifica.

Procedure Quality Control – controlli scientifici:

Test sull'incremento della pressione: questo test serve a controllare che la pressione aumenti in maniera monotona nel file contenente il downcast.

Test sulla profondità: verifica che non vi siano valori di profondità nei dati, superiori alla profondità del fondo.

Controllo per la stabilità verticale: questo test verifica che la densità aumenti con la profondità. Viene effettuato al fine di valutare la stabilità del profilo verticale, dato che alla risoluzione di 1 dbarn la colonna è stabile, a meno di rare eccezioni per cui si effettua un trattamento dati particolare (formazione acque dense, con instabilità verticale).

Test per l'individuazione della presenza di valori anomali (spikes): vengono individuati valori che escono dal range locale dei dati rilevati, dovuti principalmente al temporaneo malfunzionamento di uno o più sensori. Contemporaneamente ad un'analisi statistica, viene effettuata anche un'analisi visiva, in quanto gli spikes sono facilmente riconoscibili nel profilo di un parametro, poiché fuoriescono di molto dal normale andamento del profilo della variabile esaminata. Il test è sensibile alla frequenza di campionamento verticale, ovvero, perché un sensore funzioni in maniera ottimale, il parametro in esame deve essere campionato con una frequenza adeguatamente alta rispetto alla variabilità verticale del parametro stesso (ad es. circa ogni metro è sufficiente per i nostri studi, che non esaminano la microstruttura turbolenta dei dati). E' un test che agisce sul calcolo della differenza tra il valore in esame e i valori adiacenti, nel profilo verticale.

I parametri esaminati sono: temperatura (°C), salinità (psu), ossigeno (ml/l), trasmissività della luce (in percentuale della luce alla sorgente luminosa del trasmissometro, %) e fluorescenza (volt). Su ognuno di essi è stato applicato un diverso metodo statistico per ottimizzare l'eliminazione dei valori anomali.

Despike Temperatura: il profilo di temperatura è stato trattato dividendo la colonna d'acqua in due parti: lo strato superficiale e lo strato profondo. Ad entrambe è stato applicato un diverso valore soglia del parametro SPT descritto di seguito, oltre il quale il dato è considerato uno spike. Questa suddivisione viene fatta perché il segnale della sonda nello strato superficiale risulta essere più rumoroso e quindi necessita di una maggiore "tolleranza" (valore di soglia SPT) rispetto allo strato profondo.

Il manuale di QC di SeaDataNet definisce SPT come:

$$SPT = \frac{|V2 - (V3 + V1)/2| - |(V3 - V1)/2|}{2} \quad (1)$$

dove V2 è il valore che deve essere verificato mentre V1 e V3 sono rispettivamente i valori precedente e successivo nel profilo verticale. Se il valore SPT è maggiore del valore soglia adottato, allora il dato è considerato spike e viene sostituito con il valore di “bad data flag” -99.000 nel nostro caso.

La divisione della colonna d'acqua viene effettuata in base all'individuazione del valore di gradiente (rispetto alla pressione). Per lo strato superficiale si ha un alto gradiente dovuto alla presenza del termocline e di una maggiore variabilità naturale nello strato omogeneo vicino l'atmosfera (mixed layer) e viene applicato un valore soglia maggiore rispetto a quello della colonna d'acqua profonda in cui la temperatura varia lievemente rispetto alla profondità.

Despike della salinità e dell'ossigeno: è stato usato lo stesso procedimento di despike della temperatura.

Despike Trasmissività della luce: è stato adottato il metodo statistico di Median Absolute Deviation (MAD) gentilmente fornitoci dal dott. Igor Petenko del CNR-ISAC UOS Roma [7] sull'intera colonna d'acqua.

$$MAD = \text{MEDIAN}(\text{ABS}(X - \text{MEDIAN}(X))) \quad (2)$$

dove X è il profilo di trasmissività da analizzare, ABS indica il valore assoluto e MEDIAN è la mediana del profilo stesso. Invece

$$\text{THR_MAD} = \text{MEDIAN}(X) \pm 3\text{MAD}(X) \quad (3)$$

indica il valore soglia oltre il quale il dato è considerato spike. Il metodo è applicabile soprattutto per i dati aventi media uguale a 0 (data set stazionario), ovvero dati non influenzati da una variabilità con trend (nel nostro caso rispetto alla pressione) diverso da zero, come può anche essere il profilo di trasmissività in funzione della pressione. Quindi, si è dapprima ottenuto un secondo profilo più “liscio” di trasmissività applicando un filtro mobile (smooth) a 5 dbar che fornisce il trend di cui sopra e poi questo è stato sottratto al profilo iniziale ottenendo quindi un profilo di anomalia (a media nulla) rispetto al trend, azzerando dunque il trend stesso. Su tale profilo è stata considerata una finestra mobile di 50 punti incentrata sul valore centrale da esaminare e su questa si è applicata la Median Absolute Deviation (2) e (3) per valutare la bontà del dato centrale della finestra. Il dato è stato eliminato (-99.000) se il valore risultava essere maggiore del THR_MAD.

Despike Fluorescenza: l'algoritmo utilizzato è, anche in questo caso, il Median Absolute Deviation.

I valori individuati come errati dai controlli di cui sopra sono stati riportati su un apposito file .log che viene creato dal codice man mano che effettua i controlli sui dati (Fig. 3), in modo che l'operatore può individuare immediatamente le stazioni idrologiche con problemi, senza dover editare a mano tutti i file CTD.

In Fig. 3 si può vedere come nel file .log siano presenti i nomi dei files CTD esaminati e ad es. diciture del tipo “density not increasing” per indicare instabilità di

```
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB001d.dat
dens out of range
value of last depth greater than bottom depth2706 2734.71
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB003bd.dat
dens not increasing 31.0542 31.0513
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB003d.dat
dens out of range
value of last depth greater than bottom depth2760 2770.95
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB004d.dat
dens not increasing 28.0320 28.0212
dens not increasing 28.7668 28.7653
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB005d.dat
dens out of range
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB006d.dat
dens not increasing 28.8849 28.8844
dens not increasing 29.2069 29.2063
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB007d.dat
dens out of range
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB008d.dat
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB009d.dat
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB010sd.dat
dens not increasing 27.9073 27.9043
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB010d.dat
dens out of range
value of last depth greater than bottom depth2795.7 2834.60
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB011d.dat
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB012d.dat
dens out of range
value of last depth greater than bottom depth2761 2800.33
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB013d.dat
dens not increasing 28.0872 28.0870
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB014d.dat
dens out of range
dens not increasing 28.1293 28.1202
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB015d.dat
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB016d.dat
dens out of range
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB017d.dat
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB018d.dat
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB019d.dat
dens out of range
value of last depth greater than bottom depth2548 2556.37
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB020d.dat
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB021sd.dat
C:\Users\chiara\Desktop\chiara_abbamondi\nb1rep\Final\NB021d.dat
```

densità, etc.

Figura 3. Esempio di file .log recante segnalazioni di problemi rilevati durante la procedura di QC.

C. Conversione dati a formati europei SeaDataNet: uso software NEMO

NEMO è un software di formattazione usato per generare file ASCII in formati richiesti (ODV, MEDATLAS, NETCDF) da SeaDataNet, per la condivisione dei dati marini [8].

Il requisito essenziale è che le informazioni relative ai dati di input devono essere impostate in ugual modo per identificare le posizioni e i parametri (es. data, ora, coordinate, colonne dei parametri).

I dati di input per NEMO sono dati oceanografici in situ di qualsiasi tipo; nel nostro caso si tratta dei dati CTD della campagna NORBAL 1 ai quali è stata applicata la procedura di QC sopra descritta. I dati sono stati convertiti con NEMO, in formato ODV, utilizzando anche i vocabolari EDMO (European Directory of Marine Organizations) di SeaDataNet che sono necessari per la selezione e l'inserimento dei nomi standard dei parametri acquisiti nel file compatibile con il software di visualizzazione dati ODV.

La conversione dei dati è preceduta da una serie di impostazioni divisi in quattro menu (“tabs”) presenti nell'interfaccia di NEMO: *file, station, data e convert*, (Fig.4) in cui si immettono le informazioni contenute nel file di input, dell'Ente che ha raccolto i dati e del formato di conversione.

Le impostazioni dei formati alla fine vengono salvate in un modello utilizzabile per la formattazione di successivi dati.

NEMO crea anche un file di testo “cdi summary csv file .txt” contenete tutte le informazioni per creare un CDI (Common Data Index) record nel catalogo di SeaDataNet. Il “cdi summary csv file .txt”, una volta

convertito in formato .xls, viene letto dal sw MIKADO, per generare un .xml cdi file che è esportato al catalogo centrale di SeaDataNet. NEMO genera anche un “Coupling table” che serve a correlare il cdi al file in cui esso è contenuto.

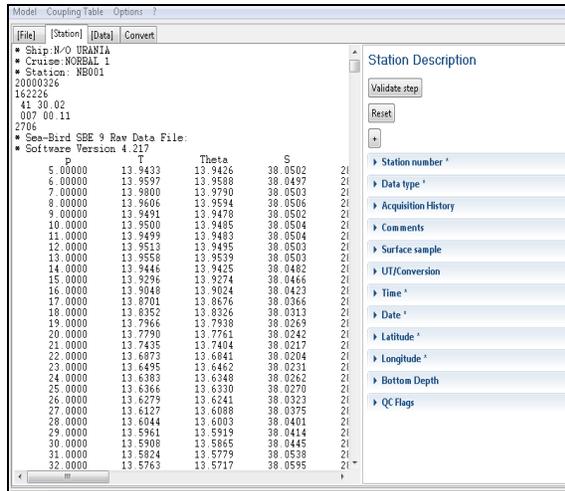


Figura 4. Schermata di settaggio dati del sw NEMO

D. Generazione metadati: uso software MIKADO

L'uso del sw MIKADO [9] è strettamente legato all'utilizzo del precedente sw NEMO. All'interno del progetto europeo SeaDataNet, il sw MIKADO viene utilizzato per la generazione di metadati (file cdi .xml) scritti con standard ISO-19115 usando i vocabolari comuni di SeaDataNet, al fine di garantire l'accesso degli utenti ai data base internazionali. I metadati sono file di testo, associati ai dati raccolti, che forniscono informazioni sui dati stessi.

La creazione del cdi .xml per la campagna NORBAL 1, è avvenuta in modalità automatica con l'utilizzo di informazioni contenute nel file .xls (Fig. 5) prodotto precedentemente dalla conversione del “cdi summary csv file .txt” del sw NEMO.

In particolare le informazioni contenute nel file .xls, vengono lette dal sw MIKADO che produce delle “Queries” per il recupero delle informazioni dei dati di input. La validità delle Queries viene verificata attraverso l'apposito tool “Queries” e si salvano in un “Configuration File” che serve alla generazione ultima del file cdi .xml (Fig. 6).

I dei metadati (cdi file) così creati permettono l'accessibilità al database di SeaDataNet per la richiesta dei dati marini appartenenti a un qualsiasi Ente.

| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P |
|----|------------|---------|-------|---------|---------|------------|----------|--------------------------------|--------------|-------------|---------|----------|------------|-------|-----------|
| 1 | LOCAL_CODE | ALABEA | TYPE | DATASET | DATASET | EDMO_CODE | PLATFORM | CRUISE_NAME | CRUISE_START | CRUISE_STOP | STATION | | | | |
| 2 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 48 | CTD profile taken during a 148 | AHST | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 3 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | TEMP | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 4 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | TEMP | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 5 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | PSAL | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 6 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | SIGT | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 7 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | SIGT | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 8 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | SIGT | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 9 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | DOOW | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 10 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | DOOW | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 11 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | ATTH | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 12 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | CPWC | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 13 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | AHST | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 14 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | AHST | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 15 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | TEMP | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 16 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | TEMP | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 17 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | PSAL | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 18 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | SIGT | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 19 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | SIGT | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 20 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | SIGT | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 21 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | DOOW | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 22 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | DOOW | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 23 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | ATTH | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 24 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | CPWC | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 25 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | AHST | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 26 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | AHST | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 27 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | TEMP | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 28 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | TEMP | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 29 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | PSAL | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 30 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | SIGT | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 31 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | SIGT | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |
| 32 | NBL | NBL0134 | Point | NBL | NBL | 2013-11-14 | 49 | CTD profile taken during a 148 | SIGT | SL | LS | NORBAL.1 | 2000-03-26 | NB012 | 440.70003 |

Figura 5. File di input “cdi_summary-csv_file.xls” per MIKADO

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<!-- this file has been created using MIKADO version 3.3.1 -->
<?xml-model href="http://schemas.seadatanet.org/Standards-Software/Metadata-formats/SDNC_CDI_ISO19115_10.0.0.xsd" type="application/xml"
  schematypens="http://purl.oclc.org/od/schematron"/>
<cdi:MD_Metadata xmlns:cdi="http://www.isotc211.org/2005/gmd" xmlns:gml="http://www.isotc211.org/2005/gml" xmlns:sos="http://www.isotc211.org/2005/sos"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xsi:schemaLocation="http://schemas.seadatanet.org/http://schemas.seadatanet.org/Standards-Software/Metadata-formats/SDNC_CDI_ISO19115_10.0.0.xsd"/>
  <cdi:ResponsibleParty>
    <cdi:CharacterString xmlns:sdnc="CDI:LOCAL_NBL1_NB011_H10" gco:CharacterString>
      </cdi:ResponsibleParty>
  </cdi:ResponsibleParty>
  <cdi:Language>
    <cdi:LanguageCode codeList="http://vocab.nerc.ac.uk/isoCodeLists/sdnCodeLists/gmxCodeLists.xml#LanguageCode" codeStringValue="eng"
      codeSpace="ISOTC211/19115-English" gco:LanguageCode>
      </cdi:LanguageCode>
  </cdi:LanguageCode>
  <cdi:CharacterSet>
    <cdi:MD_CharacterSetCode codeList="http://vocab.nerc.ac.uk/isoCodeLists/sdnCodeLists/gmxCodeLists.xml#MD_CharacterSetCode" codeStringValue="utf8"
      codeSpace="ISOTC211/19115-utf8" gco:MD_CharacterSetCode>
      </cdi:MD_CharacterSetCode>
  </cdi:CharacterSetCode>
  <cdi:HierarchyLevel>
    <cdi:MD_ScopeCode codeList="http://vocab.nerc.ac.uk/isoCodeLists/sdnCodeLists/gmxCodeLists.xml#MD_ScopeCode" codeStringValue="dataset"
      codeSpace="ISOTC211/19115-dataset" gco:MD_ScopeCode>
      </cdi:MD_ScopeCode>
  </cdi:HierarchyLevelCode>
  <cdi:HierarchyLevelName>
    <cdi:SDN_HierarchyLevelNameCode codeList="http://vocab.nerc.ac.uk/isoCodeLists/sdnCodeLists/cdicrCodeList.xml#SDN_HierarchyLevelNameCode"
      codeStringValue="CDI" codeSpace="SeaDataNet.Common Data Index record" gco:SDN_HierarchyLevelNameCode>
      </cdi:SDN_HierarchyLevelNameCode>
  </cdi:HierarchyLevelNameCode>
  <cdi:Contact>
    <cdi:CI_ResponsibilityParty>
      <cdi:OrganizationName>
        <cdi:SDN_EDMOCode codeList="http://seadatanet.maris2.nl/isoCodeLists/sdnCodeLists/edmo-edmorg-CodeLists.xml#SDN_EDMOCode"

```

Figura 6. Esempio di metadati CDI.xml prodotto dal sw MIKADO

II. RISULTATI E CONCLUSIONI

A. Risultati

Il metodo statistico utilizzato per il Quality Control dei dati CTD dei parametri acquisiti varia a seconda della variabile campionata. Di seguito vengono visualizzati i singoli parametri prima e dopo l'applicazione del Quality Control.

Temperatura: In fig. 7a è mostrato il profilo di temperatura della stazione NB066 prima del trattamento di QC, in particolare si evidenzia uno spike (derivante molto probabilmente dal malfunzionamento della sonda CTD) alla profondità di circa 470 m. Per il calcolo del valore del dato da analizzare, si è applicato il metodo SPT (1) con il valore di SPT soglia fornito dal manuale SeaDataNet pari a 6°C. Questo valore, però, è adatto solo per lo strato superficiale (mixed layer e termocline) in quanto, se applicato anche allo strato profondo sottostante, tende a non eliminare i valori anomali, essendo 6 °C un valore di soglia elevato. Quindi si è divisa la colonna d'acqua in due strati e applicato un valore soglia per lo strato

profondo pari a 0.03°C .

La divisione della colonna d'acqua avviene tramite l'identificazione del valore massimo di gradiente di temperatura rispetto alla pressione. Il valore massimo di pressione in cui si rinviene il massimo valore di gradiente indica il punto di divisione della colonna d'acqua. Nel caso di fig. 7 la divisione del profilo è avvenuta circa a 54 m. In questo modo lo spike in profondità (Fig. 7a) a circa 470 m viene correttamente eliminato (Fig. 7b).

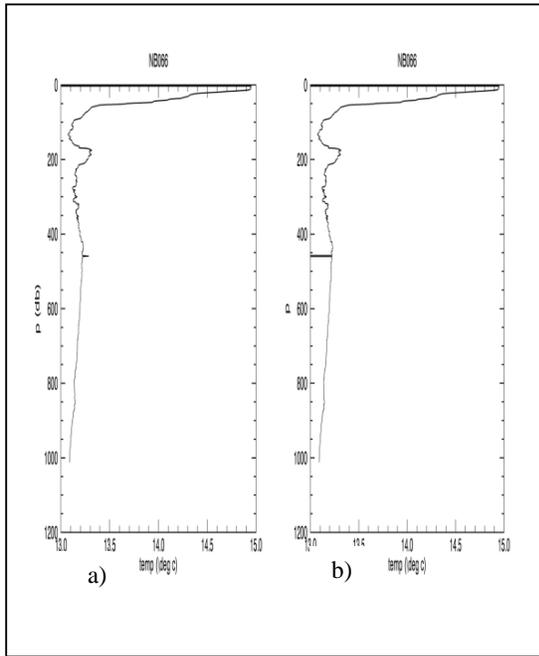


Figura 7. (a) Profilo di temperatura prima dell'applicazione di procedure QC, con spike a circa 470 m. (b) Lo stesso profilo di temperatura dopo l'applicazione del QC.

Salinità: In Fig. 8 viene riportato il profilo di salinità sempre della stazione NB066 in cui è stato applicato lo stesso metodo di despiking, con valori SPT di soglia pari a 0.9 psu in superficie e 0.02 psu in profondità. Lo spike è visibile alla stessa profondità dello spike rivenuto nel profilo della temperatura (circa 470 m) e ciò indica che gli spikes sono dovuti a una temporanea failure della trasmissione dati o dell'alimentazione.

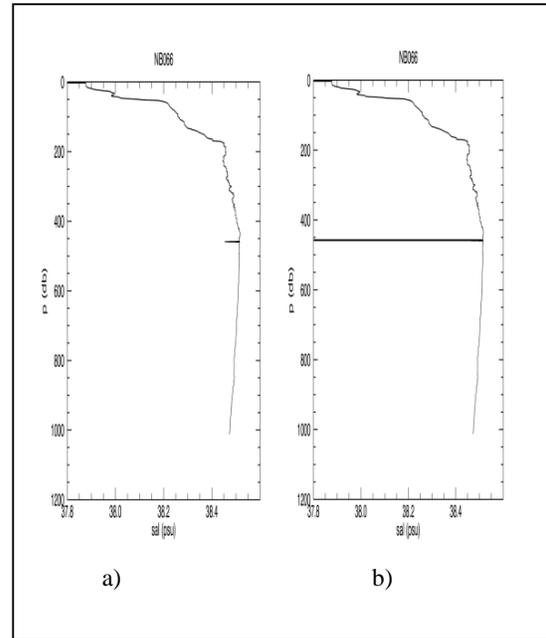


Figura 8.(a) Profilo di salinità della stz. NB066 prima dell'applicazione delle procedure di QC, con spike a circa 470 m. (b) Stesso profilo di salinità dopo l'applicazione delle procedure di QC con spike parzialmente eliminato (-99.000).

Ossigeno: I profili dell'ossigeno nei dati CTD analizzati non presentano nessun valore evidente di spike (Fig. 9a) ma piuttosto un lieve rumore dovuto all'errore casuale del sensore. Ad ogni modo, si è applicato lo stesso metodo statistico di de-spiking usato per i parametri di temperatura e salinità. I valori di soglia sono 0.2 ml/l per lo strato superficiale e 0.03 ml/l per lo strato profondo e alcuni piccoli spikes sono stati eliminati (Fig. 9b). Il rimanente rumore può essere eliminato da un utente mediante un filtro passa-basso: in questo modo i dati forniscono a tale utente una base il più possibile "pulita" sulla quale lavorare.

È stato anche fatto un tentativo di despiking utilizzando il metodo MAD (2), ma si è notato che non era efficace, in quanto tendeva ad eliminare più valori del dovuto. Questo perché il profilo derivante dall'applicazione di un filtro passa-basso a 5 dbar dell'ossigeno non seguiva fedelmente quella del profilo originale, quindi i valori di anomalia sottoposta a test MAD risultavano essere relativamente grandi e di conseguenza venivano erroneamente eliminati come spikes dal programma.

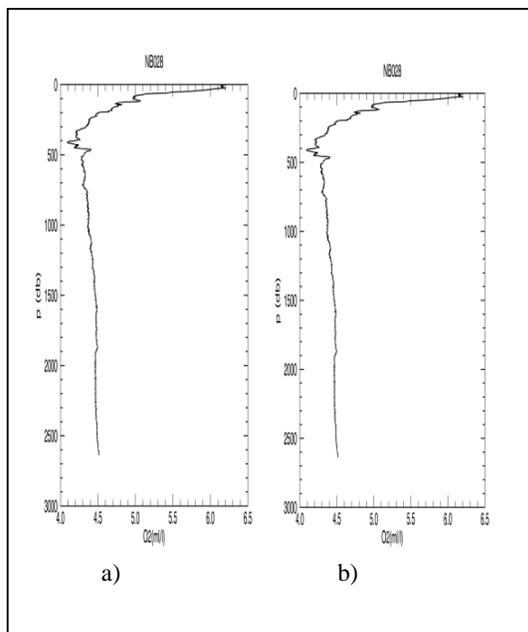


Figura 9.(a) Profilo dell'ossigeno della stz. NB028 prima dell'applicazione delle procedure di QC. (b). Profilo dell'ossigeno dopo l'applicazione di QC.

Trasmissività della luce e Fluorescenza: Dato che i sensori di trasmissività (Fig. 10) e fluorescenza (Fig. 11) risultano essere rumorosi, il metodo SPT applicato ai parametri sopra analizzati risulta essere di scarsa efficacia. Pertanto è stato applicato il metodo della MAD (2), che ha dato come si può vedere in Fig. 10b (trasmissometro) e Fig. 11b (fluorescenza) buoni risultati.

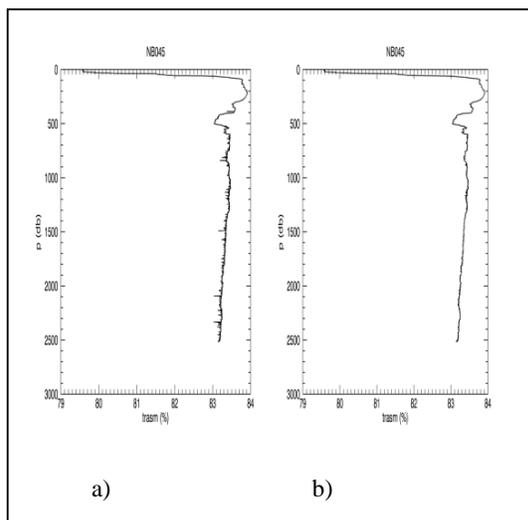


Figura 10. (a) Profilo di trasmissività della luce della stz. NB045 prima del QC, notare i numerosi spikes (b) Profilo di trasmissività dopo QC. Notare come la tecnica MAD abbia correttamente eliminato tutti gli spikes di Fig.10 a.

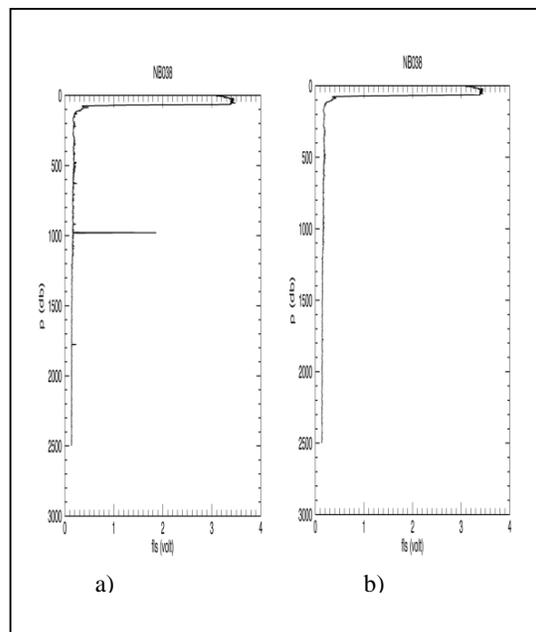


Figura 11 (a) Profilo di fluorescenza (in voltaggio registrato dal sensore) della stz. NB038 prima del QC, con un evidente spike. (b) Profilo di fluorescenza dopo l'applicazione delle procedure QC che hanno correttamente eliminato lo spike.

B. Conclusioni

Con questo lavoro che rientra nel progetto OTTIMA del programma TESSA, si è messo a punto una procedura di Quality Control, secondo canoni internazionali di progetto SeaDataNet e con procedure ad hoc, su dati in situ di sonda CTD al fine di eliminare errori ed ottenere dati il più possibile affidabili per la ricerca oceanografica. Il lavoro è proseguito per poi convertire i dati così corretti nei formati standard internazionali (ODV e relativi metadati) di nuovo come richiesto dal programma europeo SeaDataNet, dedicato a rendere più "universalmente" fruibili i dati in situ dei singoli Enti di ricerca europei alla comunità internazionale.

Le tecniche usate, SPT (1) e MAD (2) e (3), hanno eliminato o ridotto al minimo i valori anomali dal profilo della variabile acquisita, in particolare il metodo della MAD si è rilevato essere molto utile nei sensori più rumorosi (trasmissometro e fluorimetro), laddove la tecnica SPT falliva. Inoltre si è visto che il medesimo valore soglia del parametro SPT, applicato a tutta la colonna d'acqua delle variabili di temperatura, salinità ed ossigeno, non restituiva un profilo privo di spikes. Essi venivano invece eliminati, con l'individuazione di due diversi valori soglia applicati uno per lo strato superficiale e uno per quello profondo

Questo lavoro è stato proseguito poi, nella campagna PRIMI 2009, processata ed analizzata nel successivo stage OTTIMA 2014, in cui la tecnica MAD viene migliorata. Infatti il valore soglia di tolleranza, affinché un dato sia considerato buono,

varia a seconda del sensore usato e se questo risulta essere più o meno rumoroso. I due metodi applicati, comunque, si sono rivelati essere molto utili ed affidabili per l'analisi di QC dei dati marini in situ da sonda multiparametrica CTD.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] MEDOC Group (1970). Observation of Formation of Deep Water in the Mediterranean Sea. *Nature London*, 227, 1037-1040;
- [2] P. D. Killworth,., 1976: The mixing and spreading phases of MEDOC. I. *Progress in Oceanography*, Vol. 7, Pergamon, 59-90;
- [3] K.D. Leaman, F.A. Schott, 1987. Hydrographic structure of the convection regime in the gulf of Lions: winter 1987. *Journal of Physical Oceanography*, 575-598.
- [4] A. Morel, J.-M. AndreH, 1991. Pigment distribution and primary production in the western Mediterranean derived and modeled from Coastal Zone Color Scanner observations. *Journal of Geophysical Research* 96, 12685-12698;
- [5] M. Levy, L. MeHmery, G. Madec, 1999. The onset of a bloom in the MEDOC area: mesoscale spatial variability. *Deep-Sea Research* 46, 1137-1160;
- [6] SeaDataNet QC procedures V2 May 2010 disponibile su: http://www.seadatanet.org/content/download/18414/119624/file/SeaDataNet_QC_procedures_V2_%28May_2010%29.pdf ;
- [7] I. Petenko, Personal communication. Robust estimate of threshold when eliminating outliers based on “Median Absolute Deviation”;
- [8] SeaDataNet NEMO user manual versione 1.5.2 disponibile su: http://www.seadatanet.org/content/download/19875/128669/file/sdn_Nemo_UserManual_V1.5.2.pdf
- [9] SeaDataNet MIKADO user manual versione 3.3 disponibile su: http://www.seadatanet.org/content/download/20278/140561/file/sdn_Mikado_UserManual_V3.3.pdf

SITI CITATI:

- [1.1] www.seadatanet.org
- [2.1] www.seabird.com

Quality control e riduzione a formati standard europei seadatanet di dati oceanografici rilevati con profilatore ctd

Chiara Abbamondi
Istituto Ambiente Marino e Costiero - CNR
Napoli, Italia
chiarabba@libero.it

Francesco Bignami
Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima
CNR, Unità Operativa di Supporto Roma, Italia
f.bignami@isac.cnr.it

Sommario - Il presente lavoro, è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness'-TESSA" ed ha riguardato il miglioramento della metodologia di Quality Control (QC) su dati idrografici, già preliminarmente sviluppata durante il primo modulo svolto per lo stesso progetto nel 2013. Tale procedura è poi stata applicata a dati di sonda CTD relativi alla campagna PRIM1 di misura dell'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del CNR (CNR-ISAC). Il lavoro è poi proseguito con la riduzione dei suddetti dati a formati standard europei implementati durante il progetto SeaDataNet.

La campagna oceanografica qui processata è la campagna relativa al Progetto pilota inquinamento marino da idrocarburi (PRIM1). La campagna si è svolta nel Mar Tirreno meridionale, Canale di Sardegna, Canale di Sicilia e Mar Ionio occidentale, ed è stata organizzata dal Gruppo di Oceanografia da Satellite (GOS, Responsabile D.ssa Rosalia Santoleri) del CNR-ISAC, Unità Operativa di Supporto di Roma, nel mese di agosto/settembre 2009. Lo scopo di tale campagna è stato quello di validare il sistema di monitoraggio e previsionale di inquinamento marino da idrocarburi sviluppato nell'ambito del progetto PRIM1, effettuando una verifica in situ circa le macchie di idrocarburo individuate da satellite nella zona di studio.

INTRODUZIONE

La qualità dei dati dipende dagli strumenti utilizzati, dalla calibrazione dei sensori, e dal controllo dei valori dei parametri acquisiti. L'accessibilità ai dati, adeguatamente convalidati, non è sempre garantita e ciò ne pregiudica la fruibilità da parte della comunità scientifica. A questo scopo, interviene il progetto europeo SeaDataNet [1.1] in cui viene sviluppato un sistema uniforme per effettuare il controllo di qualità dei dati oceanografici in situ (ad es. raccolti mediante sonde oceanografiche CTD) e per la loro archiviazione e gestione in databases consultabili dal pubblico internazionale.

Il presente articolo è strutturato come segue: nella sezione I si descrivono tutte le fasi di acquisizione ed analisi dati, calibrazione sensori, conversione dei dati da frequenze e voltaggi in valori geofisici e l'applicazione di procedure di Quality Control e riduzione a formati standard rispondenti ai requisiti del progetto SeaDataNet. Nella sezione II vengono presentati i risultati dopo l'impiego delle diverse tecniche statistiche di Quality Control.

Il lavoro è stato svolto in ambiente di programmazione IDL per la gestione dei dati CTD e l'implementazione del Quality Control, mediante i software SEA_BIRD Electronics, per le fasi iniziali del processamento dati e i sw NEMO e MIKADO, forniti dal progetto SeaDataNet, per la riduzione a formato standard. In particolare è stato analizzato e trattato il data set di profili idrologici da sonda CTD, relativo alla campagna oceanografica "PRIM1- Progetto pilota inquinamento marino da idrocarburi" svoltasi nel Mar Tirreno meridionale, nel Canale di Sardegna, nel Canale di Sicilia e nel Mar Ionio occidentale, su nave oceanografica Urania del CNR dal 06/08/2009 al 05/09/2009 (Fig.1)

L'obiettivo del progetto era lo sviluppo di un sistema di monitoraggio e previsionale di inquinamento marino da idrocarburi per i mari italiani. Il progetto è stato finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) ed ha coinvolto quattro istituti pubblici (CNR-ISAC, UNIPO, ENEA, INGV) e tre partner privati (ACS, INNOVA, Flyby).

Gli obiettivi della campagna erano: (1) di acquisire dati in situ Radar e Lidar marini in corrispondenza di sversamenti di petrolio in mare (OS) rilevati da immagini Sar durante la crociera, (2) trovare le macchie indicate nei dati satellitari e (3) acquisire i profili verticali di parametri idrologici (temperatura, salinità, etc) e di radiazione multi spettrale in acqua per la convalida dell' algoritmo ottico satellitare per la stima della clorofilla sia in corrispondenza delle macchie superficiali di petrolio individuate che in mare pulito.

L'area di studio è stata scelta sulla base della frequenza elevata di sversamenti illegali di idrocarburi desunti da statistiche sui dati di monitoraggio storici e alla fase operativa del progetto PRIM1.

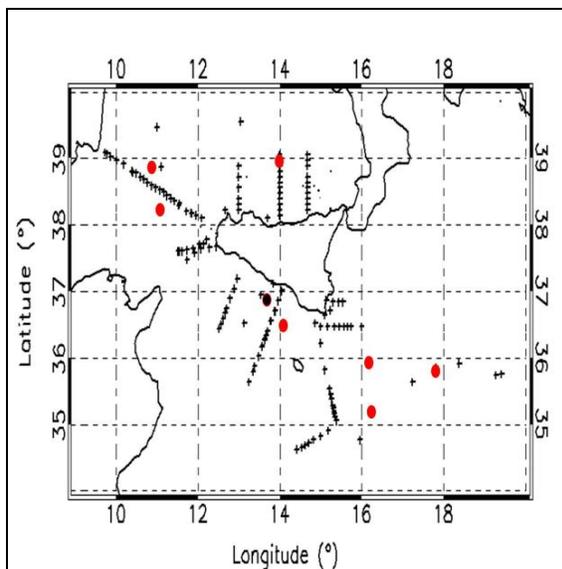


Figura 1. Mappa delle stazioni idrologiche (+) della campagna PRIM1 (nave Urania 06/08/2009-05/09/2009) trattata nel presente lavoro. I punti rossi indicano le macchie di idrocarburo localizzate da satellite e il punto nero indica lo sversamento campionato in situ.

I. MATERIALI E METODI

A. Acquisizione dati

I profili verticali delle variabili analizzate sono state acquisite tramite sonda multiparametrica CTD (Conductivity-Temperature-Depth) Sea Bird 911 plus abbinato ad un sistema di Rosette e di bottiglie Niskin per campioni d'acqua ed elaborati con il relativo software SEASOFT versione 4.217, [1.2]. I sensori presenti sulla sonda sono: temperatura SBE3 plus, conducibilità SBE4C, pressione Digiquartz, ossigeno disciolto SBE43, fluorimetro Chelsea Aqua 3, trasmissometro Sea-Tech C-star (250 mm path length, luce a 660 nm), altimetro Datasonics.

Il software SeaSoft si compone di due moduli, SeaSave v.7.23.2 e SBE Data Processing con i quali i dati sono processati per ottenere come output il dato mediato ad 1 dbar (Fig. 2).

Le fasi di processamento dati comprendono:

- Calcolo dei coefficienti di calibrazione dei sensori di pressione, trasmissività della luce e fluorescenza e produzione di un file configurazione .con per il processamento dei dati contenente tali nuovi coefficienti.
- Processamento dati CTD mediante sw SBE Data Processing [1] attraverso i moduli SW in essi contenuti:

DATCNV: converte le frequenze e voltaggi registrati dai sensori in unità fisiche (ad es. da frequenze a temperatura in °C), presenti nei file di acquisizione .dat o .hex producendo i files binari con estensione .cnv (profilo) e .ros (data lines relative alla quota di chiusura di ciascuna bottiglia Niskin del sistema Rosette).

ALIGNCTD: anticipa di 0.073 sec il sensore secondario di conducibilità rispetto la pressione e di 3 sec quello dell'ossigeno, dato che una particella d'acqua incontra prima il sensore di conducibilità poi quello di ossigeno, nel percorso nel tubo di tygon che collega i sensori, poiché l'acqua viene convogliata ai sensori attraverso questi tubi, tramite una pompa che garantisce uniformità di velocità dell'acqua, che sarebbe compromessa e.g. dal moto ondoso. In questo modo i valori conducibilità e ossigeno su un a riga del file .cnv diventano appartenenti alla stessa particella d'acqua.

CELLTM: correzione dell'effetto dell'inerzia termica della cella di conducibilità in vetro sulla conducibilità stessa. I tipici valori che si applicano nella procedura sono: anomalia dell'ampiezza termica ($\alpha = 0.03$) e dell'anomalia termica con tempo costante ($1/\beta = 7$).

FILTER: viene applicato un filtro passa-basso di 0.03 sec sul sensore di conducibilità (primario e secondario) e di 0.15 sec sulla pressione.

BINAVG: i dati vengono mediati a 1 dbar.

DERIVE: calcola la salinità, la densità e gli altri parametri oceanografici non misurati direttamente dai sensori.

SPLIT: separa i profili di discesa (downcast) e salita (upcast) della sonda, poiché il file dati di acquisizione .dat o .hex è unico. Fin qui i dati sono in formato binario (file .cnv), che ad ogni passo del presente processamento viene sovrascritto con il risultato dell'applicazione del modulo pertinente.

ASCIHOUT: crea i file .asc a 1db, versione in formato ASCII del file .cnv uscente dal modulo *Split*.

BOTTLE SUMMARY: legge i dati .ros estratti dal file .hex in corrispondenza della chiusura delle bottiglie Niskin e produce il file .btl contenenti le informazioni sulla data, ora e i dati CTD in corrispondenza della chiusura delle bottiglie. I dati di CTD del file .btl vengono usati ad es. per la calibrazione del sensore di ossigeno, assieme ai dati corrispondenti di ossigeno disciolto misurati dall'acqua delle bottiglie Niskin con il metodo chimico Winkler.

Al fine di processare l'intera campagna è stato creato un file .txt (Fig. 3) e un file .bat (Fig. 4) che esegue tutti i moduli di cui sopra in modalità batch [1].

Nel file .txt vengono specificate le istruzioni utili per il processamento con i moduli SBE Data Processing sopra citati, che avverrà lanciando il processo batch (click su file .bat). In particolare, nel file .txt vengono specificati tutti i moduli usati dal sw SBE Data Processing che si intende usare per il processamento dei nostri dati. Ogni riga del file .txt contenente il modulo (*DATCNV*, *ALIGNCTD* etc.) contiene inoltre le informazioni riguardanti la directory dei dati di input (denotata con %1), l'estensione dei file a cui fa riferimento come input (es. per *datcnv* è .hex), la directory di output (%2), il file di configurazione .con contenente i nuovi coefficienti di calibrazione calcolati precedentemente e il file .psa contenente la configurazione di tutti i settaggi impostati per quel specifico modulo. Le directory di input e output

corrispondenti ai simboli %1 e %2 nel file .txt vengono specificate nel file .bat.

Alla fine dell'esecuzione di tutti i moduli vengono prodotti tre file: un file ASCII downcast per le calate della sonda in discesa, un file ASCII upcast per quelle in risalita e un file .btl avente tutte le informazioni riguardanti la chiusura delle bottiglie Niskin.

– Correzione dell'ossigeno disciolto (ml/l) dei sensori primari e secondari della sonda attraverso il metodo chimico Winkler di analisi sui campioni d'acqua raccolti dalle bottiglie Niskin del sistema Rosette. In particolare, viene effettuata una regressione lineare tra ossigeni CTD e corrispondenti ossigeni Winkler, per ognuno dei due sensori, e l'ossigeno CTD viene corretto in base ai coefficienti (slope e bias) trovati.

– Conversione dell' header e ridistribuzione delle colonne dei parametri misurati e derivati nel formato standard adottato dall' ISAC UOS Roma.

```

#Time:PRIMI
#Date:PRIMI
#Start:001
#009807
#03447
#38 19.99
#04 40.96
#00
softwareversion:fontesavev7.18d
#
#      T      S      Dens      S1gh      S1st      S1d      S1d2
3.00000 27.5489 27.5482 24.7300 24.7190 24.7193 28.8715 32.9336
4.00000 27.5450 27.5440 24.7400 24.7296 24.7199 28.8722 32.9344
5.00000 27.5504 27.5504 24.7400 24.7292 24.7196 28.8718 32.9339
6.00000 27.5515 27.5501 24.7400 24.7194 24.7198 28.8721 32.9341
7.00000 27.5500 27.5484 24.7500 24.7298 24.7203 28.8725 32.9346
8.00000 27.5509 27.5490 24.7500 24.7302 24.7198 28.8720 32.9341
9.00000 27.5524 27.5495 24.7600 24.7390 24.7197 28.8719 32.9340
10.0000 27.5527 27.5493 24.7600 24.7399 24.7194 28.8726 32.9348
11.0000 26.3611 26.3587 24.7600 24.7302 24.7196 28.8722 32.9344
12.0000 25.4637 25.4610 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
13.0000 25.2169 25.2141 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
14.0000 24.6662 24.6632 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
15.0000 23.7249 23.7268 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
16.0000 22.4713 22.4681 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
17.0000 21.7929 21.7955 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
18.0000 21.1965 21.1930 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
19.0000 20.5758 20.5722 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
20.0000 20.1026 20.0988 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
21.0000 19.6907 19.6888 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
22.0000 19.2139 19.2099 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
23.0000 19.0048 19.0007 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
24.0000 18.7882 18.7839 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
25.0000 18.5827 18.5783 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
26.0000 18.0682 18.0637 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
27.0000 17.8514 17.8467 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
28.0000 17.7439 17.7391 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
29.0000 17.7816 17.7769 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
30.0000 16.9715 16.9665 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
31.0000 16.8920 16.8868 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
32.0000 16.8137 16.8072 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
33.0000 16.6942 16.6888 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
34.0000 16.5387 16.5331 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
35.0000 16.4715 16.4658 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
36.0000 16.4134 16.4075 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
37.0000 16.3028 16.2942 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
38.0000 15.8377 15.8316 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
39.0000 15.7437 15.7375 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
40.0000 15.4980 15.4916 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
41.0000 15.1269 15.1204 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
42.0000 15.1516 15.1449 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339
43.0000 15.5489 15.5422 24.7600 24.7305 24.7193 28.8718 32.9339

```

Figura 2. Esempio di file CTD ASCII mediato ad 1 dbar (stazione 001, campagna PRIMI)

```

***** DIRECTORIES SPECIFIED IN .BAT FILE *****
@%1 = C:\isac\ctd\primi\
@%2 = C:\isac\prove2\
*****
datcnv /%1%.hex /c:\PRIMI_P_TR_FL_reproc.con /o%2 /p%2\primi_datcnv.psa
alignctd /%1%\*.cnv /o%2 /p%2\primi_align.psa
celltm /%1%\*.cnv /o%2 /p%2\primi_celltm.psa
filter /%1%\*.cnv /o%2 /p%2\primi_filter.psa
binavg /%1%\*.cnv /o%2 /p%2\primi_binavg.psa
derive /%1%\*.cnv /c:\PRIMI_P_TR_FL_reproc.con /o%2 /p%2\primi_derive.psa
split /%1%\*.cnv /o%2 /p%2\primi_split.psa
asciout /%1%\d*.cnv /o%2 /p%2\primi_asciout.psa
asciout /%1%\u*.cnv /o%2 /p%2\primi_asciout.psa
rossum /%1%\*.ros /o%2 /c:\PRIMI_P_TR_FL_reproc.con /p%2\primi_rossum.psa

```

Figura 3. File .txt utilizzato nel processamento dati della campagna PRIMI in modalità batch

```

C:\seabtop\seabtop\processing-win2\seabtop\c:\isac\bat\primi\batcnv\mult_01hara.txt C:\isac\ctd\primi\ C:\isac\prove2\
@%1 C:\isac\prove2\*.cnv
for /L %N% in (1,1,9) do copy C:\isac\ctd\primi\primi_0086f.hdr+c:\isac\prove2\primi_0086f.asc C:\isac\prove2\ctd\ffinale\primi_0086f.ctd
for /L %N% in (10,1,99) do copy C:\isac\ctd\primi\primi_0086f.hdr+c:\isac\prove2\primi_0086f.asc C:\isac\prove2\ctd\ffinale\primi_0086f.ctd
for /L %N% in (100,1,172) do copy C:\isac\ctd\primi\primi_0086f.hdr+c:\isac\prove2\primi_0086f.asc C:\isac\prove2\ctd\ffinale\primi_0086f.ctd
for /L %N% in (1,1,9) do copy C:\isac\ctd\primi\primi_0086f.hdr+c:\isac\prove2\primi_0086f.asc C:\isac\prove2\ctd\ffinale\primi_0086f.ctd
for /L %N% in (10,1,99) do copy C:\isac\ctd\primi\primi_0086f.hdr+c:\isac\prove2\primi_0086f.asc C:\isac\prove2\ctd\ffinale\primi_0086f.ctd
for /L %N% in (100,1,172) do copy C:\isac\ctd\primi\primi_0086f.hdr+c:\isac\prove2\primi_0086f.asc C:\isac\prove2\ctd\ffinale\primi_0086f.ctd
for /L %N% in (1,1,9) do copy C:\isac\prove2\primi_0086f.btl C:\isac\prove2\ctd\ffinale\primi_0086f.btl
for /L %N% in (10,1,99) do copy C:\isac\prove2\primi_0086f.btl C:\isac\prove2\ctd\ffinale\primi_0086f.btl
for /L %N% in (100,1,172) do copy C:\isac\prove2\primi_0086f.btl C:\isac\prove2\ctd\ffinale\primi_0086f.btl
@%1 C:\isac\prove2\*.asc
@%1 C:\isac\prove2\*.hdr
@%1 C:\isac\prove2\*.ros
@%1 C:\isac\prove2\*.btl

```

Figura 4. File .bat lanciato in modalità batch per il processamento in contemporanea di tutta la campagna PRIMI

B. Procedure di Quality Control

Il controllo di qualità dei dati ha il seguente obiettivo : "assicurare la coerenza dei dati all'interno di una singola serie o di una raccolta di set di dati, e di assicurare che la qualità e gli errori dei dati sono evidenti per l'utente finale che ha informazioni sufficienti per valutare la loro idoneità per un compito" [2].

In pratica, i controlli effettuati dalle procedure di Quality Control (QC) sui dati idrologici hanno lo scopo di validare ed eliminare eventuali errori casuali o sistematici. Esse comprendono sia controlli automatici di base, inerenti le informazioni prettamente legate alla campagna oceanografica (nome crociera, data, coordinate, etc.) presenti nell'intestazione del file (file header) che controlli scientifici eseguiti sui parametri campionati e che dunque dipendono dal tipo di dato analizzato.

Alla fine delle procedure si individua un valore (secondo la scala di QC SeaDataNet) indicante la qualità del dato, da abbinare al dato stesso affinché l'utente ne conosca il livello di qualità.

Il codice di Quality Control applicato ai dati è stato scritto usando il software di programmazione IDL (versione8.2.1) e per le procedure è stato usato come riferimento il manuale di Quality Control di SeaDataNet [3] al quale sono poi state aggiunte altre procedure più specifiche. Elenchiamo di seguito le procedure di QC implementate nel codice ed applicate ai dati PRIMI, ove non specificato, le procedure si intendono come standard prescritto nel manuale QC di SeaDataNet.

Procedure Quality Control – controlli automatici:

Controllo data ed orario: questo tipo di controllo evidenzia se ci sono anomalie nel formato delle informazioni di intestazione. In particolare, si controlla che l'anno sia composto da quattro cifre, che il mese sia essere compreso tra 1 e 12, che il giorno ricada nel numero massimo di giorni del mese, che l'ora sia

compresa tra 0 e 23 ed i minuti e i secondi tra 0 e 59.

Controllo coordinate: la latitudine deve essere compresa tra -90 e 90 mentre la longitudine deve essere compresa tra -180 e 180. Controllo sia sulle coordinate scritte automaticamente sull'header dal sistema GPS della nave che di quelle digitate a mano prima dell'acquisizione del profilo idrologico, tramite software SeaSave.

Test su range globale e regionale dei valori dei parametri analizzati che devono ricadere nell'intervallo dei valori limite (minimo e massimo) globali e regionali.

Procedure Quality Control – controlli scientifici:

Test sull'incremento della pressione: per controllare che la pressione aumenti in maniera monotona nel file.

Test sulla profondità: verifica che non vi siano valori di profondità nei dati, superiori alla profondità del fondo.

Controllo per la stabilità verticale: si controlla che la densità aumenti con la profondità. Viene effettuato al fine di valutare la stabilità del profilo verticale, dato che alla risoluzione di 1 dbarn la colonna è stabile, a meno di rare eccezioni per cui si effettua un trattamento dati particolare (formazione acque dense, con instabilità verticale).

Test per l'individuazione della presenza di valori anomali (spikes): vengono individuati valori che escono dal range locale dei dati rilevati, dovuti principalmente al temporaneo malfunzionamento di uno o più sensori. Contemporaneamente ad un'analisi statistica, viene effettuata anche un'analisi visiva, in quanto gli spikes sono facilmente riconoscibili nel profilo di un parametro, poiché fuoriescono di molto dal normale andamento del profilo della variabile esaminata. Il test è sensibile alla frequenza di campionamento verticale, ovvero il parametro in esame deve essere campionato con una frequenza adeguatamente alta rispetto alla variabilità verticale del parametro stesso (ad es. circa ogni metro è sufficiente per i nostri studi, che non esaminano la microstruttura turbolenta dei dati). E' un test basato sulla differenza del valore in esame con i valori adiacenti nel profilo verticale.

I parametri esaminati sono: temperatura (°C), salinità (psu), ossigeno (ml/l), trasmittività della luce (in percentuale della luce alla sorgente luminosa del trasmittometro, %) e fluorescenza (volt). Su ognuno di esso è stato applicato un diverso metodo statistico per ottimizzare l'eliminazione dei valori anomali.

Despike Temperatura: il profilo di temperatura è stato trattato dividendo la colonna d'acqua in due parti: lo strato superficiale e lo strato profondo, ad entrambi è stato applicato un diverso valore soglia del parametro SPT descritto di seguito, oltre il quale il dato è considerato uno spike. Questa suddivisione viene fatta perché il segnale della sonda nello strato superficiale risulta essere più rumoroso e quindi necessita di una maggiore "tolleranza" (valore di soglia) rispetto allo strato profondo.

Il manuale di QC di SeaDataNet definisce SPT come:

$$SPT = |V2 - (V3 + V1) / 2| - |(V3 - V1) / 2| \quad (1)$$

dove V2 è il valore che deve essere verificato mentre V1 e V3 sono rispettivamente i valori precedente e successivo nel profilo verticale. Se il valore SPT è maggiore del valore soglia adottato, allora il dato è considerato spike e viene sostituito con il valore di "bad data flag" -99.000.

La divisione della colonna d'acqua viene effettuata in base all'individuazione del valore di gradiente (rispetto alla pressione). Per lo strato superficiale si ha un alto gradiente dovuto alla presenza del termocline e di una maggiore variabilità naturale nello strato omogeneo vicino l'atmosfera (mixed layer) e viene applicato un valore soglia maggiore rispetto a quello della colonna d'acqua profonda in cui la temperatura varia lievemente rispetto alla profondità.

Despike della salinità e dell'ossigeno: è stato usato lo stesso procedimento di despike della temperatura.

Despike trasmittività della luce: è stato adottato il metodo statistico di Median Absolute Deviation (MAD) gentilmente fornitoci dal dott. Igor Petenko del CNR-ISAC UOS Roma [4] sull'intera colonna d'acqua.

$$MAD = \text{MEDIAN}(\text{ABS}(X - \text{MEDIAN}(X))) \quad (2)$$

dove X è il nostro profilo di trasmittività da analizzare, ABS indica il valore assoluto e MEDIAN è la mediana del profilo stesso. Invece

$$\text{THR_MAD} = (\text{MED} - \text{NMADTR} * \text{MAD}, \text{MED} + \text{NMADTR} * \text{MAD}) \quad (3)$$

indica il valore soglia oltre il quale il dato è considerato spike, dove MED è la media del profilo da analizzare e il numero intero NMADTR indica il moltiplicatore della MAD per ampliare o restringere il range al di fuori del quale il dato viene flaggato. Questo valore viene stabilito in base al sensore utilizzato, ovvero il range di tolleranza viene scelto a seconda se il sensore risulta essere più o meno rumoroso, pur restando i valori validi. Il metodo è applicabile a una serie di dati aventi media uguale a 0 (data set stazionario), cioè dati non influenzati da trend sistematico temporale o, nel nostro caso funzione della pressione. Quindi, si è dapprima ottenuto un secondo profilo più "liscio" di trasmittività applicando un filtro (smooth) a 5dbar che fornisce il trend di cui sopra e poi questo è stato sottratto al profilo iniziale ottenendo quindi un profilo di anomalia rispetto al trend, azzerando dunque il trend stesso. Su tale profilo è stata considerata una finestra mobile di 31 punti incentrata sul valore centrale da esaminare e su questa, si è applicata la Median Absolute Deviation per valutare la bontà del dato centrale della finestra. Il dato è stato eliminato (-99.000) se il valore risultava essere maggiore del THR_MAD.

Despike fluorescenza: l'algoritmo utilizzato per individuare ed eliminare i valori anomali è, anche in questo caso, Median Absolute Deviation.

I valori individuati come errati dai controlli sono stati riportati su un apposito file .log che viene creato dal codice man mano che si avanza nei controlli dei

dati (Fig. 5), in modo che l'operatore può individuare immediate le stazioni idrologiche con problemi, senza dover editare tutti i file CTD esaminati (es. diciture del tipo "density instability").

```

Parameters with data area:
p T Theta S Dens Slgth Slgt Slgt Sva 02m/1 02sat xmss F1s z

C:\isac\prove2\header_ctd\prfm_071d.L1d
btm depth = 1660.00, bathy depth = 838.000
spikes in Tr eliminated
spikes in Fls eliminated

C:\isac\prove2\header_ctd\prfm_002d.L1d
btm depth = 3063.00, bathy depth = 0.000000
density instability at 1734.00 1735.00 dbar f.e. densities = 36.6200 36.6100
density instability at 1962.00 1963.00 dbar f.e. densities = 37.5900 37.5800
density instability at 1976.00 1977.00 dbar f.e. densities = 37.8500 37.8400
density instability at 1980.00 1981.00 dbar f.e. densities = 37.6700 37.6600
density instability at 1983.00 1984.00 dbar f.e. densities = 37.6899 37.6801
density instability at 1988.00 1989.00 dbar f.e. densities = 37.7100 37.7000
density instability at 1996.00 1997.00 dbar f.e. densities = 37.7300 37.7200
density instability at 2013.00 2014.00 dbar f.e. densities = 37.8101 37.8000
density instability at 2017.00 2018.00 dbar f.e. densities = 37.8300 37.8200
density instability at 2022.00 2023.00 dbar f.e. densities = 37.8600 37.8500
density instability at 2023.00 2024.00 dbar f.e. densities = 37.8500 37.8400
density instability at 2027.00 2028.00 dbar f.e. densities = 37.8800 37.8600
density instability at 2031.00 2032.00 dbar f.e. densities = 37.8800 37.8700
spikes in 02 eliminated
spikes in Tr eliminated
spikes in Fls eliminated

C:\isac\prove2\header_ctd\prfm_002d.L1d
btm depth = 3093.00, bathy depth = 0.000000
density instability at 11.0000 12.0000 dbar f.e. densities = 24.8199 24.8101

C:\isac\prove2\header_ctd\prfm_003d.L1d
btm depth = 2754.00, bathy depth = 0.000000
density instability at 3.00000 4.00000 dbar f.e. densities = 24.7700 24.7600
spikes in Tr eliminated

C:\isac\prove2\header_ctd\prfm_004d.L1d
btm depth = 1287.00, bathy depth = 0.000000
density instability at 1.00000 2.00000 dbar f.e. densities = 24.6000 24.5900
spikes in Tr eliminated

C:\isac\prove2\header_ctd\prfm_005d.L1d
btm depth = 1363.00, bathy depth = 0.000000
density instability at 2.00000 3.00000 dbar f.e. densities = 24.6801 24.6500
spikes in Tr eliminated

C:\isac\prove2\header_ctd\prfm_006d.L1d
btm depth = 1415.00, bathy depth = 0.000000
spikes in Tr eliminated

C:\isac\prove2\header_ctd\prfm_007d.L1d

```

Figura 5. Esempio di file .log recante segnalazioni di problemi rilevati durante la procedura di QC.

C. Conversione dati a formati europei SeaDataNet: uso software NEMO

NEMO è un software di formattazione usato per generare file ASCII in formati richiesti (ODV, MEDATLAS, NETCDF) da SeaDataNet, per la condivisione dei dati marini [5].

I dati di input per NEMO sono dati oceanografici in situ. Nel nostro lavoro si tratta di dati CTD della campagna PRIM1 ai quali è stata applicata la procedura di QC sopra descritta. I dati sono stati convertiti in formato ODV, utilizzando i vocabolari EDMO (European Directory of Marine Organizations) di SeaDataNet che sono necessari per la selezione e l'inserimento dei nomi standard dei parametri acquisiti nel file compatibile con il software di visualizzazione dati ODV.

La conversione dei dati è preceduta da una serie di impostazioni divise in quattro menu ("tabs"): nel menu *file* si impostano il tipo di file e il tipo di misure (profili verticali, serie temporali, etc.), la directory dove sono salvati e il numero di codice standard dell'Ente responsabile dei dati; in *station* si inseriscono tutte le informazioni inerenti la descrizione della campagna (data, ora, coordinate e profondità di fondo) ed un valore di QC flag secondo il risultato delle procedure di QC dei dati (Fig. 6); in *data* vengono inseriti i nomi delle variabili acquisite, le unità di misura e il formato con cui è scritta la variabile stessa. Infine il tab *convert* ha il comando per convertire i dati in ingresso nel formato ODV per SeaDataNet.

Le impostazioni dei vari menu alla fine vengono salvate in un modello utilizzabile per la formattazione

di successivi dati.

NEMO crea anche un file di testo "cdi summary csv file .txt" contenente tutte le informazioni minime per creare un file metadati di descrizione dei dati stessi, chiamato CDI (Common Data Index) record nel catalogo di SeaDataNet, il "cdi summary csv file .txt". Quest'ultimo, una volta convertito in formato .xls, viene letto dal sw MIKADO per generare un .xml cdi file che è esportato al catalogo centrale di SeaDataNet e rende i dati "visibili" ad un utente che interroga il database SeaDataNet. NEMO genera anche un "Coupling table" che serve a correlare il file .cdi al file dati.

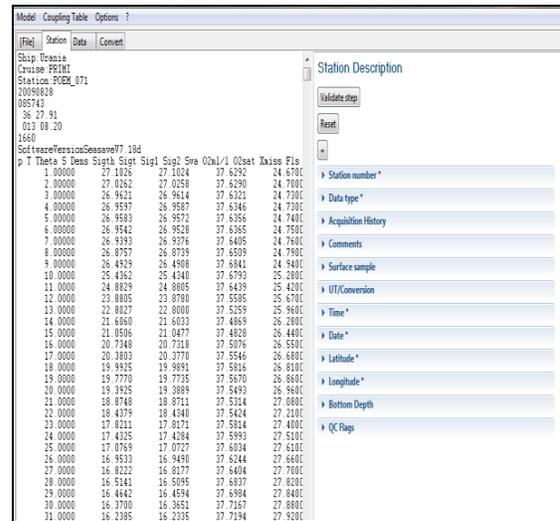


Figura 6. Il menu (tabs) di impostazione delle caratteristiche dei dati di input di NEMO.

D. Generazione metadati: uso software MIKADO

All'interno del progetto europeo SeaDataNet, il sw MIKADO [6] viene utilizzato per la generazione di metadati (file cdi .xml) scritti con standard ISO-19115 usando i vocabolari comuni di SeaDataNet, al fine di garantire l'accesso degli utenti ai data base internazionali. I metadati sono file di testo, che contengono diversi tipi di informazioni associati ai dati raccolti.

La creazione del cdi .xml per la campagna PRIM1, è avvenuta in modalità automatica con l'utilizzo di informazioni contenute nel file .xls (Fig. 7) prodotto precedentemente dalla conversione del "cdi summary csv file .txt" del sw NEMO. Le informazioni contenute nel file excel, vengono lette da MIKADO che produce delle "Queries" per il recupero delle informazioni dei dati di input che servono alla generazione del file cdi .xml (Fig. 8).

La creazione di metadati comporta l'accessibilità al database di SeaDataNet di tutte quelle informazioni utili per la richiesta dei dati marini ovvero, le informazioni inerenti l'ente che detiene i dati, il produttore e le variabili campionate.

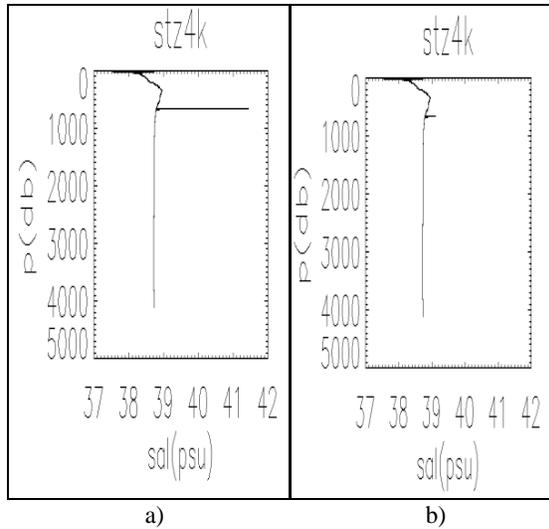


Figura 10 (a). Profilo di salinità prima dell' applicazione delle procedure QC, con spike a circa 660 m. Stazione 4k come in Fig.9. (b). Profilo di salinità dopo l'applicazione delle procedure QC, con spike ridotto (valori eliminati sostituiti con -99.000)

Ossigeno: I profili presentano in alcune stazioni un valore evidente di spike (es. in Fig. 11a), nel caso della stazione 4k sempre alla profondità di 660 m. Si è applicato lo stesso metodo statistico SPT. I valori di soglia sono 0.4 ml/l per lo strato superficiale e 0.2 ml/l per lo strato profondo di con risultante eliminazione dello spike (Fig. 11b).

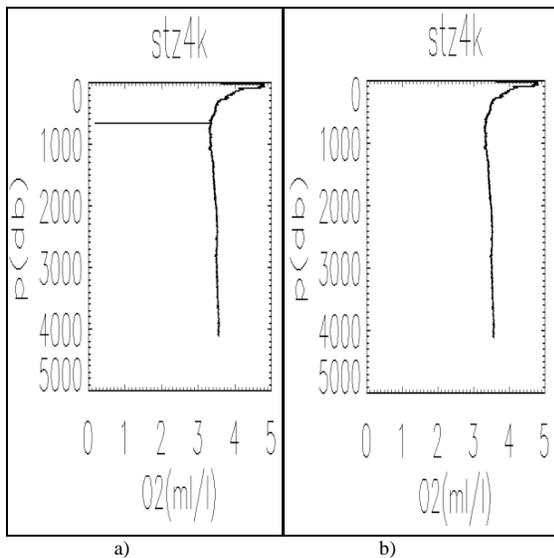


Figura 11. (a) Profilo di ossigeno prima dell'applicazione delle procedure QC. stazione 4k. (b). Lo stesso profilo di ossigeno dopo l'applicazione di QC.

Trasmissività della luce e Fluorescenza: I sensori di trasmissività della luce a 660 nm (Fig. 12a) e di fluorescenza (Fig. 13a) risultano essere rumorosi, e pertanto il metodo che utilizza il parametro SPT applicato ai parametri sopra analizzati risulta essere di scarsa efficacia. Quindi è stato applicato il metodo

della Median Absolute Deviation (2) che ha dato buoni risultati come esemplificato in Fig. 12b (trasmissività) e 13b (fluorescenza) per le stazioni Primi 004 e Primi 035.

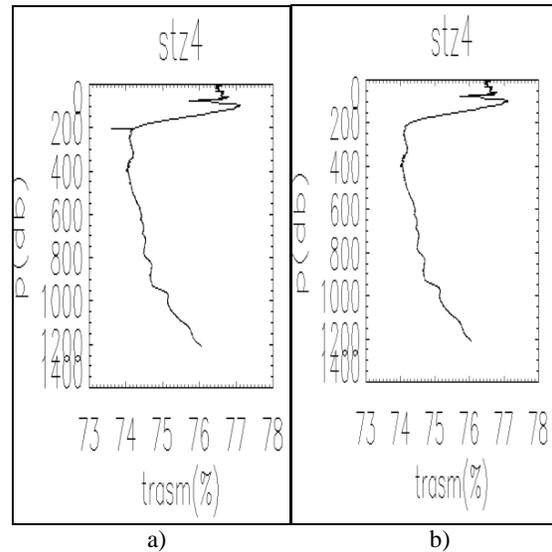


Figura 12 (a). Profilo di trasmissività prima del QC con spike circa a 200 m., stazione PRIMI_004 (07/08/09 ore 12:14 UTC, fondo 1282 m, lat. 38°40.015' N, lon. 14° 41.027' E (Mar Ionio). (b). Stesso profilo dopo QC

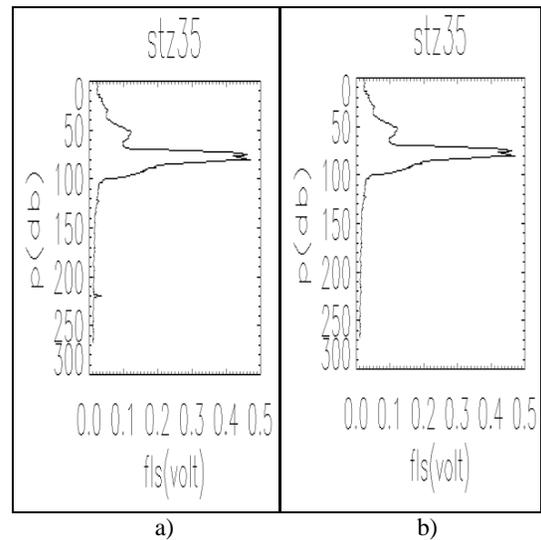


Figura 13 (a). Profilo di fluorescenza (in voltaggio registrato dal sensore) prima del QC, con spike sui 220 m. Stazione PRIMI_035 (10/08/09 ore 22:20 UTC, fondo 287 m, lat. 38°15.880' N, lon. 11° 33.040' E (Canale di Sardegna). (b) Profilo di fluorescenza dopo l'applicazione delle procedure QC che hanno correttamente eliminato gli spikes.

B. Conclusioni

Questo lavoro è stato dedicato al processamento dei dati CTD (campagna oceanografica PRIM1), all'applicazione di procedure Quality Control e alla riduzione degli stessi a formati standard europei SeaDataNet, al fine di renderli fruibili nei database internazionali.

La valutazione QC dei dati in situ è un elemento indispensabile nella condivisione del data set idrologico. Infatti il dato raccolto in un dato istante e in certe condizioni meteo-marine è unico e non riproducibile e la sua conservazione e qualità sono quindi di primaria importanza.

Le tecniche usate, SPT (1) e MAD (2 e 3), sono state migliorate ed hanno eliminato o ridotto al minimo i valori anomali (spikes) dal profilo della variabile acquisita. In particolare il metodo MAD è stato raffinato, in quanto il valore soglia viene stabilito in base al sensore utilizzato, ovvero il range di tolleranza viene scelto a seconda se il sensore risulta essere più o meno rumoroso, pur restando i valori validi. La MAD si è rilevata essere molto utile nei sensori più rumorosi (trasmissometro e fluorimetro), laddove la tecnica SPT falliva. Inoltre si è visto che il medesimo valore soglia del parametro SPT, applicato a tutto il profilo di temperatura, salinità ed ossigeno, non restituiva un profilo privo di spikes. Essi venivano invece eliminati, con l'individuazione di due diversi valori soglia applicati separatamente allo strato superficiale e a quello profondo.

Con queste due tecniche è possibile quindi avere dati con un alto indice di qualità. In futuro, con il processamento di nuove campagne oceanografiche, le tecniche saranno migliorate a seconda delle esigenze relative ai nuovi dati e la qualità dello stesso sarà migliorata ulteriormente.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Sea-Bird (2014b). SEASOFT V2: SBE DataProcessing_7.21.g. available at:
http://www.seabird.com/sites/default/files/documents/SBEDataProcessing_7.23.2.pdf
- [2] Manual of quality control procedures for validation of oceanographic data (*IOC / CEC Manuale 1993*)
<http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001388/138825eo.pdf>
- [3] SeaDataNet QC procedures V2May2010 disponibile su:
http://www.seadatanet.org/content/download/18414/119624/file/SeaDataNet_QC_procedures_V2_%28May_2010%29.pdf.
- [4] I. Petenko, Personal communication. Robust estimate of threshold when eliminating outliers based on “Median Absolute Deviation”.
- [5] SeaDataNet NEMO user manual versione 1.5.2 disponibile su:
http://www.seadatanet.org/content/download/19875/128669/file/sdn_Nemo_UserManual_V1.5.2.pdf
- [6] SeaDataNet MIKADO usermanual versione 3.3 disponibile su:
http://www.seadatanet.org/content/download/20278/140561/file/sdn_Mikado_UserManual_V3.3.pdf

SITI CITATI:

- [1.1] www.seadatanet.org
- [1.2] www.seabird.com

*Studio della correlazione tra le strutture di circolazione a mesoscala e la distribuzione di *Balaenoptera physalus* nel Tirreno centrale*

Valeria Andreotti, Antonio Olita
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto Ambiente Marino Costiero, U.O.S Oristano
valeria.andreotti87@gmail.com
antonio.olita@cnr.it

Luca Bittau, Renata Manconi
Università di Sassari, Dipartimento di Scienze della Natura
del Territorio (DIPNET).

Sommario— Negli ultimi anni è stata segnalata nel Mar Tirreno centrale una maggiore presenza di balenottere durante la stagione estiva. La disponibilità di prede è uno dei principali fattori che determinano la distribuzione di questi individui. In questo lavoro è stata analizzata la correlazione tra gli avvistamenti di *B. physalus* e le strutture di mesoscala presenti nell'area, con particolare attenzione al *gyre* ciclonico localizzato immediatamente ad est delle bocche di Bonifacio.

È stato evidenziato come questo *gyre* ciclonico subisca dei cambiamenti inter-annuali nelle concentrazioni di clorofilla a (Chl) e nella temperatura superficiale.

Gli avvistamenti di balenottere nell'ambito del Tirreno centrale sono quasi tutti posizionati al centro del *gyre* ciclonico, al quale è probabilmente associata una risalita di nutrienti. I risultati ottenuti nel presente lavoro hanno infatti mostrato una preferenza delle balenottere per quest' area in funzione delle sue caratteristiche oceanografiche e biologiche.

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' – TESSA.

Keywords— *Balaenoptera physalus*; Tirreno centrale; *gyre* ciclonico.

I. INTRODUZIONE

La balenottera comune (*Balaenoptera physalus*) è l'unico Mysticete regolarmente presente nel Mar Mediterraneo [1]. Uno studio recente [2] ha stimato una popolazione estiva nel Mediterraneo nord-occidentale di oltre 3500 individui, con una densità media di 0.015 individui km².

B. physalus è presente nel bacino nord-occidentale del Mar Mediterraneo durante tutto l'anno [3], [4], anche se la sua abbondanza sembra decrescere in inverno [5]. La disponibilità delle prede è uno dei principali fattori che determinano la distribuzione, l'abbondanza e la migrazione dei cetacei [6].

E' noto che l'alimento principale per *B. physalus* è l'eufasiaceo *Meganyctiphanes norvegica*, (*krill*) come evidenziato dall'analisi dei contenuti stomacali e dalle feci studiate [7], [8]. Questo eufasiaceo è stato trovato in abbondanza nel nord-ovest del Mediterraneo (Casanova, 1974), dove avviene la sua riproduzione dal tardo inverno alla tarda primavera [9].

L'habitat di *B. physalus* è piuttosto dinamico, trovandosi nel dominio pelagico che presenta un'alta variabilità spaziale e temporale delle sue caratteristiche fisiche e trofiche. A causa dell'enorme variabilità di questo habitat risulta di primaria importanza studiare la distribuzione della balenottera comune, per capire al meglio la sua ecologia nel Mediterraneo.

Nel Mar Tirreno la presenza di *B. physalus* è stata riscontrata prevalentemente in estate nel bacino settentrionale e nord-occidentale (area di interesse internazionale definita Santuario dei cetacei).

Tale presenza è collegata con l'alta produttività di queste acque, mentre il bacino orientale sembra essere caratterizzato da relativamente basse concentrazioni di clorofilla (Chl a) durante tutto l'anno [10]. La clorofilla è considerata come un buon indicatore di bloom di fitoplancton, direttamente connesso ad un conseguente bloom di zooplancton, la principale risorsa di cibo delle balene [11].

Studi precedenti hanno dimostrato l'esistenza di relazioni tra le condizioni oceanografiche e la distribuzione dei mammiferi marini. Ad esempio sono state riscontrate relazioni tra il numero dei cetacei e la profondità [12], [13], la concentrazione di clorofilla superficiale [14], la temperatura superficiale [12], la circolazione oceanografica [15], [13] ed il numero di prede [13], [16].

È stato dimostrato che nel mar Tirreno la presenza di strutture sottomarine come il *canyon* di Cuma influenzi la distribuzione di balenottere in una piccola area molto vicino all'isola di Ischia [17]. I *canyons* aumentano la velocità di *upwelling*, creando un habitat caratterizzato da un'elevata densità locale e diversità di fauna bentonica e pelagica [17].

Nel presente lavoro è stata studiata la presenza e variabilità spaziale e temporale di *Balaenoptera physalus* nell'area del Tirreno centrale (Bocche di Bonifacio) in relazione alle caratteristiche oceanografiche e con particolare riferimento alle strutture di mesoscala. A tale scopo è stato condotto uno studio della variabilità dell'habitat nell'area in studio, facendo uso di dati satellitari di temperatura superficiale del mare (SST) e concentrazione di clorofilla (Chl) (principali parametri strutturanti l'habitat di *B. physalus*) [18].

Si è dunque proceduto ad una analisi quantitativa sia dei dati biologici che delle relazioni tra i dati biologici ed i parametri ambientali, i cui valori sono stati opportunamente estratti dai dataset satellitari.

II. AREA DI STUDIO

La circolazione oceanografica del Mar Tirreno è organizzata in una serie di *gyre*, il più significativo dei quali, da un punto di vista dinamico, è il *gyre* ciclonico localizzato ad est di Bonifacio [19], [20]. Questo *gyre* ciclonico freddo di circa 80-120 km [21] è indotto da forti venti da nord-ovest “incanalati” dallo Stretto di Bonifacio (the North Tyrrhenian Cyclone NTC) [22]. A est dello stretto l'intensità del vento è maggiore rispetto alla parte settentrionale o meridionale, dove lo Stretto di Bonifacio è riparato dalla Corsica e dalla Sardegna [23]. La parte interna del vortice ciclonico corrisponde ad una zona di divergenza che a sua volta è causa di *upwelling* (da cui l'anomalia negativa nelle temperature superficiali), mentre la parte interna della zona anticiclonica, localizzata più a sud, corrisponde ad una zona di convergenza e *downwelling* [22].

III. MATERIALI E METODI

A. Metodologie di campionamento

Le campagne di avvistamento dei cetacei sono state condotte dal 2011 al 2013 dal Dipartimento di Scienze della Natura del Territorio dell'Università di Sassari (DIPNET).

L'area campionata comprende il tratto di mare ad Est delle Bocche di Bonifacio (Sardegna nord-orientale) nell'area compresa tra 41°- 42° di latitudine N e 9°- 10.5° di longitudine E, fino a 40 miglia nautiche al largo. I campionamenti sono stati distribuiti principalmente in tutta l'area del Canyon di Caprera.

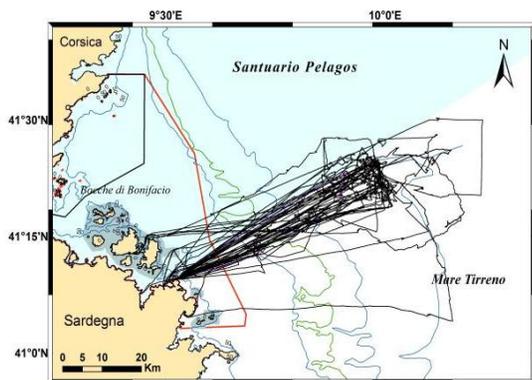


Figura 1: Percorso dell'imbarcazione durante i campionamenti a mare

Il centro dell'area indagata in modalità 'on-effort' è stato l'asse principale del Canyon di Caprera. Anche se i rilievi sono stati prevalentemente mirati, si è comunque resa casuale la scelta del punto di partenza dei transetti 'on-effort'.

Le uscite a mare (*surveys o campagne di avvistamento*) effettuate per il progetto, dedicate e mirate, sono state finalizzate alle seguenti attività:

- raccolta dati di tipo sistematico da imbarcazione dedicata, in area *offshore*;
- raccolta dati di tipo opportunistico (con imbarcazione in attività di *whale watching* in area *offshore*);
- raccolta dati di tipo opportunistico da imbarcazione in area costiera di piattaforma continentale;

Durante le attività di ricerca, sia sistematica che mirata, sono stati imbarcati un numero minimo di 3 osservatori tra cui almeno 2 esperti che, ruotando di posizione, coprivano visivamente i 360° intorno alla barca, con settori di osservazione assegnati di ± 90 -120° ciascuno. Nel caso di attività dedicata alla ricerca (sistematica), l'imbarcazione seguiva un transetto lineare predeterminato casualmente all'interno dell'area di studio (punto di inizio determinato *random*), mentre nel caso di attività finalizzata al *whale watching*, è stata seguita una rotta di tipo opportunistico, ovvero mirata esclusivamente all'avvistamento di cetacei. I transetti sistematici hanno avuto lo scopo di coprire aree non coperte spazialmente dai transetti opportunistici.

Secondo protocollo, l'attività di ricerca visiva “*on-effort*”, ha avuto luogo quando la barca manteneva una velocità costante di 7-11 nodi (13-20 km/h) e con tutti gli osservatori in posizione di avvistamento.

Gli avvistamenti di cetacei effettuati in condizioni diverse da quelle indicate dal protocollo, sono stati considerati *off effort* e pertanto non considerati nel calcolo dei tassi di incontro, ma solo nel conteggio globale degli avvistamenti e nei dati di presenza/assenza delle specie.

I dati di avvistamento (numero di gruppi avvistati) ottenuti dai *survey* sono stati successivamente utilizzati per il calcolo dell'*Encounter Rate (ER)*. L'*ER* è spesso utilizzato in bibliografia come migliore approssimazione per la “probabilità di avvistamento”. Esso è calcolato come:

$$ER=n/L \quad \text{Eq.1}$$

dove n è il numero di avvistamenti (dove un singolo avvistamento può essere anche di più esemplari) ed L è il numero di Km effettuati *on effort* [24].

B. Dati oceanografici

I dati di temperatura superficiale (SST) e clorofilla a (Chl) sono stati acquisiti dal Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (sensore MODIS) a bordo del satellite Aqua.

Le mappe con le immagini di Chl e SST a 4x4 km di risoluzione sono state scaricate dal sito di oceancolor.gsfc.nasa.gov. Per le analisi sono stati utilizzati i valori di SST e Chl a 8 giorni e mensili.

C. Analisi Statistica

Le analisi statistiche sono state svolte sui dati degli avvistamenti raggruppati per uscita. L'*Encounter Rate* è calcolata in maniera da essere indipendente dallo sforzo compiuto e nello specifico descrive il numero di esemplari avvistabili in 100 km lineari.

È stato eseguito un primo confronto qualitativo per esaminare le relazioni esistenti tra la distribuzione di *B. physalus*, la concentrazione di clorofilla e le variazioni di temperatura. Sono state sovrapposte le immagini di Chl e SST mensili nell'area di studio e la distribuzione degli avvistamenti nei mesi estivi (giugno, luglio, agosto, settembre). I campionamenti sono stati svolti durante tutto l'anno, ma per la maggior parte delle analisi sono stati presi in considerazione gli avvistamenti avvenuti nei mesi estivi in quanto numericamente più significativi.

Allo scopo di valutare differenze significative inter-annuali o mensili (queste ultime sono state effettuate utilizzando i mesi estivi da giugno a settembre) i dati di ER sono stati aggregati sia per anno, che per mese. Ai dati così aggregati è stato applicato il test dell'ANOVA (Analysis of Variance); sono state calcolate delle medie sui valori degli ER per ogni singolo mese estivo. I dati sono stati comparati tramite l'ANOVA per verificare se ci fossero delle differenze significative inter-annuali e stagionali tra gli ER.

Per osservare graficamente i dati, ad ogni tabella relativa ai parametri di output dell'ANOVA è stato associato un box-plot. Per valutare la relazione lineare tra i dati di SST e Chl con le posizioni degli avvistamenti di *B. physalus* è stato utilizzato il coefficiente di correlazione di Pearson ($P < 0,05$) con lo scopo di dimostrare la validità dell'ipotesi nulla. Questo coefficiente permette di esprimere la linearità tra le covarianze di due variabili aleatorie e il prodotto delle loro deviazioni standard. I valori degli indici di correlazione variano tra -1 e +1; i due estremi rappresentano delle relazioni perfette tra le variabili, mentre 0 rappresenta una assenza di relazione.

Per la correlazione sono stati utilizzati gli ER corrispondenti a tutte le giornate di campionamento, comprese le singole giornate nelle quali non sono state avvistate balenottere (ER=0).

Infine gli avvistamenti sono stati messi in relazione con i dati di SST e Chl-a anche in relazione al punto esatto di avvistamento: per ogni avvistamento è stato estratto il valore corrispondente di Chl e SST dal dato MODIS, L3 composite a 8 giorni. Tale prodotto risulta il migliore compromesso per catturare sinotticamente (nel tempo e nello spazio) i processi di interesse (operanti alla mesoscala) e contemporaneamente avere una sufficiente copertura dell'area, in parte ovviando al problema della copertura nuvolosa.

IV. RISULTATI

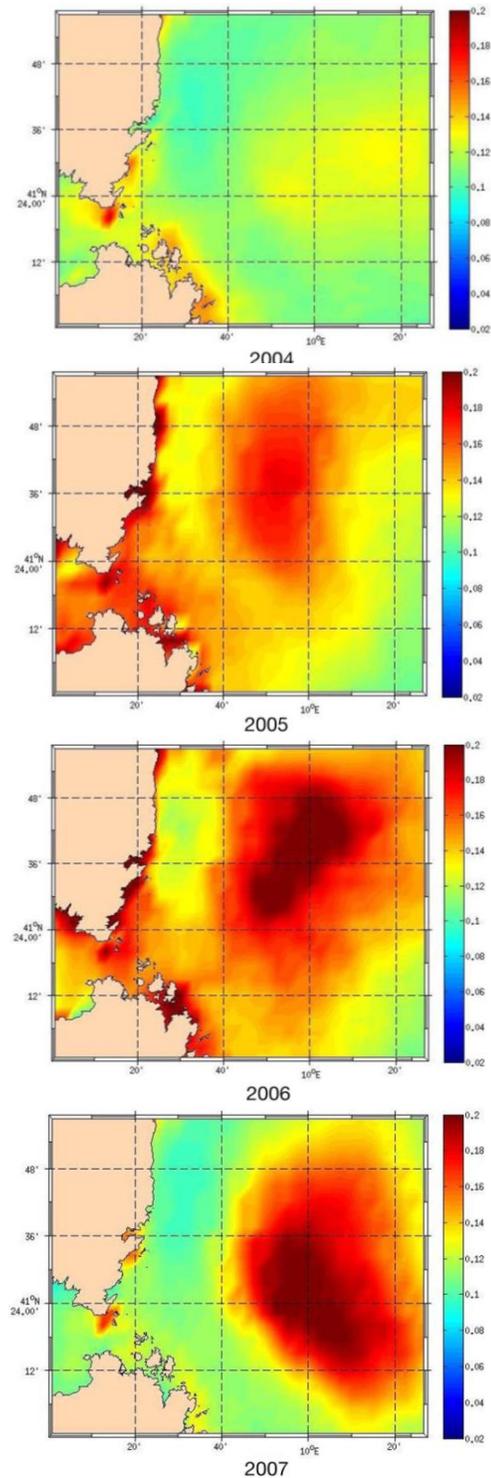
A. Variabilità idrologica/trofica nell'area di studio

Le mappe di Fig. 2 rappresentano la temperatura superficiale e la concentrazione di clorofilla a dei mesi estivi (da giugno a settembre) nell'area di studio. Sono stati presi in considerazione gli ultimi 10 anni, dal 2004 al 2013, per mostrare come nel corso di questi anni la SST e la Chl abbiano subito delle variazioni significative, che hanno influenzato il comportamento e la distribuzione delle balenottere.

È possibile osservare come in corrispondenza del *gyre* ciclonico a est di Bonifacio i valori di Chl sono maggiori,

mentre si osserva una diminuzione della temperatura nella zona centrale del *gyre*.

Si può notare come questo *gyre* ciclonico subisca dei cambiamenti inter-annuali nelle concentrazioni di Chl e nella temperatura superficiale.



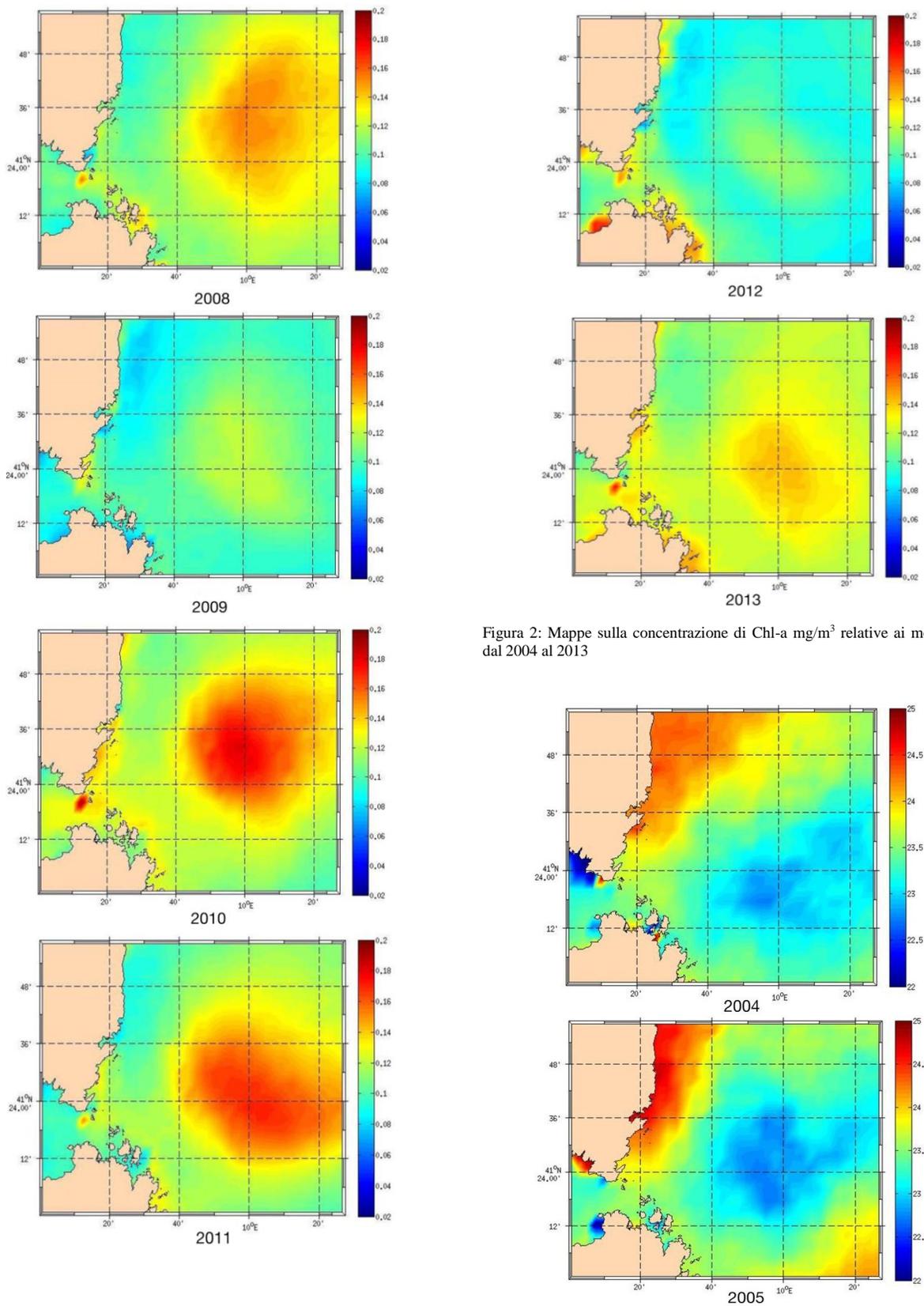


Figura 2: Mappe sulla concentrazione di Chl-a mg/m³ relative ai mesi estivi dal 2004 al 2013

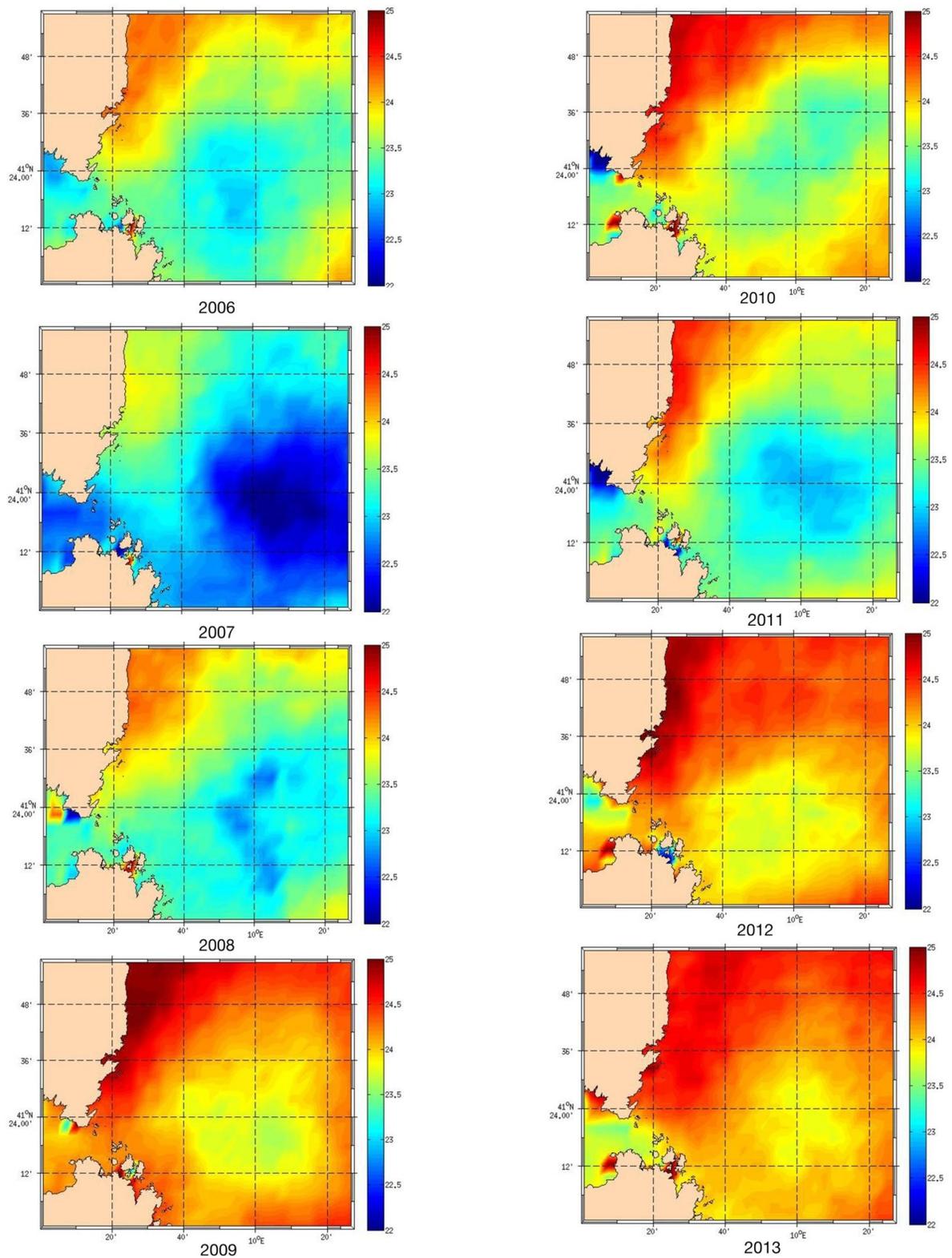


Figura 3: Mappe di temperatura superficiale media relative ai mesi estivi (Giugno-Settembre) dal 2004 al 2013.

È stato dimostrato in studi precedenti [25] che la principale forza che guida i *gyre* ciclonici e anticiclonici è il vento che arriva da Bonifacio. Il vento produce dei movimenti verticali (*Ekmán pumping*), che distorcono il campo di densità ed inducono una corrente verticale. Come risultato si forma a nord una divergenza di massa e un *upwelling*, quindi una risalita di acque profonde più fredde verso la superficie.

Da un primo confronto tra le mappe di Chl-a e SST è possibile osservare una risalita di acque profonde più fredde in corrispondenza del centro del *gyre* ciclonico, alla quale è probabilmente associata una risalita di nutrienti lungo le isopicne ed un assottigliamento del *mixed layer* che giustifica il livello trofico mediamente più alto nella zona centrale della struttura ciclonica rispetto alle aree circostanti.

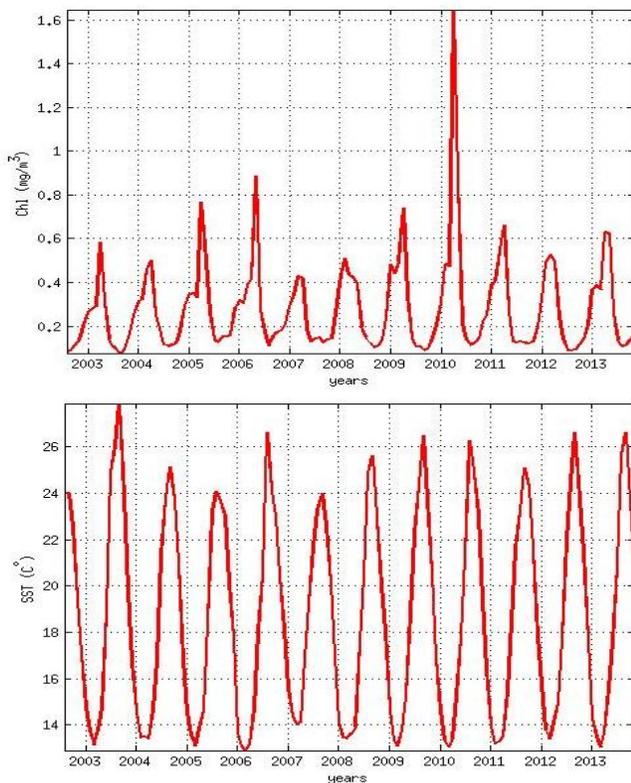


Figura 4: Time series mensili satellitari (MODIS-AQUA) di Chl-a e SST dal 2003 al 2013

Le *time series* sono state costruite a partire dai dati satellitari di clorofilla e di temperatura superficiale dal 2003 al 2013. Per le *time series* sono stati utilizzati i dati satellitari di SST e Chl acquisiti dal sensore MODIS AQUA. Sono state utilizzate le medie mensili per mostrare l'andamento annuale di clorofilla e temperatura superficiale nell'area di studio. Dalla serie temporale della Chl si può notare un picco nell'inverno del 2010, con un valore massimo di circa $1,6 \text{ mg/m}^3$. Per la SST il picco è stato raggiunto nell'estate del 2003 con una temperatura massima di 28°C , corrispondente all'anomalia termica (*summer heat wave*) che ha colpito

l'Europa continentale e l'area mediterranea in particolare nei mesi di Giugno e Agosto 2003 [26].

Il valore medio di Chl dal 2003 al 2013 di $0,27 \text{ mg/m}^3$ e $18,6^\circ\text{C}$ di SST.

Anche dalle serie temporali, come già evidenziato dalle mappe, si può notare che per quanto riguarda la Chl si osservano valori elevati nell'estate 2005-2006 con circa $0,8 \text{ mg/m}^3$ di Chl; questi valori scendono nel 2007 per poi risalire dal 2009 al 2011. Per le SST come confermato anche dalle mappe rappresentanti i mesi estivi, è possibile notare valori bassi di temperatura superficiale nell'estate del 2005 e del 2007. La time serie delle SST evidenzia inoltre il valore più basso nell'inverno del 2006 e il valore più elevato (circa 14°C) nell'inverno del 2007.

B. Statistica descrittiva delle osservazioni di *B. physalus*

Con i dati riguardanti gli avvistamenti di *B. physalus* è stata svolta una semplice analisi descrittiva.

Come si può vedere dalla tabella sottostante sono state analizzate il numero totale di uscite per ogni anno, il numero di uscite senza avvistamenti e le uscite di survey con avvistamenti di balenottere. Si può osservare che nel 2011 sono state effettuate 28 uscite a mare, di queste 21 con avvistamenti di *B. physalus*. Nel 2012 ci sono state 25 uscite di campionamento, delle quali solo 14 con avvistamenti di balenottera. Nel 2013 su 20 uscite effettuate, 10 si sono concluse senza avvistamento di balenottera. Nel 2011 inoltre, sono state osservate ben 68 *B. physalus*, mentre solo 42 nel 2012 e 37 nel 2013. Si tratta di un dato molto importante, dal momento che nel 2012 sono state effettuate solo 3 uscite in più rispetto al 2011. È fondamentale evidenziare poi che nel 2011 in una singola giornata del mese di agosto sono state osservate 10 balenottere.

Dagli ER (*Encounter rate*) calcolati considerando il numero totale degli avvistamenti ed il numero totale dei Km percorsi "*on effort*" per singola uscita, è stato effettuato un calcolo medio per anno e per la stagione estiva (giugno, luglio, agosto, settembre).

| Avvistamenti | 2011 | 2012 | 2013 |
|---------------------------|------|------|------|
| N. TOT uscite | 28 | 25 | 20 |
| uscite con B. p. | 21 | 14 | 10 |
| uscite senza B. p. | 7 | 11 | 10 |
| N. B. p. avvistate | 68 | 42 | 37 |
| N. minimo | 0 | 0 | 0 |
| N. massimo | 10 | 5 | 10 |
| ER medio | 4.11 | 2.53 | 2.33 |
| ER medio estivo | 4.99 | 2.57 | 2.48 |

Tabella 1: Risultati delle analisi descrittive sugli avvistamenti di cetacei negli anni 2011, 2012 e 2013.

Sono state calcolate delle medie sui valori degli ER (*Encounter Rate*) per ogni singolo mese estivo, che ci hanno

permesso di individuare se ci fossero o meno delle differenze significative sia inter-annuali che stagionali tramite un ANOVA.

Per quanto riguarda l'analisi inter-annuale sono stati confrontati i valori medi degli ER dei mesi estivi nei 3 anni, mentre per l'analisi stagionale sono stati presi in considerazione i 4 mesi (giugno, luglio, agosto, settembre) dei 3 anni e sono stati confrontati tra loro.

| Source | SS | df | MS | F | Prob>F |
|---------|---------|----|---------|------|--------|
| Columns | 29.6008 | 2 | 14.8004 | 5.55 | 0.0269 |
| Error | 24.0138 | 9 | 2.6682 | | |
| Total | 53.6146 | 11 | | | |

Tabella2: risultati ottenuti dall' ANOVA dei valori medi di ER nei 3 anni

Le colonne della tabella rappresentano:

- SS: la somma dei quadrati;
- df: i gradi di libertà;
- MS: (Mean Squares) la media dei quadrati, il rapporto SS/df ;
- F: è il rapporto tra due variabili chi-quadro indipendenti diviso i rispettivi gradi di libertà;

Il valore p (p-value): è il livello di significatività osservato, indica il minimo livello di significatività per il quale l'ipotesi nulla viene rifiutata.

Quindi l'ipotesi nulla viene rifiutata se il test fornisce un p-value inferiore al livello di significatività del test.

Il p-value ottenuto dall'ANOVA (Tab. 2) è di 0.0269 quindi minore di 0.05 (ovvero il 5%), quindi possiamo affermare che le differenze nella nostra serie di dati sono statisticamente significative.

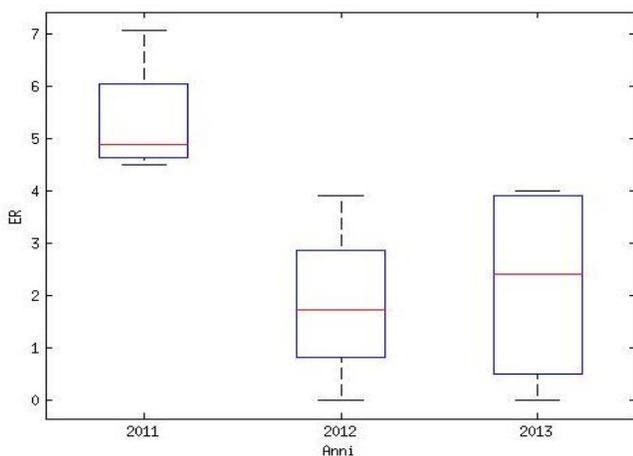


Figura 5: Box-plot relativo agli ER dei 3 anni

Il box-plot (Fig. 5) rappresenta le medie degli ER dei mesi estivi dei 3 anni di avvistamenti. Si può notare come nel 2011 gli Encounter Rate hanno un andamento differente rispetto al 2012 e 2013, questo potrebbe essere dovuto al fatto

che nel 2011 abbiamo temperature inferiori e concentrazione di Chl maggiori rispetto al 2012-2013.

| Source | SS | df | MS | F | Prob>F |
|---------|---------|----|---------|------|--------|
| Columns | 3.879 | 3 | 1.293 | 0.21 | 0.8881 |
| Error | 49.7356 | 8 | 6.21695 | | |
| Total | 53.6146 | 11 | | | |

Tabella. 3: risultati ottenuti dall'ANOVA tra i singoli mesi estivi

Il p-value ottenuto dall'analisi dei mesi estivi ($P > 0,05$) indica che gli ER calcolati nell'analisi descrittiva, non evidenziano differenze statisticamente significative.

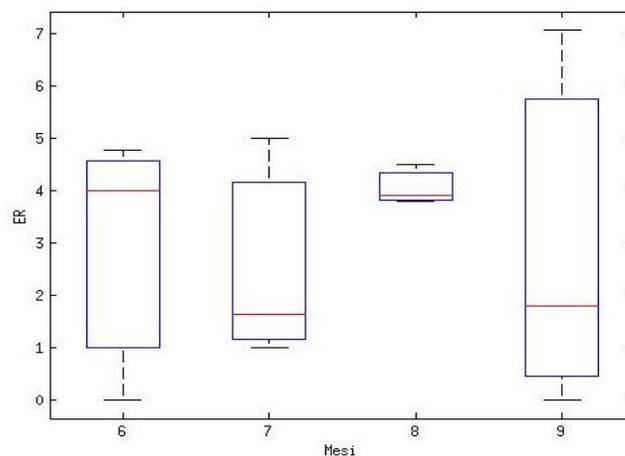


Figura 6: Il box-plot rappresenta gli ER nei mesi estivi dei 3 anni

La figura (6) mette in evidenza alcune differenze nei singoli box-plot rappresentanti i mesi estivi, l'analisi statistica invece ci conferma che sebbene ci siano delle differenze, queste non siano statisticamente significative. Questo risultato quindi potrebbe indicare che anche le differenze osservate nella distribuzione della balenottera, durante la stagione estiva non siano significative.

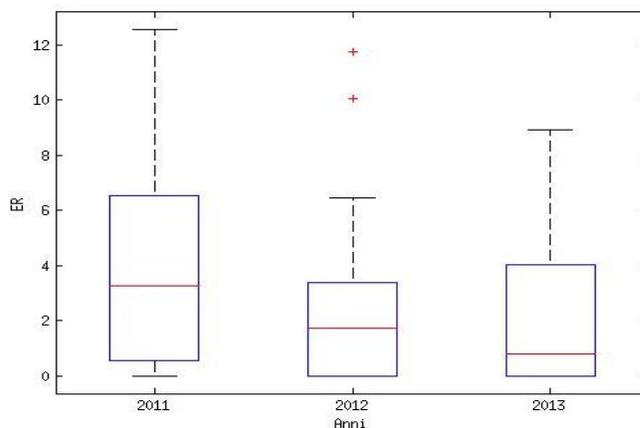


Figura 7: box-plot relativo al totale degli ER dei 3 anni

Nel box-plot (Fig. 7) vengono raffigurati gli ER totali dei 3 anni. Per l'analisi sono state prese in considerazione anche le giornate di campionamento nelle quali non sono state avvistate balenottere (ER=0).

C. Relazioni qualitative e quantitative tra presenza di B. physalus e habitat oceanografico

Lo studio delle relazioni fra osservazioni di balenottera comune e i parametri ambientali derivati da satellite è stato eseguito sia su base statistica/quantitativa che in maniera qualitativa a partire da una indagine esplorativa condotta visivamente con l'ausilio delle mappe di SST e Chl.

Le mappe sottostanti mostrano la concentrazione di Chl e la SST nei mesi estivi (giugno, luglio, agosto, settembre) per il 2011, 2012, 2013. Nelle mappe sono stati inseriti i punti di avvistamento relativi ai 3 anni.

Nel 2011 si osservano valori di clorofilla superiori e di conseguenza temperature superficiali più basse al centro del gyre, rispetto al 2012 e 2013. È possibile notare inoltre, come nel 2011 gli avvistamenti di balenottera comune siano più numerosi e più concentrati al centro del gyre, mentre nel 2013 gli avvistamenti sono distribuiti in un'area maggiore lungo tutto il gyre.

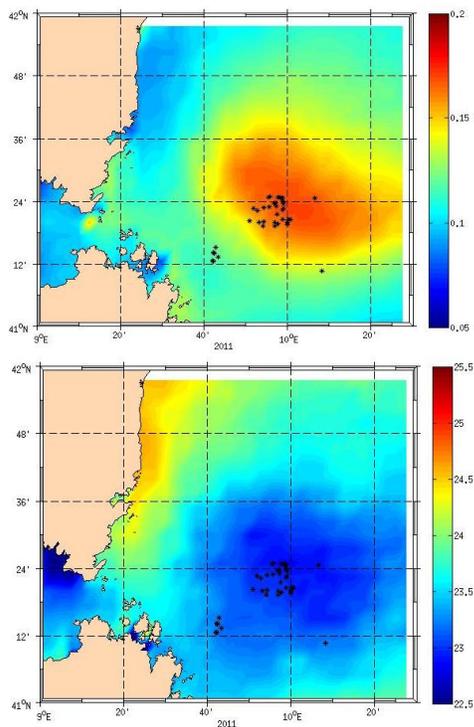


Figura 8: Mappe di Chl e SST dei mesi estivi del 2011 con punti di avvistamento

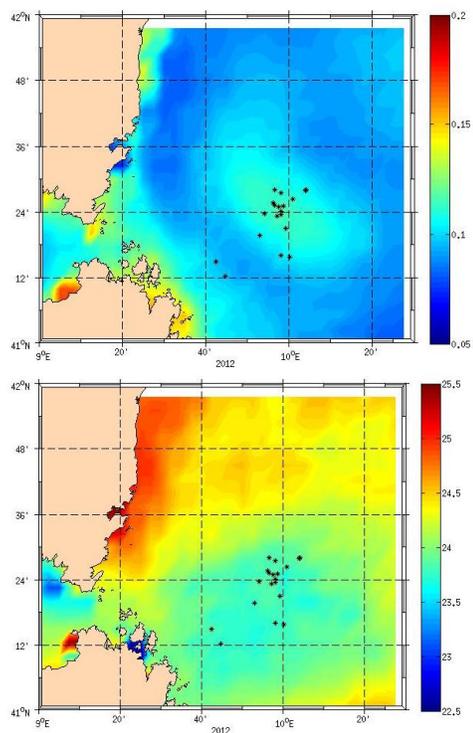


Figura 9: Mappe di Chl e SST dei mesi estivi del 2012 con punti di avvistamento

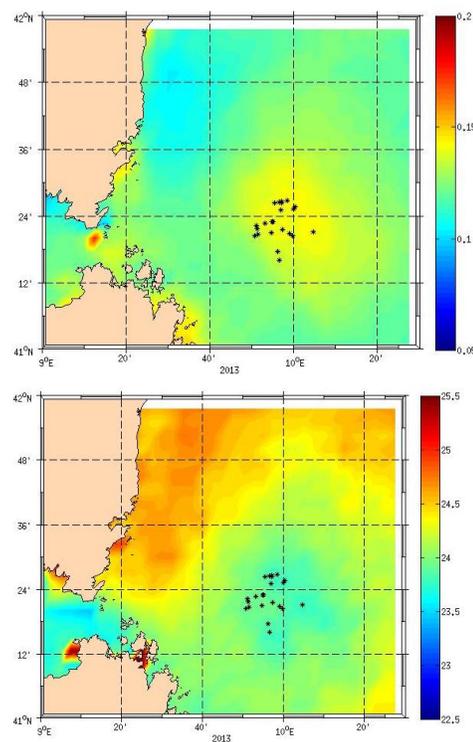


Figura 10: Mappe di Chl e SST dei mesi estivi del 2013 con punti di avvistamento

D. Correlazioni

Il coefficiente di correlazione di Pearson utilizzato per valutare la relazione tra i dati di SST e Chl non mostra valori statisticamente significativi tra le differenti variabili e i valori di ER (ovvero $P > 0,05$). Questo risultato è in contrapposizione con quanto atteso e con quanto è stato ottenuto dalle analisi precedenti.

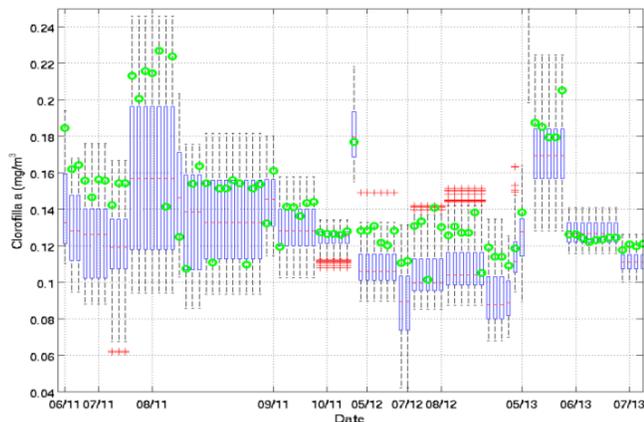


Figura 11: Grafico raffigurante i 3 anni di campionamenti, i box-plot rappresentano la distribuzione dei valori di Chl nell'area di avvistamento

Nel grafico (Fig. 11) sono rappresentati i 3 anni di campionamenti (2011-2012-2013). I singoli box plot rappresentano la distribuzione dei valori di Chl-a nell'area campionata (estratta dai MODIS 8-days composite).

I cerchi verdi sui box-plot rappresentano i valori di Chl nel punto dove è avvenuto l'avvistamento, o meglio la media dei 4 valori circostanti il punto di avvistamento.

Come è evidente osservando la distribuzione relativa dei valori delle osservazioni (punti verdi) rispetto alla mediana, il valore di Chl-a corrispondente ai singoli avvistamenti è quasi sempre collocato ben al di sopra del valore mediano di concentrazione di clorofilla per il giorno di riferimento, e molto spesso addirittura si colloca oltre il limite del box rappresentante il 75% dei valori.

Lo stesso grafico prodotto per la temperatura superficiale non mette in evidenza una così stretta relazione, in molti casi il valore è anch'esso discostato dalla mediana, ma non in una maniera così evidente come per la Chl-a.

V. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

In questo lavoro è stata studiata la presenza e la variabilità spaziale e temporale di *Balaenoptera physalus* in un'area del Tirreno Centrale, in relazione alle caratteristiche oceanografiche note ed osservate. È stata analizzata la correlazione tra gli avvistamenti e le strutture di mesoscala presenti nell'area, con particolare attenzione al *gyre* ciclonico localizzato immediatamente ad est delle Bocche di Bonifacio.

In studi precedenti sono state formulate due assunzioni riguardanti la caratterizzazione dell'habitat per *B. physalus*: a) le balenottere vengono solitamente osservate dove

il cibo (zooplankton, principalmente eufasiacei) è più abbondante e b) le risorse di cibo sono in qualche modo correlate alle condizioni oceanografiche dell'area [27].

L'area da noi studiata si estende in prossimità dei confini del Santuario dei cetacei (41° - 42° di latitudine N e 9° - $10,5^{\circ}$ di longitudine E). Quest'area (rispetto alle aree pelagiche circostanti del Tirreno Centrale) è caratterizzata da una maggiore produttività primaria dovuta alla presenza del vortice ciclonico. Questo causa una maggiore iniezione di nutrienti negli strati superficiali, legata a sua volta all'*upwelling* che solitamente caratterizza la parte centrale dei vortici ciclonici. A questa maggiore produttività primaria è legata la maggiore concentrazione di Chl-a rispetto alle zone circostanti.

La serie temporale riportata nella figura 4 mostra una notevole variabilità inter-annuale sia in termini di biomassa fitoplanctonica che in termini di posizione della stessa. In particolare, analizzando il triennio 2011-2013, si può notare che nel 2011 al centro del *gyre* ciclonico le temperature sono inferiori rispetto al 2012 e 2013, indice di un *upwelling* più intenso. Questo è evidente anche dall'analisi delle mappe di temperatura superficiale (riferite ai mesi estivi) che mostrano valori intorno ai 24°C al centro del *gyre* per il 2012-2013, mentre tra i 22 - 23°C per il 2011.

Da una prima analisi descrittiva dei dati è stato possibile notare che nel 2011 il numero di esemplari osservati è nettamente superiore rispetto al 2012 e al 2013. Il maggior numero di avvistamenti ha anche determinato un valore più alto di ER (*Encounter rate*).

Le differenze inter-annuali si possono notare dall'analisi delle mappe effettuata mettendo in relazione il dato biologico con i parametri ambientali. Nelle mappe sono stati inseriti gli avvistamenti effettuati nei 3 anni e relativi ai mesi di giugno, luglio, agosto e settembre. Nel 2011, rispetto al 2012 e 2013, sono stati osservati valori di clorofilla superiori e di conseguenza temperature superficiali più basse al centro del *gyre*. Inoltre nel 2011 gli avvistamenti di balenottera comune sono stati non solo più numerosi ma anche maggiormente concentrati nella zona centrale del *gyre*, caratterizzata da massimi di Chl e minimi di SST. Le alte concentrazioni di Chl nei mesi estivi del 2011 e quindi la presenza di una maggiore produttività primaria, potrebbero aver portato le balenottere ad aggregarsi al centro del *gyre*, probabilmente per alimentarsi.

L'ANOVA ha confermato delle differenze inter-annuali tra gli ER dei 3 anni, questo potrebbe essere dovuto alle differenti caratteristiche che il *gyre* ciclonico mostra durante gli anni. Per quanto riguarda invece le differenze stagionali, tra i singoli mesi estivi non sono state evidenziate delle differenze significative. Tale risultato è in accordo con la non-significatività del coefficiente di correlazione di Pearson con le differenti variabili oceanografiche estratte su scala mensile. Questo risultato può dunque essere un utile indizio per riformulare il piano di campionamento e/o ripensare l'indice di abbondanza utilizzato.

La relazione tra la presenza delle balenottere e il gradiente trofico è suggerito dalla distribuzione delle stesse in

relazione alla concentrazione di Chl stimata da satellite, (vedi figura 11). Gli avvistamenti sono quasi tutti posizionati su valori estremi rispetto alla distribuzione normale dei valori per un singolo dato satellitare (8-days composite). La stessa relazione non è stata osservata rispetto alla distribuzione delle temperature superficiali. Questo è un dato di estremo interesse in quanto indica che le *B. physalus* sono presenti in queste zone probabilmente per alimentarsi e non in seguito alla ricerca di optimum termici. La clorofilla come già evidenziato è considerata come un buon indicatore della biomassa fitoplanctonica, a sua volta correlata con la produzione primaria. Produzione primaria e “standing stock” di fitoplancton sono a loro volta correlati con la produzione secondaria e dunque con la presenza di zooplancton.

In conclusione possiamo affermare che la clorofilla può essere considerata uno degli indicatori fondamentali per l'individuazione delle balenottere, in accordo con quanto rilevato da studi precedenti [11], [18].

I prossimi studi potranno avvalersi dell'analisi degli output di modelli numerici di simulazione, capaci di fornire informazioni su altre variabili (velocità della corrente, flussi di calore superficiali) o su livelli verticali che non sono stati presi in considerazione nel presente studio.

VI. RINGRAZIAMENTI

Per la realizzazione di questo lavoro si ringrazia IAMC-CNR di Oristano e il DIPNET dell'Università di Sassari.

VII. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] G. Notarbartolo di Sciara, M. Zanardelli, M. Jahoda, S. Panigada, & S. Airoldi, 2003. The fin whale *Balaenoptera physalus* (L. 1758) in the Mediterranean Sea. *Mammal Review*.
- [2] J. Forcada, A. Aguilar, P. S. Hammond, X. Pastor, & R. Aguilar, 1996. Distribution and abundance of fin whales (*Balaenoptera physalus*) in the Western Mediterranean during summer. *Journal of Zoology*.
- [3] R. Duguay, & D. Vallon, (1977). Le rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) Méditerranée occidentale: état actuel des observations. *Rapp. P.-v. Reun. Comm. int. Explor. scient. Mer Méditerr.*
- [4] L. Marini, C. Consiglio, A. M. Angradi, B. Catalano, A. Sanna, T. Valentini, M.G. Fioia, & G. Villetti, 1996. Distribution, abundance and seasonality of cetaceans sighted during scheduled
- [5] S. Laran, V. Drouot-Dulau, 2007. Seasonal variation of striped dolphins, fin- and sperm whales' abundance in the Ligurian Sea (Mediterranean Sea). *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, 87: 345–352.
- [6] J. A. Learmonth, C. D. MacLeod, M. B. Santos, G. J. Pierce, H.Q.P. Crick and R. A. Robinson, 2006. Potential effects of climate change on marine mammals. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review* 44, 431–464.
- [7] L. Orsi Relini, A. Giordano, 1992. Summer feeding of the fin whale *Balaenoptera physalus* in the Liguro-Provençal Basin. *European Research on Cetacean*, 6: 138-141
- [8] G. Astruc, P. Beaubrun, 2001. Fin whale summer feeding in the north-western Mediterranean Sea. 15th Conference of the European Cetacean Society (Roma, 7-11 May). Abstract: 49.
- [9] J. P. Labat, J. Cuzin-roudy, 1996. Population dynamics of the krill *Meganyctiphanes norvegica* (M. Sars, 1857) (Crustacea: Euphausiacea) in the Ligurian Sea (NW Mediterranean Sea). Size structure, growth and mortality modelling. *Journal of Plankton Research*, 18(12), 2295–2312.
- [10] E. Bosc, A. Bricaud, and D. Antoine, 2004. Seasonal and interannual variability in algal biomass and primary production in the Mediterranean Sea, as derived from 4 years of SeaWiFS observations. *Global Biogeochemical Cycles*, 18: 1–17.
- [11] A. Arcangeli, A. Orasi, S. P. Carcassi, R. Crosti, 2013. Exploring thermal and trophic preference of *Balaenoptera physalus* in the central Tyrrhenian Sea: a new summer feeding ground? *Mar Biol* DOI 10.1007/s00227-013-2348-8
- [12] C. A. Hui, 1985. Undersea topography and the comparative distributions of two pelagic cetaceans. *Fishery Bulletin* 83 (3), 472–475.
- [13] T. H. Woodley, D.E. Gaskin, 1996. Environmental characteristics of North Atlantic right and fin whale habitat in the lower Bay of Fundy, Canada. *Canadian Journal of Zoology*, 74, 75–84.
- [14] R. C. Smith, P. Dustan, D. Au, K. S. Baker, E. A. Dunlap, 1986. Distribution of cetaceans and sea-surface chlorophyll concentrations in the California current. *Marine Biology*, 91, 385–402.
- [15] G. T. Waring, C. P. Fairfield, C. M. Ruhsam, & M. Sano, 1993. Sperm whales associated with Gulf Stream features of the north-eastern USA shelf. *Fishery and Oceanography*, 2(2), 101–105.
- [16] P. C. Fiedler, S. B. Reilly, R.P. Hewitt, D. Demer and 6 others, 1998. Blue whale habitat and prey in the California Channel Islands. *Deep-Sea Res II* 45:1781–1801
- [17] B. Mussi, A. Miragliuolo, E. Monzini, B. Diaz Lopez, M. Battaglia, 1999. Fin whale (*Balaenoptera physalus*) feeding ground in the coastal water of Ischia (Archipelago Campano). In *European Research on Cetaceans* 13: 330-335.
- [18] J. N. Druon, S. Panigada, L. David, A. Gannier, P. Mayol, A. Arcangeli, A. Can'adas, S. Laran, N. Di Meglio, P. Gauffier, 2012. Feeding habitat of fin whales in the western Mediterranean Sea: an environmental niche model. *Marine Ecology-Progress Series*, 464, 289–306.
- [19] V. G. Krivosheia and I. M. Ovchinnikov. Properties of the geostrophic circulation of the Tyrrhenian Sea, *Oceanology*, 19, 996-1002, 1973.
- [20] V. G. Krivosheia. Water circulation and structure in the Tyrrhenian Sea, *Oceanology*, 23, 166-171, 1983.
- [21] A. Perilli, V. Rupolo, E. Salusti, 1995. Satellite investigations of a cyclonic gyre in the central Tyrrhenian Sea western Mediterranean Sea.. *J. Geophys. Res.* 100, 2487–2499.
- [22] S. Marullo, R. Santoleri, and F. Bignami, 1994. The surface characteristics of the Tyrrhenian Sea: Historical satellite data analysis. *Seasonal and Interannual Variability of the Western Mediterranean Sea, Coastal and Estuarine Studies, Geophys. Monogr., Vol. 46, Amer. Geophys. Union*, 135–154.
- [23] E. Salusti, 1998. Satellite images of upwellings and cold filament dynamics as transient effects of violent air–sea interactions downstream from the island of Sardinia. *J. Geophys. Res.* 103, 3013–3031.
- [24] J. Kiszka, K. MacLeod, O. Van Canneyt, D. Walker, V. Ridoux, 2007. Distribution, encounter rates, and habitat characteristics of toothed cetaceans in the Bay of Biscay and adjacent waters from platform-of-opportunity data. *ICES Journal of Marine Science*, 64, 1033–1043.
- [25] J. Moen, 1984. Variability and mixing of the surface layer in the Tyrrhenian sea: MILEX-80, Final Report. *SACLANTCEN Report SR-75*, 128 pp..
- [26] A. Olita, R. Sorgente, S. Natale, S. Gaberšek, A. Ribotti, A. Bonanno, and B. Patti, 2007. Effects of the 2003 European heatwave on the Central Mediterranean Sea: surface fluxes and the dynamical response. *Ocean Sci.*, 3, 273-289.
- [27] E. J. Gregr, and A. W. Trites, 2001. Predictions of critical habitat for five whale species in the waters of coastal British Columbia. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58: 1265–1285.

Caratterizzazione idrologica del Canale di Sicilia

Cira Buonocore

IAMC – Istituto per l’Ambiente Marino Costiero, CNR,
Mazara del Vallo (Tp), Italia

cira.buonocore@gmail.com

Roberto Sorgente

IAMC – Istituto per l’Ambiente Marino Costiero, CNR,
Oristano, Italia

roberto.sorgente@cnr.it

Gualtiero Basilone

IAMC – Istituto per l’Ambiente Marino Costiero, CNR,
Mazara del Vallo (Tp), Italia

gualtiero.basilone@iamc.cnr.it

Sommario – Questo lavoro riguarda la raccolta e l’analisi dei dati per una caratterizzazione idrologica del Canale di Sicilia attraverso l’identificazione delle principali masse d’acqua che lo attraversano.

L’attività è stata svolta nell’ambito del progetto di formazione: “Oceanografia operativa e Tecnologie Informatiche per la sicurezza Marittima”, obiettivo 1: Oceanografia operativa e sicurezza (anno 2014-2015).

Le principali features del Canale di Sicilia sono state individuate attraverso accurate ricerche bibliografiche con lo scopo di esaminare le caratteristiche che le contraddistinguono, al fine di valutare la variabilità spaziale e temporale in relazione anche e soprattutto ai cambiamenti climatici registrati negli ultimi anni.

Nel presente lavoro sono stati analizzati i dati idrologici relativi alle campagne oceanografiche “Ancheva 2013” e “Ichnussa 2013”, mediante l’utilizzo del software Ocean Data View. I risultati ottenuti sono stati confrontati con dataset presenti in bibliografia e raccolti nella medesima area di studio.

Keywords — *Canale di Sicilia; masse d’acqua; AIS (Atlantic Ionian Stream).*

INTRODUZIONE

La distribuzione nello spazio e nel tempo delle correnti marine nel Mar Mediterraneo è stata studiata tramite misure su scala globale utilizzando appositi satelliti, campagne di misura in situ e l’ausilio di simulazioni numeriche al computer.

Studi passati hanno messo in evidenza la presenza nel Mar Mediterraneo di un sistema di circolazione determinato dalla distribuzione spaziale e temporale del vento atmosferico alla superficie del mare, dai flussi di calore e di acqua (flussi di densità) che trasferiscono energia attraverso l’interfaccia aria-acqua e dal flusso di massa attraverso lo stretto di Gibilterra [1] [2].

Attualmente l’evaporazione sulla superficie del mare eccede, in media, la somma delle precipitazioni e degli apporti fluviali (bilancio d’acqua negativo). Queste caratteristiche rendono il Mar Mediterraneo capace di aumentare il contenuto di sali nelle masse d’acqua (bacino di densificazione) diventando, di fatto, una sorgente di sale.

Per mantenere il bilancio d’acqua e il bilancio di sale a un valore di equilibrio nel bacino si deve verificare un ingresso d’acqua attraverso lo Stretto di Gibilterra con una salinità inferiore. Per effetto del bilancio del calore e del bilancio d’acqua (e quindi anche del sale, noto anche come principio di conservazione del sale) nello Stretto di Gibilterra si generano l’ingresso di una corrente superficiale di acqua atlantica (AW-Atlantic Water), relativamente fredda e poco salata, e l’uscita di una corrente profonda caratterizzata da un tipo d’acqua con caratteristiche tipiche del Mar Mediterraneo, relativamente più calda e salata, quindi più profonda. Questo tipo di circolazione è nota come circolazione anti-estuarina (Fig. 1) che condiziona la distribuzione spaziale (sia orizzontale che verticale) delle caratteristiche idrologiche delle masse d’acqua dell’intero Mar Mediterraneo.

I. CIRCOLAZIONE GENERALE

La circolazione oceanografica nell’area di studio è caratterizzata da numerosi processi dinamici che coprono l’intero spettro di scale spaziali e temporali [3].

All’interno del Canale di Sicilia [4], l’acqua superficiale atlantica (Atlantic Water, AW) si biforca dando origine a due flussi principali, la Atlantic Ionian Stream (AIS) che fluisce verso sud-est vicino alla costa della Sicilia [5] e la Atlantic Tunisian Current (ATC) che scorre verso sud sulla piattaforma tunisina [6] [7]. In estate, la maggior parte della AW è convogliata nella AIS, formando dei meandri nel Canale di Sicilia da ovest verso est attorno alle tre strutture semi-permanenti: il ciclonico Adventure Bank Vortex (ABV), l’anticiclonico Maltese Channel Crest (MCC) e il ciclonico Ionian Shelfbreak vortex (ISV), prima di diffondersi nel mar Ionio [5] [8] (Fig. 2). Nel mar Ionio, al di sopra dello shelf break, le dinamiche di mesoscala coinvolgono meandri e biforcazioni causate da strutture frontali superficiali e sub-superficiali (ISFs), che nascono come acque di scambio tra il Canale di Sicilia e il bacino Ionico [8].

La ATC è più marcata in inverno [3] [9] [10] mentre invece la AIS è più intensa in estate e tipicamente caratterizzata da un’alta variabilità spaziale [11]. Entrambi i flussi vengono

considerati come caratteristiche permanenti o semi-permanenti dell'area [7] [9].

Come descritto in studi precedenti [12] sulla caratterizzazione delle masse d'acqua nel Canale di Sicilia e la loro variabilità interannuale, la colonna d'acqua viene divisa principalmente in tre strati. Due di questi strati, quello superficiale (0-200m) e quello intermedio (200-500m), rappresentano le due principali masse d'acqua nello stretto di Sicilia; il terzo strato (>500m) viene considerato per la caratterizzazione delle masse d'acqua profonde.

La Figura 3 riassume in maniera schematica le principali masse d'acqua nei tre diversi strati (superficiale, intermedio e profondo) che attraversano il Canale di Sicilia.

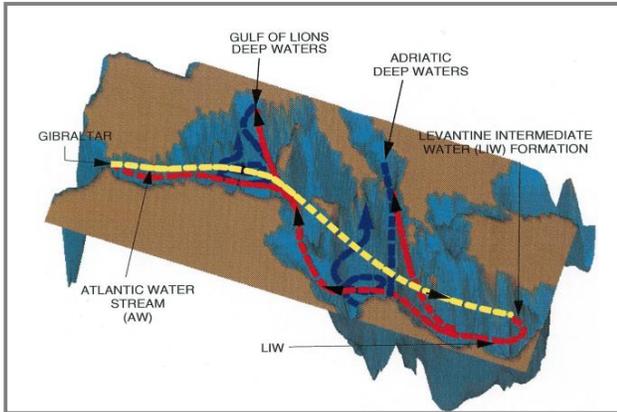


Fig. 1: Schema della circolazione termoalina che caratterizza il bacino del Mediterraneo. Le linee tratteggiate rappresentano: in giallo l'acqua superficiale atlantica (AW), in rosso l'acqua intermedia di origine levantina (LIW), ed infine in blu le celle meridionali indotte dalle acque profonde.

(modificato da [2]).

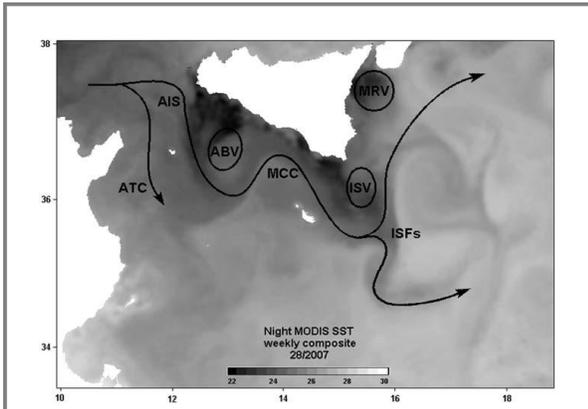


Fig. 2: Tipico pattern di circolazione superficiale estiva nel Canale di Sicilia (come riportato in [8]).

Atlantic Tunisian Current (ATC), Atlantic Ionian Stream (AIS), Adventure Bank Vortex (ABV), Maltese Channel Crest (MCC), Ionian Shelf Vortex (ISV), Messina Rise Vortex (MRV), Ionian Slope Fronts (ISFs).

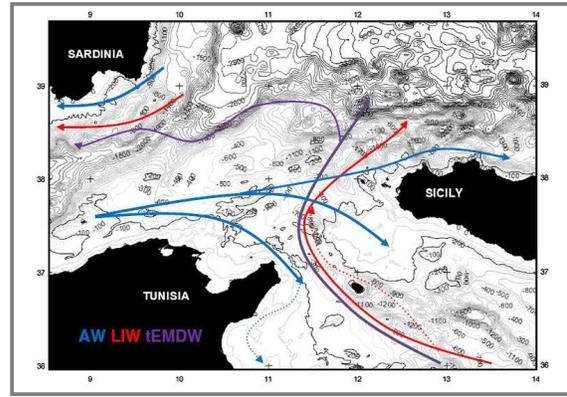


Fig. 3: Illustrazione schematica delle principali masse d'acqua che attraversano il Canale di Sicilia (modificato da [17]).

AW - Atlantic Water (blu); LIW - Levantine Intermediate Water (rosso); tEMDW - transitional Eastern Mediterranean Deep Water (viola)

A. Circolazione superficiale

Lo strato superficiale (0-200m) è caratterizzato da un'alta variabilità sia intra- che inter-annuale [13] [10].

Come descritto in precedenza, lo strato superficiale del Canale di Sicilia è principalmente costituito da AW che proviene dall'Oceano Atlantico attraverso lo stretto di Gibilterra. La circolazione superficiale è soggetta a significative variabilità di mesoscala e agli effetti della topografia di fondo che creano patterns altamente complessi [14].

La caratteristica principale che descrive il pattern di circolazione superficiale è la presenza di due flussi di AW: il primo che forma meandri lungo la costa sud della Sicilia ed è conosciuto come AIS [5] e il secondo, l'ATC [10] [15], che fluisce lungo la costa tunisina. La presenza di una massa d'acqua di origine Atlantica viene messa in evidenza dal minimo di salinità nei profili verticali.

Nel Canale di Sicilia, dagli studi condotti da [12] in un periodo compreso tra il 1998 e il 2013, i valori medi della Salinità minima (S_{min}) variavano tra 37.22 PSU e 37.863 PSU, mentre invece la Temperatura potenziale (θ) alla profondità della Salinità minima variava tra 17.577°C e 20.342°C.

Tra la AW e la LIW è stato osservato, nel maggio 2005, lungo una significativa porzione del passaggio tunisino, un'acqua più fredda ($\theta < 13.8^\circ\text{C}$) ad una profondità di circa 100-200m e con una salinità compresa tra 37.9 e 38.2.

È stato inoltre recentemente osservato, come riportato in [10], che questa nuova massa d'acqua all'interno dello strato di transizione (tra la superficie e lo strato intermedio), nella sezione tra Cape Bon - Mazara del Vallo, è contraddistinta da un minimo relativo di temperatura sul fondo della AW che è stato associato alla Western Intermediate Water (WIW) [16]. Dati raccolti nel lavoro di [17] sono in accordo con questi risultati e confermano l'entrata della WIW nel Canale di Sicilia.

Nel Canale di Sardegna la WIW è stata estesamente riscontrata [18]. Sono state successivamente identificate due vene sul lato algerino e sardo del Canale [19]. Ulteriori evidenze sono state ottenute in un altro lavoro [20], dove è

stata trovata chiaramente la WIW tra la Sicilia e la Sardegna e nel sud Tirreno.

Le sezioni CTD attraverso il Canale di Sardegna [14] mostrano una T_{\min} a 170 metri di profondità; valori simili sono stati riscontrati anche in un altro lavoro [19].

Nella loro campagna, inoltre, alcuni autori [21] hanno evidenziato la presenza di minimi di temperatura in uno strato più superficiale di alcune decine di metri rispetto a quanto descritto in precedenza; altri autori [18], invece, la trovarono anche tra i 200 e i 400 metri.

La WIW si genera, comunque, durante il periodo di convezione invernale nell'area nord del bacino mediterraneo occidentale come risultato di un raffreddamento superficiale della AW e dei processi di mescolamento con la LIW sottostante [22] [23] [10]. Generalmente la WIW forma una porzione della colonna d'acqua con la stessa direzione di flusso della AW [24].

Nel Marzo 2009, inoltre, è stata osservata un'acqua calda e relativamente più dolce. Essa si trova tra i 100 e i 200 metri di profondità col suo punto più ampio, ma il *core* è stato trovato a 120-160 metri di profondità. Il suo segnale cambia significativamente col tempo, essendo ben sviluppato e più caldo in inverno e meno marcato in estate ed autunno. Quest'acqua, che è stata associata all'acqua ionica, IW [8] è caratterizzata da un massimo relativo di temperatura (T_{\max}) che varia da 14.6°C a 14.8°C e corrisponde alla isopica di 28.7 [17]. Le sue caratteristiche sono molto simili a quelle osservate nel Marzo 2003 da [10].

La presenza della IW, tra la AW e la parte superiore della LIW, è stata riscontrata nella parte ovest dello stretto di Sicilia, con una direzione est-ovest [10].

B. Circolazione intermedia

La LIW si forma principalmente nel settore nord-orientale del bacino levantino durante l'inverno, come risultato di processi di raffreddamento ed evaporazione [25].

La LIW entra nel Canale di Sicilia attraverso la soglia di Medina [26].

Il *core* della LIW è caratterizzato da un massimo di salinità collocato tra i 200 metri e i 350 metri di profondità [10].

Studi recenti [12] mostrano come si sia registrato un generale incremento nei valori di salinità della LIW dal 1998 al 2013, specialmente negli anni 2007 e 2013, mentre la temperatura e la profondità risultano essere molto più variabili.

Valori medi di S_{\max} per la LIW in un range compreso tra 38.73 e 38.86 ed una $T_{S_{\max}}$ che varia da 13.95°C a 14.57°C sono stati osservati da [12], dati che si trovano in pieno accordo con quanto riportato anche in studi precedenti [13].

L'intera LIW si muove nel Mar Tirreno costretta dalle caratteristiche topografiche e dall'effetto di Coriolis e parzialmente mescolata con le acque dello strato superiore e dello strato inferiore, diventando più salata [27].

Il flusso della LIW non è costante, ma è soggetto ad una variabilità stagionale, calcolata essere di 2 o 3 volte più alta in inverno (3.2Sv) rispetto alla stagione estiva (1.5Sv) [28] [4].

Nella parte orientale del Canale di Sicilia, ossia dal 15° E, è stata registrata da vari autori, in diversi anni, la presenza di

una ulteriore massa d'acqua che ha origine nel Mar Egeo. Quest'acqua, la Cretan Intermediate Water (CIW), è caratterizzata da valori leggermente più alti di salinità rispetto alla LIW, una temperatura potenziale di 14.5-15°C ed una densità minore di 29.1 kg m⁻³ [12].

C. Circolazione profonda

Sebbene il bacino centrale, occupando una significativa porzione dello stretto, abbia una profondità media di circa 800 metri, in diverse fosse può essere anche più profondo, raggiungendo i 1700m [13]. Durante la metà degli anni '90 è stato riscontrato un significativo volume di transitional Eastern Mediterranean Deep Water (tEMDW) al di sotto della LIW [27], che rappresenta il risultato del mescolamento tra la LIW, la vecchia EMDW (Eastern Mediterranean Deep Water) e la nuova EMDW [29]. Queste acque mostrano una temperatura e una salinità più basse rispetto alla LIW. La LIW e la tEMDW escono dallo stretto di Sicilia ed entrano nel Mar Tirreno come due vene indipendenti. La tEMDW è una parte dello strato più superficiale delle acque profonde del mar Ionio, che entra attraverso la soglia est del Canale di Sicilia, si abbassa sul fondo data la sua elevata densità e segue la topografia di fondo come una corrente densa e profonda [17].

È stato inoltre dimostrato, da alcuni autori [27], che la tEMDW essendo più densa delle acque residenti, sprofonda generando una intensa cascata, dal momento che essa scende da circa 200m a più di 1500m di profondità.

Nello Stretto di Sicilia la tEMDW ha un *core* caratterizzato da una temperatura minima di 13.63°C, una salinità di 38.73 e una densità di 29.15 kg m⁻³, sebbene si sia registrato, negli ultimi anni, un incremento in questo strato d'acqua di fondo, sia per quanto riguarda la temperatura potenziale che la salinità [12].

II. MATERIALI E METODI

I dataset analizzati in questo lavoro sono stati acquisiti durante due diverse campagne oceanografiche condotte nell'anno 2013 nel Canale di Sicilia, una estiva "Ancheva 2013" ed una autunnale "Ichnussa 2013".

Per meglio comprendere i pattern di circolazione dell'acqua atlantica che entra nel Canale di Sicilia e dell'acqua Levantina che lo attraversa nello strato sottostante, i dati raccolti durante la campagna Ancheva 2013, condotta nel mese di Giugno a bordo della nave oceanografica "G. Dallaporta" (Fig. 4), sono stati integrati/accoppiati con quelli relativi alla campagna di misura Ichnussa 2013 (Fig. 5), condotta a bordo della R/V "Urania", nel periodo Ottobre 2013.

Durante la campagna di ricerca sono state effettuate misurazioni dei parametri fisico-chimici della colonna d'acqua con sonda multiparametrica SEABIRD. La sonda multiparametrica è stata calata in mare a nave ferma, i sensori collegati al CTD rilevavano pressione (db), temperatura (°C), conducibilità (ms-1), fluorescenza, ossigeno disciolto, trasmissione della luce, SPAR e PAR.

Sulla base dei profili verticali di temperatura e salinità, ottenuti attraverso lo studio dei parametri chimico-fisici misurati durante le calate CTD in corrispondenza dei punti di

campionamento indicati nelle Figure 4a e 5a, è stato possibile effettuare una caratterizzazione delle masse d'acqua che attraversano il canale di Sicilia.

III. RISULTATI

Una massa d'acqua è definita dalla sua temperatura e salinità prese come parametri conservativi alterati solo dal mescolamento [30].

Sebbene non esista una pratica comune accettata nella terminologia delle masse d'acqua, è comunque generalmente accettato che il "tipo d'acqua" si riferisce ad un singolo punto su un diagramma caratteristico (come può esserlo, ad esempio, il diagramma θ -S), mentre invece la "massa d'acqua" si riferisce ad alcune porzioni o segmenti delle curve caratteristiche che descrivono le proprietà del *core* di quella massa d'acqua. La presenza di determinate masse d'acqua così come la loro distribuzione spaziale sarà discussa in questo articolo analizzando i diagrammi θ -S corrispondenti all'area oggetto di studio, i quali si rivelano, a tal proposito, un utile strumento di indagine.

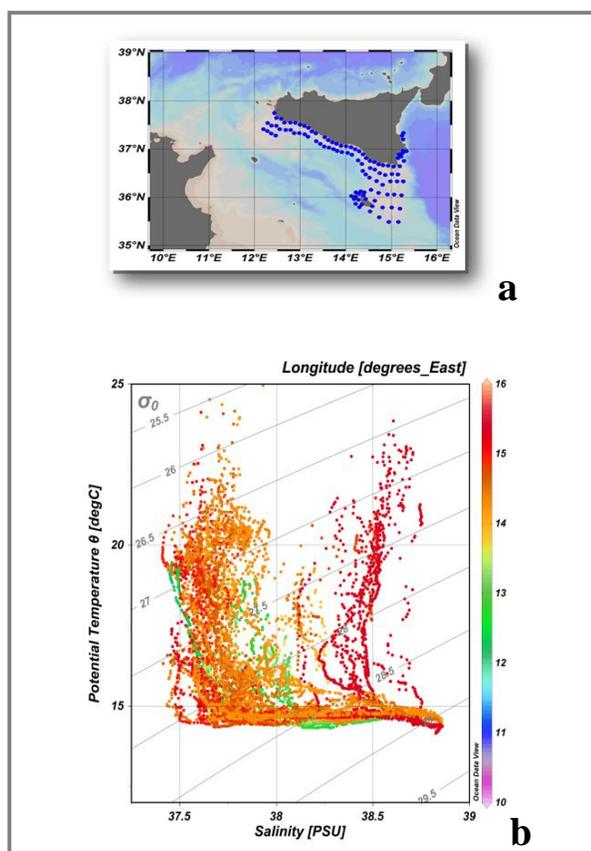


Fig. 4: Punti di campionamento della campagna "Ancheva 2013" che si è svolta nel mese di Giugno 2013 (a) e il corrispettivo diagramma θ -S (b), che correla la densità ai valori CTD osservati di temperatura e salinità

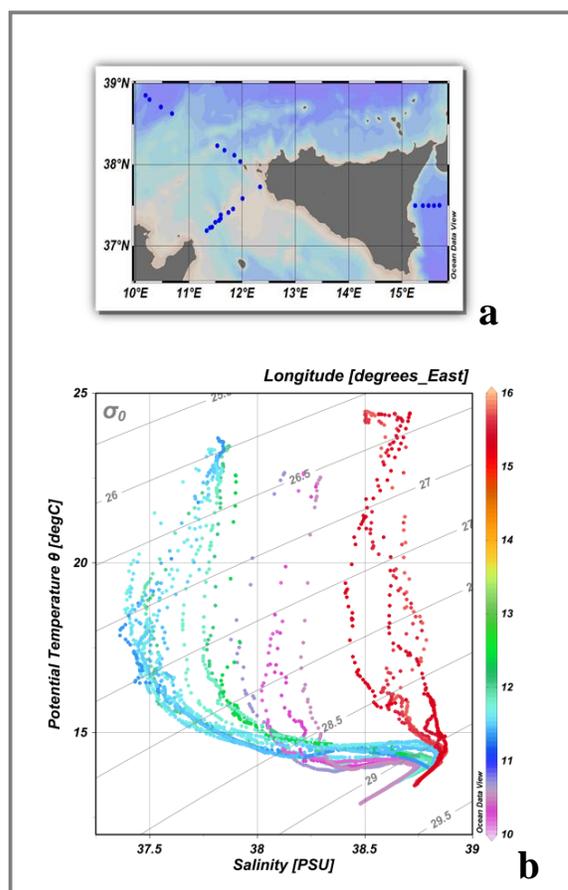


Fig. 5: Punti di campionamento della campagna "Ichnussa 2013" che ha avuto luogo nel mese di Ottobre 2013 (c) e il corrispettivo diagramma θ -S (d).

Il diagramma θ -S correla la densità ai valori osservati di temperatura e salinità. Per ovviare al problema dovuto al mescolamento e al riscaldamento e/o raffreddamento degli strati superficiali che si verifica in determinate stagioni dell'anno, tali diagrammi sono stati separati in relazione alle due differenti campagne di misura di cui fanno parte; campagne che sono state effettuate entrambe nel 2013 ma in periodi dell'anno diversi (Figg. 4b, 5b).

Il diagramma mette in evidenza, in base ad una prima e rapida analisi, la presenza di una massa d'acqua superficiale di origine atlantica individuabile dai minimi di salinità: la MAW; una superficiale più salata la cui presenza è possibile osservare verso est a partire dal 15°E di longitudine: la ISW; ed una intermedia di origine levantina messa in evidenza da un massimo assoluto di salinità: la LIW. Le sopraccitate masse d'acqua, assieme ad altre riscontrate dopo un'attenta analisi dei diagrammi θ -S ed in seguito ad una accurata e prolungata ricerca bibliografica, verranno di seguito discusse con maggiore attenzione.

A. Acqua superficiale

Con lo scopo di seguire ed esaminare il flusso dell'acqua atlantica che entra nel Canale di Sicilia, sono state costruite delle isosuperfici a diverse profondità, per quanto riguarda i profili di temperatura potenziale e salinità (Fig. 6). Tali isosuperfici, come si può notare dalla figura, mettono in evidenza sia a 5m che a 35m di profondità alcuni minimi relativi di salinità che rispecchiano quanto riportato in bibliografia riguardo la traiettoria della AIS, il cui *core* viene identificato dal minimo di salinità approssimativamente intorno ai 35-40 metri di profondità [12].

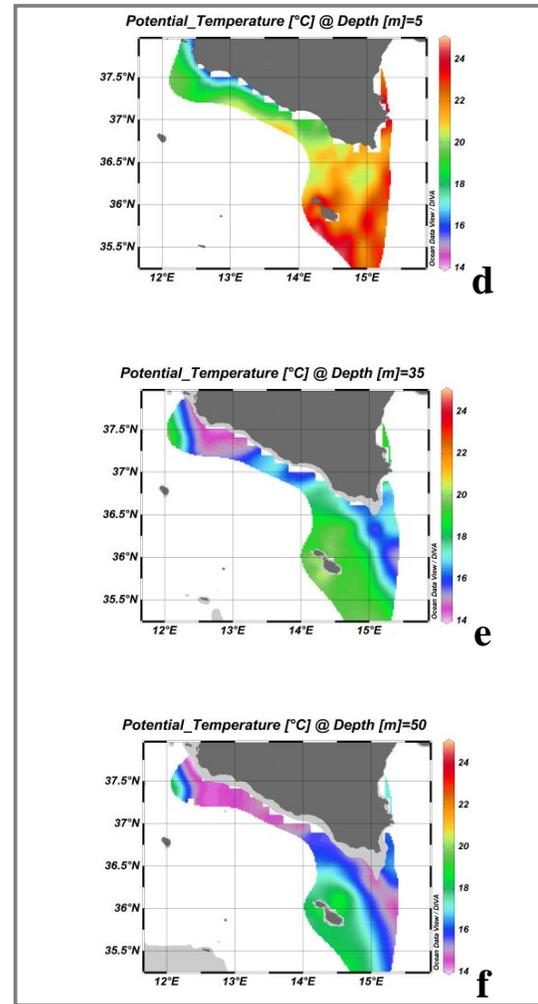
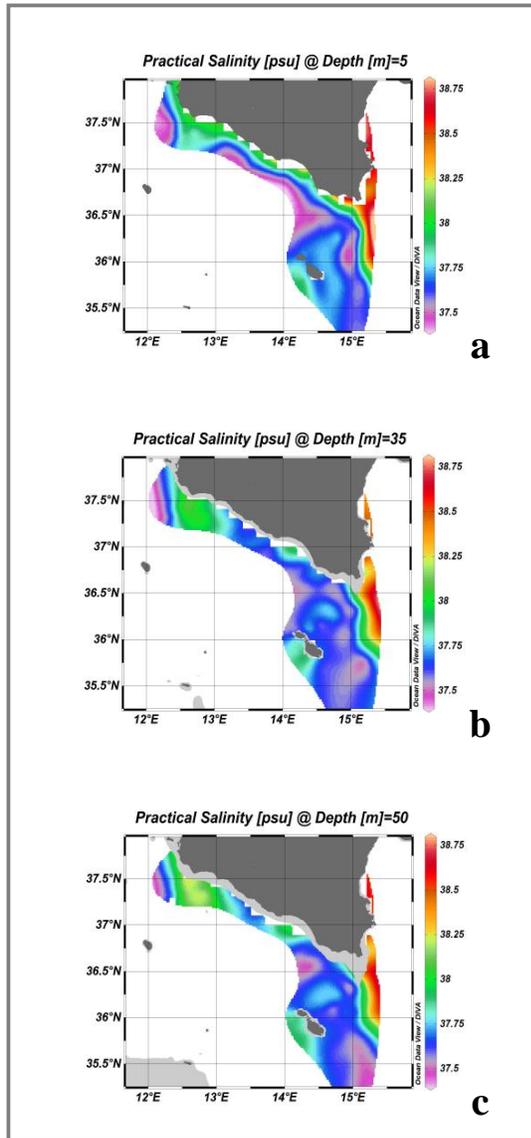


Fig. 6: Isosurface di salinità (a, b, c) e di temperatura potenziale (d, e, f) relative alla campagna di misura Ancheva 2013 condotta nel canale di Sicilia e riferite a tre diverse profondità: 5 metri (a, d), 35 metri (b, e), 50 metri (c, f).

Dai profili CTD analizzati per i valori di salinità e temperatura potenziale (Fig. 7) lungo il transetto Cape Bon-Mazara del Vallo effettuato durante la campagna Ichnussa 2013, è possibile osservare il minimo di salinità intorno ai 50 metri di profondità nelle vicinanze della costa tunisina, mentre è quasi del tutto assente, o comunque poco marcato, in prossimità della costa siciliana. Questa evidenza può essere spiegata tenendo presente che il periodo di campionamento della campagna di riferimento è Ottobre e in questo periodo la ATC è più intensa rispetto alla AIS [3] [9] [10]. Il minimo di salinità risulta ancora più evidente dal diagramma θ -S corrispondente (valori cerchiati in rosso nella Fig.7 a).

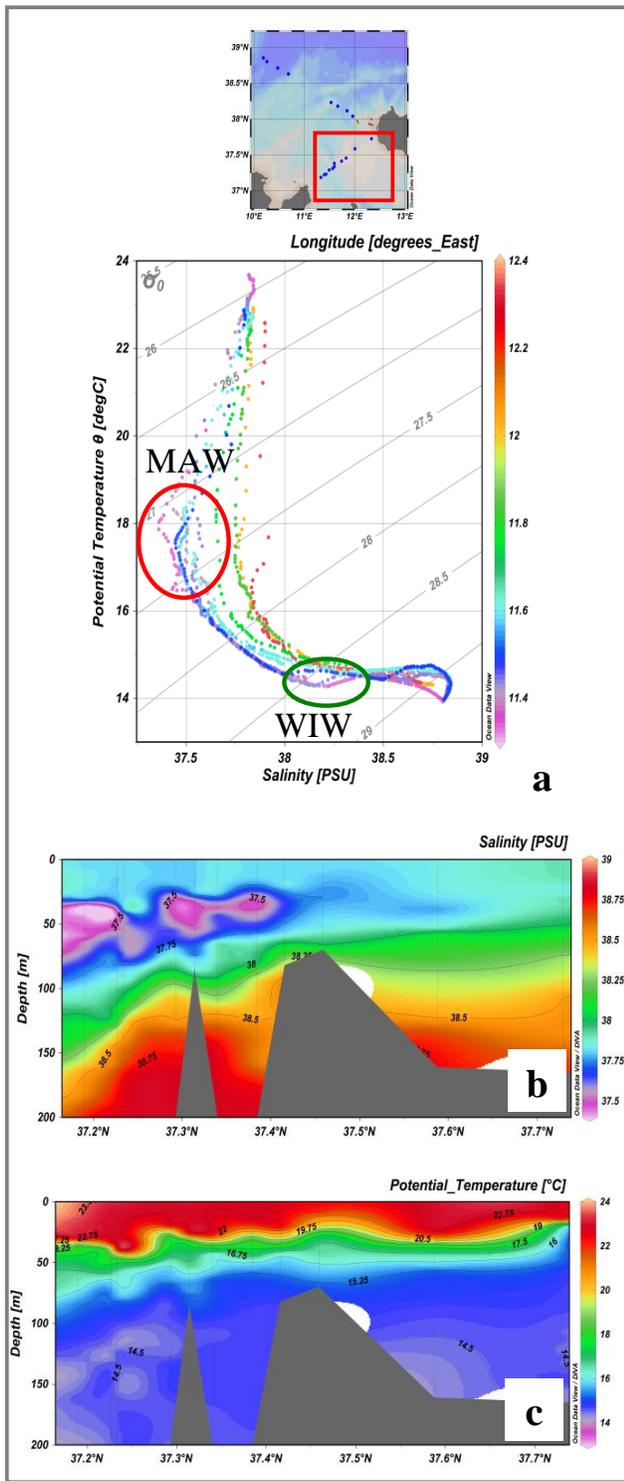
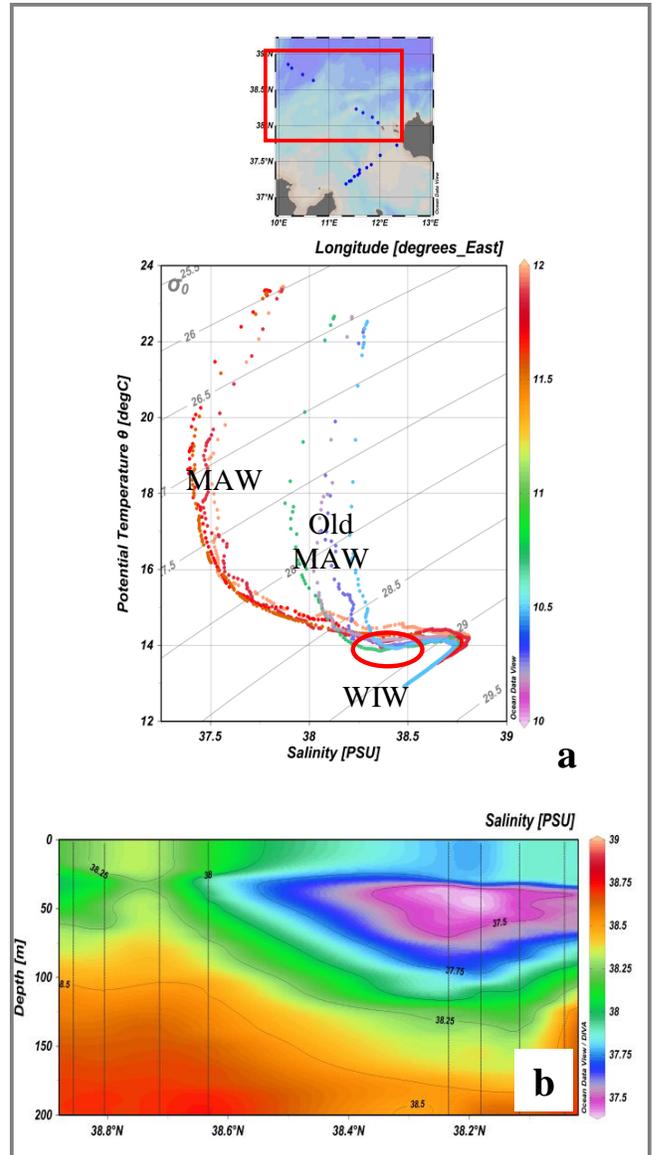


Fig. 7. a: Diagramma θ -S relativo al transetto Cape Bon-Mazara del Vallo effettuato durante la campagna Ichnussa 2013. b, c: Profili CTD di salinità (b) e di temperatura potenziale (c) dei primi 200 metri di profondità, relativi alle stazioni presenti nel riquadro rosso della figura in alto.

A condizione che bassi valori di S_{min} corrispondono ad una MAW più giovane, è stato osservato che la MAW entra nell'area di studio da ovest in stretta vicinanza alla costa algerina; a circa $11^{\circ}E$ la vena di bassa salinità gira verso sud intorno a Cape Bon (Fig. 7).

È evidente, invece, dalla figura 8b il ramo della MAW che fluisce a Nord-Est verso il Tirreno lungo la costa siciliana con valori di salinità pari a 37.5 PSU.

Esiste una chiara evidenza di un flusso di ritorno della suddetta MAW dal mar Tirreno, come dimostrato in [31], formando probabilmente un vortice ciclonico a scala di bacino nel Tirreno e ritornando verso il Canale di Sardegna [21] [31]. Gli alti valori di S_{min} a Sud-Est della Sardegna superano i 37.8 PSU suggerendo che questa MAW sia abbastanza vecchia.



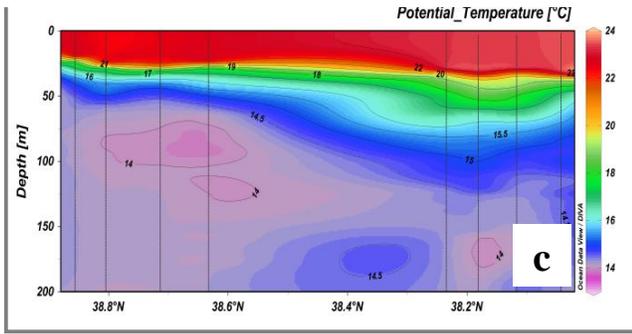


Fig. 8. a: Diagramma θ -S relativo al transetto Sardegna-Sicilia effettuato durante la campagna Ichnussa 2013. b, c: Profili CTD di salinità (b) e di temperatura potenziale (c) dei primi 200 metri di profondità, relativi alle stazioni presenti nel riquadro rosso della figura in alto.

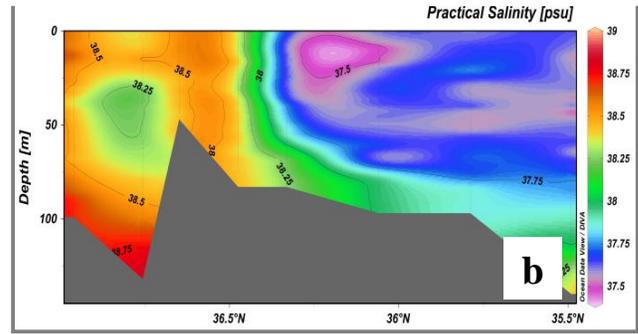


Fig. 9. a: Diagramma θ -S relativo ai punti di campionamento indicati nella mappa effettuata durante la campagna estiva Ancheva 2013. b: Profilo CTD di salinità relativo alla sezione trasversale Sicilia-Malta cerchiata in rosso nella mappa.

Spostandoci invece verso est, nel Canale di Malta, è possibile notare intorno al 15°E di longitudine la simultanea presenza di acqua più dolce di origine atlantica (AW) e di acqua ionica superficiale (ISW) più salata, come si può notare dal diagramma θ -S (Fig. 9a). Nello specifico si tratta del ramo della AIS che fluisce verso est lungo la costa siciliana portando con sé acqua atlantica più dolce attraverso il canale di Malta (Fig.9 a, b).

Il contrasto in temperatura della AIS in uscita con il più caldo mar Ionio produce quello che viene chiamato Fronte Maltese [32], visibile dall'immagine satellitare di SST riportata in figura 10.

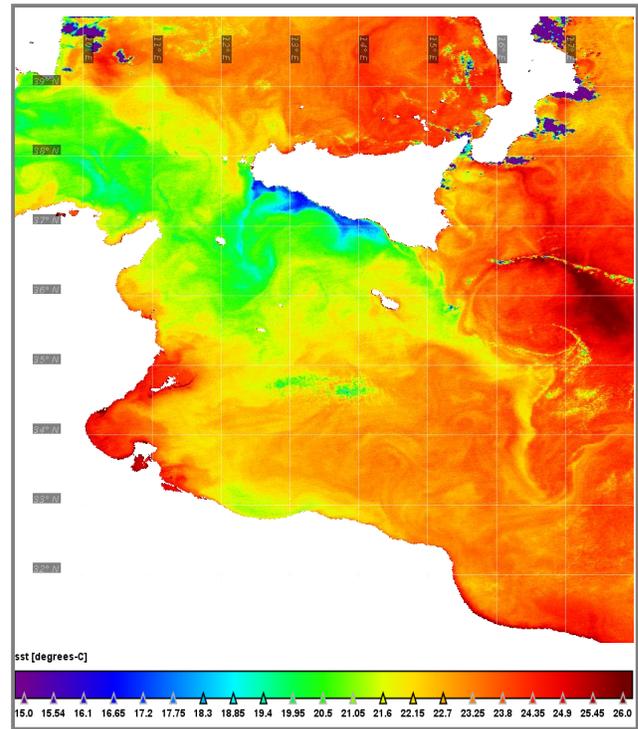
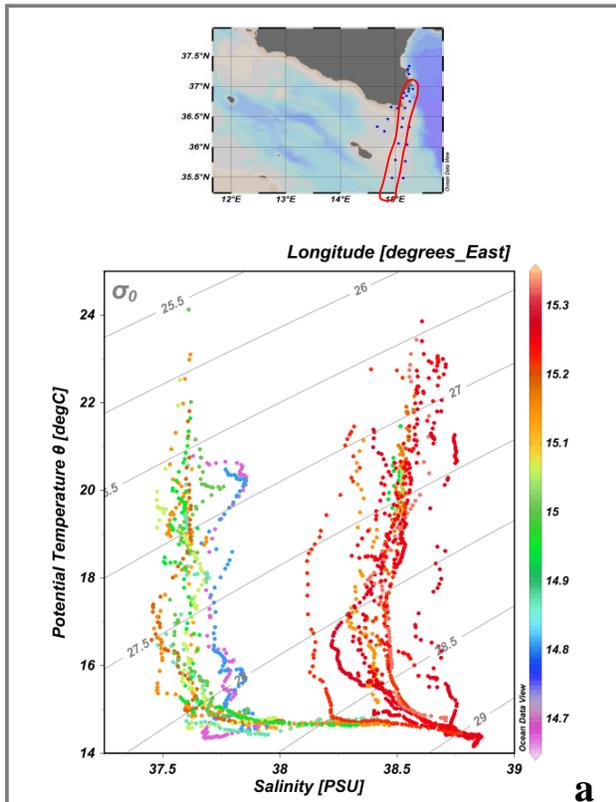


Fig. 10: Immagine satellitare della Sea Surface Temperature (SST) del Canale di Sicilia relativa al mese di Giugno 2013 che corrisponde al medesimo periodo della campagna di misura "Ancheva 2013"

B. *Acqua intermedia*

La principale massa d'acqua intermedia che attraversa il Canale di Sicilia e si riversa nel Tirreno, è rappresentata dall'acqua levantina (LIW). Quest'acqua è individuabile dal massimo di salinità (S_{max}) che è stato osservato, in questo studio, lungo il transetto Cape Bon-Mazara del Vallo ad una profondità compresa tra i 200 e 300 metri e con un valore di $S_{max}=38.84$ PSU (Fig. 11), in accordo con risultati ottenuti in studi precedenti [21], dove i più alti valori di S_{max} (38.8 psu) sono stati trovati vicino a Pantelleria.

In base ai risultati ottenuti nel lavoro di [17], inoltre, verso nord-ovest, la S_{max} decresce rapidamente di circa 0.1 PSU quando si avvicina al banco di Skerki, indicando un forte mescolamento verticale.

Dai risultati ottenuti nel presente lavoro è comunque evidente una suddivisione del flusso che avviene, ovviamente, nel canale di Sardegna, dove una lingua di alta salinità è annessa alla piattaforma ovest della Sardegna e un'altra si estende a sud attraverso il banco di Galite (Fig. 12).

Tra la AW e la LIW, è stato invece osservato, nel maggio 2005, come descritto in precedenti studi [17], lungo una significativa porzione del passaggio tunisino, un'acqua più fredda ($\theta < 13.8$) ad una profondità di 100-200 metri che corrisponde ad una salinità di 37.9-38.2 PSU. Recentemente è stato osservato [10] che questa nuova massa d'acqua all'interno dello strato di transizione (tra la superficie e lo strato intermedio), nella sezione tra Cape Bon-Mazara del Vallo, è contraddistinta da un minimo relativo di temperatura sul fondo della AW, che è stato associato alla Western Intermediate Water (WIW) [16].

Nella parte occidentale del Canale di Sicilia è stata identificata acqua con caratteristiche della WIW, ma solo in inverno e in primavera e mai in autunno e in estate [21]. Durante la campagna Ichnussa 2013 condotta ad Ottobre e oggetto di questo studio, è stata trovata una rimanenza di quella che potrebbe essere la WIW all'interno del Canale di Sicilia e tra la Sicilia e la Sardegna. Nel primo caso, infatti, è stato osservato lungo il transetto Cape Bon-Mazara del Vallo un minimo relativo di temperatura ($\theta \approx 14.5$) in vicinanza della costa tunisina, ad una profondità compresa tra 100-150 metri, tra l'acqua atlantica e quella levantina (Fig. 7). Allo stesso modo, segnali di quella che potrebbe essere la WIW sono stati osservati lungo il transetto Sardegna-Sicilia con un minimo relativo di temperatura $\theta \approx 14$ tra 100 e 150 metri di profondità e per lo più in vicinanza della costa sarda (Fig. 8).

Data la differenza di valori abbastanza significativa rispetto a quanto riportato in bibliografia, è possibile ipotizzare che la WIW segua un ciclo stagionale e che quindi quanto osservato in questo studio non sia altro che una rimanenza di quella che è la WIW nel canale di Sicilia. Secondo quanto riportato in un precedente lavoro [21], infatti, la WIW entra nel canale in inverno/primavera quando il flusso della MAW diretto verso est è più forte, e viene conseguentemente mescolato in estate e autunno perdendo quindi in parte le sue proprietà.

C. Acqua profonda

Seguendo le indicazioni di [33] e le proposte di [34], la tEMDW è una parte dello strato d'acqua profondo più superficiale del mar Ionio, che entra attraverso la soglia orientale del canale Tunisia-Sicilia e segue la topografia di fondo come una corrente densa e profonda. Questa si trova al di sotto della LIW ed è caratterizzata da valori di salinità e temperatura più bassi rispetto a quest'ultima.

La LIW e la tEMDW escono dallo stretto di Sicilia ed entrano nel Mar Tirreno come due vene indipendenti (Fig. 3). Secondo quanto descritto da [12], quest'acqua ha un $T_{min} = 13.63^\circ\text{C}$, una salinità pari a 38.73 PSU ed una

densità $\sigma = 29.15$, sebbene si sia registrato, dal 1998 al 2013, un graduale aumento nei valori di temperatura (13.8°C) e di salinità (38.77 PSU).

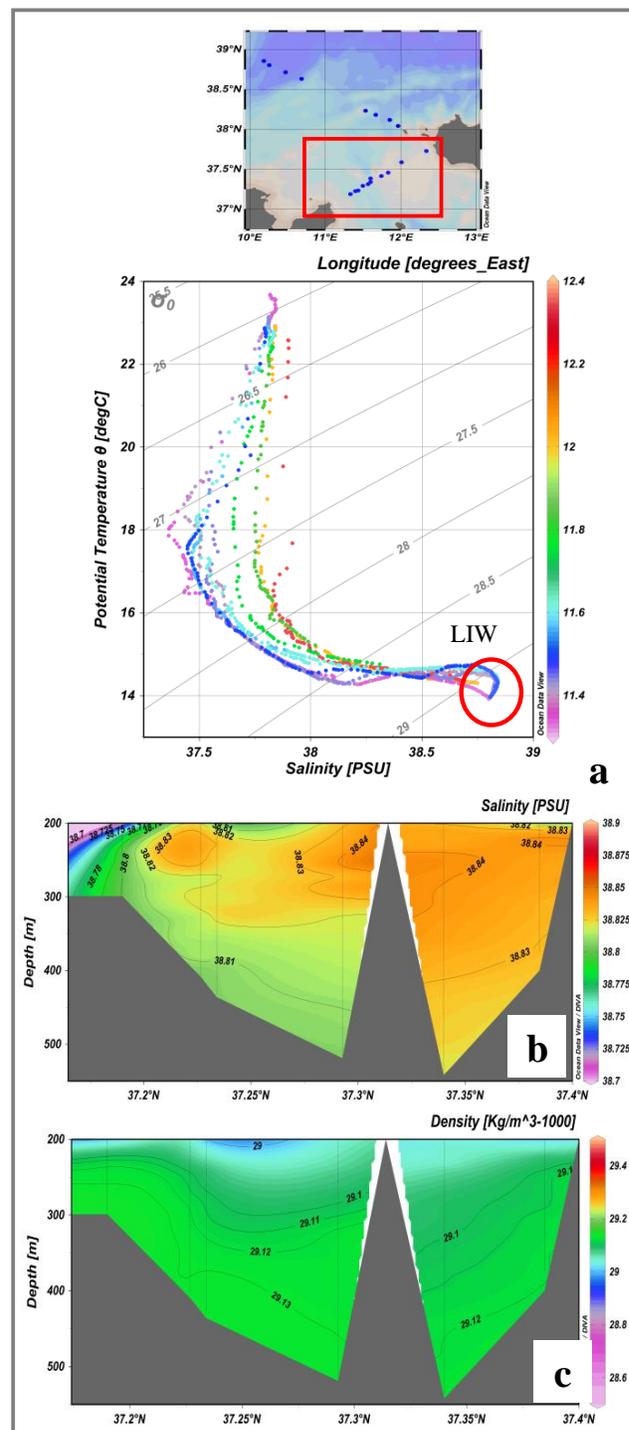


Fig. 11: a: Diagramma θ -S relativo al transetto Cape Bon-Mazara del Vallo effettuato durante la campagna Ichnussa 2013. b, c: Profili CTD di salinità (b) e densità (c) dai 200 metri di profondità al fondo per meglio mettere in evidenza la presenza di masse d'acqua intermedie. Si noti, inoltre, che nei profili verticali si arriva fino al 37.4°N di latitudine, poiché per le stazioni più vicine alla costa siciliana la batimetria non supera i 200 metri.

Nel presente studio, segnali della tEMDW sono stati trovati durante la campagna Ichnussa 2013 lungo il transetto Sardegna-Sicilia e per lo più in prossimità della Sardegna, con valori che sono in accordo con quanto riportato da [12] (Fig. 12).

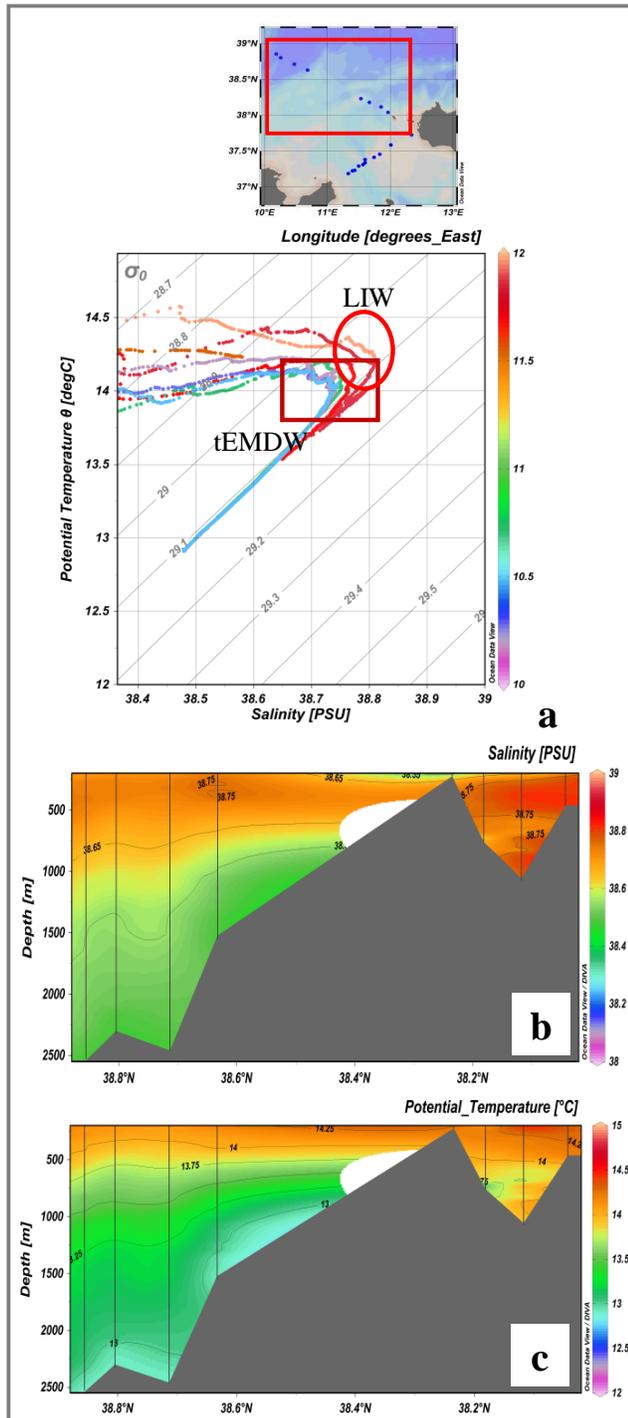


Fig. 12. a: Diagramma θ -S relativo al transetto Sardegna-Sicilia effettuato durante la campagna Ichnussa 2013. b, c: profili CTD di salinità (b) e di temperatura potenziale (c) dai 200 metri di profondità al fondo.

IV. CONCLUSIONI

I dataset idrologici presenti in bibliografia coprono un ampio intervallo temporale. Questo ci ha permesso, insieme con le misure analizzate nel presente lavoro e riferite all'anno 2013, di confermare la presenza nel Canale di Sicilia di determinate masse d'acqua, strutture permanenti e semi-permanenti e di evidenziare la loro variabilità annuale.

Nella valutazione di una eventuale variabilità annuale delle caratteristiche fisiche delle masse d'acqua che attraversano il canale è stato comunque importante considerare la limitazione imposta dal fatto di avere due diverse campagne di misure effettuate in due distinte stagioni (ANCHEVA 2013-GIUGNO, ICHNUSSA 2013-OTTOBRE).

Le misure effettuate confermano comunque la presenza di acqua atlantica che entra nel Canale di Sicilia con valori di $S_{\min}=37.5$ psu, la cui presenza, nel mese di Ottobre, è più marcata in vicinanza della costa Tunisina. Dallo studio della variabilità di S_{\min} , diversi autori hanno confermato nei loro studi l'ipotesi di un incremento dei valori di salinità per l'AW, in entrata nel canale, a partire dal 2003 [17].

I risultati ottenuti in questo lavoro confermano ulteriormente questa ipotesi.

Viene ulteriormente confermata anche la presenza di una old MAW come flusso di ritorno dal Tirreno centrale lungo le coste sud est della Sardegna.

Nello strato intermedio, la presenza dell'acqua levantina è messa in evidenza dai valori di S_{\max} (38.84 psu), valori che diminuiscono, nel flusso in uscita, in corrispondenza del banco di Skerki a causa probabilmente di un mescolamento verticale.

I pattern di salinità hanno messo anche in evidenza la presenza di un fronte termohalino ad est dello stretto di Sicilia (Figg. 9b, 10), in corrispondenza del canale di Malta (intorno al 15°E), il che indica una sorta di barriera fisica alle dinamiche di circolazione superficiale.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Castellari, S., Pinardi, N., Leaman, K.: A model study of air-sea interactions in the Mediterranean sea. *J. Marine System*, 18, 89-114, 1998.
- [2] Pinardi, N. and Masetti, E.: Variability of the large scale general circulation of the Mediterranean sea from observations and modelling: a review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 158, 153-173, 2000.
- [3] Sorgente, R., Drago, A. F., and Ribotti, A.: Seasonal variability in the Central Mediterranean Sea circulation. *Ann. Geophys.*, 21, 299-322, doi:10.5194/angeo-21-299-2003, 2003.
- [4] Astraldi, M., Gasparini, G. P., Sparnocchia, S., Moretti, M., and Sansone, E.: The characteristics of the water masses and the water transport in the Sicily Strait at long time scales the eastern and western Mediterranean through the Strait of Sicily. *Bulletin de l'Institut Océanographique, Monaco, CIESM Science Series n 2*, 95-115, 1996.
- [5] Robinson, A. R., Sellschopp, J., Warn-Varnas, A., Leslie, W. G., Lozano, C. J., Haley Jr., P. J., Anderson, L. A., and Lermusiaux, P. F. J.: The Atlantic Ionian Stream. *J. Mar. Syst.*, 20, 129-156, 1999.
- [6] Pierini, S. and Rubino, A.: Modeling the Ocean Circulation in the Area of the Sicily Strait: the Remotely Forced Dynamics. *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 1297-1412, 2001.
- [7] Béranger, K., Mortier, L., Gasparini, G.P., Gervasio, L., Astraldi, M., Crépon, M.: The dynamics of the Sicily Strait: a comprehensive study from observations and models. *Deep Sea Res.* II51, 411-440, 2004.
- [8] Lermusiaux, P. F. J. and Robinson, A. R.: Features of dominant mesoscale variability, circulation patterns and dynamics in the Strait of Sicily. *Deep-Sea Res.* I, 48, 1953-1997, 2001.
- [9] Sorgente, R., Olita, A., Oddo, P., Fazioli, L., and Ribotti, A.: Numerical simulation and decomposition of kinetic energy in the Central Mediterranean: insight on mesoscale circulation and energy conversion. *Ocean Sci.*, 7, 503-519, doi:10.5194/os-7-503-2011, 2011.
- [10] Ben Ismail, S., Sammari, C., Gasparini, G. P., Béranger, K., Brahim, M., and Aleya, L.: Water masses exchanged through the Channel of Sicily: evidence for the presence of new water masses on the Tunisian side of the channel. *Deep-Sea Res.* Pt. I, 63, 65-81, 2012.
- [11] Garcia Lafuente, J., Vargas, J. M., Criado, F., Garcia, A., Delgado, J., and Mazzola, S.: Assessing the variability of hydrographic processes influencing the life cycle of the Sicilian Channel anchovy, *Engraulis encrasicolus*, by satellite imagery. *Fish. Oceanogr.*, 14, 32-46, 2005.
- [12] Bonanno A., Placenti F., Basilone G., Mifsud R., Genovese S., Patti B., Di Bitetto M., Aronica S., Barra M., Giacalone G., Ferreri R., Fontana I., Buscaino G., Tranchida G., Quinci E. M. and Mazzola S.: Variability of water mass properties in the strait of Sicily in summer periodo f 1998-2013. *Ocean Sci. Discuss.*, 11, 811-837, doi:10.5194/osd-11-811-2014, 2014.
- [13] Gasparini, G. P., Ortona, A., Budillon, G., Astraldi, M., and Sansone, E.: The effect of the Eastern Mediterranean transient on the hydrographic characteristics in the Straits of Sicily and in the Tyrrhenian Sea. *Deep-Sea Res.* Pt. I, 52, 915-935, 2005.
- [14] Sammari, C., Millot, C., Taupier-Letage, I., Stefani, A., and Brahim, M.: Hydrological characteristics in the Tunisian-Sardinia-Sicily area during spring 1995. *Deep-Sea Res.* Pt. I 46, 1671-1703, 1999
- [15] Poulain, P. M. and Zambianchi, E.: Surface circulation in the central Mediterranean Sea as deduced from Lagrangian drifters in the 1990s. *Cont. Shelf Res.*, 27, 981-1001, 2007.
- [16] Salat, J., Font, J., 1987. Water mass structure near and offshore the Catalan coast during the winters of 1982 and 1983. *Ann. Geophys.* 1B, 49-54.
- [17] Ben Ismail, S., Schroeder, k., Sammari, C., Gasparini, G. P., Borghini, M., and Aleya, L.: interannual variability of water mass properties in the Tunisia-Sicily channel. *J. Marine System*, 135, 14-28, 2014.
- [18] Perkins, H., Pistek, P. Circulation in the Algerian Basin during June 1986. *J. Geophys. Res.* 95, 1577-1585, 1990.
- [19] Bouzinac, C., Font, J., Millot, C. Hydrology and currents observed in the Channel of Sardinia during the PRIMO-1 experiment from November 1993 to October 1994. *J. Mar. Syst.* 20, 333-355, 1999.
- [20] Katz, E.J. The Levantine Intermediate Water between the Strait of Sicily and the Strait of Gibraltar. *Deep-Sea Res.* 19, 507-520, 1972.
- [21] Onken, R. and J. Sellschopp, Water masses and circulation between the eastern Algerian basin and the Strait of Sicily in October 1996. *Oceanol. Acta*, 24, 151-166, 2001.
- [22] Conan, P. and Millot, C.: Variability of the northern current off Marseilles, western Mediterranean Sea, from February to June 1992. *Oceanol. Acta*, 18, 193-205, 1995.
- [23] Gasparini, G. P., Zodiatis, G., Astraldi, M., Galli, C., and Sparnocchia, S.: Winter Intermediate Water lenses in the Ligurian Sea. *J. Marine Syst.*, 20, 319-332, 1999.
- [24] Millot, C.: Circulation in the Western Mediterranean Sea. *J. Mar. Syst.*, 20(1-4), 423-442, 1999.
- [25] Nittis, K. and Lascaratos, A.: Diagnostic and prognostic numerical studies of LIW formation. *J. Marine. Syst.*, 18, 179-195, 1998.
- [26] Warn-Varnas, A., Sellschops, J., Haley, Jr., P. J., Leslie, W. G., and Lozano, C. J.: Strait of Sicily water masses. *Dyn. Atmosph. Oceans*, 29h, 437-469, 1999.
- [27] Sparnocchia, S., Gasparini, G. P., Astraldi, A., Borghini, M., and Pistek, P.: Dynamics and mixing of the Eastern Mediterranean outflow in the Tyrrhenian Sea. *J. Marine Systems*, 20, 301-317, 1999.
- [28] Manzella, G. M. R., Gasparini, G. P., and Astraldi, M.: Water exchange between the eastern and western Mediterranean through the Strait of Sicily. *Deep-Sea Res.* I, 35, 1021-1035, 1988.
- [29] Roether, W., Manca, B.B., Klein, B., Bregant, D., Georgopoulos, D., Beitzel, V., Kovacevic, V., Lucchetta, A. Recent changes in eastern Mediterranean deep waters. *Science* 271, 333-335, 1996.
- [30] Budillon, G., Lo Bue, N, Siena, G., Spezie, G.: Hydrographic characteristics of the water masses and circulation in the Northern Ionian Sea. *Deep Sea Res.* II(57), 441-457, 2010.
- [31] Onken, R., Robinson, A. R., Lermusiaux, P. F. J., Haley, P. J., and Anderson, A. L.: Data-driven simulations of synoptic circulation and transports in the Tunisian-Sardinia-Sicily region. *J. Geophys. Res.* 108(C9), 8123-8136, 2003.
- [32] Drago, A. F., Sorgente, R., Ribotti, A.: A high resolution hydrodynamic 3-D model simulation of the Malta shelf area. *Annales geophysicae*, 21, 323-344, 2003.
- [33] Pollak, M.J. The sources of deep water of the eastern Mediterranean Sea. *J. Mar. Res.* 10, 128-152, 1951.
- [34] Astraldi, M., Gasparini, G.P., Vetrano, A., Vigudelli, S. Hydrographic characteristics and interannual variability of water masses in the central Mediterranean: a sensitivity test for long-term changes in the Mediterranean Sea. *Deep Sea Res.* I(49), 661-680, 2002.

Individuazione di sorgenti sottomarine nel Golfo di Policastro (Mar Tirreno) ed effetti sulle caratteristiche fisiche della colonna d'acqua

Francesco Ciccone
CNR-Istituto per l'Ambiente Marino Costiero
Calata Porta di Massa - 80133 Napoli

Francesca Budillon
CNR-Istituto per l'Ambiente Marino Costiero
Calata Porta di Massa - 80133 Napoli

Bruno Buongiorno Nardelli
CNR-Istituto per l'Ambiente Marino Costiero
Calata Porta di Massa - 80133 Napoli

Sommario—Il flusso di acqua di origine terrestre che attraverso il fondale marino raggiunge il mare, noto come *Submarine Groundwater Discharge* (SGD), ha un impatto potenzialmente rilevante sull'ambiente marino costiero, in quanto è generalmente caratterizzato da alte concentrazioni di nutrienti e sostanze chimiche, oltre ad avere caratteristiche fisiche differenti dall'acqua di mare. Allo stato attuale è però difficile determinare e quantificare il flusso associato alle sorgenti sottomarine: per tale motivo non esistono molti studi sui loro effetti e sono state trascurate dalla comunità scientifica per molto tempo. Nel presente lavoro sono stati elaborati ed analizzati dati acquisiti con sonda CTD (*Conductivity Temperature Depth*) durante la campagna oceanografica "Arcose 2010" nel Golfo di Policastro (Mar Tirreno) in corrispondenza di morfologie del fondo associabili a punti di emissione di fluidi (*pockmarks*). L'analisi dei dati ha confermato la presenza delle sorgenti sottomarine e ha permesso di mostrare gli effetti dei SGD sulla colonna d'acqua, in un periodo stagionale in cui il regime di flusso è in genere al minimo (fine estate). In particolare, si è osservato un significativo decremento della salinità in corrispondenza dei *pockmarks* principali ed un'intensa attività di mescolamento turbolento associabile a meccanismi di doppia diffusione e convezione.

Parole chiave—*sorgenti sottomarine; CTD; Golfo di Policastro; doppia diffusione; angolo di Turner.*

INTRODUZIONE

Le sorgenti sottomarine vengono spesso indicate con l'acronimo SGD (*Submarine Groundwater Discharge*) che si riferisce a qualsiasi flusso di acqua lungo i margini continentali a prescindere dalla composizione del fluido e dalla forza motrice che ne causa il movimento [1]. Sono esclusi da questa definizione i processi di circolazione idrotermale profonda e fuoriuscita di fluidi in prossimità di margini continentali convergenti.

In questo studio con il termine sorgente sottomarina si intende la fuoriuscita dal fondale marino di acqua meteorica infiltrata nel sottosuolo dagli acquiferi e giunta al fondo mare attraverso cavità, fratturazioni e interstizi dei terreni. Gli SGD hanno impatti rilevanti sull'ambiente marino costiero, sia ecologici che fisici, in quanto sono caratterizzati da alte concentrazioni di nutrienti e sostanze chimiche e possono indurre variazioni sulla circolazione marina a scala locale, quando di portate considerevoli. Allo stato attuale si riscontrano delle complessità nel quantificare il flusso di sorgenti sottomarine; probabilmente per tale motivo non sono stati fatti molti studi sui loro effetti. Per questa ricerca di SGD nel Golfo di Policastro (Mar Tirreno) sono stati utilizzati dati batimetrici e CTD campionati dall'IAMC-CNR di Napoli durante la crociera oceanografica "Arcose 2010", condotta a bordo della N/O Urania del CNR.

Attraverso il software Sea-Bird è stato eseguito il *processing* ed il controllo di qualità dei dati CTD, in modo da visualizzare ed analizzare i dati oceanografici con il software Ocean Data View. Dall'analisi dei dati campionati, in periodo di bassa piovosità, si nota un decremento della salinità in corrispondenza dei *pockmarks*, precedentemente identificati dal DEM del fondale marino, e dei valori dell'angolo di Turner associati a meccanismi di mescolamento turbolento legati a fenomeni di doppia diffusione e convezione. Nelle stazioni circostanti si osservano inoltre, su uno strato intermedio, alcune infiltrazioni di acqua dolce dello spessore di circa 10 m, non distinguibili nei profili di densità, anch'esse associate a processi legati alla doppia diffusione causata da una sorgente profonda, noti in letteratura come *interleaving* [2]

Tali osservazioni hanno consentito di confermare la presenza di sorgenti sottomarine nell'area di studio e di fornire una prima descrizione del loro impatto sulla stratificazione della colonna d'acqua.

I. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Le sorgenti sottomarine che rappresentano l'oggetto di questo studio sono localizzate sulla piattaforma continentale interna al largo di Sapri (Campania, Tirreno meridionale). L'area si inserisce in un settore del margine tirrenico sud-orientale rappresentato dall'alto morfo-strutturale del Cilento, delimitato verso nord-ovest dal bacino del Golfo di Salerno – Piana del Sele e verso sud-est dal bacino del Golfo di Policastro. Entrambi i bacini sono caratterizzati da una pronunciata subsidenza. Il margine tirrenico, la cui individuazione è legata alle fasi di apertura del settore sud-orientale del Tirreno nel Pliocene superiore - Pleistocene [3], è interessato da faglie listriche con blocchi ruotati verso mare e verso terra [4] che determinano la presenza di aree ribassate sulla piattaforma continentale. La scarpata continentale si estende sino alla profondità di 1600 m con pendenze comprese tra 1° e 6°. I pendii sono interessati da diffusi processi di instabilità, da rilievi e da depressioni che conferiscono un'articolata morfologia. Le aree depresse, subsidenti e colmate prevalentemente da depositi pleistocenici, sono delimitate da faglie dirette con andamento appenninico NW-SE e sembrano essere state attive fino al Pleistocene superiore [5].

Il Golfo di Policastro si individua nella porzione meridionale dell'alto morfo-strutturale descritto, la sua articolata morfologia [6] [7] è controllata dalle faglie parallele e perpendicolari al margine [8], individuatesi durante le fasi tettoniche plio-pleistoceniche che hanno provocato la marcata surrezione della catena e l'accentuato ribassamento dell'area tirrenica [9]. L'unità fisiografica principale che caratterizza questo tratto di margine è il Bacino di Sapri, un bacino di scarpata peri-tirrenico ubicato sulla scarpata superiore. Questo bacino è sotteso verso terra (a Nord e ad Est) da una piattaforma continentale ristretta, raccordata da una scarpata continentale dissecata da numerosi canali; inoltre, è delimitato a sud da due dorsali sottomarine, con orientamento meridiano, che costituiscono una soglia alla dispersione dei flussi gravitativi di sedimenti terrigeni dalle aree prossimali [6]. I terreni affioranti nell'area cilentana possono essere ricondotti a due grandi insiemi, diversi per litologia, posizione strutturale e paleogeografia: un insieme di unità terrigene, costituite da torbiditi bacinali argilloso calcaree e argilloso arenacee, di età oligo-miocenica ed una successione carbonatica di piattaforma, nota come piattaforma carbonatica interna dell'Appennino meridionale o unità tettonica Alburno-Cervati [10] [11] [12].

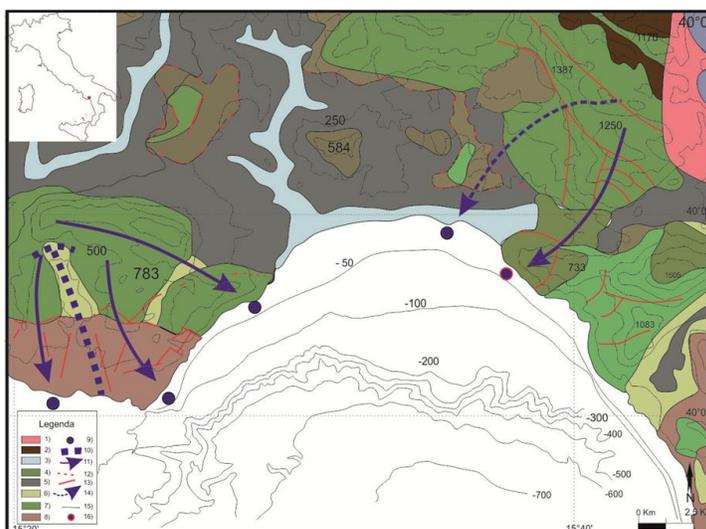


Fig. 1 Scema idrogeologico del Cilento (Campania) da Carta idrogeologica dell'Italia meridionale, ISPRA (modificata)

1) Complesso dolomitico dell'Unità Bulgheria-Verbicario; 2) compl. delle successioni pelitico-calcaree; 3) compl. alluvionale costiero; 4) compl. calcareo dell'Unità Bulgheria-Verbicario; 5) compl. calcareo argillitico dell'Unità Nord-calabrese; 6) compl. dei depositi epiclastici continentali; 7) compl. calcareo dell'Unità Alburno-Cervati-Pollino; 8) compl. dolomitico dell'Unità Monti della Maddalena e Monte Foraporta; 9) sorgente sottomarina; 10) limiti probabili, all'interno di strutture idrogeologiche, delle aree di alimentazione di sorgenti e falde; 11) principali direttrici del flusso idrico sotterraneo all'interno delle strutture idrogeologiche di maggiore rilevanza; 12) Principali faglie, affioranti, presunte o sepolte, maggiormente rilevanti per la ricostruzione dell'assetto idrostrutturale; 13) principali sovrascorrimenti, affioranti e presunti o sepolti, maggiormente rilevanti per la ricostruzione dell'assetto idro-strutturale; 14) principali assi di drenaggio preferenziale identificati dalle ricostruzioni piezometriche; 15) isobate; 16) sorgenti sottomarine captate.

II. MATERIALI E METODI

A. Dati batimetrici e oceanografici

Per questo studio sono stati utilizzati dati batimetrici e oceanografico-fisici raccolti dall'Istituto per l'Ambiente Marino Costiero (IAMC) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), a bordo della nave oceanografica Urania, durante la campagna Arcose nel Golfo di Policastro (Mar Tirreno) a settembre del 2010.

I campionamenti CTD sono stati localizzati in seguito all'analisi del DEM dell'area in studio e dopo un'accurata ricerca bibliografica sulla presenza di sorgenti sottomarine nel Golfo di Policastro. [13]

Nell'area antistante il Monte Bulgheria (Fig.2), i campionamenti sono stati eseguiti parallelamente alla linea di costa, perché è nota dalla letteratura la presenza di sorgenti in tale zona, ed altri in modo random perchè non sono state riscontrate evidenze geomorfologiche particolari dall'analisi del DEM.

Nella parte centrale del Golfo (Fig.3), area prospiciente la città di Sapri (SA), le misure sono state effettuate in corrispondenza di morfologie del fondo associate a punti di emissione di fluidi (*pockmarks*).

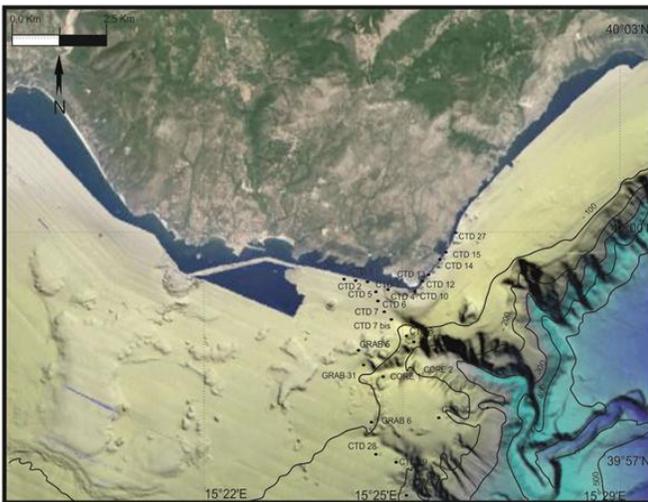


Fig.2 Stazioni di campionamento (Punta Infreschi, SA)



Fig.3 Stazioni di campionamento (Sapri, SA)

I dati batimetrici sono stati acquisiti con lo strumento Kongsberg EM710, un ecoscandaglio Multibeam con una frequenza di 100 kHz. Dai dati raccolti è stato prodotto un *Digital Elevation Model* (DEM) con una risoluzione di 5 m. Un DEM è la rappresentazione della distribuzione delle quote di un territorio, o di un'altra superficie come il fondale marino, in formato digitale. Il DEM viene generalmente prodotto in formato *raster*, associando a ciascun pixel l'attributo relativo alla quota assoluta. Per generare un DEM di un fondale marino vengono utilizzati metodi di geofisica marina basati sull'acustica sottomarina.

Il concetto di base dell'acustica sottomarina è quello di misurare il tempo di ritorno di un segnale acustico riflesso dal fondale marino e di calcolare la distanza corrispondente, conoscendo la velocità di propagazione del segnale. La distanza calcolata è la profondità del fondale.

I segnali acustici vengono emessi e ricevuti da un'ecoscandaglio multifascio meglio conosciuto come *Multibeam*. I dati multibeam acquisiti devono essere processati per raggiungere la più veritiera e accurata rappresentazione del fondale marino sotto forma di DEM.

I dati idrografici sono stati campionati con la sonda multiparametrica CTD 911 plus della Sea Bird, uno strumento utilizzato dai più importanti enti di ricerca del mondo, che consente di campionare ad una frequenza di 24 Hz. La sonda CTD è dotata principalmente di sensori per la misura della conduttività elettrica (da cui si ricava una stima della salinità), della temperatura e della pressione (da cui si stima la profondità), ma si possono installare fino ad otto sensori per la misura di altri parametri, per esempio: fluorescenza, ossigeno disciolto, trasmittanza della luce, radiazione disponibile per la fotosintesi (PAR).

I file in cui sono salvati i dati grezzi (*raw data*), memorizzati in formato esadecimale (con estensione *.hex*), contengono i valori letti direttamente dagli strumenti, che devono quindi ancora essere convertiti nelle variabili fisiche di interesse, e vari metadati, cioè informazioni ausiliari come per esempio il nome della nave e della campagna oceanografica, il nome e la posizione (latitudine e longitudine) del punto di campionamento, l'orario di esecuzione e la profondità massima raggiunta dalla sonda.

I *raw data* acquisiti devono quindi essere processati, in modo da trasformarli in grandezze fisiche, eliminare eventuali dati non validi e convertirli in file facilmente trattabili per le analisi successive (nel nostro caso i dati convertiti in variabili fisiche sono memorizzati in file ASCII con estensione *.cnv*).

I dati possono quindi essere importati in un software che consente di visualizzare serie di dati, creare grafici ed analisi statistiche in modo da avere una rappresentazione completa e più facilmente analizzabile dei parametri misurati. In questo studio è stato utilizzato l'Ocean Data View (ODV), un software che permette di visualizzare ed analizzare serie di dati georeferenziati sia oceanografici che atmosferici, e che permette inoltre di calcolare parametri aggiuntivi derivabili dalle misure disponibili. I dati in formato *.cnv* possono essere automaticamente importati dal software ODV.

B. Processing dei dati CTD

Il *processing* dei dati CTD è stato eseguito con il software *SBE Data Processing* della SeaBird seguendo una procedura standard costituita da 6 passaggi fondamentali:

- **Data Conversion .cnv**
- **Align CTD**
- **Cell Thermal Mass**
- **Filter**
- **Bin Average**
- **Derive**

Il primo passaggio nella conversione dei file *.hex* in *.cnv*, anche se molti utenti decidono di modificare i *raw data* eliminando errori o aggiungere note integrative. La SeaBird consiglia di effettuare prima la conversione in *.cnv* e poi apportare eventuali modifiche, per non rischiare la perdita di dati.

In questa fase il software utilizza il file di configurazione *.xmlcon* dello strumento (lo stesso usato da Seasave V7), che definisce i sensori, i canali del sensore e i coefficienti di calibrazione, per convertire i dati grezzi in unità fisiche.

Molti dati oceanografici (ad esempio salinità, densità, velocità del suono) vengono calcolati dalla misura di temperatura, pressione e conducibilità dell'acqua. La precisione più alta dei parametri derivati si ottiene quando le misure sono realizzate sullo stesso campione di acqua di mare. In primo luogo, i sensori della temperatura e della conducibilità hanno diversi tempi di reazione e sono posizionati in posti diversi della sonda CTD. Le due misure non saranno quindi dello stesso campione di acqua. La mancata corrispondenza si può riscontrare osservando picchi di salinità ed inversioni di densità nei dati processati. Per ovviare a questi errori si esegue il secondo passaggio della procedura di *processing*: il modulo **Align CTD** compensa il disallineamento fisico ed il ritardo di risposta dei sensori ed allinea i dati rispetto alla pressione per garantire che i calcoli di salinità siano realizzati sullo stesso campione di acqua. Il modulo può anche essere usato per allineare i dati di strumenti ausiliari. Ad esempio, per un sensore di ossigeno disciolto, **Align CTD** compensa il ritardo dovuto al tempo di risposta del sensore e al tempo di transito del campione di acqua nell'impianto idraulico.

La misura della conducibilità elettrica dell'acqua è una funzione della temperatura. La cella di conducibilità del sensore è costituita da vetro e plastica, e come tale ha una capacità termica. Quando la cella passa da acqua calda a fredda, l'acqua che passa attraverso di essa è riscaldata leggermente. Viceversa, quando la cella passa da acqua fredda a calda, l'acqua viene leggermente raffreddata. Tale alterazione termica comporta una differenza di temperatura tra l'acqua nella cella di conducibilità e quella misurata precedentemente dal termometro. Questo trasferimento di calore può essere modellato e corretto eseguendo il modulo **Cell Thermal Mass**.

Il modulo **Filter**, che rappresenta il passaggio successivo, è complementare al precedente ed applica un filtro sulle colonne

di dati in modo da eliminare il rumore strumentale che determina rapide variazioni dei parametri misurati rispetto al tempo, evitando di avere dei picchi e dei buchi nella serie temporale.

Bin Average consente di effettuare una media dei dati in intervalli prefissati basati sui valori di pressione, del numero di scansioni o di tempo.

Nel nostro caso i dati sono mediati a intervalli di un dbar (corrispondente circa ad 1 m).

Infine è stato eseguito il modulo **Derive** che utilizza le misure della pressione, della temperatura e della conducibilità contenute nel file .cnv per calcolare i seguenti parametri oceanografici: densità, densità potenziale, volume specifico, anomalia del volume specifico, anomalia geopotenziale, profondità (acqua salata, acqua dolce), salinità, velocità del suono, velocità media del suono, temperatura potenziale (pressione di riferimento = 0,0 decibar), anomalia della temperatura potenziale, conducibilità specifica.

Completata la procedura di elaborazione, i dati sono stati importati in Ocean Data View per effettuare la loro rappresentazione grafica ed analisi. Tale software consente di importare direttamente i file .cnv della SeaBird senza che questi vengano trasformati in altri formati (ASCII).

C. Il fenomeno fisico della doppia diffusione

In alcune regioni dell'oceano, sebbene il profilo di densità sia stabile (acque meno dense si trovano sopra acque più dense) e non siano presenti processi turbolenti di mescolamento causati da interazioni con l'atmosfera o da altri meccanismi puramente dinamici, la colonna d'acqua è soggetta a processi di mescolamento legati alla differente velocità con cui il calore si diffonde rispetto alla salinità. Questo genere di instabilità si verifica perché la diffusione molecolare del calore è circa 100 volte più veloce della diffusione del sale. Questo processo fu scoperto per la prima da Melvin Stern nel 1960, che rapidamente ne capì l'importanza in oceanografia.

Consideriamo due strati sottili spessi pochi metri separati da una forte interfaccia (Fig. 4). Se lo strato superiore è caldo e salato e se quello inferiore è più freddo e meno salato di quello superiore, l'interfaccia diventa instabile anche se lo strato superiore è meno denso di quello inferiore.

Infatti, il calore si diffonde attraverso l'interfaccia più velocemente della salinità, producendo un sottile strato freddo e salato tra i due strati iniziali. Questo strato sottile è più denso di quello meno salato che si trova sotto, e quindi affonda. Dato che lo strato è sottile, il fluido affonda in cilindri di pochi cm di diametro e O(10 cm) di lunghezza, non molto differenti dalle dimensioni delle nostre dita. Questo tipo di struttura è stato infatti chiamato *salt fingers* (letteralmente 'dita salate'). Dato che i due costituenti si diffondono nell'interfaccia, il processo è più genericamente chiamato *doppia diffusione*.

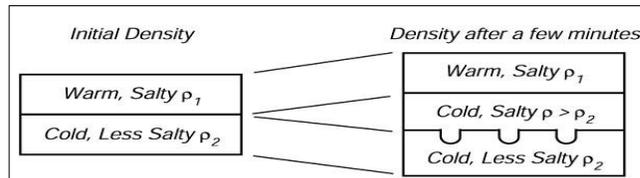


Fig.4 A sinistra: distribuzione verticale iniziale della densità. A destra: dopo un certo tempo, la diffusione di calore porta alla formazione di un sottile strato instabile tra i due strati inizialmente stabili. Il sottile strato instabile affonda nello strato sottostante come *salt fingers*.

Ci sono quattro variazioni in questo schema. Due variabili per due strati portano a quattro possibili combinazioni:

1. Acque calde e salate sopra quelle più fredde e meno salate. Come detto, questo processo è chiamato *salt fingers* e si osserva per esempio nelle acque centrali di un gyre subtropicale, nel Nord Atlantico tropicale occidentale, e nell'Atlantico nord-orientale sotto il flusso che esce dal Mare Mediterraneo. Il processo porta eventualmente ad un aumento della densità con la profondità in una serie di scalini. Gli strati a densità costante sono separati da strati sottili con forti differenze in densità, ed il profilo di densità sembra essere una scala. [14] Schmitt *et al.*, (1987) osservò uno strato a scalini di 5-30 m nell'Atlantico Nord tropicale occidentale, che era esteso su 200-400 km e che rimase almeno per 8 mesi.

2. Acque più fredde e dolci sopra quelle calde più salate. In queste condizioni si osserva un processo chiamato convezione diffusiva. Anche la convezione diffusiva porta a strutture con scalini di densità in funzione della profondità. In questo caso, la doppia diffusione crea un sottile strato caldo e meno salato alla base dello strato iniziale superiore più freddo e meno salato. Lo strato sottile sale e si mescola con l'acqua dello strato superiore. Un processo simile accade nello strato inferiore dove uno strato più freddo e salato si forma all'interfaccia. Come risultato della convezione degli strati superiori ed inferiori l'interfaccia si rafforza [15] [16].

3. Acque fredde e salate sopra a quelle calde e meno salate. In questa condizione la colonna d'acqua è sempre staticamente instabile.

4. Acque calde e poco salate sopra quelle fredde e salate. Sempre stabile ma la doppia diffusione dilata l'interfaccia tra i due strati.

La doppia diffusione mescola le acque dell'oceano. Merryfield *et al.* (1999) [17], usando un modello numerico della circolazione oceanica che include la doppia diffusione, hanno osservato che il mescolamento della doppia diffusione cambia la distribuzione regionale della temperatura e della salinità, sebbene abbia una piccola influenza sulla circolazione a grande scala dell'oceano.

Un parametro per determinare la natura della doppia diffusione è il rapporto del gradiente di densità [18] [19]:

$$R\rho = (\alpha \, dT / dz) / (\beta \, dS / dz) \text{ (Eq. 1)}$$

dove $\alpha \, dT / dz$ è il contributo del gradiente verticale di temperatura media, dT / dz , al gradiente di densità verticale e $\beta \, dS / dz$ è il contributo corrispondente del gradiente verticale di salinità media, dS / dz .

Il rapporto, R_p , è minore di zero nel regime stabile ($dT / dz > 0$, $dS / dz < 0$) e nel regime staticamente instabile ($dT / dz < 0$, $dS / dz > 0$), ma $R_p > 0$ in entrambi i regimi di doppia diffusione.

Il gradiente verticale di densità è $dp / dz = \rho_0 (-\alpha \, dT / dz + \beta \, dS / dz)$ (Eq. 2)

e per la stabilità statica globale questo deve essere < 0 . Può essere scritta:

$$dp / dz = \rho_0 \beta (dS / dz) (1 - R_p) \text{ (Eq. 3)}$$

che è < 0 se $dS / dz > 0$ (come nel finger regime), purché $R_p > 1$.

Analogamente

$dp / dz < 0$ se $dS / dz < 0$ (in regime diffusivo), purché $R_p < 1$. Quindi in **finger regime** $R_p > 1$; in **diffusion regime** $0 < R_p < 1$.

La convezione descritta finora non comporta turbolenza; i movimenti guidati da instabilità sono laminari a condizione che il contributo alla turbolenza da altre fonti, ad esempio rottura di onde interne, sia relativamente debole, la forma iniziale di instabilità in convezione di doppia diffusione si trova a evolvere in una struttura spazialmente coerente contenenti strati di temperatura e salinità uniformi.

D. Angolo di Turner

È un pratico indicatore della stabilità della colonna d'acqua influenzata dall'effetto della doppia diffusione, [18] [19] definito come:

$$Tu = \arctang \, di \, (N_T^2 - N_S^2) / (N_T^2 + N_S^2) \text{ (Eq. 4)}$$

$N_S^2 = +/- \, g \, \beta \, dS / dz$ e $N_T^2 = +/- \, g \, \alpha \, dT / dz$ sono le coordinate degli assi del grafico di rappresentazione dell'angolo. I segni di N_T^2 o N_S^2 sono scelti in modo tale che la stratificazione di S e T sia stabile.

Infatti, i gradienti di salinità e temperatura verticale vengono rappresentati rispettivamente sugli assi delle X ed Y, per convenzione la z è positiva verso il basso e $\rho^{-1} dp / dz = -\alpha \, dT / dz + \beta \, dS / dz$.

Dalla figura sottostante si può notare che $R_p = -\tan(Tu + 45^\circ)$.

Le proprietà della stabilità della stratificazione locale sono determinate da R_p e si dividono in quattro regioni come mostrato dal grafico (Fig.5).

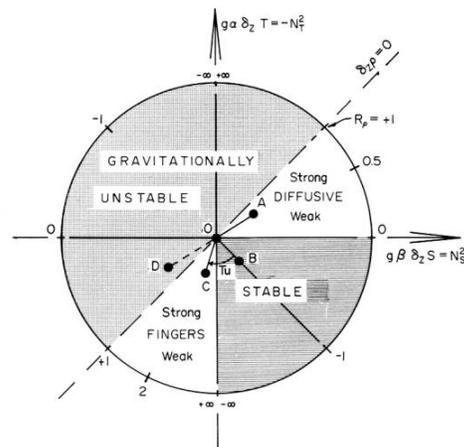


Fig.5 Grafico rappresentante l'angolo di Turner

I punti A, B, C e D rappresentano gradienti che sono, rispettivamente, favorevole alla convezione diffusiva ($-90^\circ < Tu < -45^\circ$), stabile ($Tu < 45^\circ$), instabile con condizioni favorevoli al *salt fingering* ($45^\circ < Tu < 90^\circ$), e gravitazionalmente instabile ($Tu > 90^\circ$). I vantaggi dell'utilizzo del Tu rispetto al R_p sono: la scala infinita del R_p è sostituita da una che va da $+\pi$ a $-\pi$, il forte *fingering* ($1 < R_p < 2$) ed il debole *fingerins* ($2 < R_p < \infty$) occupano lo stesso spazio sulla scala Tu . Il valore indeterminato ottenuto con $dS / dz = 0$ è ben definito in termini di Tu ; inoltre i regimi con i corrispondenti angoli sono semplici da ricordare.

III. RISULTATI

A. Punta degli Infreschi

Osservando il grafico dei profili della temperatura (Fig. 6), ottenuto dai campionamenti effettuati a Punta degli Infreschi, che rappresenta la zona nord-occidentale del Golfo di Policastro, si nota che la temperatura varia in funzione della profondità in modo simile in tutte le stazioni di campionamento. In particolare, in superficie, nei primi 20 m della colonna d'acqua la temperatura è di circa $24,2^\circ\text{C}$, con valori leggermente più alti vicino alla superficie; a 25 m comincia il termoclino e vi è una diminuzione di circa 8°C fino ai 50 m di profondità. La temperatura in questo punto è di 16°C . Dato che la gran parte dei campionamenti sono stati effettuati a poca distanza dalla costa, solo alcuni raggiungono tale profondità, però come si può osservare dal grafico, la variazione di temperatura è simile in tutti i profili.

Un solo profilo raggiunge la profondità di 130 m; in questo caso si osserva un'ulteriore diminuzione di temperatura di 2°C in 50 m, raggiungendo il valore minimo di 14°C a 100 m di profondità.

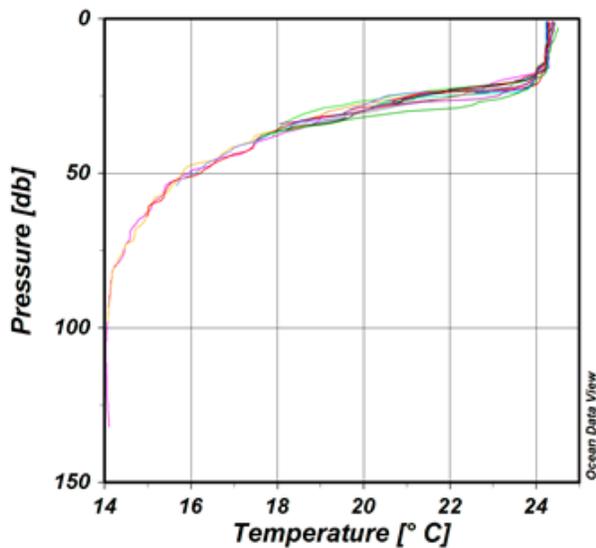


Fig.6 Profili della temperatura delle stazioni CTD, Punta Infreschi

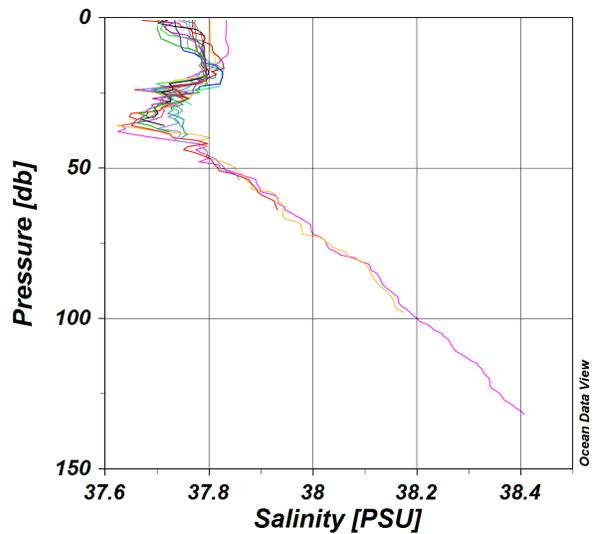


Fig.8 Profili della salinità delle stazioni CTD, Punta Infreschi

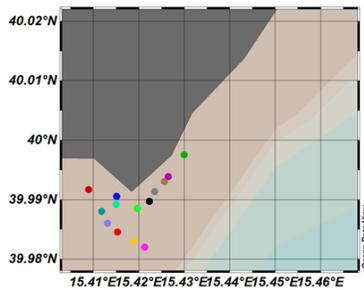


Fig.7 Posizione delle stazioni CTD

Anche per quanto riguarda la salinità (Fig. 8), la variazione con la profondità è simile in tutti i profili tracciati sul grafico. In un unico caso, il profilo tracciato col colore fucsia, che rappresenta la stazione di campionamento più distante dalla costa e che raggiunge una profondità maggiore, ha un valore di salinità in superficie lievemente maggiore (37,82 PSU), mentre tutti gli altri hanno valori compresi tra 37,7 e 37,8 PSU.

La salinità è generalmente minore in superficie rispetto a quella che si trova a circa 20m (con valori intorno ai 37,8 PSU). Tra 20 m e 35 m vi è quindi una diminuzione di 0,2 PSU. Al di sotto di questo strato relativamente più dolce la salinità tende ad aumentare nuovamente, fino ad un valore massimo di 38,4 PSU a 130 m di profondità. I valori osservati rientrano comunque nei *range* caratteristici delle acque superficiali tirreniche in mare aperto (lontano da sorgenti terrigene).

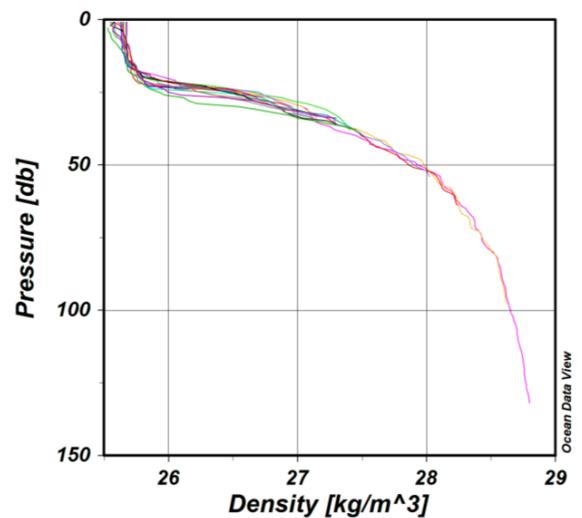


Fig.9 Profili della densità delle stazioni CTD, Punta Infreschi

Dal grafico (Fig.9) si osserva che anche l'andamento della densità presenta differenze piccole per tutte le stazioni di campionamento. In superficie si ha un valore di $25,5 \text{ kg/m}^3$; si ha una notevole variazione in corrispondenza del termoclino, dove la densità aumenta di $2,3 \text{ kg/m}^3$ passando dai $25,7 \text{ kg/m}^3$ a 22 m ai 28 kg/m^3 a 50 m. Il valore massimo è $28,7 \text{ kg/m}^3$ a 130 m di profondità.

B. Sapri

I profili di temperatura (Fig. 10) osservati nel tratto di mare prospiciente la città di Sapri (SA) presentano uno strato superficiale piuttosto omogeneo fino a circa 15 m ed una diminuzione della temperatura con la profondità simile in tutte le stazioni di campionamento.

Si riscontrano però alcune differenze rispetto all'area studiata in precedenza. Il termoclino si trova ad una profondità inferiore, tra 15 m e 20 m, e in quasi tutti i profili si raggiunge un minimo di temperatura di 20,2 °C a circa 30 m, partendo da quella massima superficiale di 24,2 °C. In un solo caso, dove il profilo raggiunge la profondità massima di 25 m, la temperatura minima è di 22°C (CTD 23).

Altra differenza da osservare è l'ulteriore diminuzione di temperatura dopo i 20 m di profondità nelle stazioni CTD 16 e CTD 20. Nel primo caso la temperatura raggiunge un minimo di 18°C a 28 m, con una variazione abbastanza rapida dai 18 ai 23 m. Nel secondo caso la temperatura diminuisce con rapidità oltre i 30 m raggiungendo 18,2°C circa a 35 m.

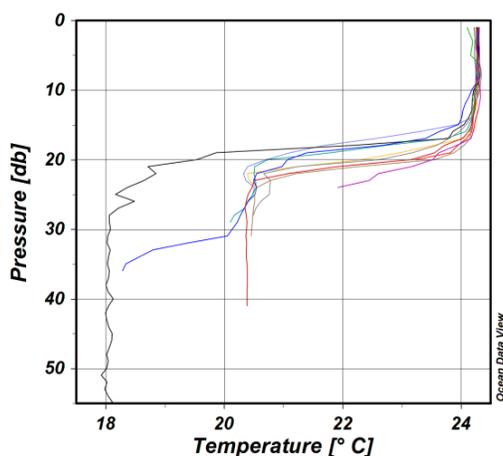


Fig.10 Profili della temperatura delle stazioni CTD, Sapri.

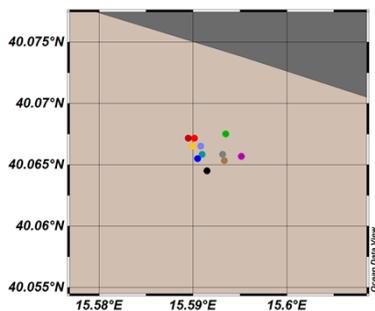


Fig.11 Posizioni delle stazioni CTD, Sapri.

Dal grafico dei profili della salinità (Fig. 12) si possono desumere alcune importanti osservazioni. Il valore di 37,8 PSU superficiale diminuisce a 18 m di profondità, per tutti i profili, ad eccezione delle stazioni CTD 16, CTD 17 bis, CTD 20, raggiungendo il valore di 37,3 PSU, poi risale a 37,78 PSU a 25 m. In tali profili è dunque evidente la presenza di uno strato di acqua relativamente più dolce, che tuttavia è compensato in temperatura (non ha cioè un impatto in termini di stabilità gravitazionale della colonna d'acqua). Una diversa struttura verticale è invece presente nelle stazioni CTD 16, CTD 17 bis, CTD 20.

Il profilo della prima mostra un piccolo incremento, da 37,3 a 37,5 PSU a 20 m poi una rapida diminuzione fino al valore di 37,1 PSU a 25 m. In seguito ci sono continui aumenti e diminuzioni nel range di 0,2 PSU raggiungendo i 37,6 PSU alla base del profilo, 55 m.

Il profilo di salinità della stazione CTD 17bis raggiunge un minimo di 37,38 PSU a 23 m per poi aumentare lentamente fino a 35,8 PSU a 40 m. Per la stazione CTD 20 si osserva una rapida diminuzione passando dal valore di 37,78 PSU a 30 m a quello di 37,5 PSU a 35 m.

Valori di salinità inferiori a 37,4 non sono certamente tipici delle acque superficiali tirreniche di mare aperto e indicano la presenza di acqua proveniente da ambiente terrestre lungo la colonna d'acqua. La stazione CTD 16, che si trova esattamente in corrispondenza di una delle strutture identificate nel DEM come possibili sorgenti, presenta caratteristiche chiaramente compatibili con la presenza di una sorgente di acqua relativamente dolce e fredda.

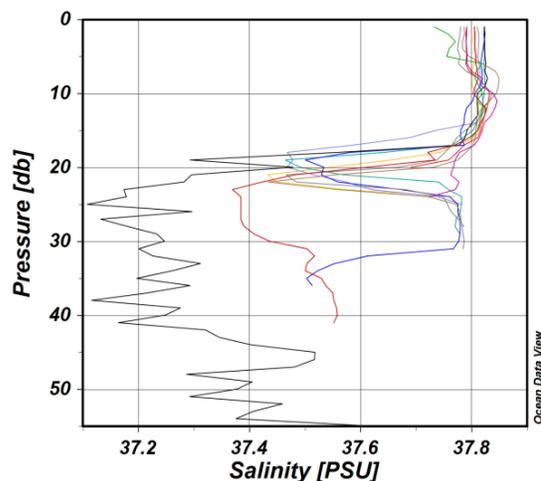


Fig.12 Profili della salinità delle stazioni CTD, Sapri.

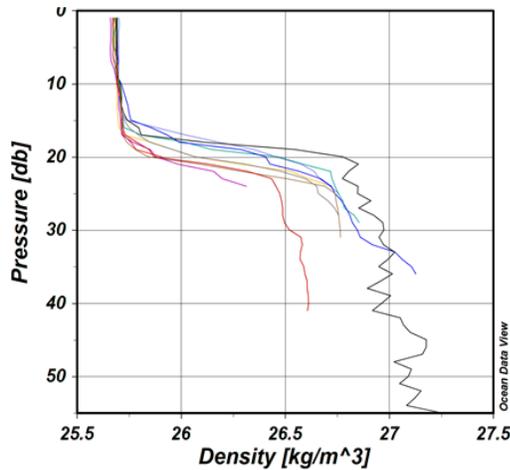


Fig. 13 Profili della densità delle stazioni CTD, Sapri.

I profili di densità (Fig. 13) sono generalmente stabili con un aumento dai $25,5 \text{ kg/m}^3$ in superficie a $26,7 \text{ kg/m}^3$ nel picnoclino intorno ai 15-20 m. Il profilo della stazione di campionamento CTD 16 ha il valore più elevato di densità, $27,25 \text{ kg/m}^3$ perché raggiunge una profondità più elevata, 54 m. In questa stazione si osservano molteplici inversioni di densità tra i 20 m e i 54 m.

La densità nella stazione CTD 17bis a 30 m è inferiore rispetto alle altre, infatti come si osserva essa raggiunge un valore massimo di $26,5 \text{ kg/m}^3$ e $26,55 \text{ kg/m}^3$ a 40 m.

Dall'analisi dei profili di temperatura, salinità e densità delle stazioni di campionamento CTD 16, CTD 17 bis, CTD 20, si può ipotizzare la presenza di acqua più fredda e dolce che penetra nella colonna d'acqua, alterando significativamente il *pattern* dei parametri fisici misurati. Sui dati campionati nell'area di Sapri è stato calcolato l'angolo di Turner, per meglio analizzare la stabilità della colonna d'acqua e verificare se la presenza di una sorgente di acqua dolce e fredda sul fondo sia associabile a meccanismi di mescolamento dovuti alla doppia diffusione o al *mixing* turbolento nelle aree vicine alla sorgente. Sono stati riportati i grafici degli angoli di Turner dei profili CTD più significativi.

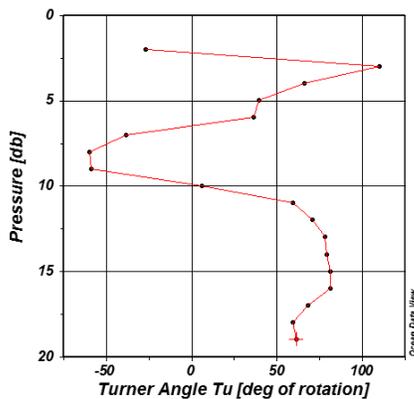


Fig. 14 Scatter plot angolo di Turner, CTD 17

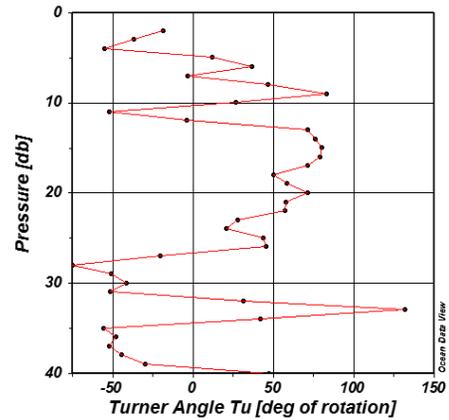


Fig. 15 Scatter plot angolo di Turner CTD 17bis

Analizzando il grafico della stazione CTD17 (Fig. 14) si nota che nei primi 5 m vi è instabilità e condizioni favorevoli a debole diffusione tra 6 ed 8 m, mentre dai 10 ai 20 m le condizioni sono favorevoli ad un debole *fingers*. Nel grafico CTD 17 bis (Fig. 15) i primi 25 m sono simili al precedente, ma dai 30 m in poi prevalgono le condizioni per una debole diffusione.

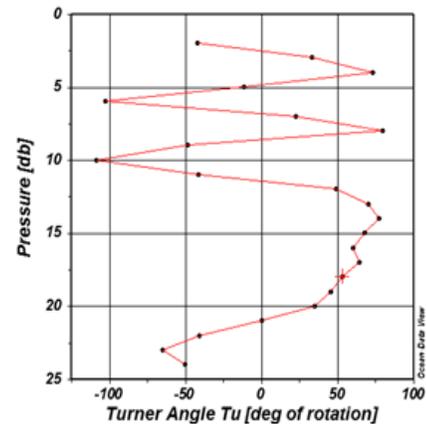


Fig. 16 Scatter plot angolo di Turner CTD 18

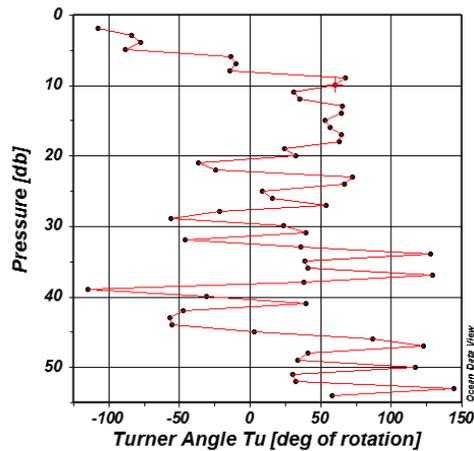


Fig. 17 Scatter plot angolo di Turner CTD 16

Nel profilo CTD 18 (Fig. 16) si osserva un'alternanza di debole diffusione e debole *fingers*, mentre nel CTD 19 (non mostrato), nella parte superficiale vi è debole e forte diffusione, in quella centrale prevalgono fenomeni di forte *fingers* ed in quella profonda condizioni per la stabilità.

Nel profilo della CTD 16 (Fig.17) si osserva nei primi 30 m una forte alternanza di condizioni di stabilità, di diffusione debole e di *fingers* debole. La cosa interessante da notare è l'instabilità che si ha oltre che nei primi 5 m (probabilmente causata dalle interazioni aria-mare), dai 35 ai 55 m, dove invece sono più probabilmente associabili ad una *plume* di acqua dolce e fredda (peraltro più densa). Nel profilo CTD 20 (Fig. 18) prevalgono condizioni per debole *fingers* e di stabilità.

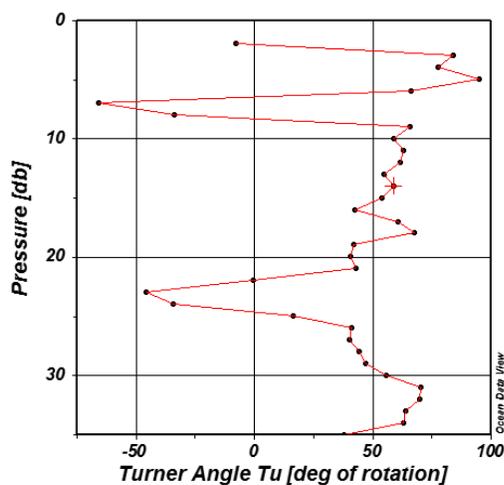


Fig. 18 Scatter plot angolo di Turner CTD 20

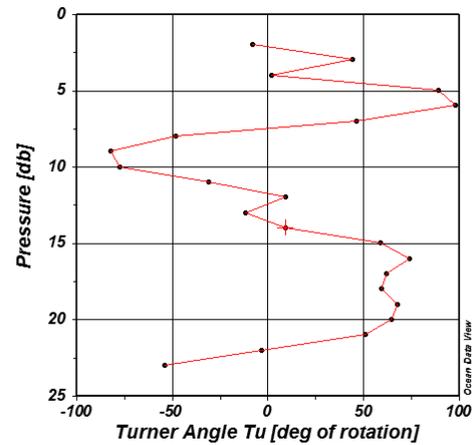


Fig. 19 Scatter plot angolo di Turner CTD 24

Nella CTD 24 (Fig. 19) è stata osservata una forte instabilità a 5 m, poi una diffusione debole a 10 m e un *fingers* debole oltre i 15 m di profondità. Nel profilo CTD 22 (non mostrato) vi è stabilità e forte *fingers*.

Nella stazione CTD 23 (non mostrato) dai valori dell'angolo di Turner si può dedurre la presenza di forte diffusione ed instabilità nei primi metri della colonna d'acqua, diffusione debole e stabilità intorno ai 10 m di profondità e debole *fingers* dai 13 ai 23 m. Nel profilo CTD 21 (non mostrato) si osservano condizioni stabilità e forte *fingers* nei primi 5 m, tra 5 e 10 m forte diffusione, dai 10 ai 20 m debole *fingers* e poi stabilità fino al fondo.

Il profilo CTD 25 (non mostrato) è caratterizzato da instabilità nei primi 7 m, da forte diffusione tra i 10 ed i 18 m di profondità, poi dai 19 ai 24 m debole diffusione, e debole *fingers* oltre i 25 m.

IV. CONCLUSIONI

L'analisi dei dati campionati in corrispondenza di strutture batimetriche, come i *pockmars*, associabili a sorgenti sottomarine, ha confermato la presenza delle sorgenti nel Golfo di Policastro e ha permesso di mostrare gli effetti del SGD sulla colonna d'acqua. Per contro, non si ha evidenza di strutture associabili a SGD nell'area di Punta Infreschi. Nella stazione di campionamento CTD 16, in particolare, si è osservato un significativo decremento della salinità verso il fondale non associabile in termini di caratteristiche T-S all'acqua superficiale tirrenica. Analizzando l'angolo di Turner si evidenzia in questa stazione la presenza di una intensa attività di mescolamento turbolento associabile a vere

e proprie inversioni di densità (*overturning*). Poichè l'acqua che si osserva in questo profilo risulta essere molto fredda e densa relativamente alle stazioni circostanti, si può ipotizzare un flusso piuttosto intenso dalla sorgente profonda che riesce a raggiungere e modificare la colonna d'acqua fino a 20 m di profondità. Nei profili limitrofi sono invece presenti condizioni favorevoli a meccanismi di doppia diffusione, in particolare alla base e al limite superiore di una intrusione (di circa 10 m di spessore) di acqua relativamente più dolce, alla profondità di circa 20 m. Questo tipo di intrusione è noto in letteratura per essere causato dalla doppia diffusione associata a sorgenti locali dalle caratteristiche T-S molto diverse da quelle delle acque residenti. Ulteriori studi saranno necessari per valutare se sia possibile una stima della portata delle sorgenti accoppiando ad esempio considerazioni energetiche (relativamente all'altezza della *plume* di acqua dolce) e analisi morfo-batimetriche, o se siano necessarie misure specifiche.

E' da notare inoltre che i campionamenti sono stati effettuati nel mese di settembre, quindi in regime di bassa piovosità e gli effetti sono risultati comunque ben visibili, per cui, sarebbe interessante ripetere i campionamenti a fine inverno, con acquiferi carichi, in modo da poter valutare l'impatto del SGD sulla colonna d'acqua a massimo regime. Si può comunque concludere che la metodologia utilizzata per lo studio ha prodotto risultati consistenti e ha permesso di analizzare processi generalmente non considerati negli studi sulla dinamica della piattaforma costiera.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' - TESSA". Ringrazio l'IAMC-CNR di Napoli per avermi dato la possibilità di svolgere il tirocinio del corso di formazione, OTTIMA 2014-2015, presso la propria sede e per la disponibilità dei dati acquisiti durante la campagna oceanografica Arcose 2010, sui quali ho svolto il mio lavoro di *processing* ed analisi. Un ringraziamento particolare va ai miei tutor, la Dott.ssa Francesca Budillon e il Dott. Bruno Buongiorno Nardelli per avermi seguito con attenzione e con la volontà di trasmettermi parte del loro bagaglio culturale.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] BURNETT W.C. A., P.K. AGGARWAL B., A. AURELI C., H. BOKUNIEWICZ D., J.E. CABLE E., M.A. CHARETTE F., E. KONTAR G., S. KRUPA H., K.M. KULKARNI B., A. LOVELESS I., W.S. MOORE J., J.A. OBERDORFER K., J. OLIVEIRA L., N. OZYURT M., P. POVINEC N.I., A.M.G. PRIVITERA O., R. RAJAR P., R.T. RAMESSUR Q., J. SCHOLTEN N., T. STIEGLITZ R.S., M. TANIGUCHI T., J.V. TURNER U., (2006) : Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods., Science of The Total Environment, Elsevier.
- [2] MCDUGALL, T. J., (1985b) : Double-Diffusive Interleaving. Part II: Steady State Interleaving. *J. Phys. Oceanogr.*, **15**, 1542–1556.
- [3] SARTORI R. (1988), *Drilling of ODP Leg 107 in the Tyrrhenian sea: tentative basin evolution compared to deformation in the surrounding chains*. In: Boriani A., Bonafede M., Piccardo G.B. and Vai G.B. (ed.), *The lithosphere in Italy*. Advance in earth sciences research, 125-138.
- [4] TRINCARDI F. & ZITELLINI N., (1987), *The rifting of the Tyrrhenian basin*. *Geo-Marine Letters*, 7, -6.
- [5] FERRARO L., PESCATORE T., RUSSO B., SENATORE M.R., VECCHIONE C., COPPA M.G. & DI TUORO A. (1997), Studi di geologia marina del margine tirrenico: la piattaforma continentale tra Punta Licoso e Capo Palinuro (Tirreno Meridionale), *Boll. Soc. Geol. It.*, 116, 473-485
- [6] PENNETTA M. (1996a), Margine tirrenico orientale: morfologia e sedimentazione tardo-pleistocenica olocenica del sistema piattaforma-scarpata tra Capo Palinuro e Paola. *Boll. Soc. Geol. It.*, 115, 339-354.
- [7] DE PIPPO T. E PENNETTA M. (2000), Late Quaternary morphological evolution of a continental margin based on emerged and submerged morphostructural features: the south-eastern Tyrrhenian margin (Italy). *Z Geomorph. N.F.*, 44, 4, 435-448
- [8] PENNETTA M. (1996b), Evoluzione morfologica quaternaria del margine tirrenico sudorientale tra Capo Palinuro e Capo Bonifati. *Il Quaternario- Italian Journal of Quaternary Sciences*, 9(1),353-358.
- [9] KASTENS K., MASCLE J., CHANNEL J., MULLER C., REHAULT J., ROBERTSON A., SARTORI R., SPROVIERI R. & TORII M. (1988), *ODP Leg 107 in the Tyrrhenian sea: insights into passive margin*
- [10] COCCO E. & PESCATORE T.S. (1968), Scivolamenti gravitativi (olistostromi) nel Flysch del Cilento (Campania). *Boll. Soc. Nat. Napoli*, 77 (1),51-91.
- [11] SGROSSO I. (1998), Possibile evoluzione cinematica miocenica nell'Orogene centro-sud-appenninico. *Boll. Soc. Geol. It.*, 117, 679-724.
- [12] AIELLO G., MARSELLA E. (2013) The contribution of marine geology to the knowledge of marine coastal environment off the Campania region (southern Italy): the geological map n. 502 "Agropoli" (southern Campania). *Marine Geophysical Researches*, 34(2). DOI: 10.1007/s11001-013.
- [13] ALLOCCA V., CELICO F., CELICO P., DE VITA P., FABBROCINO S., MATTIA C., MONACELLI G., MUSILLI I., PISCOPO V., SCALISE A., SUMMA G., TRANFAGLIA G., Carta idrogeologica dell' Italia meridionale, APAT, Dipartimento di geofisica e Vulcanologia, Università degli studi di Napoli Federico II.
- [14] SCHMITT R.W., H. PERKINS, J.D. BOYD, AND M.C. STALCUP. 1987. C-SALT: An investigation of the thermohaline staircase in the western tropical North Atlantic. *Deep-Sea Research* 34 (10): 1655–1665.
- [15] MCDUGALL, T.J., (1985a): DOUBLE-DIFFUSIVE INTERLEAVING. Part I: Linear Stability Analysis. *J. Phys. Oceanogr.*, **15**, 1532–1541.
- [16] MCDUGALL, T. J., (1985b) : Double-Diffusive Interleaving. Part II: Steady State Interleaving. *J. Phys. Oceanogr.*, **15**, 1542–1556
- [17] MERRYFIELD W.J., G. HOLLOWAY, AND A.E. GARGETT, (1999). A global ocean model with double diffusion mixing. *Journal of Physical Oceanography* 29 (6): 1124–1142.
- [18] RUDDICK B., (1983): A practical indicator of the stability of the water column to double-diffusive activity. *Deep-Sea Res.*, 30, 1105–1107.
- [19] MCDUGALL, T. J., S. A. THORPE AND C. H. GIBSON, 1988: Small-scale turbulence and mixing in the ocean: A glossary, in *Small-scale turbulence and mixing in the ocean*, edited by J. C.

Progettazione e implementazione di un sistema previsionale di allerta inondazione per le coste del Comune di Napoli

Diana Di Luccio
Istituto per l'ambiente Marino Costiero
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Napoli (NA), Italia
diana.diluccio@gmail.com

Giorgio Budillon, Raffaele Montella
Dipartimento di Scienze e Tecnologie
Università degli Studi di Napoli
"Parthenope"
Napoli (NA), Italia
budillon@uniparthenope.it
raffaele.montella@uniparthenope.it

Eugenio Pugliese Carratelli,
Fabio Dentale
Dipartimento Ingegneria Civile
Università degli Studi di Salerno
Fisciano (SA), Italia
epc@unisa.it
fdentale@unisa.it

Sommario— L'ambiente costiero è un sistema con una dinamica complessa, influenzata da fattori naturali e antropici che determinano la sua evoluzione nel tempo e nello spazio a breve e lungo termine. La fascia costiera del Comune di Napoli, è molto antropizzata ed eventi meteo-marini estremi possono provocare ingenti danni in termini paesaggistici, sociali ed economici. L'idea di utilizzare strumenti numerici ed informatici per garantire ed aumentare la sicurezza dei cittadini e delle infrastrutture prospicienti la costa è nata da una collaborazione tra il Dipartimento Ambiente Servizio Tutela del Mare del Comune di Napoli e il Dipartimento di Scienze e Tecnologie (DiST) dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope" con la collaborazione del Centro inter-Universitario Grandi Rischi (CUGRi) di Salerno.

Il risultato di questo lavoro è stato l'implementazione di un sistema di previsione e gestione degli allarmi connessi a eventi di mareggiata, da utilizzare come supporto decisionale per gli enti locali e gli stabilimenti balneari della del Comune di Napoli. Le attività sono state svolte utilizzando le risorse modellistiche e computazionali del Centro Campano per il Monitoraggio e la Modellistica Marina ed Atmosferica (CCMMA) dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope".

Keywords— mareggiata; run-up; overtopping; modellistica numerica; shallow water; forecasting.

INTRODUZIONE

L'antropizzazione delle coste con strutture abitative e di trasporto è aumentata progressivamente negli ultimi decenni, con forti impatti di tipo ambientale, sociale ed economico. Le fonti ISTAT evidenziano che il 34% del territorio nazionale compreso nella fascia dei 300 m dalla riva, area che la normativa annovera tra i beni da tutelare per il loro valore paesaggistico (D.Lgs. 42/2004 e s.m.i.), è urbanizzata. All'elevata densità di popolazione corrispondono numerosi insediamenti urbani e/o produttivi che, in molte zone, hanno alterato notevolmente le caratteristiche naturali del territorio.

Gli strumenti normativi vigenti in materia di protezione dell'ambiente marino e costiero hanno come denominatore comune lo sviluppo del coordinamento tra i settori economici, ambientali e amministrativi. A livello nazionale sono state attivate procedure inter-istituzionali finalizzate alla ratifica del Protocollo sulla Gestione Integrata delle Zone Costiere entrato in vigore il 24 marzo 2011. A livello regionale è sempre più

evidente e diffuso un approccio integrato nell'elaborazione di strumenti per la gestione dell'area costiera.

La costa campana è densamente interessata da attività antropiche ed eventi meteo-marini estremi non correttamente gestiti possono portare ingenti danni in termini paesaggistici, sociali ed economici. Da questa motivazione è nata l'esigenza, da parte delle autorità locali, di dover fare affidamento ad un sistema di allerta basato su strumenti di previsione e gestione degli allarmi connessi ad eventi di mareggiata da utilizzare come supporto decisionale in caso di emergenze ambientali.

I. STATO DELL'ARTE

La Campania può vantare una lunga storia in materia di studi e di azioni per la sicurezza delle coste. Da tempo, infatti, gli Istituti di ricerca della regione svolgono attività di monitoraggio e analisi del moto ondoso ed hanno sviluppato una vasta esperienza sia nella modellistica oceanografica che nella gestione di boe ondometriche nei Golfi di Napoli e di Salerno [1] [2].

Per quanto riguarda gli aspetti operativi, già nel 1997 il CUGRi redasse per la Provincia di Salerno il piano di Previsione e Prevenzione dei rischi, che includeva un "Settore Mareggiate"; nel 1999-2000, l'Autorità di Bacino Sinistra Sele, prima in Italia, introdusse il "Settore Erosione Costiera" nel Piano Straordinario per la delimitazione delle aree a rischio, anch'esso redatto dal CUGRi. Le metodologie sviluppate furono oggetto di pubblicazioni anche internazionali [3] [4] [5].

Successivamente la Regione Campania svolse, attraverso l'AMRA (Analisi e Monitoraggio del Rischio Ambientale) e nel quadro del P.O.R. Campania 2000-2006, un importante lavoro di indagine sui problemi della sicurezza delle coste. Tale lavoro, che tra l'altro prevedeva anche un'ipotesi di sistema di preallarme [6] mai realizzato, è stato svolto in collaborazione tra l'Università di Napoli Federico II, il CUGRi ed il Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto per l'Ambiente Marino Costiero: esso è alla base delle metodologie impiegate per la parte più strettamente costiera del lavoro qui presentato. Negli anni successivi, varie altre Autorità si sono dotate di strumenti per la difesa delle coste ed in particolare, l'Autorità di Bacino Nord Occidentale (ora incorporata nell'Autorità di Bacino Regionale Campania Centrale) si dotò di un Piano per la difesa delle Coste, che

contiene disposizioni normative generali e specifiche linee guida in materia di assetto e gestione della fascia costiera e le cui norme di attuazione prevedono che “nelle aree a rischio elevato d’inondazione, le strutture stagionali, amovibili e temporanee ad uso turistico e balneare potranno essere utilizzate, subordinatamente all’attuazione di un sistema di monitoraggio e pre-allertamento. Qualora tale sistema non dovesse essere attivo ovvero non risultasse approvato dagli enti competenti, le strutture in questione dovranno essere totalmente rimosse”.

Per adempiere a queste prescrizioni, il Comune di Napoli ha richiesto al DiST di sviluppare un sistema innovativo per la gestione in tempo reale di soglie di allarme, integrando così la preesistente rete di monitoraggio meteo-marino dell’Università degli Studi di Napoli “Parthenope”. Il progetto pilota, realizzato con la collaborazione del CUGRI, è stato operativo per tutto il periodo balneare del 2014 su alcune aree della fascia costiera pilota, fornendo un supporto decisionale al Comune di Napoli ed ai gestori di stabilimenti balneari per la pianificazione e l’elaborazione di strategie di emergenza da attivare in caso di eventi meteo-marini estremi che coinvolgono il litorale. Terminata la fase pilota, è ora in corso un fase di ristrutturazione e di implementazione per rendere il sistema pienamente operativo anche per il futuro.

II. IL PARAGGIO PILOTA

Il paraggio studiato in questo lavoro interessa la fascia costiera rientrante nei confini amministrativi del Comune di Napoli. Sulla base dei documenti pubblici disponibili è stata analizzata la cartografia comunale della costa di Napoli, con particolare attenzione all’individuazione delle spiagge e delle opere presenti su di essa. Sono state inoltre individuate le zone a maggiore rischio d’inondazione per la presenza di stabilimenti balneari e/o strade prospicienti la riva, con o senza opere di difesa.

Sono state selezionate 21 sezioni (transetti) rappresentative di ognuno dei tratti di costa da monitorare (Tabella 1). Ciascun transetto è stato spinto verso terra fino a una distanza dalla linea di riva di 50-100 m, oppure fino a raggiungere la prima infrastruttura sita sulla costa e a mare fino ad una profondità compresa tra -30m e -10m in, relazione all’accuratezza del profilo batimetrico disponibile. I transetti individuati ricadono nelle seguenti quattro macro-aree:

- Area Bagnoli/Pozzuoli;
- Area Lungomare;
- Area Posillipo;
- Area San Giovanni.

Ognuno di essi è identificato da una coppia di coordinate riferite al punto di contatto terra-mare, in corrispondenza della linea di costa. Riguardo alle caratteristiche morfologiche e geometriche del settore di costa considerato, nonché alla presenza/assenza di strutture di protezione sono stati individuati i seguenti scenari:

1. Spiaggia;
2. Parete sub-verticale o barriera di protezione aderente;
3. Spiaggia con barriera di protezione distaccata;
4. Parete sub-verticale e barriera di protezione distaccata.

Questo non è vincolante dal punto di vista di espansione e adattabilità del software poiché, utilizzando le opportune

formule empiriche sarà possibile ampliare lo spettro delle casistiche da prendere in esame.

TABELLA I. TRANSETTI MONITORATI

| Area ^a | Transetti | | |
|----------------------|---|--|-----------------------|
| | Nome | Coordinate | Scenario ^a |
| AreaBagnoli/Pozzuoli | Via Napoli - Dazio | 14° 9' 25.531" N 40° 49' 3.331" E | 2 |
| AreaBagnoli/Pozzuoli | Via di Pozzuoli | 14° 9' 43.222" N 40° 48' 55.649" E | 1 |
| AreaBagnoli/Pozzuoli | Via di Pozzuoli - Rotonda Belvedere | 14° 9' 44.600" N 40° 48' 54.101" E | 1 |
| AreaBagnoli/Pozzuoli | Via Coroglio - L'Arenile | 14° 9' 55.750" N 40° 48' 44.348" E | 1 |
| AreaBagnoli/Pozzuoli | Via Coroglio - Città della Scienza | 14° 10' 20.780" N 40° 48' 13.180" E | 3 |
| AreaBagnoli/Pozzuoli | Via Coroglio - Italsider | 14° 10' 23.588" N 40° 48' 6.469" E | 1 |
| AreaBagnoli/Pozzuoli | Via Nuova di Nisida - Arena S. Antonio | 14° 10' 29.269" N 40° 47' 55.900" E | 1 |
| AreaBagnoli/Pozzuoli | Via Coroglio - Arin | 14° 10' 3.461" N 40° 48' 30.370" E | 2 |
| Area Lungomare | Via Caracciolo - Stazione Zoologica | 14° 14' 12.559" N 40° 49' 54.052" E | 2 |
| Area Lungomare | Piazza Vittoria | 14° 14' 12.559" N 40° 49' 52.770" E | 3 |
| Area Lungomare | Via Parthenope - Castel dell'Ovo | 14° 14' 47.641" N 40° 49' 46.430" E | 2 |
| Area Posillipo | Via Posillipo - Baia delle Rocce Verdi | 14° 11' 55.090" N 40° 47' 50.071" E | 2 |
| Area Posillipo | Via Posillipo - Bagno Sirena | 14° 12' 49.651" N 40° 49' 9.131" E | 3 |
| Area Posillipo | Via Posillipo - Bagno Elena | 14° 12' 54.551" N 40° 49' 16.252" E | 1 |
| Area Posillipo | Via Posillipo - Bagno Ideal | 14° 12' 58.230" N 40° 49' 18.350" E | 1 |
| Area Posillipo | Via Marechiaro - Villa Imperiale | 14° 11' 25.260" N 40° 47' 38.260" E | 2 |
| Area Posillipo | Via Marechiaro - Il Gabbiano | 14° 11' 40.610" N 40° 47' 45.110" E | 2 |
| Area Posillipo | Via Marechiaro - Lido Marechiaro | 14° 11' 31.531" N 40° 47' 39.570" E | 4 |
| Area San Giovanni | N1 | 14° 18' 38.020" N 40° 49' 42.128" E | 1 |
| Area San Giovanni | N2 | 14° 18' 51.430" N 40° 49' 32.239" E | 1 |
| Area San Giovanni | N3 | 14° 19' 1.672" N 40° 49' 27.091" E | 1 |

a. Tipologia di scenario a cui appartiene ciascun transetto

b. Area geografica di interesse in cui il transetto ricade

III. LA CATENA MODELLISTICA OPERATIVA

Gli obiettivi precedentemente illustrati sono stati raggiunti attraverso l’implementazione di un sistema di previsione meteo-marina a scala regionale, ad alta risoluzione spaziale nella Regione Campania, con dominio innestato sul Golfo di Napoli. Gli strumenti di previsione utilizzati sono stati opportunamente configurati utilizzando un sistema di calcolo ad alte prestazioni per gestire ed eseguire una catena modellistica basata sugli algoritmi implementati nei modelli

numerici open-source WRF (*Weather Research and Forecasting*) e WW3 (*Wavewatch III*). La catena modellistica, regolata da una struttura di tipo *workflow* (Fig. 1), ha come strumento principale il modello numerico WRF per la previsione dei forzanti atmosferici necessari ad alimentare il modello WW3 per la stima del moto ondoso *offshore*, che costituisce le condizioni iniziali e al contorno per la modellizzazione delle onde in *shallow water*. L'azione del moto ondoso sul litorale non dipende solo dal clima meteo-marino al largo e dall'esposizione del paraggio, ma anche dagli effetti che piccole variazioni della batimetria o presenza di ostacoli inducono nella propagazione delle onde verso costa (rifrazione, *shoaling*). Un risolutore di equazioni matematiche che regolano il trasporto fisico delle onde da largo a costa consente di ottenere i parametri del moto ondoso in prossimità di ciascun transetto monitorato. Tali condizioni sono utilizzate per valutare l'entità dell'inondazione in termini di *run up* e/o *overtopping*, tenendo conto del modello di decadimento dell'onda frangente. A ciò è associato un sistema in grado di gestire soglie di allarme secondo la durata e l'intensità dell'evento di mareggiata previsto dai modelli. Questo risultato è ottenuto tenendo conto della geomorfologia dell'area d'interesse e della presenza/assenza di opere di difesa. Il sistema di *alert* invia un messaggio tramite e-mail qualora siano superati i livelli soglia definiti per ciascun transetto.

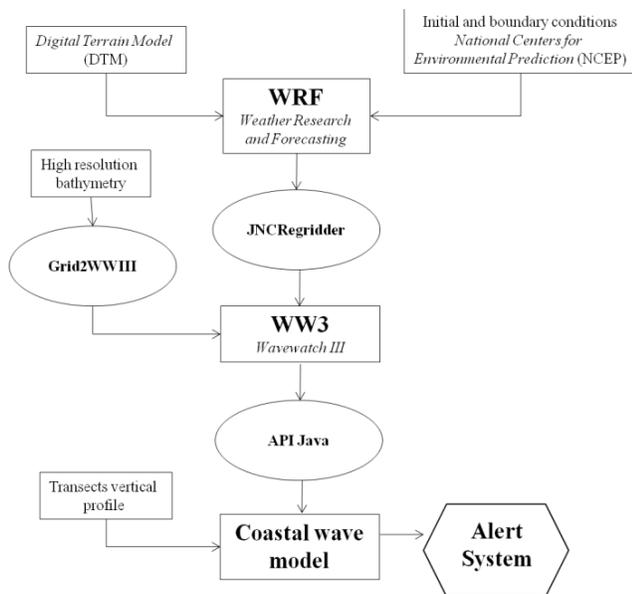


Fig. 1. Workflow della catena modellistica operativa e moduli software di interfaccia tra i modelli numerici.

L'accesso ai dati è possibile attraverso il portale meteo.uniparthenope.it; a tale scopo è stata sviluppata un'interfaccia utente semplice ed efficace come web application, basata sul *Content Management System* (CMS) *Drupal*.

L'accoppiamento (*coupling*) fra i modelli numerici è di tipo *offline*, cioè gli *output* di un modello sono utilizzati come *input* per un altro. Questo tipo di *coupling* richiede fasi di pre-

processing e post-processing per adattare i dati affinché l'interfacciamento funzioni correttamente.

Le operazioni più comuni sono il ri-campionamento su differenti griglie spaziali e/o su diversi riferimenti temporali e le conversioni di formato file più o meno complesse. Per soddisfare questa esigenza, sono stati sviluppati moduli software *ad hoc* sfruttando le potenzialità dei linguaggi di programmazione *Java* e *Python*.

Nel diagramma a blocchi (Fig. 1) sono evidenziati i differenti moduli funzionali sviluppati e le relative connessioni, intese come percorso dei dati da un modulo all'altro.

Gli *output* dei modelli previsionali utilizzati sono in formato NetCDF (*Network Common Data Form*), rispondenti alle richieste della comunità scientifica per la distribuzione e condivisione di dati multidimensionali.

Per accedere e manipolare file NetCDF con standard CDL (*network Common data form Description Language*) è stata utilizzata l'interfaccia di programmazione Java-NetCDF che ha fornito un valido supporto per lo sviluppo dell'applicazione di accoppiamento tra i modelli WRF e WW3. A tale scopo è stato implementato il software JNCRegridder (*Java NetCDF Regridder*). Una serie di API (*Application Programming Interface*) sono state realizzate per l'accesso diretto ai dati prodotti dal modello WW3.

Il sistema di *alert* implementato sfrutta le potenzialità del linguaggio di programmazione *Python*, supportato dalle librerie necessarie all'interfacciamento con archivi di dati NetCDF.

Numerosi *shell script* sono stati preparati per ottimizzare gli automatismi necessari a rendere operativa la catena modellistica, realizzando un flusso di lavoro indipendente dal continuo intervento di operatori dedicati.

L'analisi e la visualizzazione dei risultati ottenuti dai modelli sono effettuate con il software GrADS (*Grid Analysis and Display System*), un sistema interattivo usato per accedere e visualizzare dati penta-dimensionali (5D) localizzati su griglie spaziali regolari.

Un sistema di previsione basato sulla realizzazione di una catena modellistica ambientale come quella descritta, implica di risolvere numericamente, anche più volte al giorno e con risoluzioni crescenti, sistemi analitici costituiti da centinaia di equazioni. Le risorse computazionali necessarie richiedono la realizzazione di un'infrastruttura informatica *hardware* e *software* specializzata; per questo lavoro è stato utilizzato il *cluster Blackjeans*, messo a disposizione dall'Università degli Studi di Napoli "Parthenope".

A. WeatherResearch and Forecasting (WRF)

Il WRF (*Weather Research and Forecast*) è un modello numerico di simulazione atmosferica *open-source* e in continuo sviluppo (<http://www.wrf-model.org>).

La previsione atmosferica per questo lavoro è stata ottenuta utilizzando i dati a scala globale prodotti dal modello meteorologico *Global Forecast System* (GFS) dell'NCEP, che costituiscono, insieme a un Modello Digitale del Terreno (DTM) di alta risoluzione, i parametri di *input* necessari al modello meteorologico WRF.

L'uso operativo del WRF prevede due distinte fasi, quella di preparazione e quella di esecuzione vera e propria del modello. La prima è svolta da un sottosistema *software* denominato WPS (*WRF Preprocessing System*) che comprende i moduli GEOGRID, METGRID e UNGRIB (Fig. 2). Il modulo GEOGRID effettua un *subsetting* del DTM e restituisce in *output* il file dell'area che sarà interessata dalla simulazione in formato NetCDF.

Il modulo UNGRIB effettua una conversione/estrazione dei dati relativi alle condizioni iniziali ed al contorno, prodotti dal modello GFS, dal formato Grib2 a quello NetCDF.

Il modulo METGRID riceve in *input*, oltre alla definizione dei domini, anche i dati prodotti dai moduli GEOGRID e UNGRIB. Il risultato è costituito da file NetCDF che contengono le condizioni iniziali e quelle al contorno interpolate sui domini della simulazione per l'intervallo temporale considerato. Questo modulo termina la preparazione dei dati. Il modulo REAL prepara i dati da usare per un caso reale e non idealizzato. In particolare, sono creati i file per l'inizializzazione e per le condizioni al contorno di ciascun dominio, che saranno usati dal modulo solutore.

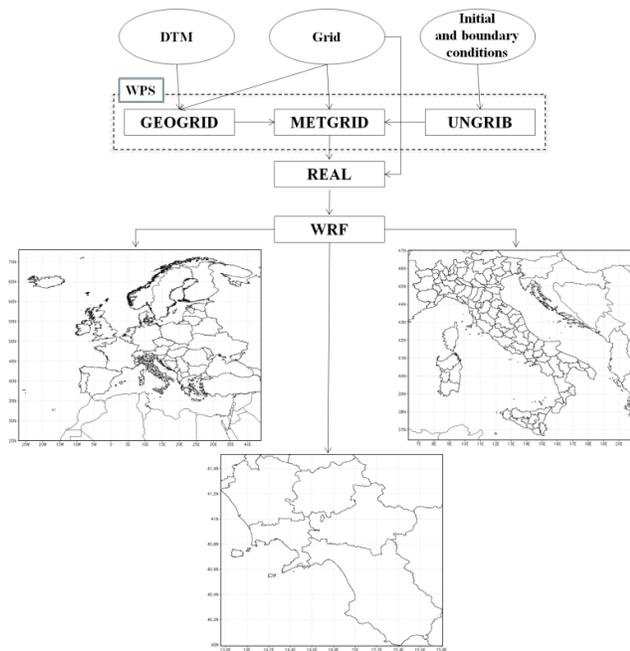


Fig. 2. Configurazione del modello WRF operativo presso il CCMMMA dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope".

Il tempo di calcolo necessario a ciascuna simulazione è proporzionale alle dimensioni del dominio di calcolo in termini di celle. Per aumentare la risoluzione localmente è stata utilizzata la tecnica del *nesting two way* che consente la massima accuratezza della simulazione. Il CCMMMA produce previsioni meteorologiche per un massimo di 144 ore (6 giorni di previsione) ed i dati prodotti sono disponibili sul portale *meteo.uniparthenope.it* con cadenza oraria.

B. Wavewatch III (WW3)

Il WW3 (*WaveWatch III*) è un modello di propagazione di onde marine di terza generazione, sviluppato presso il NOAA/NCEP. Per l'implementazione del WW3 e la relativa inclusione nella catena modellistica è stata sviluppata una suite di software accessori per la configurazione automatica dei domini innestati, per la preparazione degli *input* in maniera coerente e per l'accoppiamento con il modello meteorologico WRF.

Per la costruzione del modello batimetrico di riferimento, è stato utilizzato ETOPO1, un modello globale della Terra che integra la topografia delle terre emerse e la batimetria dei fondali ad una risoluzione orizzontale di 1/60 di grado (1 arc-minute). Per l'accoppiamento *one-way* tra i modelli WW3 e WRF è stato sviluppato il *software JNCRegridder*, sfruttando le potenzialità del linguaggio di programmazione ad oggetti *Java* e la libreria *JAVA-NetCDF*. Questo software ricampiona dati di vento con interpolazione lineare bidimensionale per passare dalla griglia Aracawa-C del WRF a una griglia regolare adoperata dal WW3.

Il sistema produce previsioni del moto ondoso per i domini mostrati in Fig. 3 con cadenza oraria per un totale di 144 ore di simulazione (6 giorni).

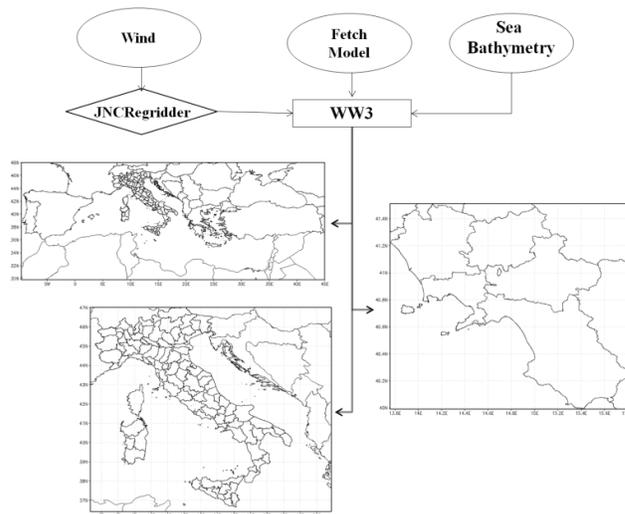


Fig. 3. Configurazione del modello WW3 operativo presso il CCMMMA dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope".

IV. TRASFERIMENTO ONDE COSTA-LARGO

I punti più vicini alla costa del dominio a più alta risoluzione del modello WW3 sono stati utilizzati come "ondametri virtuali" (OV).

Per ciascun OV la catena modellistica implementata fornisce ogni giorno le previsioni del moto ondoso con cadenza oraria. Un software, interamente sviluppato in linguaggio *Java*, consente, sfruttando le opportune relazioni fisico-matematiche, di risolvere le problematiche relative alla propagazione delle onde in acque basse, in cui la morfologia

della costa e la presenza di un fondale a bassa profondità influenzano notevolmente la dinamica, tanto da modificare le caratteristiche delle onde fino al frangimento delle stesse. Secondo la tipologia di scenario sono state applicate differenti formulazioni empiriche che hanno portato alla stima dei parametri di *run up* e/o *overtopping*, alla base degli studi sul livello di pericolosità associato a ciascun transetto.

A. Spiaggia

La massima quota che la superficie libera raggiunge rispetto al livello medio del mare è definita dal *run up* (R). Questo parametro, che assume importanza notevole nel dimensionamento delle opere marittime e nella sicurezza dei litorali, dipende dalla ripidità dell'onda incidente e dalle caratteristiche geometriche del fondale e della sponda.

Per il calcolo di R è stata utilizzata la formulazione empirica proposta da Mase [7] per determinare il valore del *run up* rispetto al livello medio del mare, da cui si può ricavare la distanza di inondazione dalla linea di costa (Fig. 4):

$$R = 0.88 \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \right)^{0.69} H_0 \quad (1)$$

in cui:

H_0 = altezza d'onda significativa *off-shore*;
 θ = angolo d'inclinazione della spiaggia;
 L_0 = lunghezza d'onda *off-shore*.

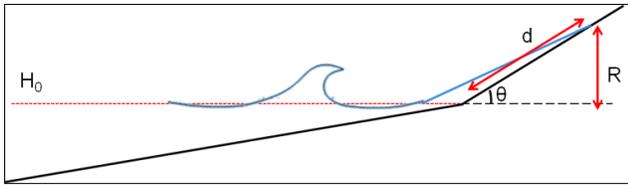


Fig. 4. Procedura per il calcolo del run-up nel caso di spiagge. Parametri: d=distanza d'inondazione; R=run up; θ =angolo d'inclinazione della spiaggia; H_0 = altezza d'onda significativa *off-shore*.

B. Parete sub-verticale o barriera di protezione aderente

In presenza di barriere di protezione aderenti (Fig. 5), le portate tracimanti (*overtopping*) dipendono dal tipo di interazione onda-struttura. L'approccio seguito in questo lavoro segue le linee generali proposte nel citato studio AMRA per la Regione Campania, con alcune modifiche alle formulazioni impiegate a causa della limitatezza dei dati batimetrici e topografici disponibili.

In particolare è stato seguito l'approccio di Allsop et al [8].

Si distinguono quindi tre casi, a seconda del valore di profondità alla rottura dell'onda h_* : impulsivo (3), non impulsivo (4) ed intermedio.

La profondità dell'onda alla rottura (2) è calcolata come:

$$h_* = 1.3 \frac{\text{depthP}}{H_{m0}} \frac{2\pi(\text{depthP})}{gT^2} \quad (2)$$

In cui:

H_{m0} = altezza d'onda significativa al piede della struttura

T = periodo medio dell'onda

depthP = profondità al piede della struttura

- se $\text{depthP} \leq 0$ la barriera è totalmente emersa e l'*overtopping* si manifesta sotto forma di lamina d'acqua che scorre al di sopra della struttura (*green water*). I danni associati sono relativamente moderati;
- se $\text{depthP} > 0$ le onde possono frangere violentemente contro la barriera dando luogo ad *overtopping* caratterizzato da forti getti verticali (*uprushing jet*).

La portata di *overtopping* Q è calcolata come:

- Caso non impulsivo ($h_* > 0.3$)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.04 \exp \left(-2.6 \frac{R_c}{H_{m0}^2} \right) \quad (3)$$

- Caso impulsivo ($h_* < 0.2$)

$$\frac{q}{h_*^2 \sqrt{gh_s^3}} = 1.5 \times 10^{-4} \left(h_* \frac{R_c}{H_{m0}} \right)^{-3.1} \quad (4)$$

- Caso intermedio ($0.2 < h_* < 0.3$)

La portata di *overtopping* è calcolata sia per il caso impulsivo che per quello non impulsivo ed assume valori molto grandi.

Come è possibile notare dalle formule precedentemente descritte, l'entità dell'*overtopping* dipende, oltre che dall'altezza d'onda significativa h_s a largo e dalla profondità del fondale al piede della struttura H_{m0} , anche dal dimensionamento della struttura ed in particolare dalla quota di coronamento della barriera e/o parete verticale R_c .

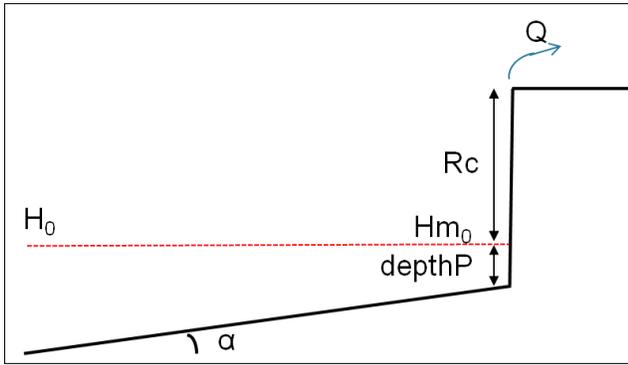


Fig. 5. Procedura per il calcolo del *run-up* nel caso di parete sub-verticale o barriera di protezione aderente. Parametri: Q =portata di *overtopping*, R_c =altezza della porzione emersa della barriera e/o parete sub-verticale; $depthP$ =profondità al piede della struttura; H_{m0} = altezza d'onda al piede della struttura; H_0 =altezza d'onda significativa *off-shore*; α =angolo d'inclinazione del fondale al piede della barriera.

C. Spiaggia con barriera di protezione distaccata

È il caso della spiaggia protetta da una struttura (Fig. 6). Il *run up* dell'onda sulla spiaggia è calcolato utilizzando la formula (5) proposta da Hunt [9] e riscritta da Battjes [10]:

$$R = \frac{tg\phi}{\sqrt{\frac{h_{SR}}{L}}} h_{SR} \quad (5)$$

In cui h_{SR} (6) è l'altezza d'onda ridotta calcolata tenendo conto della presenza della barriera e quindi dei fenomeni di trasmissione, riflessione e *shoaling*:

$$h_{SR} = h_{st} k_s k_r \quad (6)$$

In cui:

- h_{st} è l'altezza d'onda trasmessa
- k_s è il coefficiente di *shoaling*
- k_r è il coefficiente di rifrazione

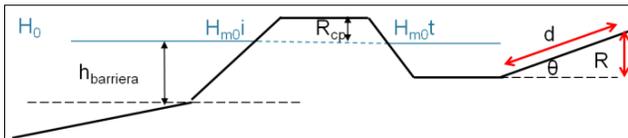


Fig. 6. Caso di spiaggia protetta da barriera. Parametri: d =distanza di allagamento; R =*run-up*; θ =angolo d'inclinazione della spiaggia; H_0 =altezza d'onda significativa *off-shore*; H_{m0i} =altezza d'onda significativa incidente; H_{m0t} =altezza d'onda significativa trasmessa; $h_{barriera}$ =profondità al piede della barriera; R_{cp} =altezza della porzione di barriera emersa.

D. Parete sub-verticale e barriera di protezione distaccata

Questo scenario è la combinazione degli scenari B e C (Fig. 7). Si tratta del caso in cui alle spalle di una barriera di protezione non aderente è presente una parete verticale.

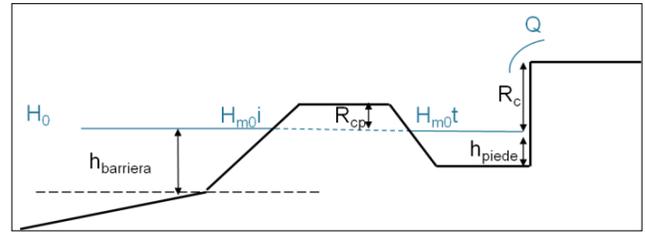


Fig. 7. Caso di parete sub-verticale protetta da barriera. Parametri: H_0 =altezza d'onda significativa a largo; H_{m0i} =altezza d'onda significativa incidente; H_{m0t} =altezza d'onda significativa trasmessa; $h_{barriera}$ =altezza della porzione di barriera sommersa; R_{cp} =altezza della porzione di barriera emersa; R_c =altezza della porzione di parete emersa; h_{piede} =profondità al piede della parete.

V. SISTEMA PER LA GENERAZIONE DELL'ALLARME

Il sistema di allerta consente, attraverso un servizio di messaggi automatizzati, di controllare costantemente, o secondo i tempi stabiliti dall'utente, lo stato del mare per ciascun punto identificato, segnalando prontamente i rilevamenti fuori soglia. L'idea principale è stata la creazione di un sistema personalizzabile per ciascun utente. Il sistema è stato implementato in *Python* e sfrutta *Java API*. Per rendere più user friendly la creazione di regole è stato sviluppato un *front-end web* come modulo *Drupal*.

La regola controlla il parametro relativo al livello di pericolosità per ciascun transetto e se il valore del parametro è superiore di una predeterminata soglia viene in automatico inviata un messaggio dal sistema ad una lista di utenti specifica, che riporta il luogo a rischio di mareggiata e la data e l'ora per cui è previsto l'evento con il relativo livello di pericolosità a cui saranno potenzialmente esposti i cittadini e le infrastrutture.

La notifica di allarme può avvenire su uno o più media (es. e-mail, sms, facebook, twitter, ecc.) decisi dall'utente in fase d'impostazione del sistema. Dai dati grezzi sono state create tabelle di rischio per ciascun punto da monitorare (Fig. 8). Una volta individuati gli elementi di interesse (status, altezza d'onda significativa e periodo), le procedure connesse alla visualizzazione dei dati sono riassumibili in due punti principali: un opzionale pretrattamento dei dati (*pre-processing*) e il *rendering* vero e proprio.

Il sistema di visualizzazione è stato sviluppato in linguaggio *Php* ed integrato in *Drupal* come modulo personalizzato, in conformità alla struttura del portale meteo del CCMMMA dal quale avviene l'accesso ai dati.

Il sistema fornisce previsioni del rischio d'inondazione marina legato a fenomeni di mareggiata per tre giorni (72 h) con cadenza oraria e si aggiorna ogni qualvolta sono disponibili nuove serie temporali dei dati prodotti dal modello WW3, aumentando così l'accuratezza della previsione e fornendo uno strumento affidabile e valido per la sicurezza in zone costiere.

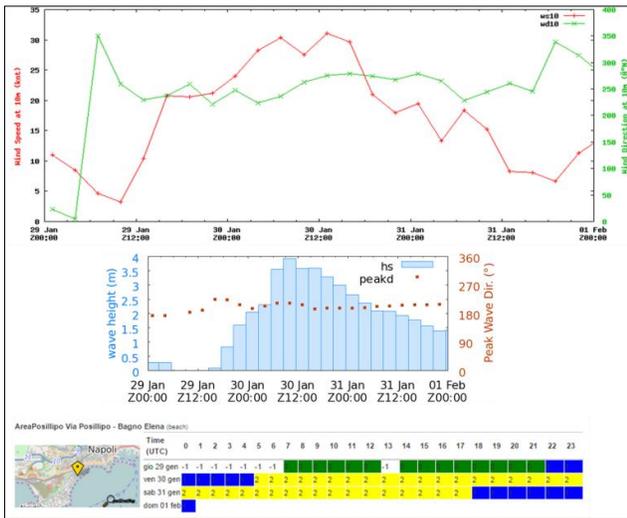


Fig. 8. Interfaccia web di visualizzazione dei risultati. La scala cromatica corrisponde ai seguenti livelli di rischio a cui è esposto il transetto: nullo (verde), basso (blu), medio (giallo), alto (rosso). I dati sono riferiti alla simulazione del 29 Gennaio 2015 alle 00.00 UTC per la località Via Posillipo - Bagno Elena. In corrispondenza del paragigio in esame si è avuta un'altezza d'onda massima di circa 4 m.

Una scala cromatica (verde, blu, giallo, rosso) è stata assegnata a ciascun livello di rischio per rendere il sistema facilmente utilizzabile anche ad utenti non esperti in materia (Fig. 8) ma, attraverso il portale è possibile accedere anche ai valori numerici relativi ai parametri che governano lo stato del mare e dell'atmosfera sfruttando il protocollo OpenDAP.

VI. CONCLUSIONI

Le metodologie descritte in questo lavoro hanno fornito una base per lo studio del rischio legato all'inondazione costiera con strumenti di oceanografia operativa. Esso fornisce un valido supporto gestionale alle amministrazioni locali e agli stabilimenti balneari, che potranno pianificare le attività inter-annuali garantendo la massima sicurezza ai cittadini e alle infrastrutture prospicienti la fascia costiera.

La corretta previsione degli episodi di mareggiata è importante per le grandi ricadute che gli eventi meteo-marini estremi hanno in campo economico, di protezione civile ed ambientale. Alla sempre migliore affidabilità degli strumenti numerici di previsione si arriva mediante la costante verifica dei risultati e dei metodi di impiego dei modelli.

Il sistema implementato sarà, quindi, sottoposto ad un'accurata fase di calibrazione e validazione modellistica per poter migliorare ulteriormente l'efficacia delle metodologie proposte, fornendo così uno strumento versatile e facilmente adattabile a differenti tipologie di litorale.

È evidente, in ogni caso, che la qualità dei risultati forniti dipende dai parametri introdotti nei vari modelli e sotto-modelli; tali parametri richiedono una conoscenza dettagliata della batimetria, geomorfologia e topografia dei luoghi e

devono comunque essere calibrati attraverso un lungo lavoro di monitoraggio, sia estivo sia invernale.

In questo contesto, una delle attività da esplicare nell'ambito del progetto di ricerca qui esposto è l'integrazione delle misure effettuate *in situ* con i dati di boe meteo-oceanografiche, in particolare con la boa del Comune di Napoli. Come sviluppo a medio termine è prevista l'evoluzione del modello di allerta e la sua implementazione verso la copertura completa della costa campana. A tale scopo, il sistema di allerta comprende già attualmente alcune sezioni sul litorale salernitano; in prospettiva si potrà estendere la verifica anche a litorali con diverse caratteristiche geomorfologiche e marine.

I. RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la "Situational Sea Awareness" – TESSA. Il CUGRI ha contribuito con il suo software ed i suoi dati d'archivio. Il DiST ha curato l'implementazione dell'intero sistema e ne ha consentito l'operatività mettendo a disposizione l'architettura hardware necessaria e gli strumenti modellistici.

II. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Ferrante V., Budillon F., Iorio M., Lubritto C., Monaco M., Pugliese Carratelli E., Vicinanza D., "Tracing Possible Offshore Sand Movement During Extreme Sea Storm Events: an example from the Salerno Bay (Southern Tyrrhenian Sea)", Chapter Risks, Marine Research at CNR, Dipartimento Terra e Ambiente, ISSN 2239-5172, Volume DTA/06-2011 pp. 1720-1733, 2011.
- [2] Pugliese Carratelli E., Budillon G., Dentale F., Reale F., Napoli F., Spulsi G., "An Experience in Monitoring and Integrating Wind and Wave Data in the Campania Region", OGS Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, ISSN: 0006-6729 Vol 48, No.3, 2007.
- [3] Giarrusso C.C., Pugliese Carratelli E. and Spulsi G., "Assessment Methods for Sea-Related Hazards in Coastal Areas", Journal of Natural Hazard, Kluwer Academic Publishers, pp. 295-309, 1999.
- [4] Giarrusso C.C., Pugliese Carratelli E., Spulsi G., "Large Scale Coastal Storm Hazard Mapping", ASCE Conference Solutions to Coastal Disasters '02, San Diego (CA), 2002.
- [5] Cocco E., Giarrusso C.C., Iuliano S., Mangiolfi A., Pugliese Carratelli E., Spulsi G., "Assessment of Erosion and Wave Risk over Coastal Areas", Proceedings of Coastal Engineering, Rhodes (Greece), 2001.
- [6] Pugliese Carratelli E., "Erosion and Storm Hazard Mapping and Real Time Monitoring: the Role of Remote Sensing and Real Time Systems", 1st Regional Conference on Geoinformatics, Disaster Management and Early Warning Systems November 24-26, KISR, State of Kuwait, 2008.
- [7] Mase H., "Random wave run-up height on gentle slope", J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng., 115 (5), pp. 649-661, 1989
- [8] Allsop W., Bruce T., Pullen T.A. and Van der Meer J., "Direct hazards from wave overtopping - the forgotten aspect of coastal flood risk assessment", 43rd Defra Flood and Coastal Management Conference, Manchester University, 2008.
- [9] Hunt, I. A., "Design of Seawalls and Breakwaters" J. Waterways and Harbors Div., ASCE, Vol. 85, No. WW3, 1959.
- [10] Battjes, J.A., "Surf Similarity", 14th Intl. Conf. Coastal Engr., pp. 466-480, 1974.

Implementazione di una catena operativa per il controllo di qualità di misure radar in banda X

Vincenzo Mazzarella^{1,2}

¹Istituto per l'Ambiente Marino Costiero
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Napoli, Italia
mazzarella.vi@gmail.com

Vincenzo Capozzi², Giorgio Budillon²

²Dipartimento di Scienze e Tecnologie
Università degli Studi di Napoli "Parthenope"
Napoli, Italia
vincenzo.capozzi@uniparthenope.it
giorgio.budillon@uniparthenope.it

Sommario— I radar meteorologici rivestono un ruolo di primo piano nell'ambito della stima in tempo reale dell'intensità delle precipitazioni atmosferiche. La validità di tali sistemi, tuttavia, soprattutto in contesti orografici particolarmente complessi, è spesso interessata da molteplici sorgenti di errore. Il presente lavoro si propone l'obiettivo di implementare una catena operativa finalizzata all'eliminazione degli errori deterministici (residui di retrodiffusione da ostacoli non meteorologici, clutter di mare, occlusione e attenuazione del fascio elettromagnetico) che possono alterare le misure di riflettività acquisite da un radar meteorologico in banda X, operativo nell'area urbana di Napoli. La catena operativa è stata sviluppata in linguaggio Python, il quale si distingue per la sua estrema portabilità e per la facilità con cui può essere eseguito su qualsiasi piattaforma. I test effettuati hanno mostrato risultati molto soddisfacenti: le procedure implementate per l'eliminazione del clutter di mare e del clutter di terra si dimostrano particolarmente valide, così come le tecniche adottate per la risoluzione dei problemi di attenuazione e ostruzione del fascio elettromagnetico legato alla presenza di ostacoli orografici. Saranno presentati, inoltre, i risultati derivanti dallo sviluppo di un algoritmo finalizzato al riconoscimento del tipo di precipitazione (stratiforme o convettiva) a partire dalle misure di riflettività corrette. Tale aspetto si rivelerà particolarmente utile in sede di conversione del dato di riflettività in intensità di pioggia.

Keywords—radar meteorologico; controllo di qualità; Python; catena operativa

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni la comunità scientifica ha dato ampio risalto alla comprensione e alla disamina delle sorgenti di errore che possono inficiare le misure radar [1]. Tali errori possono alterare sensibilmente le stime di pioggia, riducendo la validità di tale sistema di rilevamento nell'ambito di una rete di monitoraggio integrata. L'orografia particolarmente complessa dell'area urbana di Napoli può interagire con il fascio radar determinando una serie di errori (clutter di mare, clutter di terra, blocco del fascio, attenuazione etc.); pertanto, l'utilizzo dei prodotti radar non può prescindere

dall'implementazione di una catena operativa finalizzata alla rimozione degli echi di natura non meteorologica. Al fine di rendere la catena operativa completamente automatizzata, nonché funzionante in maniera autonoma e continua, si è scelto di svilupparla in linguaggio Python. Quest'ultimo supporta diversi paradigmi di programmazione: *object-oriented* (con supporto all'ereditarietà multipla), imperativo e funzionale. È fornito di una libreria *built-in* estremamente ricca, che unitamente alla gestione automatica della memoria e a robusti costrutti per la gestione delle eccezioni, fa di Python uno dei linguaggi più ricchi e comodi da usare. Python rientra, inoltre, tra i linguaggi pseudo-compilati: un interprete si occupa di analizzare il codice sorgente e, se sintatticamente corretto, di eseguirlo. Tale caratteristica lo rende estremamente portabile ed eseguibile su gran parte delle piattaforme attualmente utilizzate, siano esse di casa Apple, Windows o GNU/Linux.

Alla catena operativa implementata si aggiunge un ulteriore algoritmo, finalizzato all'identificazione del tipo di precipitazione (convettiva, stratiforme, mista) [2]. Tale aspetto risulterà di particolare rilievo ai fini di una corretta calibrazione pluviometrica delle stime di pioggia fornite dal radar.

I. IL SISTEMA RADAR

Il radar meteorologico (Fig. 1), operativo nell'area urbana di Napoli (40.84°N 14.24°E, 230 m slm), è un sistema in singola polarizzazione, denominato WR10X. Lo strumento si propone come il miglior candidato per il monitoraggio delle condizioni meteorologiche in tempo reale, sia in aree urbane che in aree dall'orografia complessa. La frequenza di lavoro, pari a 9.4 GHz (banda X), offre la possibilità di utilizzare un'antenna di ridotte dimensioni, pur mantenendo buone caratteristiche di risoluzione angolare del fascio. Altro punto di forza è il ridotto consumo di energia elettrica, circa 200 W, una quantità irrisoria se confrontata con un radar tradizionale. La durata dell'impulso, invece, è selezionabile tra 0.3, 0.6 e 1.2 μ S, mentre la potenza massima raggiungibile dal ricetrasmittitore è pari a 10 Kw. Il radar opera in maniera

continua, eseguendo scansioni ad intervalli di 5 minuti con *range* alternati di 36 e 72 km a diversi angoli di elevazione: 1°, 2°, 3°, 4°, 5° e 10°. L'antenna è caratterizzata da un'ampiezza del fascio di 3° e da una velocità di rotazione di 20 (°/s); la frequenza di ripetizione dell'impulso è di 800 Hz, mentre la risoluzione in *range* è pari a 300 m. La portata varia dai 72 km per fenomeni medio/forti ai circa 36 km per fenomeni di media e debole intensità. A differenza degli altri radar a basso costo presenti sul mercato, il WR-10X si caratterizza per l'antenna di tipo "pencil-beam", il cui fascio presenta la stessa lunghezza sia in azimuth che in elevazione [3]. In virtù delle tecnologie utilizzate, il costo d'acquisto e la manutenzione risultano molto contenuti, se confrontati con i tradizionali radar in banda C o S. Inoltre, le ridotte dimensioni, in aggiunta ai bassi consumi, consentono l'installazione dello strumento sia in postazione fissa, sia in postazione mobile.



Fig. 1 Sistema radar WR10X installato presso Castel Sant'Elmo (NA).

II. IMPLEMENTAZIONE DELLA CATENA OPERATIVA PER IL CONTROLLO DI QUALITÀ DEL DATO

Le misure di riflettività acquisite da un qualsiasi radar meteorologico sono soggette a molteplici errori:

- *Errori dovuti al campionamento dell'evento*: evaporazione a bassa quota, fascio del radar che oltrepassa la cella di precipitazione, effetto di arricchimento della precipitazione dovuto all'orografia, riempimento parziale del volume di campionamento, sottostima dell'intensità di precipitazione nel caso di pioggia fine o neve;
- *Errori di tipo statistico*: fluttuazioni dell'ampiezza dell'eco-radar, variazioni su piccola scala dei parametri fisici dell'atmosfera;
- *Errori deterministici*: retrodiffusione da ostacoli non meteorologici, occlusione del fascio elettromagnetico da parte dell'orografia, attenuazione del segnale-radar durante la propagazione, intercettazione dello strato di fusione da parte del fascio elettromagnetico, variazione verticale della riflettività, errata calibrazione del ricevitore.

La prima categoria raccoglie le problematiche imputabili alla morfologia del fenomeno di precipitazione e alla geometria di osservazione. Si tratta generalmente di errori non correggibili, se non conoscendo a priori l'evento su scale spaziali e temporali più fini rispetto a quelle del radar. La seconda tipologia include errori non prevedibili, solitamente di piccola

scala, i quali possono dar vita a falsi echi e a problemi nella localizzazione dei bersagli meteorologici. L'ultima categoria è quella cui è stata rivolta maggiore attenzione, dato che raggruppa errori correggibili con tecniche fisicamente basate: conoscendo le caratteristiche dello strumento e del territorio campionato, è possibile sviluppare procedure di correzione in grado di eliminarne o limitarne gli effetti [4]. In particolare, sono state adottate opportune metodologie di correzione per le seguenti problematiche:

- Residui di retro-diffusione da ostacoli non meteorologici;
- Retro-diffusione da parte della superficie del mare;
- Occlusione del fascio elettromagnetico da parte dell'orografia;
- Attenuazione del segnale elettromagnetico emesso dal radar.

Le riflettività acquisite dal sistema radar ai diversi angoli di elevazione sono memorizzate in archivi compressi con estensione .cab. La catena operativa richiama un primo *script*, in linguaggio Fortran, necessario per la decompressione dei file, la lettura degli stessi e la successiva conversione dei dati dal formato binario al formato decimale. Il secondo ed ultimo *script*, scritto in Python, procede, invece, al controllo di qualità del dato e restituisce come *output* le mappe e le matrici di *Vertical Maximum Intensity* (VMI), ovvero del massimo di riflettività lungo la verticale di ogni punto.

Al fine di testare l'efficacia della catena operativa implementata sono stati identificati diversi casi studio in relazione alle quattro problematiche precedentemente evidenziate.

A. Residui di retro-diffusione da ostacoli non meteorologici

I residui di retro-diffusione da ostacoli non meteorologici sono generati dall'interazione del fascio radar con la superficie terrestre e sono caratterizzati da basse ampiezze spettrali [5]. Il radar WR-10X utilizza un primo filtro di *decluster*, di tipo statistico, che valuta la diversa distribuzione dei campioni che si ha fra l'eco del radar dovuto al *clutter* e quello legato al segnale di natura meteorologica. Tuttavia, in sede di elaborazione delle scansioni-radar, è necessario integrare l'algoritmo precedente con un secondo filtro statistico volto ad eliminare i rumori residui generati dal *clutter* di terra. Tale filtro si basa su principi di natura statistica; in particolare, esso ricorre ai concetti di entropia media e varianza locale e lavora in domini quadrati di cui è possibile definire l'ampiezza. I campi con bassa entropia sono interpretati come portatori di un bassissimo contenuto di informazione e quindi sono filtrati completamente; i campi con entropia più elevata, invece, sono soggetti a successiva indagine attraverso il filtro mediano e il filtraggio locale. Quest'ultimo valuta la media e la varianza delle porzioni di campo quadrate; segnali rumorosi sono attribuiti a bassi valori della varianza e della media: essi, pertanto, una volta individuati, sono scartati. Di particolare criticità si è rivelata la scelta della soglia sulla varianza locale

(parametro di tessitura): le elaborazioni effettuate hanno suggerito di adottare una soglia sulla tessitura più bassa nell'immediato intorno (≈ 6 km) del radar, ove i disturbi residui si manifestano in maniera particolarmente frequente. La procedura di filtraggio, sviluppata dal Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DIET) dell'Università "La Sapienza" di Roma, è stata implementata in linguaggio Python ed inserita nella catena operativa. L'algoritmo è stato ottimizzato per l'area urbana di Napoli e reso più efficiente mediante l'utilizzo dell'estensione NumPy, che permette di ridurre i tempi di calcolo nelle gestione degli *array*.

Il filtro statistico implementato è stato testato su molteplici casi studio ed in particolare per l'evento del 27/10/2012, giornata caratterizzata da forte instabilità associata a rovesci di pioggia particolarmente intensi. In Fig. 2 sono riportate, rispettivamente, la mappa di riflettività non filtrata, ossia inficiata da retro-diffusione residua del terreno, e la mappa di riflettività risultante dall'applicazione del filtro statistico. Le mappe sono state elaborate prendendo in considerazione il VMI ed offrono la possibilità di apprezzare l'efficacia del filtro in corrispondenza degli ostacoli orografici (Vesuvio, Camaldoli, Monti Lattari, Ischia).

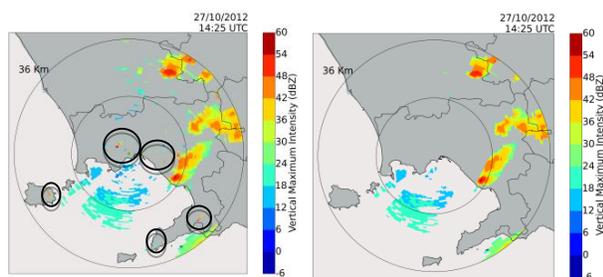


Fig. 2 Mappa di riflettività non filtrata relativa al caso studio del 27/10/2012 (pannello di sinistra). Risulta evidente il *clutter* di terra in corrispondenza degli ostacoli orografici evidenziati dalle circonferenze in nero. Nel pannello di destra è riportata la mappa di riflettività filtrata in cui non si osservano i disturbi generati dal *clutter* di terra.

B. Retro-diffusione da parte della superficie del mare

Il *clutter* di mare è causato dall'interazione del fascio radar con le onde del mare e si verifica in condizioni di moto ondoso intenso e di elevata rugosità dello specchio d'acqua e presenta bassi valori di riflettività. Generalmente questo parametro è apprezzabile solo in corrispondenza degli angoli di elevazione più bassi; è caratterizzato da una tessitura molto fine e da echi generalmente stazionari sia in termini d'intensità, che in termini spaziali. In letteratura sono riportate numerose tecniche, più o meno sofisticate, preposte alla rimozione di tale disturbo [6], [7], [8] e [9]. L'algoritmo implementato nella catena operativa trae spunto dallo studio di [10], secondo cui in condizioni di pioggia gli echi di natura meteorologica sono associati a profili di riflettività continui lungo la verticale, mentre in condizioni di *clutter* di mare gli stessi risultano fortemente discontinui. L'algoritmo implementato per il riconoscimento e l'eliminazione di tale disturbo confronta le differenze di riflettività tra 1° e 2° di elevazione (RD):

$$RD = V_1 - V_2 \text{ (dBZ)} \quad (1)$$

dove V_1 e V_2 sono due angoli di elevazione dell'antenna (solitamente i più bassi). Il ritorno di natura non meteorologica dovuto al *clutter* di mare è diagnosticato allorché occorre una delle seguenti condizioni:

$$RD > T_1 \quad (2)$$

$$RD > 0 \wedge V_2 < T_2 \quad (3)$$

dove T_1 e T_2 sono valori di soglia empirici definiti mediante l'analisi della distribuzione in frequenza del ritorno non-meteorologico e di quello dovuto a pioggia.

L'algoritmo volto alla rimozione del *clutter* di mare è stato testato su molteplici casi studio ed in particolare sull'evento del 13/01/2013, giornata caratterizzata da forti venti di Libeccio sul Tirreno Centro-Meridionale. Il *clutter* di mare, infatti, si manifesta proprio in condizioni di moto ondoso intenso, ossia in condizioni di elevata rugosità dello specchio d'acqua. In Fig. 3 sono riportate le due mappe di VMI relative al caso studio preso in esame. Nella prima risultano evidenti gli echi di natura non meteorologica all'interno del Golfo di Napoli, associati al *clutter* di mare. Nella seconda, invece, a cui è stato applicato il filtro, la superficie del mare risulta priva di disturbi.

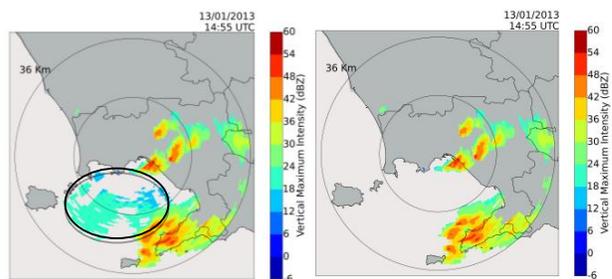


Fig. 3 Mappa di riflettività non filtrata relativa al caso studio del 13/01/2013 (pannello di sinistra). Risulta evidente il *clutter* di mare nel Golfo di Napoli, contrassegnato dalla circonferenza in nero. L'applicazione del filtro rimuove i disturbi presenti sulla superficie marina (pannello di destra).

C. Occlusione del fascio elettromagnetico da parte dell'orografia

La presenza di un ostacolo orografico può determinare una perdita di potenza (totale o parziale) del fascio radar che impedisce la corretta stima della precipitazione. La percentuale d'area della sezione trasversale del fascio radar ostruita dalla topografia può essere espressa in funzione del raggio della sezione trasversale del fascio e della differenza tra l'altezza media del terreno ed il centro del fascio [11]. L'algoritmo incrementa di alcuni decibel (Tab. 1) i valori di riflettività in corrispondenza degli azimuth influenzati dall'orografia.

Tab. 1: Schema di correzione: l'incremento di riflettività proposto tiene conto della sola percentuale di occultazione del fascio.

| Occultazione (%) | Schema di correzione |
|------------------|------------------------------|
| | Incremento riflettività (dB) |
| 0-10, >60 | 0 |
| 11-29 | +1 |
| 30-43 | +2 |

| Occultazione (%) | Schema di correzione |
|------------------|------------------------------|
| | Incremento riflettività (dB) |
| 44-55 | +3 |
| 56-60 | +4 |

L'incremento di riflettività proposto da [12] tiene conto della sola percentuale di occultazione del fascio; non vi è alcuna menzione, dunque, riguardo alla specifica parte del fascio che viene schermata. Quest'approccio ricorre ad una funzione d'intercettazione relativamente semplice ed è basato sull'ipotesi per cui i fattori additivi tengano conto della distribuzione della potenza del fascio.

Utilizzando un Modello Digitale del Terreno (DTM) e considerando la geometria del sistema radar WR-10X, sono state elaborate le mappe del *beam blocking* (espresso in percentuale) ad 1°, 2° e 3° di elevazione (Fig. 4). Un'attenta analisi evidenzia alte percentuali di blocco in corrispondenza dei Camaldoli e del Vesuvio, rispettivamente nelle direzioni NW ed ESE. In virtù della geometria del fascio, la mappa ad 1° di elevazione risente anche della presenza dei Monti Lattari, in particolare del Monte Faito, della catena del Partenio, dei Monti di Sarno e dei Monti Trebulani, seppur in maniera minore (Fig. 4).

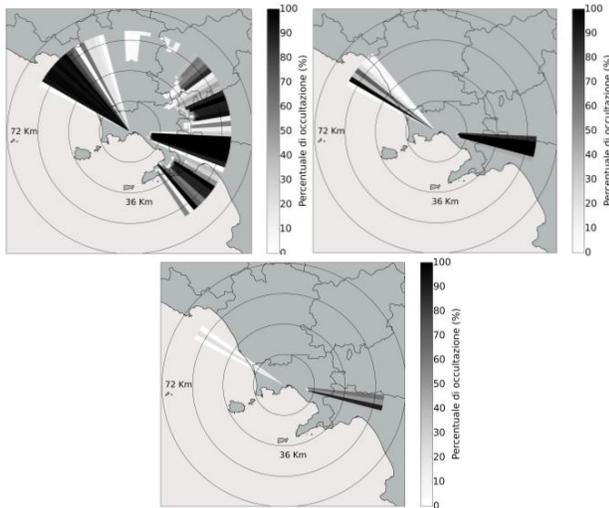


Fig. 4 Mappa del *beam blocking* ad 1° di elevazione (pannello in alto a sinistra). Alte percentuali di occultazione del fascio si riscontrano in corrispondenza dei Camaldoli (NW), del Vesuvio (ESE) e del Monte Faito (SE). Nel pannello in alto a destra è mostrata la mappa del *beam blocking* a 2° di elevazione. Il fascio radar raggiunge altezze maggiori: di conseguenza, l'occultazione dello stesso è determinata dai soli ostacoli orografici posti a breve distanza dal radar. Nel pannello in basso è riportata la mappa del *beam blocking* a 3° di elevazione. Il fascio radar raggiunge altezze sempre maggiori all'aumentare della distanza: di conseguenza, le uniche percentuali di occultazione sono determinate dal Vesuvio e dai Camaldoli, rilievi posti a breve distanza dal radar.

In Fig. 5 sono riportate le mappe di compensazione per i tre angoli di elevazione, ottenute adottando lo schema proposto da [12] ed assumendo un gradiente verticale di rifrazione standard. L'incremento di dBZ risulta piuttosto basso e

compreso tra 1 e 4 dBZ; i valori maggiori si riscontrano proprio in corrispondenza dei Camaldoli e del Vesuvio, in accordo con le percentuali di *beam blocking* mostrate in Fig. 4.

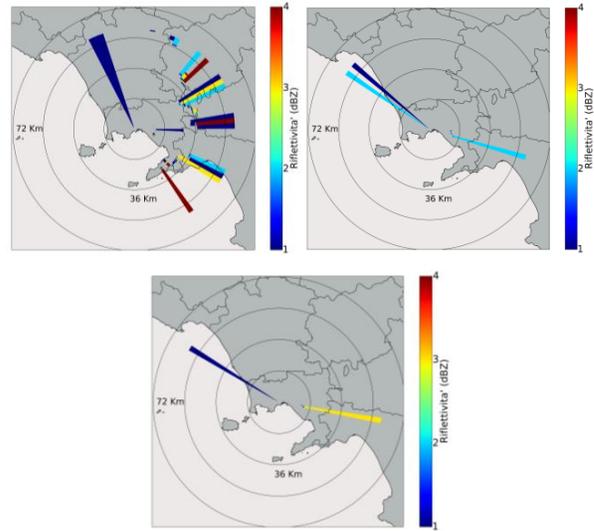


Fig. 5 Mappa di compensazione ad 1° (pannello in alto a sinistra), 2° (pannello in alto a destra) e 3° (pannello in basso) di elevazione. L'incremento di riflettività (dBZ) è proporzionale alle percentuali del *beam blocking* e all'elevazione del fascio radar.

D. Attenuazione del segnale elettromagnetico emesso dal radar

L'energia elettromagnetica incidente su un bersaglio (gas atmosferici, nubi e idrometeor) viene in parte diffusa e in parte assorbita; la potenza del fascio radar, pertanto, viene ridotta di un fattore che dipende dal tipo di mezzo, dalla densità del mezzo e dalla frequenza dell'onda elettromagnetica. Tale problematica assume particolare rilevanza proprio in banda X, come dimostrato da [13], [14] e [15], ed è fortemente dipendente dall'intensità della precipitazione. L'attenuazione tra la cella $i-1$ e la cella i può essere calcolata secondo l'espressione analitica riportata di seguito, la quale trae origine dalla definizione di una legge di potenza che lega il fattore di riflettività Z all'attenuazione; in tale relazione compaiono due coefficienti, α e β , il cui valore dipende dalla frequenza di lavoro del radar, dalla distribuzione dimensionale delle idrometeor e dalla temperatura di queste ultime:

$$A(i-1,i)=2L*\alpha(Z_i)^\beta \quad (4)$$

L'algoritmo, sviluppato originariamente in linguaggio MATLAB, è stato convertito in Python ed inserito nella catena operativa. Esso trae ispirazione dall'algoritmo sviluppato in [16], incentrato sul calcolo del *Path Integrated Attenuation* (PIA), ossia dell'attenuazione lungo l'intero percorso compiuto dal fascio del radar:

$$PIA_{(0,i-1)}=\sum_{j=1}^{i-1} A(j-1,j) \quad (5)$$

Per il calcolo dell'attenuazione, invece, sono stati utilizzati i coefficienti proposti da [17].

L'algoritmo utilizzato per limitare l'attenuazione del segnale elettromagnetico è stato validato in diversi casi studio prima di essere integrato nella catena operativa. Di seguito sono mostrati i risultati ottenuti per l'evento occorso in data 17/12/2012, caratterizzato da precipitazioni di natura temporalesca, associate, dunque, ad alti valori di riflettività. In Fig. 6 si riportano, rispettivamente, la mappa di VMI e la mappa di compensazione per l'attenuazione. I valori di quest'ultima sono piuttosto bassi e compresi nel range 0.2-1.8 dBZ; risulta, inoltre, evidente la dipendenza sia dall'intensità della precipitazione in atto, che dalla distanza e dall'altezza raggiunta dal fascio radar.

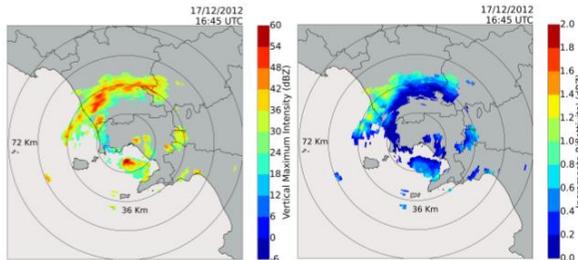


Fig. 6 Mappa del VMI acquisita in data 17/12/2012 (pannello di sinistra). Mappa rappresentativa dell'incremento di riflettività (pannello di destra) che si ottiene applicando l'algoritmo di compensazione per l'attenuazione.

III. IDENTIFICAZIONE DEL TIPO DI PRECIPITAZIONE

Sulla base di misure inerenti la distribuzione dimensionale delle idrometeorie ed assumendo valida una relazione per la velocità terminale delle gocce, è possibile derivare una relazione di potenza e di forma fra le variabili Z (mm^6/m^3) ed R (mm/h):

$$Z = \alpha R^\beta \quad (6)$$

dove α e β sono coefficienti che possono variare da punto a punto e da un evento precipitativo all'altro. Essi riflettono le caratteristiche climatologiche di una particolare località e, più specificatamente, il tipo di precipitazione (stratiforme, convettiva, orografica) per il quale sono stati derivati. Al fine di migliorare la relazione di conversione per la stima del tasso di pioggia è necessario identificare il tipo di precipitazione a partire da un'accurata analisi delle mappe di riflettività. In particolare, la precipitazione si definisce stratiforme se il moto verticale dell'aria soddisfa la seguente condizione:

$$|w| \ll |V_t| \quad (7)$$

Dove V_t rappresenta la velocità terminale delle gocce di pioggia e w la velocità verticale dell'aria.

Sono state sviluppate diverse tecniche per l'identificazione del tipo di precipitazione in accordo con la condizione (7) utilizzando i valori di riflettività acquisiti dal radar. Alcuni metodi fanno uso dell'effetto di *bright band* per identificare le precipitazioni stratiformi [18], [19]; tali metodologie, tuttavia, come evidenziato da [2], possiedono alcuni limiti, relativi da un lato al fatto che la risoluzione verticale del radar al crescere della distanza del bersaglio può non essere adeguata per distinguere la *bright band*, dall'altro al fatto che quest'ultima è

ben definita solo quando la precipitazione stratiforme è ben sviluppata. Altri metodi, invece, più semplici e pratici, analizzano la struttura orizzontale del campo di precipitazione (o di riflettività). In [20] e [21] sono stati sviluppati in quest'ottica algoritmi di separazione completamente indipendenti dalla tecnica adottata in sede di conversione riflettività-pioggia. L'algoritmo implementato riprende in parte la procedura adottata da [2] e pone le proprie basi sulla ricerca delle celle convettive, ossia di picchi di riflettività con determinate caratteristiche. Il raggio di tali celle è definito in funzione della riflettività media che caratterizza l'intorno del centro convettivo. Al metodo originariamente sviluppato in [2] sono state introdotte lievi modifiche per sopperire ad eventuali *spike* presenti nei dati di riflettività. Le integrazioni possono essere sintetizzate come segue:

- Una volta individuato il pixel che soddisfa la prima condizione definita da [2], viene effettuato il calcolo della media del campo di riflettività in un intorno di raggio pari a 2 km centrato sul pixel. Se il valore di riflettività del pixel classificato come convettivo eccede una certa soglia, pari alla media dell'intorno addizionata al doppio della deviazione standard della riflettività dell'intorno stesso, allora il pixel viene classificato come *spike* e gli viene assegnato il valore medio dell'intorno.
- Il pixel che soddisfa il secondo criterio definito da [2] viene confrontato con la media di un intorno di raggio pari a 5 km centrato sul pixel stesso. Se la riflettività del pixel eccede una certa soglia, pari ancora una volta al valore medio dell'intorno addizionato al doppio della deviazione standard, allora il pixel è classificato come *spike* e gli viene assegnato il valore medio dell'intorno.

L'algoritmo di riconoscimento è stato testato per l'evento del 05/01/2012, il quale fu caratterizzato sia da precipitazioni convettive sia da precipitazioni stratiformi. I valori di VMI, in accordo con l'algoritmo di identificazione confermano precipitazioni di tipo misto (Fig. 7).

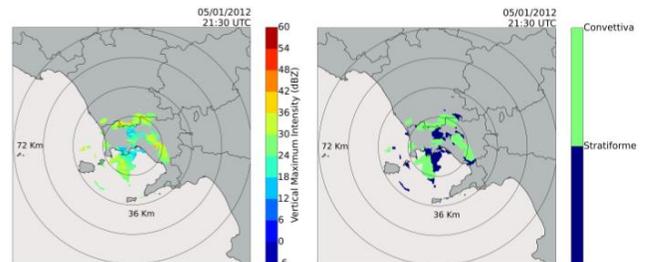


Fig. 7 Mappa di riflettività relativa all'evento misto del 05/01/2012 (pannello di sinistra). L'immagine nel pannello di destra riporta le diverse tipologie di precipitazione identificate. In verde sono indicate le precipitazioni convettive, in blu le precipitazioni di tipo stratiforme.

IV. CONCLUSIONI

La catena operativa implementata, finalizzata al controllo di qualità di misure radar acquisite dal radar meteorologico in banda X operativo nell'area urbana di Napoli, mostra risultati piuttosto soddisfacenti. Gli algoritmi utilizzati per l'eliminazione del *clutter* di mare e del *clutter* di terra si dimostrano particolarmente efficaci; le immagini elaborate

risultano quasi del tutto prive di disturbi. Anche le procedure adottate per compensare il *beam blocking* e per limitare l'attenuazione del segnale elettromagnetico risultano particolarmente valide: l'incremento di riflettività, seppur lieve, concorre alla minimizzazione dell'errore. La catena operativa sviluppata, con l'ausilio dell'algoritmo di identificazione della tipologia di precipitazione, risulterà di fondamentale importanza per una futura stima "ad hoc" dei coefficienti di calibrazione, necessari per convertire accuratamente i valori di riflettività in intensità di pioggia.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' - TESSA".

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Marzano, F.S., Budillon, G., Picciotti, E., Montopoli, M., Zinzi, A., Buonocore, B. (2012), "X-band weather radar monitoring real-time products in Rome and Naples urban areas", Tyrrhenian Workshop 2012 on Advances in Radar and Remote Sensing.
- [2] Steiner, M., Houze, R.A., Yuter, S.E. (1995), "Climatological Characterization of Three-Dimensional Storm Structure from Operational Radar and Rain Gauge Data", *J. Appl. Meteor.*, 34, 1978–2007.
- [3] Montopoli M., Picciotti E., Di Fabio S., Telleschi A., Volpi A., Marzano F.S. (2010), "X-band weather radar monitoring products at urban scale: spatial calibration hail detection and tracking accuracy evaluation", ERAD-2010 The sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology.
- [4] Borga, M. and Tonelli, F. (2002), "Long-term assessment of bias adjustment in radar rainfall estimation", *Water Resources Research*, vol. 38, 11, 1226.
- [5] Doviak, R. and Zrníc, D. (1993), "Doppler radar and weather observations", Academic Press UK, 592 pp.
- [6] Steiner, M. and Smith, J.A. (2002), "Use of Three-Dimensional Reflectivity Structure for Automated Detection and Removal of Nonprecipitating Echoes in Radar Data", *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19, 673–686.
- [7] Lakshmanan, V., Hondl, K., Stumpf, G., Smith, T. (2003), "Quality Control of weather Radar data using Texture Features and a Neural Network", 5th Int'l Conf. on Adv. In Pattern Recog., IEEE, Kolkata.
- [8] Kessinger, C., Ellis, S., Van Andel, J. (2003), "The Radar Echo Classifier: A Fuzzy Logic Algorithm for the WSR-88D", 19th IIPS Conf., Amer. Meteor. Soc. Long Beach, CA.
- [9] Gill, R.S. (2007), "Sea clutter removal using radar elevation dependent second order texture parameters", Scientific Report 07-01, Ministry of Transport and Energy (DMi).
- [10] Alberoni, P. P., Andersson, T., Mezzasalma, P., Michelson, D. B., Nanni, S. (2001), "Use of the vertical Reflectivity profile for Identification of Anomalous propagation", *Meteorol. Appl.* 8, pp. 257 – 266.
- [11] Bech, J., Codina, B., Lorente, J., Bebbington, B. (2003), "The Sensitivity of Single Polarization Weather Radar Beam Blockage Correction to Variability in the Vertical Refractivity Gradient", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 20, pp 845-855.
- [12] Fulton, R. A., Breidenbach, J. P., Seo, D., Miller, D., O'Bannon, T. (1998), "The WSR-88D rainfall algorithm", *Wea. Forecasting*, 13, 377–395.
- [13] Delrieu, G., Hucce, L., Creutin, J.D. (1999), "Attenuation in Rain for X- and C-Band Weather Radar Systems: Sensitivity with respect to the Drop Size Distribution", *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 38, pp. 57-68.
- [14] Delrieu, G., Serrar, S., Guardo, E., Creutin, J.D. (1999), "Rain Measurement in Hilly Terrain with X-Band Weather Radar Systems: Accuracy of Path-Integrated Attenuation Estimates Derived from Mountain Returns", *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 16, 405–416.
- [15] Berne, A. and Uijlenhoet, R. (2006), "Quantitative analysis of X-band weather radar attenuation correction accuracy", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 419-425.
- [16] Osrodka, K., Szturc, J., Jurczyk, A. (2012), "Chain of data quality algorithms for 3-D single-polarization radar reflectivity (RADVOL-QC system)", *Meteorol. Appl.*, DOI: 10.1002/met.1323.
- [17] Perez, M.A. and Zawadzki, I. (2003), "S- and X-band dual-wavelength radars revisited," Preprints, 31st Int. Conf. on Radar Meteorology, Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc., 51–54.
- [18] Collier, G.C., Lovejoy, S., Austin, G.L. (1980), "Analysis of bright bands from 3-D radar data", Preprints, 19th Conference on Radar Meteorology, Miami Beach, FL, Amer. Meteor. Soc., 44-47.
- [19] Rosenfeld, D., Amitai, E., Wolff, D.B. (1995), "Classification of Rain Regimes by the Three-Dimensional Properties of Reflectivity Fields", *J. Appl. Meteor.*, 34, 198–211.
- [20] Churchill, D. D., Houze, R.A. Jr. (1984), "Development and structure of winter monsoon cloud clusters on 10 December 1978", *J. Atmos. Sci.*, 41, 933-960.
- [21] Steiner, M., Houze, R.A. Jr. (1993), "Three-dimensional validation at TRMM ground truth sites: Some early results from Darwin, Australia, Preprints, 26th Conference on Radar Meteorology", Norman, American Meteorological Society, 417-420.

Analisi climatologica con dati XBT

Francesco Orilia
IAMC-CNR Napoli
fra.orilia@gmail.com

Alberto Ribotti
IAMC-CNR Oristano, Loc.Sa Mardini
alberto.ribotti@cnr.it

Sommario—Il sub-bacino del mar Tirreno, parte del Mediterraneo occidentale, è attraversato da masse d'acqua intermedie provenienti dal bacino orientale del Mediterraneo. Per questo motivo negli ultimi anni l'interesse per il mar Tirreno è accresciuto nell'ambito dello studio sulla formazione di nuove acque profonde nel Mediterraneo occidentale e la loro relazione con l'evento climatologico chiamato *Eastern Mediterranean Transient*. In questo lavoro è descritta un'analisi climatologica realizzata con 15 anni di profili di temperatura acquisiti tramite sonde XBT. L'analisi mostra tendenza positiva nell'andamento della temperatura dello strato intermedio a partire dal 1999 con un picco massimo a settembre 2014, anno in cui si evidenzia l'anomalia maggiore. Il lavoro descritto è stato svolto grazie al corso di formazione "OTTIMA"(Oceanografia Operativa e Tecnologie Informatiche per la sicurezza marittima) nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness'-TESSA".

Keywords—*Mar Tirreno, Transiente Mediterraneo Orientale, circolazione oceanografica, acque intermedie.*

INTRODUZIONE

Il mare Mediterraneo è un mare marginale semi-chiuso, collegato all'Oceano Atlantico attraverso lo Stretto di Gibilterra ed è formato da due principali bacini, l'orientale e l'occidentale, che comunicano attraverso il Canale di Sicilia. La circolazione oceanografica del Mediterraneo è forzata da scambi di masse d'acqua attraverso gli stretti e i canali, lo stress del vento e il bilancio dei flussi di calore all'interfaccia aria-mare. La circolazione generale è complessa ed è composta da tre scale spaziali predominanti e connesse tra di loro e cioè la mesoscala, la scala di sub-bacino e la larga-scala. La complessità e le diverse scale nascono dalla presenza di una molteplicità di forzanti, tra cui una forte influenza della topografia dei fondali e della morfologia delle coste. I canali e gli stretti del Mediterraneo, di differente ampiezza e profondità, hanno un fondamentale ruolo di controllo dei trasporti ed influenzano le caratteristiche degli scambi [1]. Il mar Tirreno è il sub-bacino più profondo del Mediterraneo occidentale e raggiunge la profondità più elevata al suo centro (3550 m) ed è caratterizzato da una complessa batimetria. Il bacino è delimitato a est dalla penisola italiana, a ovest da Corsica e Sardegna ed a sud dalla Sicilia. Verso nord i collegamenti con il Mar Ligure e il bacino occidentale sono

attraverso il Canale di Corsica. In direzione sud è collegato con lo Stretto di Sicilia ed il bacino algerino attraverso un'ampia apertura tra Sicilia e Sardegna, mentre gli scambi attraverso le Bocche di Bonifacio e lo Stretto di Messina sono trascurabili rispetto agli ultimi due descritti. L'idrodinamica del mar Tirreno negli anni passati è stata studiata in dettaglio [1],[2],[3],[4],[5],[6],[7] ma solo alla fine degli anni '90 è aumentato l'interesse da parte dei ricercatori, in seguito alla formazione di nuove acque profonde nel mar Mediterraneo occidentale e la loro relazione con l'evento climatologico chiamato Transiente del Mediterraneo Orientale o EMT [8],[9],[10],[11],[12]. L'EMT ha modificato le caratteristiche, relativamente costanti in passato, delle acque intermedie con l'ingresso di acque più calde e più salate attraverso lo Stretto di Sicilia dal Mediterraneo orientale verso il Mediterraneo occidentale, causando un eccesso e/o una completa sostituzione delle acque profonde precedentemente residenti [11]. Dal 2005 nel Golfo del Leone è stata osservata la formazione di una massa d'acqua più salata, più calda e più densa relativamente alla *Western Mediterranean Deep Water* (WMDW) [13];[14], con successiva diffusione sul fondo in tutto il bacino del Mediterraneo occidentale.

La circolazione del mar Tirreno può essere semplicemente descritta con il sistema a tre strati tipico del mare Mediterraneo: strato superficiale, intermedio e profondo. Lo strato superficiale si posiziona tra la superficie ed i 100-150 m di profondità e proviene principalmente da ovest, con la corrente Algerina, identificabile da un minimo di salinità. Lo strato intermedio viene invece da est ed è composto da una mescolanza tra la *Levantine Intermediate Water* (LIW) e la *Cretan Intermediate Water* (CIW), acque entrambe formatesi nel bacino orientale. La mescolanza tra queste due acque è denominata *Eastern Intermediate Water* (EIW) che entra nel bacino occidentale e nel mar Tirreno attraverso il Canale di Sicilia. La EIW è composta dalla LIW per 2/3-3/4 ed è caratterizzata da un massimo di salinità che si può osservare nel Tirreno tra i 700-1000 m di profondità [15] e tra i 200-800 m vicino alla scarpata continentale [16]. Le acque intermedie circolano verso nord con un andamento anti-ciclonico lungo la penisola italiana, continuando a mescolarsi con le acque circostanti. La EIW mostra una salinità di circa 38.76-38.77 ($\sigma_\theta=29.07-29.08 \text{ kg/m}^3$) vicino alla Sicilia, di circa 38.88-38.90 ($\sigma_\theta=29.05-29.10 \text{ kg/m}^3$) di fronte a Napoli e di 38.65 ($\sigma_\theta=29.10 \text{ kg/m}^3$) vicino costa orientale sarda [15]. La circolazione della EIW subisce variazioni stagionali: mentre in inverno una parte lascia il bacino attraverso il Canale di Corsica mentre un'altra attraverso l'apertura tra Sicilia e

Sardegna, in estate, quest'ultima area rappresenta il principale collegamento con il resto del Mediterraneo [1],[17]. Al di sotto della LIW, la *Tyrrhenian Deep Water* (TDW) è il risultato del mescolamento tra la WMDW (*Western Mediterranean Deep Water*) che entra dal Canale di Sardegna, la *transitional Eastern Mediterranean Deep Water* (tEMDW) che proviene dal Mediterraneo orientale oltrepassando lo Stretto di Sicilia e, parzialmente, la EIW che una volta entrata nel bacino Tirrenico si mescola con le acque circostanti e sprofonda sotto i 2000 m. [4], [13], [15].

Lo scopo principale di questo lavoro è quello di descrivere il trend e la variabilità delle temperature negli strati intermedi del mar Tirreno e la relazione con le influenze passate e attuali del transiente (EMT). Questo attraverso 16 anni di osservazioni (1999-2014) relative a profili di temperatura acquisiti tramite sonde XBT lungo il mar Tirreno.

I. MATERIALI E METODI

I profili XBT sono stati acquisiti nel periodo 1999-2014 nel contesto del *Voluntary Observing Ship (VOS) Programme* diretto da JCOMM (*Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology*) e finanziati da diversi progetti europei. I dati di temperatura sono stati raccolti principalmente utilizzando navi commerciali della compagnia marittima italiana "Grandi Navi Veloci" lungo il transetto Genova Palermo (Fig.1) in tre differenti periodi: settembre 1999 - dicembre 2000 (20 campagne); maggio 2004 - ottobre 2006 (17 campagne) e luglio 2010 - settembre 2014 (18 campagne). Un transetto incompleto è stato realizzato nel 2000 dalla nave oceanografica Urania del CNR. Altri profili sono stati ottenuti, tra aprile 2009 e settembre 2010 (10 transetti), utilizzando navi mercantili delle compagnie Hapag Lloyd e CMA CGM lungo il transetto dalla Sicilia occidentale all'estremo nord della Corsica a Capo Corso (Fig. 1). Sono stati usati differenti tipi di XBT con differenti tipologie di acquisizione dati:

- 1999-2000: sonde LM Sippican T4 con sistema di acquisizione LM Sippican MK12;
- 2004-2006: sonde LM Sippican T4, DB e XTCD-1 con sistema di acquisizione LM Sippican MK21;
- 2010-2014: sonde LM Sippican T4, DB and T5/20 con sistema di acquisizione LM Sippican MK21 USB .

A luglio 2010 e per il transetto Sicilia - Capo Corso è stato usato un sistema di acquisizione Turo QUOLL. La profondità di misura è stata di 450-550 m per la sonda T4, 720-890 m per la sonda DB e 1600-1750 m per la sonda T5/20. La frequenza dei campionamenti nei tre periodi è stata variabile. Il primo periodo (1999-2000) è stato caratterizzato da circa 40 profili per transetto distanziati di 20-25 km, con campagne mensili.

Nel secondo periodo, dal 2004 al 2006, si è mantenuto lo stesso schema di campionamento mentre dal 2006 la frequenza è diminuita passando da campagne mensili a stagionali (al massimo un transetto ogni due mesi) e con l'acquisizione di meno di 30 profili per transetto. Nel transetto Sicilia-Corsica la distanza tra un campionamento e l'altro è aumentata a circa 60 km.

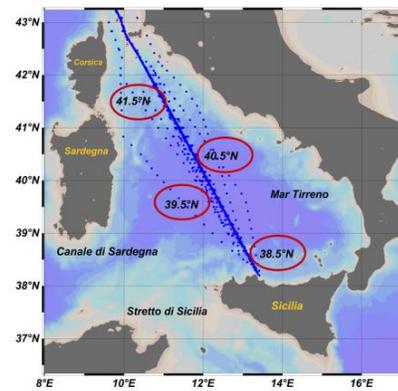


Fig.1 Transetto principale dal Tirreno settentrionale alla Sicilia e transetto secondario dalla Corsica alla costa occidentale siciliana. Per l'analisi climatologica dei dati sono stati considerati dati compresi in 4 aree distanziate tra loro di circa 1 grado di latitudine, da 41.5° N a 38.5° N.

Le sonde XBT sono sprovviste di sensori per misurare la pressione dell'acqua di mare, quindi forniscono "semplicemente" il dato di temperatura ogni 0.1s. Successivamente il dato viene associato ad una profondità tramite equazioni che tengono conto del tasso di velocità di caduta della sonda con coefficienti suggeriti da IGOSS (*Integrated Global Ocean Services System*) per le sonde T4 e DB, mentre per la sonda T5/20 sono stati usati coefficienti forniti dal produttore. Il corretto funzionamento del sistema di acquisizione del dato di temperatura è stato calibrato tramite una sonda tester che verifica la possibile presenza e quantità di errori dovuti ai componenti elettrici del circuito. Data la particolarità del mare Mediterraneo (frequenti inversioni di temperatura della colonna d'acqua, omogeneità, alte temperature e concentrazione di sali) sono state applicate specifiche procedure di qualità dei dati (sempre includendo un controllo visivo) sviluppate a partire dall'inizio del progetto MFSPP [18], [19].

II. RISULTATI

Per l'analisi sono state prese in considerazione le profondità tra i 200 e i 900 m in modo da escludere l'alta variabilità degli strati superficiali e per focalizzarsi nello strato intermedio. I dati sono concentrati nei mesi di settembre e dicembre; per questo motivo la maggior parte delle analisi sono state realizzate usando i dati di questi due mesi. Nel grafico di Fig. 2 sono riportati profili di temperatura acquisiti nella stagione autunnale nei diversi anni a latitudini comprese tra i 38.33-38.68° N. Le stazioni relative agli anni 1999 e 2000, nella parte sinistra della figura risultano essere quelle più fredde, mentre le stazioni del 2004, 2012 e 2014, nella parte destra della figura sono quelle più calde. La distinzione tra i profili più freddi e quelli più caldi è confermata dai grafici di Fig. 3, che mostrano la variazione di temperatura a due differenti latitudini, rispettivamente 38.5°N e 41.5°N ed a tre differenti profondità (300, 500 e 700m).

Ad entrambe le latitudini il trend delle temperature dal 1999 al 2014 mostra un generale incremento a tutte le profondità.

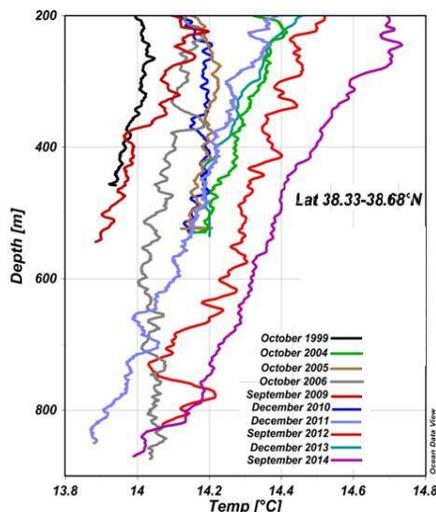


Fig. 2 : Profili di temperatura nel range di profondità 200-900 m acquisiti tramite XBT nel Tirreno meridionale (38.5°N) tra ottobre 1999 e settembre 2014.

Nei dati relativi alla latitudine di 38.5°N vi sono due picchi visibili nel 2004 e nel 2012 a 300 m mentre c'è un evidente decremento nel 2012 da 500 a 800m. Nel 2014 a 300 m di profondità la temperatura aumenta di +0.6°C rispetto al valore di 14.0°C nel 1999. La differenza di temperatura tra i due picchi riscontrati nel 2004 e nel 2014 è superiore a +0.3°C.

Alla latitudine di 41.5°N il trend delle temperature è simile ma con valori più bassi, con un incremento di +0.2°C a 300 m (1999-2014). Nel 2006 è però osservabile un evidente decremento di temperatura (-0.45°C rispetto al 1999).

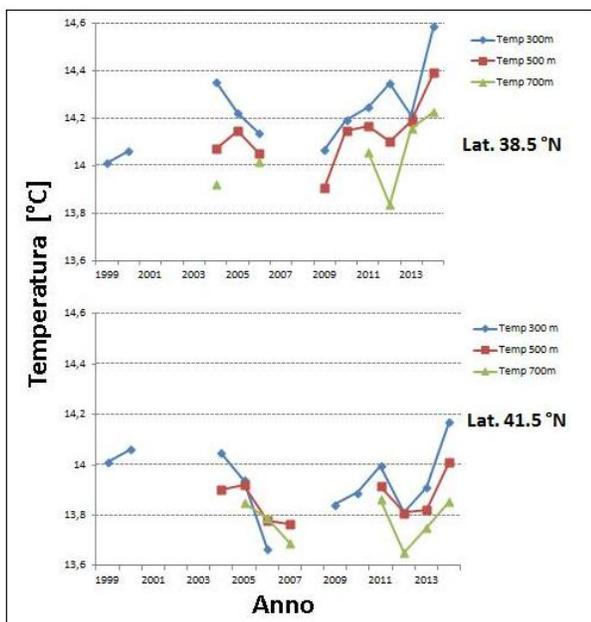


Fig.3 Evoluzione della temperatura a differenti profondità, 300, 500 e 700 m e alle latitudini di 41.5°N e 38.5°N tra il 1999 e il 2014.

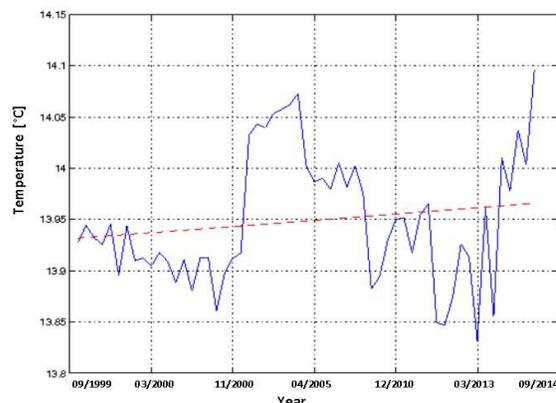


Fig.4 Trend della temperatura del Mar Tirreno realizzata con le medie di temperatura di ogni transetto dal 1999 al 2014, tra le latitudini 42.5°N- 38.5°N e le profondità di 200-800 m.

Tuttavia il trend di temperatura nell'intero periodo preso in esame (1999-2014) risulta generalmente in aumento, come evidenziato nelle curve (Fig. 4) realizzate mediando i dati di temperatura di ogni transetto ed utilizzando l'intero dataset a disposizione. Il trend è inoltre confermato osservando i diagrammi di Hovmoller dei mesi di settembre e dicembre (tempo-profondità) in Fig. 5 relativi a 2 aree geografiche identificate in Fig. 1. Nei grafici è ben osservabile il "periodo più freddo" tra il 2006 e il 2010, e le differenze di temperatura e l'area di estensione dell'evento tra i due "anni caldi" 2004 e 2014. La Figura 6 mostra solo 2 grafici riferiti ai mesi di ottobre 2004 (b) e settembre 2014 (c) dei 58 grafici che coprono l'intero dataset. La climatologia è stata costruita mettendo il dato sinottico XBT su una griglia latitudine/profondità regolare attraverso un'interpolazione lineare dei dati. Prima di interpolare i dati sono state calcolate medie pesate annuali, per eliminare il più possibile l'errore dovuto alla diversa quantità di dati disponibili negli anni presi in esame. Le anomalie sono state calcolate sottraendo alla climatologia i valori dei dati grigliati sinottici. In figura vengono riportati i grafici con i valori di anomalia positive maggiori delle anomalie calcolate precedentemente descritti come più caldi rispetto all'intero dataset.

Dai risultati si osserva un riscaldamento che in realtà parte da metà 2004 (non ci sono dati disponibili prima) fino all'inizio del 2005 (non mostrato). Successivamente, segue un decremento della temperatura fino al 2010, alla latitudine di 38.5°N, quando è osservabile un nuovo incremento abbastanza costante che raggiunge i massimi valori a settembre 2014. Nella parte più a nord del bacino (41.5°N) il segnale è presente con un più basso incremento di temperatura, dai 200 agli 800 m, quindi coinvolgendo l'intera acqua intermedia. I due eventi di riscaldamento, avvenuti rispettivamente nel 2004 e nel 2014 differiscono sia nell'ampiezza spaziale e temporale che nel valore di temperatura raggiunto alle differenti profondità. Il primo riscaldamento del 2004 ha coinvolto l'intero mar Tirreno ed è più visibile nella parte centrale e meridionale con un incremento di +0.4°C rispetto il 1999 e limitato ai 400 m di profondità.

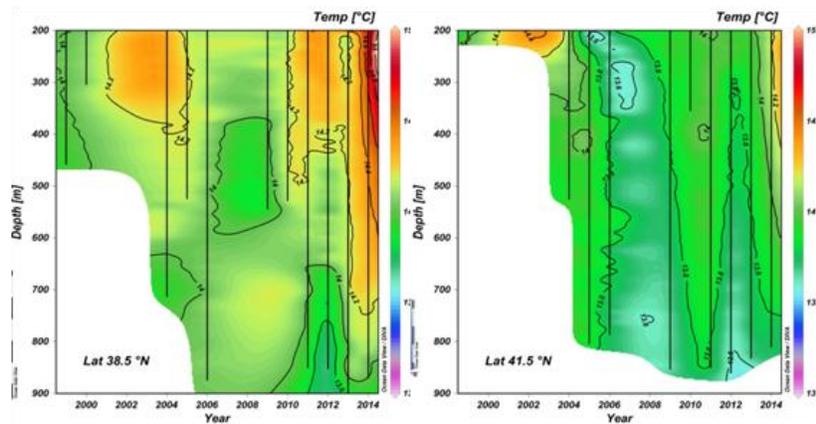


Fig.5: Diagrammi di Hovmoller che mostrano l'evoluzione nel tempo della temperatura tra il 1999 e il 2014 tra i 200 e i 900 m di profondità in 2 aree: 38.5°N nella parte sinistra e 41.5°N nella parte destra

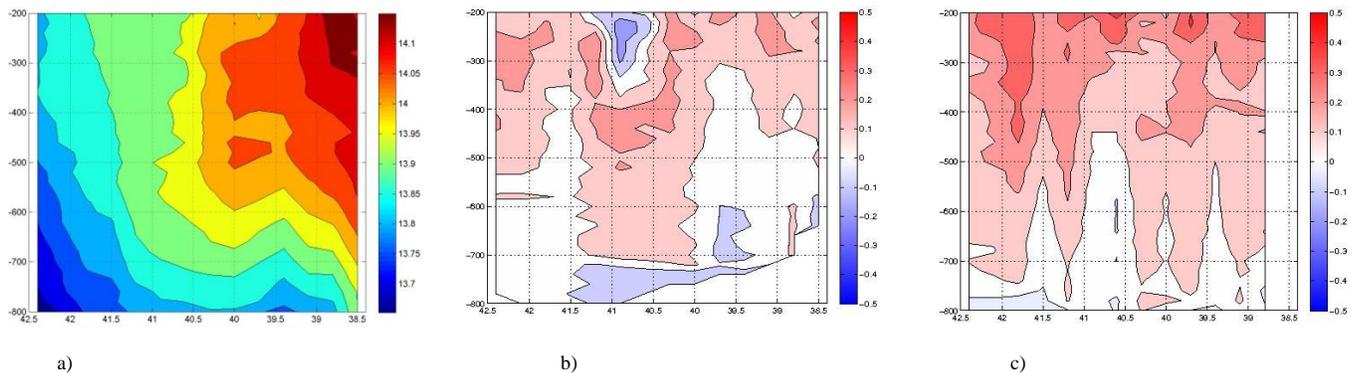


Fig. 6a) Climatologia realizzata con i dati XBT nell'intero periodo 1999-2014 tra le latitudini 42.5°N e 38.5°N e nel range di profondità 200-800 m; b) e c) mostrano le differenze di temperatura rispetto alla climatologia in (a) tra le latitudini 42.5°N e 38.5°N e nel range di profondità 200-800 m a (b) ottobre 2004 e (c) settembre 2014)

Nel 2004 il *bias*, ovvero deviazione dei valori di temperatura rispetto alla climatologia del periodo studiato, mostra un incremento tra i $+0.1^{\circ}\text{C}$ e $+0.45^{\circ}\text{C}$ nei primi 400 m. Il secondo periodo più caldo iniziato nel 2010 è stato preceduto da un piccolo decremento tra il 2012-2013 a tutte le profondità e latitudini. Nel 2014 si può invece osservare un notevole riscaldamento con un aumento di temperatura rispetto alla climatologia sopra i $+0.45^{\circ}\text{C}$ fino a 450 m di profondità e coinvolgendo l'intero bacino del Tirreno anche astensione dell'evento tra i due "anni caldi" 2004 e 2014. profondità di 800m anche se con incrementi di temperatura minori.

III. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

I profili di temperatura analizzati sono stati acquisiti senza una periodicità costante per circa 16 anni (1999-2014) nel mar Tirreno lungo un transetto che va dal Canale di Corsica fino alla costa settentrionale della Sicilia, al largo di Palermo. I dati sono stati acquisiti tramite sonde XBT e grazie a navi di opportunità, per lo più navi commerciali italiane della Grandi Navi Veloci. L'analisi dei dati dello strato intermedio mostra chiaramente un trend positivo dal 1999 al 2014 con due picchi nel 2004/2005 e nel 2013/2014 e un raffreddamento tra il 2006 e il 2010, osservato anche dalla stazione oceanografica

DYFAMED localizzata nel bacino Ligure Provenzale.[19]. I due eventi di riscaldamento descritti in precedenza, nel 2004 e nel 2014, differiscono in estensione orizzontale e verticale con una deviazione massima di temperatura dalla climatologia di circa $+0.40^{\circ}\text{C}$ - $+0.45^{\circ}\text{C}$ per entrambi i periodi. Nel 2004 l'anomalia termica è stata osservata principalmente tra 200-300m di profondità mentre nel 2014 si estende in tutto il sub-bacino tra i 200-500 m raggiungendo anche gli 800 m di profondità in molti settori del sub-bacino. E' stato calcolato [20] che la LIW, muovendosi dal bacino orientale a quello occidentale, impiega 12-13 anni per arrivare nel Canale di Sicilia e 10-12 anni per fluire dal Canale di Sicilia al Golfo del Leone.

Si suppone che l'anomalia termica riscontrata nel mar Tirreno nel 2004, attraverso i dati XBT, sia dovuta all'ingresso di acqua intermedia più calda formatasi nel bacino orientale nei primi anni '90 in seguito all'evento climatologico noto come *Eastern Mediterranean Transient* [EMT], [13], fenomeno ampiamente descritto da molti autori, che ha portato alla formazione di nuova WMDW [14];[24];[25]; [26]; [27].

A supporto di questa ipotesi si riscontra, agli inizi degli anni '90 [21], la presenza di una circolazione anticiclonica nel mar

Ionio, condizione che sembra essere necessaria per la formazione del transiente EMT. Diversi studi [22] hanno inoltre evidenziato come tale condizione presenti una periodicità di 10 anni nel Mediterraneo orientale.

L'anomalia termica del 2014 è simile, nella sua evoluzione e caratteristica, a quella del 2004; per questo motivo possiamo associare al fenomeno del 2014 un'altro segnale del passaggio del transiente nel mar Tirreno, considerando l'evoluzione decennale del cambiamento di circolazione nel mar Ionio.

Le differenze tra il riscaldamento del 2004 e quello del 2014 potrebbero essere ricercate nella particolare condizione meteorologica avvenuta nel Mediterraneo nel 2002-2003 [28] [29] che, caratterizzata da un inverno con poche precipitazioni e venti persistenti, potrebbe aver favorito la formazione di acque più salate e più calde nel livello intermedio del bacino occidentale. In prospettiva futura si può ipotizzare che nei prossimi 10 anni [20] le acque più calde della LIW, grazie anche a condizioni favorevoli nell'Algero-Provenzale e nel Golfo del Leone, potrebbe maggiormente incidere sulla formazione del *Western Mediterranean Transition* o WMT con formazione di nuova WMDW [30], [26].

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] M. Astraldi and G.P. Gasparini (1994), The seasonal characteristics of the circulation in the Tyrrhenian Sea in La Violette, P. E. (Ed), Seasonal and interannual variability of the Western Mediterranean sea, Coastal and Estuarine Studies, 46, 115-134
- [2] V.G Krivosheya, (1983), Winter circulation and structure in the Tyrrhenian Sea, Oceanology, 23, 166-171
- [3] T.S Hopkins, (1988), Recent observations on the intermediate and deep water circulation in the Southern Tyrrhenian Sea, Oceanol. Acta, Special Issue, 9, 41-50
- [4] S Sparnocchia, G.P. Gasparini, M. Astraldi, M. Borghini, and P. Pistek (1999), Dynamics and mixing of the Eastern Mediterranean outflow in the Tyrrhenian basin, J. Marine Syst., 20(1-4), 301-317, doi:10.1016/S0924-7963(98)00088-8
- [5] G. Budillon, G.P. Gasparini, and K. Schröder (2009), Persistence of an eddy signature in the central Tyrrhenian basin, Deep-Sea Res. Part II, 56 (11-12), 713-724, doi:10.1016/j.dsr2.2008.07.027
- [6] C. Millot, (2009), Another description of the Mediterranean Sea outflow, Progr. Oceanogr., 82(2), 101-124, doi:10.1016/j.pocean.2009.04.016
- [7] A. Vetrano, E. Napolitano, R. Iacono, K. Schröder, and G.P. Gasparini (2010), Tyrrhenian Sea Circulation and water mass fluxes in spring 2004: observations and model results, J. Geoph. Res., 115(C06), doi:10.1029/2009JC005680
- [8] A.Lascaratos, W. Roether, K. Nittis, and B. Klein (1999), Recent changes in deep water formation and spreading in the Mediterranean Sea: a review, Progr. Oceanogr., 44 (1-3), 5-36
- [9] P.Malanotte-Rizzoli, B.B. Manca, M. Ribera d'Alcalà, A. Theoharis, S. Brenner, G. Budillon, and E. Ozsoy (1999), The Eastern Mediterranean in the 80s and in the 90s: the big transition in the intermediate and deep circulation, Dyn. Atmosph. Oceans, 29(2-4), 365-395, doi:10.1016/S0377-0265(99)00011-1
- [10] F. Raicich, (2000), Variability in the Mediterranean Sea: connection with climatic patterns, In: CIESM Workshop Monographs n. 10, (eds.) F. Briand, Monaco, The Eastern Mediterranean climatic transient: its origin, evolution and impact on the ecosystem, Trieste, March/April 2000, 86 pp, 35-36
- [11] A.Theoharis, B. Klein, K. Nittis, and W. Roether (2002), Evolution and status of the Eastern Mediterranean Transient (1997-1999), J. Marine Syst., 33-34, 91-116, doi:10.1016/S0924-7963(02)00054-4
- [12] W. Roether, B. Klein, B.B. Manca, A. Theoharis, and S. Kioroglou S. (2007), Transient Eastern Mediterranean deep waters in response to the massive dense-water output of the Aegean Sea in the 1990s, Prog. Oceanogr., 74(4), 540-571, doi:10.1016/j.pocean.2007.03.001
- [13] G.P. Gasparini, A. Ortona, G. Budillon, M. Astraldi, and E. Sansone (2005), The effect of the Eastern Mediterranean Transient on the hydrographic characteristics in the Strait of Sicily and in the Tyrrhenian Sea, Deep-Sea Res. Part I, 52(6), 915-935, doi:10.1016/j.dsr.2005.01.001
- [14] K.Schröder, G. P. Gasparini, M. Tangherlini, and M. Astraldi (2006), Deep and intermediate water in the western Mediterranean under the influence of the Eastern Mediterranean Transient, Geophys. Res. Lett., 33, L21607, doi:10.1029/2006GL027121
- [15] C. Millot, Another description of the Mediterranean Sea outflow, Progr. Oceanogr., 82(2), 101-124, doi:10.1016/j.pocean.2009.04.016
- [16] J.-L. Fuda, G. Etiope, C. Millot, P. Favali, M. Calcara, G. Smeriglio, and E. Boschi (2002), Warming, salting and origin of the Tyrrhenian Deep Water, Geophys. Res. Lett., 29 (19), 4-1-4-4, doi:10.1029/2001GL014072
- [17] R. Sorgente, A. Olita, P. Oddo, L. Fazioli, and A. Ribotti (2011), Numerical simulation and decomposition of kinetic energies in the central Mediterranean: insight on mesoscale circulation and energy conversion, Ocean Sci., Special Issue, 7(4), 503-519, doi:10.5194/os-7-503-2011
- [18] G.M.R. Manzella, E. Scoccimarro, N. Pinardi, and M. Tonani (2003), Improved near real time data management procedures for the Mediterranean ocean Forecasting System - Voluntary Observing Ship Program, Ann. Geophys., 21(1), 49-62, doi:10.5194/angeo-21-49-2003
- [19] J.C.Marty and J. Chiaverini (2010), Hydrological changes in the Ligurian Sea (NW Mediterranean, DYFAMED site) during 1995-2007 and biogeochemical consequences, Biogeosciences, 7(7), 2117-2128, doi:10.5194/bg-7-2117-2010
- [20] M. Gačić, K. Schröder, G. Civitarese, S. Cosoli, A. Vetrano, and G.L. Eusebi Borzelli (2013), Salinity in the Sicily

Channel corroborates the role of the Adriatic–Ionian Bimodal Oscillating System (BiOS) in shaping the decadal variability of the Mediterranean overturning circulation, *Ocean Sci.*, 9 (1), 83-90, doi:10.5194/os-9-83-2013

[21] G.L.E Borzelli, M. Gačić, V. Cardin, and G. Civitarese (2009), Eastern Mediterranean transient and reversal of the Ionian Sea circulation, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L15108, doi:10.1029/2009GL039261

[22] M. Gačić, G. Civitarese, G.L. Eusebi Borzelli, V. Kovacevic, P.-M. Poulain, A. Theocharis, M. Menna, A. Catucci, and N. Zarokanellos (2011), On the relationship between the decadal oscillations of the Northern Ionian Sea and the salinity distributions in the Eastern Mediterranean, *J. Geophys. Res.*, 116, C12, doi:10.1029/2011JC007280

[23] P. Lionello, J. Bhend, A. Buzzi, P.M. Della-Marta, S. Krichak., A. Jansà, P. Maheras, A. Sanna, L.F. Trigo, R. Trigo (2006), Cyclones in the Mediterranean region: climatology and effects on the environment, In: P. Lionello, P. Malanotte-Rizzoli, R. Boscolo (eds) *Mediterranean Climate Variability*, Amsterdam, 325-372

[24] K. Schröder, A. Ribotti, M. Borghini, R. Sorgente, A. Perilli, and G. P. Gasparini (2008), An extensive western Mediterranean deep water renewal between 2004 and 2006, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L18605, doi:10.1029/2008GL035146

[25] K. Schröder, G. P. Gasparini, M. Borghini, and A. Ribotti (2009), Experimental evidence of recent abrupt changes in the deep Western Mediterranean Sea, In: Dynamics

of Mediterranean deep waters, In: CIESM Workshop Monographs n. 38, (eds.) F. Briand, Monaco, Malta, 27-30 May 2009, 132 pp.51-56

[26] P. Zunino, M. Vargas-Yanez, F. Moya, M. C. García-Martínez, and F. Plaza (2009), Deep and intermediate layer warming in the western Mediterranean: Water mass changes and heaving, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L20608, doi:10.1029/2009GL039578

[27] M. Hermann, F. Sevault, J. Beuvier, and S. Somot (2010), What induced the exceptional 2005 convection event in the northwestern Mediterranean basin? Answers from a modeling study, *J. Geophys. Res.*, 115, C12051, doi:10.1029/2010JC006162

[28] A. Olita, R. Sorgente, S. Natale, S. Gabersek, A. Ribotti, A. Bonanno, and B. Patti (2007), Effects of the 2003 European heatwave on the Central Mediterranean Sea: surface fluxes and the dynamical response, *Ocean Sci.*, Special Issue, 3, 273-289, doi:10.5194/os-3-273-2007

[29] L. Feudale, L., and J. Shukla J. (2011), Influence of sea surface temperature on the European heat wave of 2003 summer. Part I: an observational study, *Climate Dyn.*, 36 (9-10), 1691-1703, doi: 10.1007/s00382-010-0788-0

[30] CIESM (2009), Dynamics of Mediterranean deep waters, In: CIESM Workshop Monographs n. 38, (eds.) F. Briand, Monaco, Malta, 27-30 May 2009, 132 pp.

Previsione numerica della dispersione di idrocarburi nel Mar di Sardegna e Mar Tirreno

Costanza Tedesco
IAMC-CNR Napoli
costanza.tedesco@iamc.cnr.it

Roberto Sorgente
IAMC-CNR Oristano
roberto.sorgente@cnr.it

Sommario— Il successo delle azioni di mitigazione nell'affrontare gli effetti inquinanti di eventuali sversamenti di idrocarburi in mare è strettamente dipendente dall'efficacia dei sistemi di monitoraggio e di previsione della circolazione marina in ambiente costiero. La previsione delle traiettorie seguite dalle sostanze rilasciate in mare può essere effettuata mediante l'applicazione di algoritmi semi empirici, che partendo dall'intensità dei venti forniscono una stima del percorso seguito dalle masse d'acqua superficiali, oppure mediante l'applicazione di sofisticati modelli matematici/numerici in grado di riprodurre la circolazione delle acque e, quindi, simulare la dispersione delle sostanze in esse disciolte e/o disperse. In questo contesto, il gruppo di Oceanografia Operativa dell'Istituto per l'Ambiente Marino Costiero del Consiglio Nazionale delle Ricerche di Oristano cura la catena operativa di simulazione numerica della circolazione marina tridimensionale ad area limitata a scala sub-regionale per il Mediterraneo Centrale e bacino Occidentale. Nel presente lavoro, supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' - TESSA, vengono presentati alcuni scenari di simulazione numerica di trasporto, diffusione e dispersione di idrocarburi in mare, attraverso l'accoppiamento del modello lagrangiano MEDSLIK II nella catena operativa di analisi e previsione numerica della circolazione marina a scala sub-regionale del Gruppo di Oceanografia Operativa di Oristano [1]

keywords— oil spill; modelli lagrangiani; MEDSLIK_II;

INTRODUZIONE

Il Mar Mediterraneo, pur rappresentando meno dell'1% dell'area mondiale coperta dagli oceani, è caratterizzato da un intenso traffico di navi e imbarcazioni. Nel 2000 erano 1.715 milioni le tonnellate di petrolio trasportato in mare e nel 1999 sono state stimate 360-370 milioni di tonnellate trasportate nel solo Mar Mediterraneo. Qui avviene infatti circa il 30% degli scambi commerciali e circa il 25% del trasporto mondiale di petrolio. Fino al 2004 presentava 82 principali porti petroliferi ed altrettante raffinerie che lavoravano 8.780.326 barili di greggio al giorno, oltre il 10% della raffinazione mondiale. Nel nostro mare, poi, si snodano le principali rotte per il trasporto di petrolio greggio dai pozzi del Nord Africa, del Mar Nero e del Mediterraneo orientale verso i consumatori dell'Europa e del Nord America [2]. Risulta chiaro, quindi, che nel momento in cui si verificano incidenti in mare è di fondamentale importanza avere a disposizione dei sistemi di

supporto alla decisioni al fine di definire in anticipo le fasi di intervento per il contenimento dell'inquinamento marino da idrocarburo. Secondo una definizione del GESAMP (Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environment Protection – organismo consultivo delle Nazioni Unite sugli aspetti scientifici della protezione dell'ambiente marino) l'inquinamento marino è la "introduzione diretta o indiretta da parte umana, di sostanze o energia nell'ambiente marino che provochi effetti deleteri quali danno alle risorse viventi, rischio per la salute umana, ostacolo alle attività marittime comprese la pesca, deterioramento della qualità dell'acqua e riduzione delle attrattive. Le categorie di inquinanti connesse con il traffico marittimo sono principalmente gli idrocarburi e i prodotti chimici. La convenzione MARPOL 73/78 [3] definisce con il termine idrocarburi il petrolio in tutte le sue forme, ed in particolare il petrolio greggio, l'olio combustibile, le morchie, i residui d'idrocarburi e i prodotti raffinati. Diversi progetti di ricerca sono stati finanziati nel corso degli anni con lo scopo di realizzare sistemi integrati per la gestione delle emergenze dovute all'inquinamento marino da idrocarburi. Un esempio è rappresentato dal progetto "SOS Bocche di Bonifacio [4][5]. Il progetto ha avuto come scopo quello di realizzare un innovativo sistema integrato per la gestione delle emergenze ambientali da inquinamento marino da idrocarburo attraverso l'utilizzo di una gerarchia di modelli numerici di previsione della circolazione marina a diverse scale spaziali, parametri atmosferici e moduli per la simulazione numerica del trasporto e dispersione degli Oil-Spill nelle Bocche di Bonifacio [6]. Questo sistema, operativo dal 2010, consente di ottenere simulazioni numeriche in "tempo reale" capaci di prevedere la traiettoria degli inquinanti (idrocarburi) disciolti e/o dispersi. Il valore aggiunto è dato dalla capacità del sistema di previsione di calcolare una stima della traiettoria della macchia di idrocarburo tenendo conto delle condizioni meteo-oceanografiche e della sua variabilità nello spazio e nel tempo. La stima della posizione e della concentrazione, quindi, consentono agli enti preposti di approntare tutte le necessarie misure di contenimento. Il sistema integrato, oltre a funzionare in modalità "prognostica" può essere utilizzato anche in modalità "diagnostica" per diversi scopi. Uno di questi è quello di associare ai tratti della costa un indice di probabilità dell'eventuale presenza di idrocarburi rilasciati nell'area di studio. In questo modo, sulla base di idonee simulazioni numeriche di scenari atte a replicare le tipiche condizioni meteo-marine dell'area in esame, è possibile ottenere delle mappe di probabilità di dispersione (mappe di rischio) in

funzione di un preciso intervallo temporale (stagioni, mesi, anni). Tali mappe consentono di ottenere informazioni sul rischio potenziale di inquinamento dell'area costiera in esame. [12]. Nell'ambito della gestione dei rischi ambientali si colloca anche il progetto PRIMI (PRogetto pilota Inquinamento Marino da Idrocarburi), una delle iniziative dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) che ha come obiettivo il monitoraggio nei mari italiani degli Oil Spill e delle aree contaminate da idrocarburi. PRIMI è un sistema composto da 4 moduli: osservazione, previsione, archivio e interfaccia utente. Il 'modulo osservazione' usa più piattaforme SAR (Syntetic Aperture Radar) e ottiche che garantiscono la massima copertura possibile dei mari italiani. Le informazioni su eventuali Oil Spill rilevati vengono poi trasmesse al "modulo previsione" che, mediante modelli numerici di circolazione marina, produce una previsione a 72 ore sulle future posizioni degli Oil-Spill osservati, nonché sul loro stato biologico, chimico e fisico.(www.asi.it). Può essere citato anche il progetto TOSCA (Tracking Oil Spills & Coastal Awareness network) [7] che utilizza una rete di radar (installati per il monitoraggio del Golfo di Napoli) i quali, sfruttando la diminuzione della rugosità superficiale del mare dovuta alla presenza della chiazza d'olio, riescono ad individuare, sia di giorno che di notte, l'eventuale sversamento di petrolio e, quindi, a monitorare la sua evoluzione nello spazio e nel tempo. Tale progetto si avvale anche dell'utilizzo di dati da boe in situ per migliorare la conoscenza delle correnti superficiali marine e quindi per ottimizzare le capacità di determinazione del "destino" della chiazza d'olio versata. Inoltre, i dati dei radar possono rappresentare valide condizioni iniziali per i modelli di simulazione numerica dell'evento inquinante. Il problema dell'inquinamento marino a causa dello sversamento di idrocarburi è diffusamente trattato nell'ambito della ricerca scientifica, con lo scopo di fornire supporto alle autorità preposte e di rendere più rapide ed agevoli le attività di intervento, potendo così limitare, per quanto possibile, i danni all'ambiente. Gli idrocarburi sono una vasta famiglia di composti organici costituiti da carbonio ed idrogeno e rappresentano una delle principali fonti energetiche del globo. L'intenso trasporto marittimo di petrolio greggio e dei prodotti della raffinazione rappresenta uno dei pericoli più preoccupanti per il Mar Mediterraneo, sia per l'elevato rischio di incidenti, che per inquinamenti derivati dall'attività operativa delle navi e delle industrie, come ad esempio perdite industriali a costa, procedure di bunkeraggio, di lavaggio delle cisterne, di scarico delle acque di zavorra (utilizzate per bilanciare il carico della nave) e di sentina (miscela di idrocarburi con acqua salmastra in varie proporzioni). Questi ultimi fattori appartengono alla tipologia di inquinamento detto "cronico". A differenza dell'inquinamento cronico, che comporta piccole ma costanti immissioni di oli in mare, la tipologia di inquinamento "acuto", rappresentato dagli incidenti di navi petroliere, causa lo sversamento di ingenti quantità di petrolio, in tempi ristretti e in un'area limitata. L'impatto di tale inquinamento è immediato e costituisce uno dei fattori più gravi sull'ambiente marino e sugli ecosistemi [8]. Gli idrocarburi

hanno un peso specifico minore dell'acqua, per cui, una volta versati in mare, inizialmente formano una pellicola impermeabile all'ossigeno sopra il pelo libero dell'acqua causando, oltre agli evidenti danni per fenomeni fisici e tossici diretti alla macrofauna, un'anaerobiosi (metabolismo senza ossigeno) che uccide il plancton. La successiva precipitazione sul fondale replica l'effetto sugli organismi bentonici. La bonifica dell'ambiente danneggiato può richiedere mesi o anni [9]. Inoltre, una volta sversati, gli idrocarburi vanno incontro a diversi fenomeni chimico-fisici detti processi di weathering, tra i quali i principali sono:

Diffusione (Spreading)

L'olio versato in mare, anche in assenza di azioni meccaniche esterne, si diffonde sulla superficie marina sotto l'influenza delle tensioni superficiali che agiscono all'interfaccia aria-acqua-olio e di altri fattori fisico-chimici. La dimensione della macchia che si crea dipende dalla quantità di idrocarburo sversato e dalla distanza della fonte di spandimento, dalla viscosità dell'olio, dalle condizioni meteorologiche e dalla superficie disponibile; generalmente dopo un po' di tempo la chiazza comincia a scomporsi a causa dell'azione del vento e della turbolenza della circolazione marina.

Dispersione (Dispersion)

Questo processo può intervenire contemporaneamente alla diffusione e consiste nella rottura parziale o totale della macchia in frammenti e gocce di dimensioni variabili che formano un miscuglio nella parte alta della colonna d'acqua. Tali gocce, in presenza di turbolenza dell'acqua, possono anche riaggregarsi e riformare la macchia. Questo processo è più veloce se l'olio versato è del tipo leggero, a bassa viscosità e il mare è molto mosso.

Evaporazione (Evaporation)

Contemporaneamente alla diffusione, sulla superficie marina inizia il processo di evaporazione delle componenti leggere del petrolio versato. La velocità di evaporazione e la quantità di olio che evapora dipende dalla volatilità della stessa. Un'intensa evaporazione è favorita dal vento forte, turbolenza del mare, alte temperature e grande dimensione della macchia; in questo caso si formano frazioni di greggio residue con valori di densità e viscosità più alti avendo perso la frazione leggera.

Sedimentazione (Sedimentation)

I prodotti raffinati, che hanno densità maggiore dell'acqua di mare, possono affondare e sedimentarsi sul fondale marino; generalmente l'affondamento si verifica mediante l'adesione di particelle o materiale organico alla sostanza, soprattutto in zone costiere dove la turbolenza della circolazione marina è elevata. Se il petrolio brucia dopo essere stato versato, essendosi persa la frazione infiammabile, cioè quella più leggera, si possono formare residui sufficientemente densi per affondare.

Questo processo avviene quando il petrolio è invecchiato e si verifica mediante la metabolizzazione degli idrocarburi da parte dei microrganismi marini, come batteri, funghi, lieviti ed alghe con produzione finale di composti innocui come acqua e anidride carbonica. I processi di weathering, precedentemente discussi, sono rappresentati graficamente nella seguente figura. I differenti processi di weathering agiscono su scale temporali diverse, come mostrato nella figura successiva. In generale si parla quindi del problema dell' "oil spill", cioè il versamento in mare di idrocarburi liquidi dovuto ad attività antropiche di diverso tipo. Gli sversamenti in mare possono essere ascrivibili in definitiva alle seguenti cause: inquinamenti operazionali: sono la causa dello scarico a mare della maggior parte di idrocarburi versati e sono determinate dalle normali operazioni di routine; inquinamenti accidentali: possono essere causati da collisioni, affondamento, esplosioni, cedimenti meccanici e da avverse condizioni meteo-marine; inquinamenti volontari: attività illegali [10]. Nel prossimo paragrafo si presenta il contributo alla realizzazione del sistema numerico integrato per la gestione delle emergenze ambientali (trasporto, diffusione e weathering degli idrocarburi), in particolare la descrizione dell'innovativo modulo di trasporto degli Oil-Spill, denominato MEDSLIK_II, e il suo utilizzo mediante i forzanti atmosferici (ECMWF) e i forzanti dello stato del mare dell'IAMC/CNR [11].

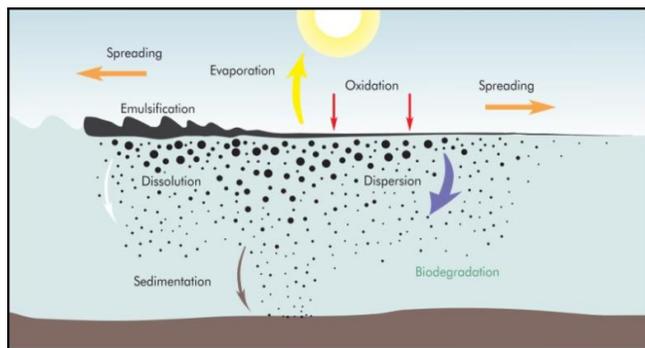


Fig.1: Processi che agiscono sulla chiazza d'olio (fonte ITOPF- The International Tankers Owners Pollution Federation Limited).

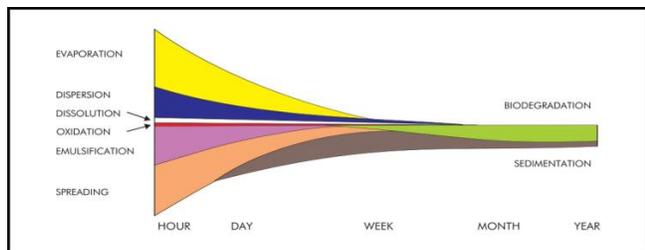


Fig.2: Rappresentazione schematica dell'evoluzione temporale dei fenomeni di weathering agenti sulla chiazza d'olio. Lo spessore di ciascuna banda indica l'importanza del processo (fonte ITOPF).

I. MATERIALI E METODI

Obiettivo del sistema integrato è quello di agevolare le operazioni di risposta attraverso la conoscenza della stima futura dell'evoluzione spazio temporale del trasporto, diffusione e dispersione di "particelle" di idrocarburo consentendo di individuare in anticipo tecniche e dotazioni ottimali da impiegare durante l'emergenza. Oltre ai modelli numerici di simulazione dell'atmosfera e dello stato del mare (circolazione e onda), in tale ambito assume un importante ruolo il modello numerico di simulazione delle traiettorie delle particelle noto come MEDSLIK II [12] [13] [14] [15] il cui sviluppo scientifico è supportato da una collaborazione formale (Memorandum of Agreement for the Operation and Continued Development of MEDSLIK-II) tra INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), CMCC (Centro Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici), CNR-IAMC (Istituto per l'Ambiente Marino Costiero) e Università di Cipro. Di seguito verrà fornita una breve descrizione di MEDSLIK II, delle condizioni al contorno e alla superficie e, infine, una descrizione del sistema osservativo - drifter, cioè della boa lagrangiana utilizzata per la validazione delle traiettorie simulate dal modello di circolazione sub-regionale.

A. Il modello numerico di simulazione "MEDSLIK II"

MEDSLIK II è un modello lagrangiano e, in quanto tale, consente di rappresentare la chiazza d'olio con un numero N di particelle. Quest'ultime si muoveranno orizzontalmente, trasportate e disperse dal campo di corrente orizzontale, generato dal galleggiamento, dai venti e dalle onde [16] [17]. Lo spostamento di ciascuna particella è dovuto ai processi di avvezione, ad opera delle correnti marine, i processi turbolenti e diffusivi [18]. L'avvezione consiste essenzialmente nel trasporto del campo scalare, in questo caso rappresentato dalla chiazza d'olio, dovuto ai movimenti macroscopici del fluido, mentre la diffusione è dovuta ai movimenti microscopici. Il trasporto della chiazza d'olio è governato, infatti, dalle correnti marine e dall'azione del vento e le particelle d'olio vengono disperse dalle componenti delle fluttuazioni turbolente, che sono parametrizzate con uno schema "random-walk". Si assume che la particella che si muove attraverso il fluido riceva un impulso random ad ogni time step, dovuto all'azione dei moti turbolenti, e che non ha memoria dei suoi precedenti spostamenti turbolenti. Ciò può essere scritto come:

$$dx'_k(t) = (2r - 1)d \quad (1)$$

dove d è il percorso medio della particella ed r è un numero reale random che ha valori compresi tra 0 ed 1 [19]. Oltre l'azione avettiva e diffusiva, le particelle d'olio subiscono trasformazioni dovute ai diversi processi chimici e fisici citati in precedenza. I processi di trasporto, diffusione e trasformazione della chiazza d'olio sulla superficie del mare possono essere simulati usando un modello Lagrangiano, come il MEDSLIK II per l'appunto, accoppiato con modelli di

circolazione Euleriani. Secondo l'approccio Euleriano la dispersione viene descritta in modo tale che le varie proprietà del fluido vengano definite come funzioni dello spazio (ossia del vettore posizione) e del tempo t . L'osservazione avviene, quindi, in maniera solidale ad un riferimento fisso ed è come se fotografasse il campo di velocità (o di densità, o di pressione) a ciascun istante temporale, senza avere informazioni relative al moto della singola particella fluida. L'approccio Lagrangiano, invece, focalizza l'attenzione non su di un determinato volume di controllo, ma sulla singola particella fluida. Le proprietà del flusso saranno quindi funzione del particolare elemento fluido, oltre che del tempo t . Scegliendo di identificare la particella fluida mediante il vettore posizione x_0 del suo centro di massa all'istante iniziale t_0 , la sua velocità al generico istante t sarà esprimibile come $u=u(x_0, t)$. L'approccio Lagrangiano risulta quindi più adeguato alla rappresentazione di un fenomeno dinamico come lo spostamento, la diffusione e la degradazione di una chiazza d'olio versata sulla superficie del mare. Mentre la chiazza d'olio si sposta e si diffonde, la sua concentrazione varia a causa dei processi di weathering. Simulare il comportamento di un idrocarburo, rilasciato in mare, significa determinare il campo di concentrazione da esso prodotto in qualunque punto dello spazio e in qualunque istante successivo all'emissione. L'equazione generale per la concentrazione $C(x,y,z,t)$ di un tracciante immesso in ambiente marino è:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{U} \nabla C = \nabla (\mathbf{K} \nabla C) - \sum_{j=1}^M r_j(C) \quad (2)$$

dove:

$\frac{\partial C}{\partial t}$ è l'operatore del tasso locale di variazione, \mathbf{U} è il campo medio della corrente marina con componenti (u,v,w) , \mathbf{K} è il tensore di diffusività che parametrizza gli effetti turbolenti e $r_j(C)$ rappresenta gli M tassi di trasformazione che modificano la concentrazione dell'inquinante a causa delle reazioni chimiche e di mescolamento meccanico [19]. MEDSLIK, quindi, consente di ottenere numericamente una stima del trasporto e della dispersione delle particelle di idrocarburi, oltre ad ottenere una valutazione quantitativa dei principali processi chimico-fisici coinvolti durante l'evoluzione dell'evento (percentuale di olio sulla superficie del mare, disperso nella colonna d'acqua, evaporato e percentuale di olio depositato sulla costa) al fine di fornire una risposta sulla metodologia di intervento in tempo quasi-reale nel caso di un eventuale sversamento nell'area di studio. Le condizioni al contorno sono rappresentate dai campi bidimensionali di vento (direzione e intensità) e i campi tridimensionali oceanografici (direzione e intensità della corrente e temperatura superficiale del mare. Ovviamente, la qualità delle condizioni al contorno è fondamentale, in quanto

esse influenzano fortemente anche la qualità del risultato numerico del trasporto e della dispersione delle particelle.

B. Struttura e funzionamento del modello numerico "MEDSLIK II"

Il modello numerico MEDSLIK II richiede, come input, dati relativi al versamento di petrolio, dati atmosferici e oceanografici, come campi di vento, temperatura della superficie del mare e direzione e intensità delle correnti marine sulle tre dimensioni. I dati di versamento della chiazza, richiesti per definire le condizioni numeriche iniziali sono: coordinate dello sversamento, istante e area interessata, "età" del petrolio sversato dall'istante di immissione in mare. MEDSLIK II produce come output l'evoluzione delle proprietà dell'idrocarburo e la sua posizione media, sia per la porzione in superficie, per quella dispersa e per quella che si sposta verso le coste. [19]. Lo schema di funzionamento del MEDSLIK II è mostrato nella fig.3. Per la validazione della circolazione marina sono stati acquisiti i dati di posizione di una boa lagrangiana (drifter) lanciata nel Mare di Sardegna. In questo caso è stato usato il modulo MEDTRAK del modello MEDSLIK II, adatto per rappresentare la traiettoria di una singola particella immessa in mare e soggetta ai campi di corrente orizzontale del modello di circolazione, trascurando i processi di weathering. MEDTRAK ha consentito di effettuare una validazione di una particolare simulazione numerica mediante il confronto con un dato reale, rappresentato dalla traiettoria di un drifter lagrangiano lanciato dai ricercatori dell'IAMC di Oristano nel dicembre del 2011.

C. Il forzante atmosferico

I campi di analisi e di previsione delle condizioni atmosferiche, in termini di intensità e direzione del vento, rappresentano un aspetto importante nella modellizzazione del trasporto di una chiazza di idrocarburi sversata in mare. La variabilità spazio temporale del campo di vento (direzione e intensità) rappresenta le condizioni alla superficie per il modello lagrangiano MEDSLIK II ed è stato ottenuto dal sistema Europeo ECMWF -European Centre for Medium-Range Weather Forecasts,. Tra i principali obiettivi del centro europeo ECMWF vi è lo sviluppo di modelli che si occupano di simulare lo stato dinamico, termodinamico e strutturale dell'atmosfera nelle tre dimensioni al fine di fornire analisi e previsioni numeriche della circolazione atmosferica, oltre a contribuire al suo monitoraggio. Il centro contribuisce alla ricerca tecnica e scientifica per il miglioramento di tali previsioni e produce e distribuisce ai paesi membri i dati ottenuti; esso è inoltre attivo nell'implementare i programmi della World Meteorological Organization -WMO [20].

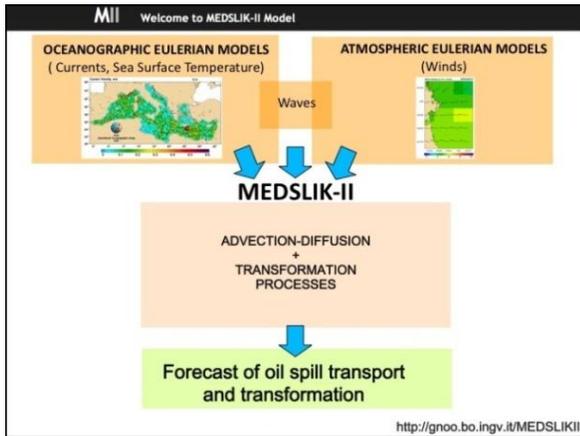


Fig.3: Organizzazione funzionale del modello MEDSLIK II

I dati ECMWF utilizzati hanno una risoluzione spaziale di 1/4 di grado (circa 25 km) ed una temporale di 6 ore (00:00, 06:00, 12:00, 18:00 UTC) e si tratta degli stessi dati utilizzati per forzare alla superficie il modello di circolazione sub-regionale.

D. Il forzante oceanografico

Il sistema di previsione nazionale dei mari regionali italiani è costituito da più sottosistemi di previsione che, nel loro insieme, ricoprono l'intero specchio d'acqua del Mediterraneo. I modelli regionali sono sviluppati dallo GNOO (Gruppo Nazionale di Oceanografia Operativa) e quindi dagli enti che ne fanno parte. Tra i sottosistemi esistenti citiamo il TSCRM e il WMED sviluppati dal gruppo di oceanografia operativa del CNR/IAMC di Oristano.

1) Modello di circolazione sub-regionale TSCRM (Tyrrhenian and Sicily Channel sub-Regional Model Forecasting System)

Tale modello è stato ottenuto aggiornando il sistema di analisi/previsione ad area limitata SCRM (Sicily Strait sub-Regional Model), mediante l'aumento della risoluzione spaziale a 1/48° (circa ~2 km) rispetto ad 1/32° (~ 3.5 km) precedente [14]. Il dominio spaziale è stato esteso in latitudine andando a coprire anche il Mar Tirreno. La griglia di calcolo del modello TSCRM è costituito da 362 x 578 nodi mediante uno schema di tipo Arakawa c-grid. Il sistema aggiornato si basa sullo stesso modello numerico di SCRM, cioè una versione del POM (Princeton Ocean Model [21], un modello numerico di simulazione della dinamica del mare nelle tre dimensioni, idrostatico (approssima l'equazione verticale, con l'equazione idrostatica: $dp = -\rho g dz$ che lega le variazioni di quota alle variazioni di pressione), a superficie libera con coordinate verticali sigma [8]. La batimetria è ottenuta per interpolazione bilineare di dati U.S. DBDB1 a 1/60° (Navy Digital Batimetric Data Base) [22]. Le condizioni sullo stato iniziale e ai contorni aperti (campo di velocità, temperatura e

salinità) sono state ottenute mediante accoppiamento numerico "one way" (dal modello a risoluzione maggiore -padre- a quello a risoluzione minore -figlio-) dei campi medi giornalieri di analisi/previsione prodotti dal modello globale OGCM-MFS1671 operativo presso l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - INGV. Tale modello globale copre l'intero Mediterraneo e produce previsioni medie giornaliere ed orarie. Una volta a settimana il sistema fornisce anche medie orarie e giornaliere delle analisi, che rappresentano la migliore stima delle condizioni oceanografiche. Gli output del modello a scala di bacino MFS forniscono le condizioni iniziali e al contorno per i modelli a più alta risoluzione, i quali riescono meglio a risolvere le dinamiche costiere [19] [23]. I campi medi di previsione forniti giornalmente sono validi sino a +10 giorni. La previsione di TSCRM è di tipo "cold start", cioè ad ogni nuova previsione (ogni giorno) il modello viene inizializzato attraverso l'applicazione della tecnica di downscaling: dalla minore risoluzione spaziale del modello padre, le variabili vengono trasferite alla maggiore risoluzione del modello TSCRM. Tale passaggio produce oscillazioni nei valori delle variabili, i quali necessitano di un lasso temporale per "aggiustarsi" su valori ottimali. Tali oscillazioni sono filtrate mediante l'algoritmo VIFOP [24]. In altre parole, si ha quindi un'ottima interpolazione dei campi di previsione prodotti da OGCM (risoluzione spaziale 1/16°, circa 5 km) sulla griglia del modello di TSCRM mediante l'utilizzo di VIFOP [25] adattato alla nuova griglia di calcolo ad 1/48°. Questo metodo di interpolazione consente di ridurre sensibilmente le oscillazioni di gravità che si generano e si propagano durante la fase di spin-off [24].

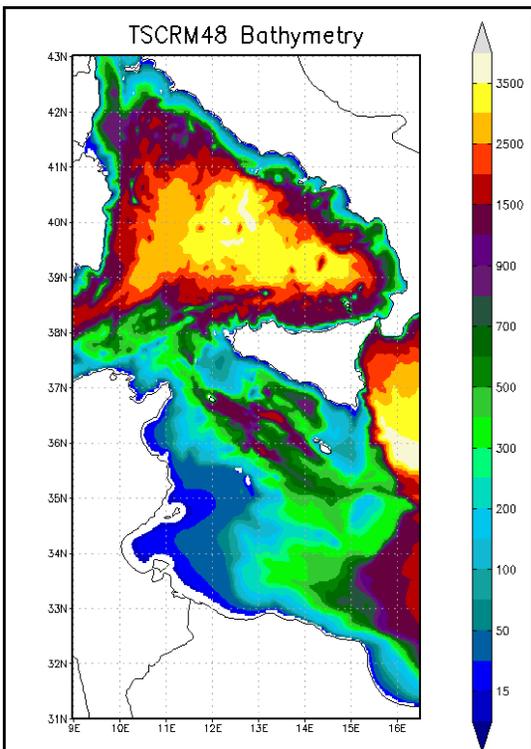


Fig. 5: Estensione spaziale del modello TSCRM con relativa variazione batimetrica. I dati sono stati ottenuti mediante interpolazione bilineare del data base DBDB1 (US Navy) originariamente disposti su una griglia regolare ad $1/60^\circ$.

TSCRM è forzato all'interfaccia aria-mare attraverso i flussi di momento, calore e d'acqua ottenuti mediante applicazione delle bulk formulae [26] dei parametri atmosferici prodotti dal sistema di analisi/previsione atmosferica European Centre for Medium Weather Forecast - ECMWF. I campi di previsione atmosferici sono emessi giornalmente e validi sino a +10 giorni. Hanno una risoluzione temporale di 6 ore (00:00, 06:00, 12:00, 18:00) e una risoluzione spaziale di 0.25° in latitudine e longitudine. Il sistema TSCRM fornisce giornalmente una previsione valida dalle 00:00 del giorno di emissione sino a +5 giorni. I campi prodotti sono ottenuti in modalità slave¹ e sono: la velocità tridimensionale del campo di corrente, la temperatura, la salinità ed elevazione della superficie del mare. I dati di output vengono forniti come medie orarie su predefiniti livelli zeta che coprono la colonna d'acqua superficiale sino ai primi 40 metri di profondità (-0.1, -4.59, -7.94, -11.56, -15.45, -19.63, -24.13, -28.97, -34.16, -39.74).

¹Nella modalità slave ogni nuova previsione prodotta dal modello TSCRM viene inizializzata e forzata ai contorni aperti mediante i campi medi giornalieri di previsione prodotti da MFS1671.

2) Modello di circolazione sub-regionale WMED (Western MEDiterranean Regional Model Forecasting System)

Il sottosistema di previsione del bacino occidentale del Mar Mediterraneo è rappresentato dal Western MEDiterranean Regional Model Forecasting System e fornisce una previsione delle medie giornaliere del campo idrodinamico (temperatura, salinità, velocità, elevazione della superficie del mare) dei mari intorno alla Sardegna, fino ad un massimo di 5 giorni, a partire dalle 00:00 UTC [4]. Il modello WMED è una versione del POM ed è innestato nel modello a scala di bacino MFS il quale gli fornisce quindi le condizioni al contorno [13]. Alla superficie il WMED è forzato dai flussi di momento, calore e d'acqua determinati dai campi dei parametri atmosferici simulati dal modello numerico di previsione ECMWF prodotti ogni 6 ore. Il WMED ha una risoluzione minore del TSCRM, cioè pari a $1/32^\circ$ (circa 3.5 Km) e si estende sulla latitudine dai 3° E ai 16.5° E, mentre sulla longitudine va dai 30.95° N ai 39.48° N, coprendo così tutta l'area del Mediterraneo occidentale. La risoluzione verticale è pari a 30 livelli σ .

3) Le osservazioni

Lo sviluppo di simulazioni numeriche di sversamenti di idrocarburi in mare assume una valenza significativa nel momento in cui vi è la possibilità di confrontare il dato simulato col dato reale. Una tale validazione è stata possibile nel caso di una specifica simulazione numerica di uno sversamento ipotetico a largo del Golfo di Oristano, per la quale, trattandosi del Mediterraneo Occidentale, sono stati utilizzati i dati di previsione dello stato del mare (circolazione) prodotti dal modello WMED. Nel dicembre del 2011 è stato lanciato, dai ricercatori dell'IAMC di Oristano, un drifter nell'area prospiciente il Golfo di Oristano; lo strumento ha consentito la registrazione in continuo della sua posizione per una durata di circa 15 giorni, durante i quali ha coperto un'ampia zona estesa in latitudine, seguendo un percorso a tratti vorticoso, come mostrato nella fig. 7.

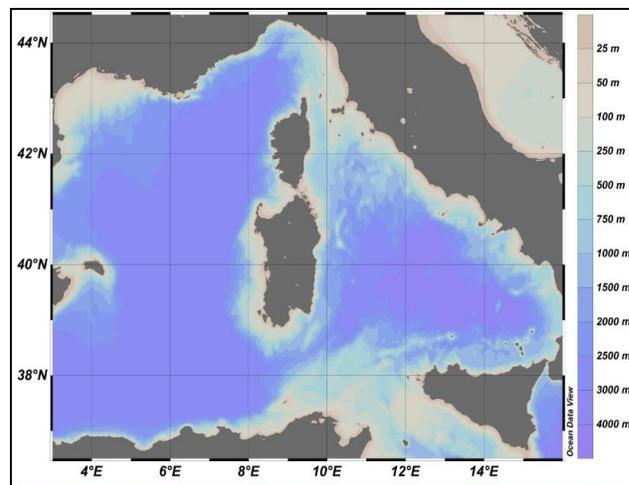


Fig.6: Estensione spaziale del modello WMED che va dai 3° ai 16.5° di longitudine e dai 36.7° - 44.5° di latitudine.

II. RISULTATI

In questo paragrafo sono stati riprodotti alcuni scenari di oil-spill utilizzando il sistema accoppiato di modelli numerici costituito dai modelli di circolazione marina TSCRM/WMED e il modello lagrangiano di trasporto e diffusione di idrocarburi MEDSLIK_II descritti nel paragrafo precedente. Sono stati riprodotti alcuni scenari di oil spill nel Golfo di Napoli e Palermo (paragrafo A), zone cruciali del Mar Tirreno in termini di traffico marittimo e frequenza elevata di incidenti, e nel Mare di Sardegna (paragrafo B) per la presenza di osservazioni lagrangiane che consentono una validazione dei risultati del sistema integrato.

A. Golfo di Napoli e Palermo

In questo esperimento numerico il modulo di oil spill è stato applicato rispettivamente nell'area del Golfo di Napoli e Palermo. Ogni simulazione numerica è stata condotta ipotizzando sversamenti istantanei e puntuali di idrocarburi di tipologia API-22 (10 tonnellate) utilizzando come condizioni al contorno la direzione e l'intensità delle correnti marine e temperatura superficiale previste dal modello operativo a scala sub-regionale TSCRM. Le informazioni relative ai dati di previsione dei parametri atmosferici vengono invece acquisite dal sistema ECMWF. La simulazione numerica è iniziata alle ore 00:00 del giorno 19 Novembre 2013 ed è valida per le successive 72 ore. Nelle figure 9 e 10 è rappresentato l'output del modello di oil-spill (ogni 6 ore), rispettivamente per il Golfo di Napoli e Palermo, che consiste nell'evoluzione spazio temporale del trasporto e della diffusione delle particelle di idrocarburo. In ogni figura, oltre alla concentrazione (espressa in ton/km^2), sono indicati i campi di corrente superficiali "previsti" in ogni punto di griglia del modello di circolazione (m/s) e il campo di vento (m/s) nel baricentro della macchia in funzione della latitudine e della longitudine. A partire dalle coordinate iniziali dello sversamento, la simulazione mostra il progressivo trasporto, diffusione e dispersione delle particelle (nello spazio e nel tempo) indotto principalmente dal campo di corrente superficiale e dall'azione del vento alla superficie. Questi scenari rappresentano un esempio di applicazione operativa del sistema integrato nel caso di incidenti e, quindi, può rappresentare un valido sistema di prevenzione a supporto degli enti preposti per la protezione dell'ambiente marino e costiero.

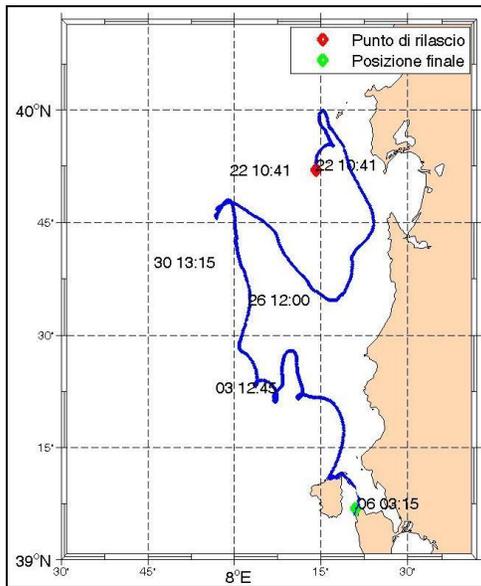


Fig.7: Percorso del drifter lanciato a largo del Golfo di Oristano (dicembre 2011)

I drifter sono forse una delle più antiche tecniche per la misura della velocità delle correnti superficiali e consentono di ottenerne informazioni spazio-temporali. Nel corso degli anni la ricerca scientifica ha consentito l'utilizzo di strumenti sempre più sofisticati, anche se i principi fondamentali di funzionamento dei drifter rimangono gli stessi: tali strumenti vengono attrezzati con radio e ricevitori GPS e le loro forme possono variare da cilindri ad "aquiloni" galleggianti [27]. Il drifter segnala, tramite il sistema GPS integrato, la sua posizione in continuo consentendo in questo modo di tracciare il suo percorso su un determinato arco temporale. Le immagini seguenti mostrano lo strumento di cui è stato possibile sfruttare la traiettoria per la validazione della simulazione numerica. Lo strumento adottato ha una lunghezza di circa 1,5 m e appartiene alla categoria dei drifter ad aquilone; dalle immagini è possibile notare le quattro sfere che ne assicurano il galleggiamento e le due vele ortogonali, che gli consentono di essere guidato dalle correnti marine superficiali. L'antenna GPS che fuoriesce dal mare consente allo strumento la comunicazione della sua posizione sotto forma di coordinate geografiche (gradi, primi e secondi) unitamente ad informazioni orarie.



Fig.8: Foto del drifter lanciato a largo del Golfo di Oristano dagli operatori dell'IAMC-CNR

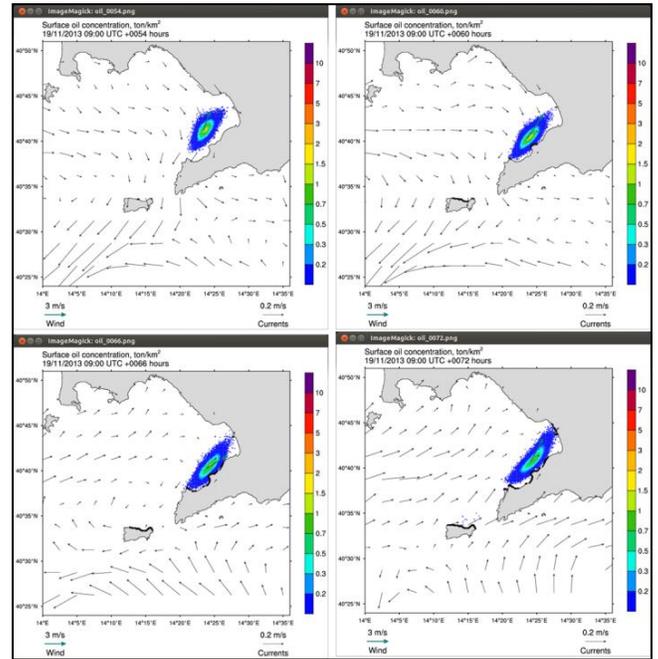
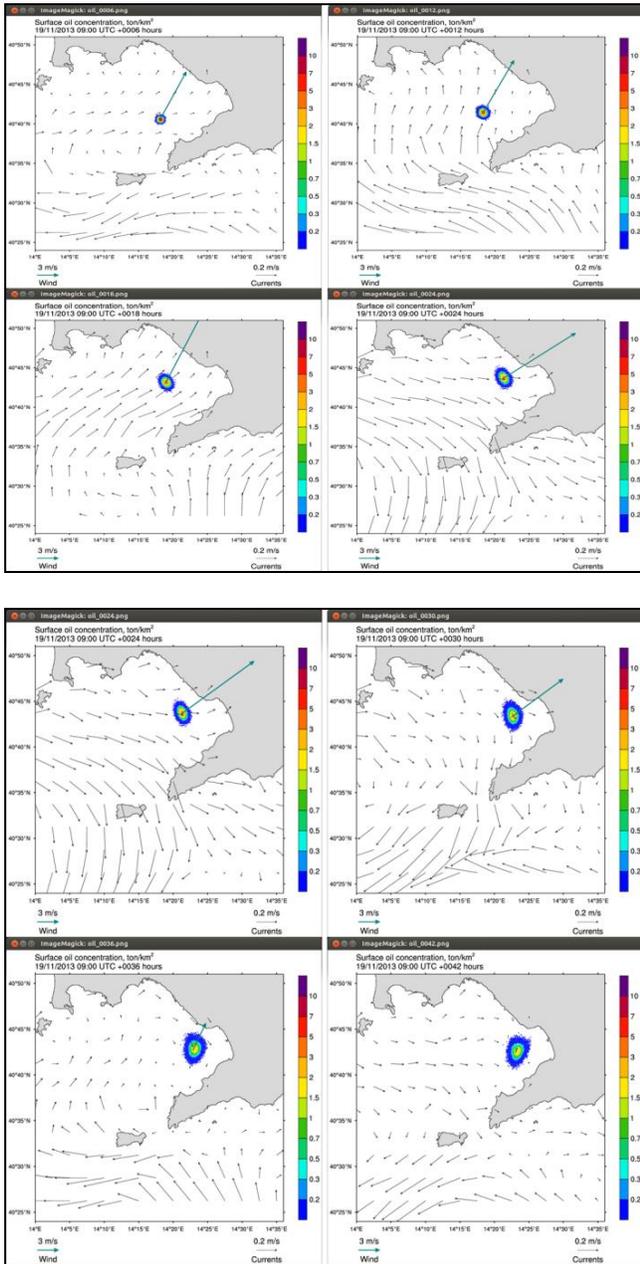
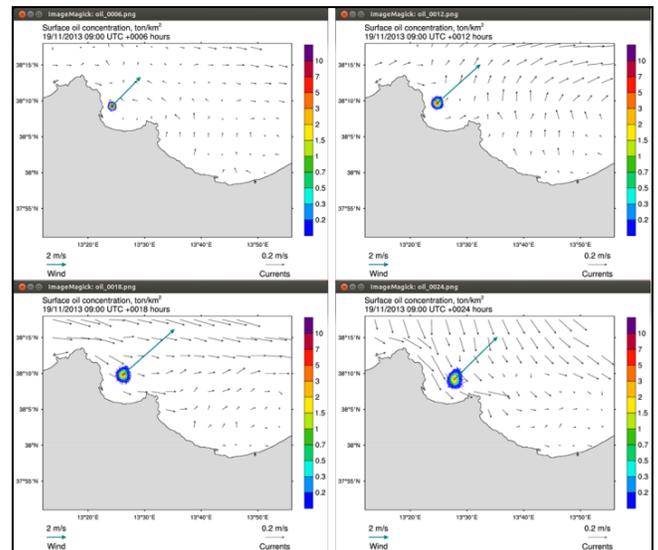


Fig. 9: Simulazione, della durata di 72 ore, dell'evoluzione spaziotemporale di uno sversamento puntuale istantaneo di 10 tonnellate di idrocarburi nel Golfo di Napoli in data 19/11/2013. La "color bar" consente di visualizzare la quantità di idrocarburo che si sposta e si diffonde. Nel caso mostrato il modello ha simulato uno spostamento ed una diffusione della chiazza verso la penisola Sorrentina, prevedendo un parziale spiaggiamento della sostanza inquinante.



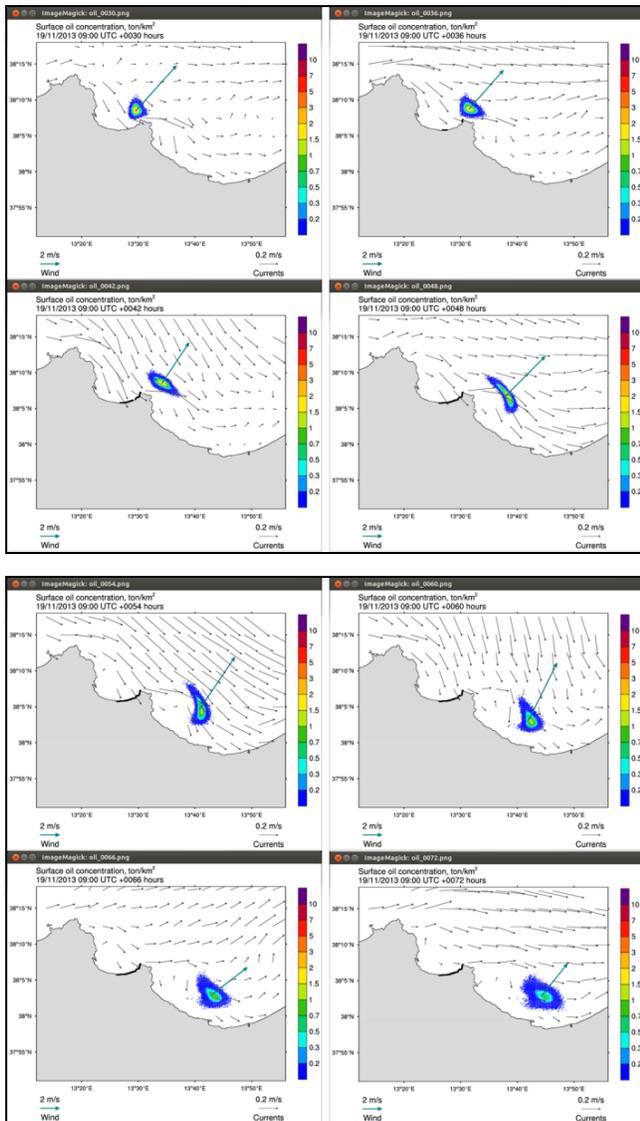


Fig. 10: Simulazione, della durata di 72 ore, dell'evoluzione spazio-temporale di uno sversamento puntuale istantaneo di 10 tonnellate di idrocarburi nel Golfo di Palermo in data 19/11/2013. La "color bar" consente di visualizzare la quantità di idrocarburo che si sposta e si diffonde. Il modello ha simulato uno spostamento ed una diffusione della chiazza verso est, prevedendo un parziale spiaggiamento della sostanza inquinante lungo le coste del Golfo stesso. Appare molto evidente l'effetto dell'avvezione della corrente superficiale rispetto all'azione esercitata dal vento.

B. Mare di Sardegna

Le precedenti simulazioni riguardano sversamenti ipotetici non validabili da nessun dato reale. Nel caso della simulazione sviluppata per il Mare di Sardegna invece vi è stata la possibilità di validare il risultato simulato mediante confronto statistico con un dato reale, rappresentato dalla traiettoria di un drifter lanciato dai ricercatori dell'IAMC-CNR di Oristano il 22/12/2011 nel punto di coordinate 39°51.9' di latitudine e

08°21.04' di longitudine. Lo strumento ha registrato la sua posizione per una durata di 15 giorni, fino al 06/01/2012 escluso, giorno in cui è stato "perso" a sud dell'isola di Carloforte. Il drifter lanciato, quindi, consente di registrare la sua posizione (latitudine e longitudine) ad intervalli di 15' permettendo, a priori, di validare il percorso della traiettoria media delle particelle di idrocarburo e ottenere una stima dell'incertezza mediante il modulo MEDTRAK descritto in precedenza. Per tale validazione sono stati utilizzati i dati di previsione del modello WMED e di vento ECMWF-25 relativi agli stessi giorni che lo strumento ha trascorso in mare. Nello specifico, sono stati utilizzati i dati relativi a ciascun giorno in cui il drifter è rimasto in mare, ottenendo così una nuova simulazione per ognuno di essi (ogni nuova previsione ha una durata di 48 ore). Si è scelto di proseguire in questo modo in quanto, utilizzare solo i dati relativi al giorno di immissione dello strumento in mare e sviluppare una simulazione di 15 giorni, avrebbe prodotto risultati molto divergenti dalla situazione reale, in quanto per ogni giorno il modello WMED produce 5 giorni di previsione, oltre i quali il grado di incertezza aumenterebbe eccessivamente. In questo modo è stato possibile confrontare la traiettoria di una particella immessa in mare ottenuta dalla simulazione e quella seguita effettivamente dal drifter. Una volta sviluppata la previsione numerica per ogni giorno della durata del percorso del drifter, il modulo MEDTRAK II produce un file di output all'interno del quale sono presenti dati relativi alle singole simulazioni. Il file è organizzato in colonne, di cui la quarta rappresenta un errore statistico indicato come "err50"; questo parametro rappresenta il raggio (in metri) della circonferenza all'interno della quale vi è il 50% di probabilità di riscontrare il dato vero. Per tale ragione si è plottato sulle singole simulazioni tale errore sotto forma di circonferenza ad intervalli di 12 ore; tali circonferenze di incertezza aumentano in dimensione all'aumentare del tempo della singola simulazione, indicando che, statisticamente, la bontà della simulazione decresce man mano che ci si allontana dalla condizione iniziale. Nella figura successiva, oltre alle singole simulazioni delle traiettorie giornaliere, è possibile osservare tali variazioni.

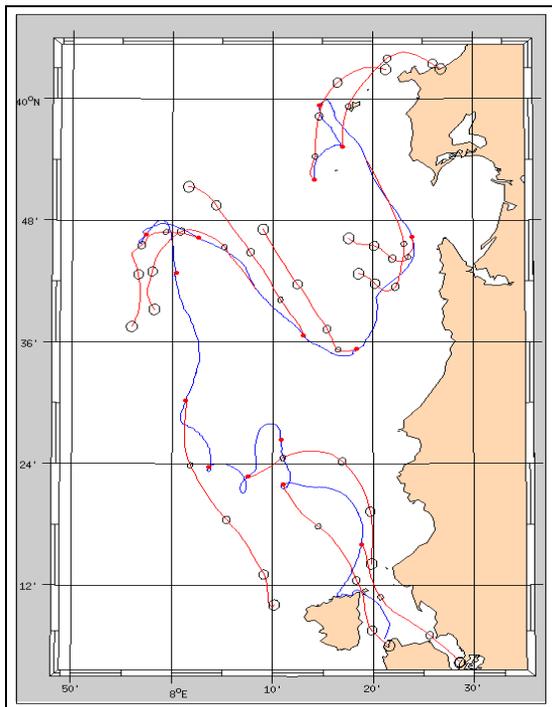


Fig. 11: Traiettorie del drifter (in blu) e traiettorie simulate (in rosso) rilasciate su opportune posizioni del drifter; su ciascuna traiettoria simulata sono rappresentate, ogni 12 ore, le circonferenze di incertezza.

Come evidente, la traccia seguita dal drifter è, in alcuni tratti, molto complessa, in quanto lo strumento avrà seguito le dinamiche superficiali di vortici a scala inferiore alla mesoscala, oppure legate alle correnti inerziali. Bisogna tuttavia precisare che i dati relativi al percorso del drifter non hanno subito una procedura di quality control (QC), per cui è possibile che siano presenti degli errori nella registrazione di posizione, data ed ora. Inoltre si deve tener presente che i dati di input utilizzati per le simulazioni hanno tutti risoluzioni spaziali e temporali differenti: il modello numerico WMED ha una risoluzione spaziale di circa 3.5 Km, mentre i dati atmosferici ECMWF hanno una risoluzione spaziale di 1/4 di grado, quindi circa 25 Km, ed una temporale di 6 ore; il drifter invece ha inviato dati ogni quarto d'ora. Tali discrepanze nelle diverse risoluzioni portano sicuramente ad un'incerta rappresentazione del dato reale, evidenziando la necessità, per approfondimenti futuri, di implementare modelli numerici di simulazione con una risoluzione spazio-temporale tale che consenta una rappresentazione realistica anche della piccola scala. Tuttavia, per alcuni giorni è possibile notare come il modello riesca a simulare con buona approssimazione la traccia segnata dal drifter. Un'ulteriore osservazione può essere fatta in relazione all'influenza della variazione batimetrica sulla traiettoria simulata; com'è possibile notare dalla figura 11, le traiettorie simulate dal modulo MEDTRAK sembrano avvicinarsi a quella reale in maniera più evidente nelle aree in cui vi è mare profondo, come ad esempio tra i

39°36' e i 39°48' di latitudine. Un comportamento meno coerente della traccia simulata è invece riscontrabile nelle aree sotto costa.

III. CONCLUSIONI

Le società che si sono sviluppate lungo le coste hanno legato le loro dinamiche al mare. Per questa ragione risulta importante il monitoraggio dello stato del mare per prevenire danni eventuali causati da diversi fattori, quali eventi estremi, eccessivo sfruttamento delle risorse sia costiere che marine o sversamento di inquinanti. Siccome mari ed oceani evolvono su scale temporali relativamente brevi (giorni, ore), la pianificazione di una qualsiasi attività in mare dovrà prendere in considerazione la variabilità a breve termine delle correnti, del livello del mare e dei parametri fisico-chimici. In questo contesto assume un ruolo fondamentale l'Oceanografia Operativa, che associa l'aspetto tecnico a quello puramente scientifico e che ha consentito lo sviluppo di sistemi integrati di osservazioni e modelli, con l'obiettivo di produrre e distribuire dati di previsione sullo stato del mare.

Molti sono i prodotti e i servizi offerti dall'Oceanografia Operativa per applicazioni che vanno dalla previsione e controllo dell'inquinamento alla pesca sostenibile e alla sicurezza dei trasporti. Per quanto riguarda il monitoraggio dell'inquinamento marino da idrocarburi, il sistema operativo prevede anche l'utilizzo di dati satellitari oltre quelli in situ e, in questo contesto, l'Oceanografia Operativa è senz'ombra di dubbio in prima linea, fornendo da anni un importante supporto nelle attività di monitoraggio, previsione e prevenzione dell'inquinamento marino da idrocarburi. Partendo da tali presupposti, il presente lavoro sviluppato nell'ambito del corso di formazione OTTIMA del progetto TESSA, ha avuto il fine di mostrare l'importanza del monitoraggio e della previsione di inquinanti riversati a mare: tenendo conto delle previsioni delle correnti marine e dei dati di vento unitamente ad altri parametri idrodinamici e con l'impiego di un software specifico, il MEDSLIK-II, è stato possibile ottenere una stima dell'evoluzione degli inquinanti riversati in mare, ovvero la loro dispersione, diffusione e trasporto (gli aspetti di weathering non sono stati presi in considerazione nelle valutazioni modellistiche). Prendendo in esame il Mar Tirreno ed il Mar di Sardegna, sono state sviluppate diverse simulazioni di sversamenti ipotetici puntuali di idrocarburi in mare, mediante l'utilizzo dei modelli numerici di previsione a scala regionale TSCRM e WMED (innestati nel modello a scala di bacino MFS1671). Per quanto riguarda i dati di vento sono stati utilizzati quelli relativi al sistema ECMWF-25. Le diverse simulazioni hanno mostrato la capacità del modello di riprodurre l'evoluzione di una chiazza d'olio sversata e soggetta alle correnti marine e al vento. Nel caso in esame non sono stati utilizzati dati satellitari relativi ai singoli sversamenti simulati, anche se previsto dal modello numerico MEDSLIK II. Le simulazioni hanno mostrato come il MEDSLIK II sia uno strumento utile per riuscire a prevedere le dinamiche di dispersione, diffusione

e trasporto degli idrocarburi, rappresentando, in questo senso, un ottimo supporto decisionale in caso di emergenze da inquinamento in mare. In particolare, un risultato molto interessante è stato ottenuto potendo validare, con dati reali, il modulo MEDTRAK II, che ha la capacità di riprodurre l'evoluzione nel tempo dello spostamento di una particella ideale immessa in mare e soggetta a determinati campi di vento e di corrente. E' stato infatti possibile confrontare i dati di previsione del modello con dei dati reali del percorso di un drifter lanciato di fronte al golfo di Oristano nel dicembre 2011. La simulazione è stata corredata con delle valutazioni grafiche e statistiche elaborate in Matlab, le quali hanno consentito di valutare, giorno per giorno, quanto il percorso simulato col modulo MEDTRAK II sia coerente col corrispondente percorso seguito dal drifter durante la sua deriva nel Mare di Sardegna.

Il lavoro effettuato ha consentito di comprendere l'importanza dell'Oceanografia Operativa soprattutto nell'ambito del monitoraggio e della previsione di eventi inquinanti in mare, unitamente alle attività di salvaguardia ambientale. La ricerca scientifica diventa quindi strumento di supporto per tutte quelle istituzioni che si occupano della salvaguardia dell'ambiente marino, consentendo di estrarre in poco tempo e in modo versatile le informazioni utili ai processi decisionali. In particolare, l'utilizzo del modulo MEDTRAK II si colloca bene anche come supporto nelle attività di ricerca e recupero ("Search & Rescue") di corpi ed oggetti dispersi in mare: definito nel tempo e nello spazio il punto di naufragio, il servizio oceanografico produrrà delle mappe con le possibili traiettorie seguite dall'oggetto, al fine di individuare le aree di ricerca più attendibili.

Tra le prospettive future di sviluppo e applicazione del modello numerico MEDSLIK II è prevista una sua validazione quantitativa; in particolare verranno calcolati dei parametri statistici, come il Root Mean Square Error e lo SKILL. Il primo consentirà di ottenere un confronto tra il percorso del drifter simulato dal modello numerico e quello reale, mentre il secondo consentirà di ottenere una valutazione della "bontà" della simulazione numerica ottenuta; più lo skill (parametro adimensionale) tende ad 1, migliore è la performance del modello. Tale attività, già iniziata nell'ambito del corso di formazione OTTIMA, verrà portata avanti successivamente per questioni legate alle tempistiche del suddetto corso di formazione. E' prevista inoltre, l'implementazione di un forzante atmosferico ad altissima risoluzione spaziale e temporale, come ad esempio il sistema SKIRON (risoluzione spaziale di circa 5 Km e temporale di un'ora) ; ciò potrebbe apportare notevoli miglioramenti nella riproduzione delle traiettorie reali.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] <http://www.seaforecast.cnr.it/forecast/it/content/home>
- [2] <http://rempec.org/>
- [3] http://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaArticolo/
- [4] <http://www.seaforecast.cnr.it/sosbonifacio>
- [5] SOS – Bocche di Bonifacio, 2011. Contratto DEC/DPN 2291 of 19/12/2008. Direktorat Generale per la Protezione della Natura e dell’Ambiente del Ministero dell’Ambiente, Italia. Rapporto finale
- [6] A Cucco., A. Ribotti, A. Olita, L. Fazioli, B. Sorgente, M. Sinerchia, A. Satta, A. Perilli, M. Borghini, K. Schroeder, and R. Sorgente, *Oil spills prediction in the Bonifacio strait area, western Mediterranean*, Ocean Science Special Issue, "The MyOcean project: scientific advances for operational ocean monitoring and forecasting", Eds. P. Brasseur, M. Bell, J. A. Johannessen, P.-Y. Le Traon, and A. Schiller, 8, 4, pp. 443-454, 2012 (a)
- [7] <http://www.tosca-med.eu/>
- [8] Teal J.M., Howarth R.W.: Oil spill studies: a review of ecological impacts, *Environmental Management*, vol. 8, pp. 27-43, 1984
- [9] <http://www.minambiente.it>
- [10] <http://www.isprambiente.gov.it/it>
- [11] <http://www.seaforecast.cnr.it/forecast/it/content/home>
- [12] R Lardner., G Zodiatis., L Loizides., A Demetropoulos., *An operational oil spill model for the Levantine Basin (Eastern Mediterranean Sea)*, International Symposium on Marine Pollution, 1998
- [13] R Lardner., G Zodiatis., D Hayes., N Pinardi., *Application of the MEDSLIK Oil Spill Model to the Lebanese Spill of July*, European Group of Expert on Satellite Monitoring of sea Based Oil Pollution, European Communities, 2006
- [14] G Zodiatis., R Lardner., D Hayes., G Georgiou., N Pinardi., De M Dominicis., X Panayidou., *The Mediterranean oil spill and trajectory prediction model in assisting the EU response agency*. Congreso Nacional de Salvamento en la Mar, Cadiz, 2-4 October, libro de actas, 535-547, 2008
- [15] <http://gnoo.bo.ingv.it/MEDSLIKII/>
- [16] M De Dominicis., N Pinardi., G Zodiatis., R Archetti.: *Medslk II, a lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting-Part.2*, *Geosci. Model Dev.*, vol.6, pp. 1851–1869, 2012
- [17] M De Dominicis., S Falchetti., F Trotta., N Pinardi., L Giacomelli., Napolitano E., Fazioli L., Martinis F., Lermusiaux P., Haley P.: *A relocatable ocean model in support of environmental emergencies: the Costa Concordia emergency case*. 2013
- [18] G Coppini., M De Dominicis., G Zodiatis., R Lardner., N Pinardi., R Santolieri., S Colella., S Bignami., D. R Hayes., D Soloviev., G Georgiou., G Kallos.: *Hindcast of oil spill pollution during Lebanon Crisis in the eastern Mediterranean, July-August 2006*, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 62, pp. 140-153, 2011
- [19] M De Dominicis., S Falchetti., F Trotta., N Pinardi., L Giacomelli., E Napolitano., L Fazioli., F Martinis., P Lermusiaux., P Haley.: *A relocatable ocean model in support of environmental emergencies: the Costa Concordia emergency case*. 2013
- [20] <http://www.ecmwf.int/>
- [21] <http://www.ccpo.odu.edu/POMWEB>
- [22] http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_DBDBV.html
- [23] R Sorgente., A Olita., P Oddo., P Fazioli L., A Ribotti.: Numerical simulation and decomposition of kinetic energy in the central Mediterranean : insight on mesoscale circulation and energy conversion, *Ocean Science*, vol 7, pp. 503–519, 2011
- [24] S Gabersšek., R Sorgente., S Natale., A Ribotti., A Olita., M Astraldi., M Borghini.: *The Sicily Channel Regional Model forecasting system: initial boundary conditions sensitivity and case study evaluation*, *Ocean Science*, vol. 3, pp. 31-41, 2007
- [25] F Auclair., S Castas., P Marseleix.: *Application of an Inverse Method to coastal modelling*, *JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY*, vol 17, pp. 1368-1391, 2000
- [26] S Castellari., N Pinardi., K Leaman., : *A model study of air-sea interaction in the Mediterranean Sea*, *Journal of Marine Systems*, vol. 18, pp. 89–114, 1998
- [27] <http://www.whoi.edu/>

Valutazioni della corrente mareale nel Golfo di Napoli da dati radar in HF

Roberta Di Lemma

Istituto per l'Ambiente Marino e Costiero

IAMC-CNR

Napoli, Italia

Berardino Buonocore, Pier Paolo Falco, Ilaria Iermano, Enrico Zambianchi

Dipartimento di Scienze e Tecnologie

Università degli studi di Napoli "Parthenope"

Napoli, Italia

Sommario—Un sistema Sea Sonde CODAR HF opera nel Golfo di Napoli dal 2004 con frequenza di funzionamento di 25Mhz, monitorando in tempo reale le correnti marine superficiali del bacino. Studi precedenti hanno rilevato, nel Tirreno meridionale, un contributo mareale sul campo di corrente molto limitato. L'analisi di lunghe e continue osservazioni di correnti marine superficiali, relative all'anno 2012, ha invece rivelato correnti mareali significative: la determinazione della corrente di marea nel Golfo di Napoli, ottenuta mediante l'utilizzo del toolbox di MatLab `t_tide`, ha evidenziato una componente prevalentemente diurna ed intensità anche di 10 cm/s.

Parole chiave - Golfo di Napoli - HF radar - Marea - Corrente mareale - Dinamica superficiale - Analisi armonica.

I. INTRODUZIONE

Le oscillazione del livello marino sono causate dalla sovrapposizione di molti contributi, i principali dei quali sono la marea astronomica e la marea meteorologica, generalmente separate in bande di frequenza diverse e, mentre, la prima determina una variazione del livello marino regolare e periodica dovuta al sistema Terra-Sole-Luna, la marea meteorologica è irregolare dipendendo principalmente da variazioni di pressione e stress del vento sulla superficie dell'acqua.

Un metodo usato frequentemente per la previsione della marea astronomica in una certa località, è l'analisi per componenti armoniche: in un determinato luogo la marea viene calcolata come sovrapposizione di oscillazioni sinusoidali, ciascuna caratterizzata da una propria ampiezza e fase; la loro somma ricostruisce l'onda di marea.

Partendo da una serie temporale monodimensionale, come quella che deriverebbe dalla variazione di livello del mare, e supposto di aver scelto di stimare M componenti armoniche da includere nell'analisi mareale, il problema che si pone è determinare ampiezze A_j e fasi ϕ_j (con $j=1, \dots, M$), della funzione $C_0 + \sum_{j=1}^M A_j \cos(\sigma_j t_i + \phi_i)$, che meglio si adattano alla serie di osservazioni $y(t_i), i=1, \dots, N$. Se si considera che il numero N di osservazioni è generalmente molto superiore al numero $2M+1$ delle incognite, il sistema di equazioni: $y(t_i) = C_0 + \sum_{j=1}^M A_j \cos(2\pi(\sigma_j t_i + \phi_i))$, risulta sovrastimato e quindi non avrà una soluzione univoca. La tecnica dei minimi quadrati rappresenta un criterio di ottimizzazione che consente di determinare in maniera univoca ed ottimale i valori di ampiezze e fase, determinando i parametri incogniti al fine di

minimizzare la differenza tra modello teorico e sperimentale; tradotto in formule:

$$\min T, \quad (1)$$

$$T = \sum_{i=1}^N [y_i - C_0 - \sum_{j=1}^M A_j \cos(\sigma_j t_i + \phi_i)]^2. \quad (2)$$

Osservato che:

$$\sum_{j=1}^M A_j \cos(\sigma_j t_i + \phi_i) = \sum_{j=1}^M [C_j \cos(2\pi\sigma_j t_i) + S_j \sin(2\pi\sigma_j t_i)], \quad (3)$$

con $A_j = \sqrt{(C_j^2 + S_j^2)}$ e $2\pi\phi_j = \arctan \frac{S_j}{C_j}$, il problema si riduce alla risoluzione del sistema:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial C_0} = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial C_k} = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial S_k} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$k=1, \dots, N$, i.e:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \left(y_i - C_0 - \sum_{j=1}^M C_j \cos 2\pi\sigma_j t_i - \sum_{j=1}^M S_j \sin 2\pi\sigma_j t_j \right) \\ & \quad \times (-1) = 0 \\ & \sum_{i=1}^N \left(y_i - C_0 - \sum_{j=1}^M C_j \cos 2\pi\sigma_j t_i - \sum_{j=1}^M S_j \sin 2\pi\sigma_j t_j \right) \\ & \quad \times (-\cos 2\pi\sigma_k t_k) = 0 \\ & \sum_{i=1}^N \left(y_i - C_0 - \sum_{j=1}^M C_j \cos 2\pi\sigma_j t_i - \sum_{j=1}^M S_j \sin 2\pi\sigma_j t_j \right) \\ & \quad \times (-\sin 2\pi\sigma_k t_k) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$k=1,\dots,N$. Posto:

$$\bar{C}_k = \sum_{i=1}^N \cos 2\pi \sigma_k t_i, \quad (6)$$

$$\bar{S}_k = \sum_{i=1}^N \sin 2\pi \sigma_k t_i, \quad (7)$$

$$CC_{kj} = \sum_{i=1}^N (\cos 2\pi \sigma_k t_i)(\cos 2\pi \sigma_j t_i) = CC_{jk}, \quad (8)$$

$$SS_{kj} = \sum_{i=1}^N (\sin 2\pi \sigma_k t_i)(\sin 2\pi \sigma_j t_i) = SS_{jk}, \quad (9)$$

$$CS_{kj} = \sum_{i=1}^N (\cos 2\pi \sigma_k t_i)(\sin 2\pi \sigma_j t_i) = SC_{jk}, \quad (10)$$

Il sistema è esprimibile in forma matriciale compatta $B\mathbf{x} = \mathbf{y}$, ove:

$$B = \begin{pmatrix} N & \bar{C}_1 \dots \bar{C}_M & \bar{S}_1 \dots \bar{S}_M \\ \bar{C}_1 & CC_{11} \dots CC_{1M} & CS_{11} \dots CS_{1M} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_M & CC_{M1} \dots CC_{MM} & CS_{M1} \dots CS_{MM} \\ S_1 & SC_{11} \dots SC_{1M} & SS_{11} \dots SS_{1M} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_M & SC_{M1} \dots SC_{MM} & SS_{M1} \dots SS_{MM} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \vdots \\ C_M \\ S_1 \\ \vdots \\ S_M \end{pmatrix} \quad \mathbf{y} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N y_i \\ \sum_{i=1}^N y_i \cos 2\pi \sigma_1 t_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N y_i \cos 2\pi \sigma_M t_i \\ \sum_{i=1}^N y_i \sin 2\pi \sigma_1 t_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N y_i \sin 2\pi \sigma_M t_i \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Dopodichè tenuto conto della simmetria e definitezza in segno positiva della matrice B, per risolvere efficientemente il sistema si procede con il metodo di fattorizzazione di Cholesky [11].

Un fenomeno importante associato alle maree è la corrente mareale: quando la marea sale si innesca una corrente verso terra detta flusso, quando scende si innesca una corrente verso mare detta riflusso. Le caratteristiche delle correnti di marea dipendono soprattutto da quelle della marea concomitante, ma sono influenzate dalla profondità delle acque, dalla configurazione delle coste e dalla distribuzione delle terre che ostacolano la propagazione delle onde di marea. Pertanto marea e corrente di mareale possono presentare carattere diverso, per esempio la marea astronomica nello stretto di Singapore ha carattere prevalentemente semidiurno mentre la corrente mareale è tipicamente diurna [20].

Le costanti armoniche del Mar Tirreno sono state calcolate per numerosi porti e ripetutamente nel tempo, ma lo studio

in generale delle maree del Mar Tirreno è stato sempre affrontato con scarso interesse dal momento che esse sono di debole ampiezza e non producono particolari effetti pratici. Ciò non di meno il loro studio riveste un certo interesse a causa di comportamenti particolari. I costituenti sia diurni che semidiurni sono praticamente uguali in ampiezza e fase in quasi tutte le stazioni di osservazione del Tirreno per le quali sono state calcolate. Ciò implica una prima importante conclusione: il mare al suo interno pulsa come un unico pistone [17]. Altra importante particolarità riguarda le correnti di mare che si sviluppano nello Stretto di Messina che, a causa della differenza di fase tra le maree tirreniche e ioniche, generano correnti mareali di particolare intensità [17]. Non è noto invece il contributo della corrente di marea all'interno del Golfo di Napoli (GoN). In questa area è noto che la marea astronomica ha un andamento prevalentemente semidiurno con due massimi e due minimi nelle 24 ore, e il suo maggior costituente semidiurno, M2, è circa tre volte maggiore del costituente diurno K1 [17].

Nel presente lavoro, dopo aver analizzato dati di sea level registrati dal mareografo di Ischia nell'anno 2012, s'indaga sulla corrente mareale nel GoN attraverso l'elaborazione di dati di corrente superficiale, registrati durante il medesimo anno dalla rete di radar costieri disposti nel golfo, utilizzando il pacchetto software *t_tide* scritto in linguaggio MatLab.

II. AREA DI STUDIO:IL GOLFO DI NAPOLI

GoN è un bacino marginale del Tirreno sud-orientale delimitato a nord dalle isole di Ischia e Procida e dai Campi Flegrei, e a sud dall'isola di Capri e dalla Penisola Sorrentina (fig 1). Caratterizzato da una profondità media di 170 m e da una superficie di circa 870 km², il bacino presenta una complessa topografia di fondo con due canyon sottomarini (Magnaghi e Dohrn), incisi nella piattaforma continentale dove l'estremità superiore è vicina alla costa, quella inferiore raggiunge una profondità di 800 m [1-8]. La comunicazione tra le acque interne e quelle esterne del Mar Tirreno avviene attraverso due alti morfo-strutturali principali [1]: la Bocca Grande, che separa le isole di Ischia e Capri, e la Bocca Piccola, localizzata tra Capri e la punta della Penisola Sorrentina (Punta Campanella). La morfologia della costa che circonda il Golfo varia da N a S: le coste sabbiose presenti nella parte settentrionale ed orientale del bacino sono sostituite al sud dalla dorsale calcarea dei Monti Lattari, un sistema montuoso che fa parte degli Appennini [7]. L'area di studio è anche contraddistinta da particolari aspetti orografici che influenzano le dinamiche del vento e del mare. Il vulcano Vesuvio (altitudine: 1.281 m) e le colline che circondano la città di Napoli (con altitudini fino a 450 m) proteggendo il bacino dai venti provenienti da NE (dominanti nei mesi invernali), creano correnti che innescano rapidi processi di trasporto costa-largo [4-6-9-10-12-16]. Il Golfo di Napoli è caratterizzato dalla presenza di due masse d'acqua principali, tipiche del Tirreno centro meridionale [9]. La prima è l'acqua di provenienza atlantica che, modificata lungo il suo percorso (MAV), raggiunge la profondità di 50-

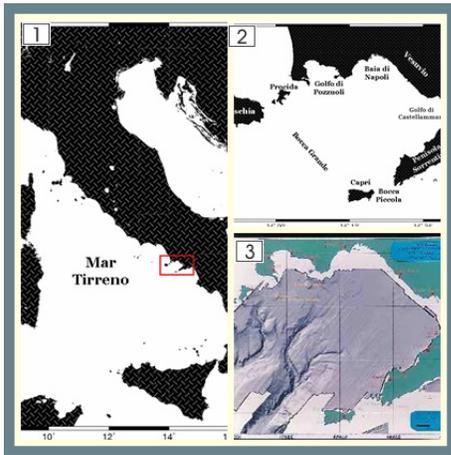


Figura 1. - 1) Rappresentazione del Mar Tirreno con evidenziato nel rettangolo rosso il Golfo di Napoli. 2) Sottoaree, canali e bocche interne al golfo di Napoli. 3) il Canyon Dohrn (destra) e il Canyon Magnaghi (sinistra) che drenano l'intero Golfo, incluse le isole di Ischia e Procida.

100 m, con salinità pari a 37.5% e temperatura che segue l'andamento stagionale, diminuendo con la profondità. Nei mesi invernali, a causa del completo rimescolamento della colonna d'acqua, la temperatura assume un valore costante pari a circa 14°C.

Nelle stazioni più profonde, in prossimità della Bocca Grande, invece, è presente la *Levantine Intermediate Water (LIW)*. I valori caratterizzanti tale massa d'acqua nel Golfo di Napoli sono:

$$T = 14.2^{\circ}\text{C} \quad S = 38.65\% \quad \sigma_t = 29.0$$

E' possibile riscontrare la presenza di altri tipi di masse d'acqua in relazione all'andamento stagionale: il risultato del mescolamento invernale costituisce un tipo di acqua, la *Tyrrhenian Intermediate Water (TIW)* dopodichè a causa del riscaldamento estivo la TIW si ritrova a una profondità di circa 75 m, e diviene *Tyrrhenian Surface Water (TSW)*, con valori di T ed S pari di 26°C e 38% rispettivamente. Il nucleo della TIW risiede tra i 75 e 100 m fino a tardo autunno, quando viene inglobata dalla nuova produzione di TIW [5]. Infine, a causa delle immissioni nel Golfo delle acque dolci provenienti dai fiumi Sarno e Volturno e degli scarichi urbani e industriali, è identificabile una massa d'acqua simile alla TSW, che risulta, pertanto, essere meno salata e più calda [5].

III. HF RADAR NETWORK

La dinamica delle acque costiere e la circolazione risultante sono dipendenti da molti meccanismi fisici ed interazioni che non possono essere compresi bene se non sono campionati con la necessaria risoluzione temporale e spaziale. Le tecniche di misura convenzionali sono limitate all'osservazione nel tempo di un singolo punto (misure euleriane, danno un'informazione regolare nel tempo, ma limitata all'immediato intorno della posizione di misura) oppure alla ricostruzione della velocità lungo la traiettoria di strumenti derivanti che simulino le particelle di fluido (misure lagrangiane, danno informazioni

distribuite all'interno della zona di interesse, ma la misura in posizioni diverse viene effettuata in tempi differenti). In altre parole, le misure euleriane e lagrangiane mancano rispettivamente di sinotticità spaziale e temporale. A queste limitazioni è possibile ovviare, almeno in parte, con misure telerilevate, ossia effettuate da strumenti che si trovino ad una certa distanza dai punti di misura (generalmente montati su satelliti o su aerei), e che quindi siano in grado di inquadrare un'area di mare di una certa ampiezza con sinotticità temporale. In questo ambito particolarmente interessanti risultano le potenzialità dei radar costieri in HF: si tratta di strumenti non installati su velivoli ma sulla costa, che misurano le correnti marine nel primo metro d'acqua su grigliati con risoluzioni che vanno da qualche chilometro a poche centinaia di metri e con una cadenza temporale oraria [3]. Il termine radar (Radio Detection And Ranging) definisce un dispositivo che trasmette un segnale a radiofrequenza verso un bersaglio e ne rileva l'eco riflessa. In un radar costiero il bersaglio è costituito dalle increspature associate alle onde che si propagano sulla superficie di un bacino costiero. La riflessione produce uno spettro energetico al ricevitore, anche se la sorgente di energia è a singola frequenza, a causa della forma e del movimento della superficie del mare. Interpretare i rendimenti spettrali per varie frequenze di trasmissione è la chiave per estrarre informazioni sul mare e, in particolare, per misurare correnti superficiali. Come conseguenza della legge Scattering di Bragg, il più forte ritorno ricevuto proviene da onde che viaggiano direttamente verso o lontano dalla sorgente radar e la cui lunghezza d'onda fisica è esattamente la metà di quella della radiazione incidente emessa dallo strumento. Il segnale di ritorno viene elaborato e la sua analisi spettrale fornisce lo spettro Doppler mare-echo, dove due picchi dominanti a diverse frequenze possono essere riconosciuti. Lo spostamento di questi picchi lontano dalle loro frequenze, chiamato spostamento Doppler echo, permette di valutare la velocità radiale della corrente di superficie. Pertanto, a partire dall'effetto Doppler, con software dedicati, è possibile identificare nel segnale riflesso la presenza di correnti superficiali (relative al primo metro d'acqua) che modulino l'andamento delle onde. Questa operazione, eseguita per ogni stazione ricetrasmittente (o antenna), fornisce una componente radiale, diretta cioè da o verso la stazione stessa; per ricostruire l'intero campo bidimensionale delle correnti superficiali sono necessarie almeno due antenne, ma a causa della geometria della costa, e quindi di come si sovrappongono le aree misurate da ogni singola antenna, è bene disporre di almeno tre stazioni, per poter garantire una copertura omogenea dei bacini osservati. L'attuale configurazione del sistema attivo sul Golfo di Napoli è composta da antenne situate a Portici, Castellammare e Sorrento, con il centro di monitoraggio e coordinamento ospitato presso il Dipartimento di Scienze e Tecnologie dell'università Parthenope (DiST). Le misure radiali di corrente sono inviate a Portici dai due siti di Massalubrense e Castellammare, attraverso una connessione WI-FI, da qui poi i dati sono mandati all'unità centrale di rilevamento e processamento dei dati ubicata presso il DiST. Il sistema radar in HF così costituito permette la stima del campo

superficiale di corrente con un'elevata risoluzione e copertura spaziale (la griglia finale sulla quale vengono combinate le informazioni fornite separatamente da ciascun sistema di misura ha un passo regolare di un 1 km; (fig.2) e temporale (1h). La rete di monitoraggio ambientale del Dipartimento di Scienze e Tecnologie include anche due stazioni mareografiche ubicate una a Castellammare e l'altra nel porto di Ischia. L'analisi dei dati mareografici acquisiti nel periodo 2002-2005, condotta da Buonocore e Menna [1] mostra un andamento del livello medio mare (lmm) che si mantiene pressoché costante, presentando escursioni tra il valore minimo e massimo dell'ordine degli 80 cm. Tale valore rappresenta il doppio del contributo imputabile alle variazioni mareali legate alle sole cause astronomiche.



Figura 2. Massima copertura del sistema installato nel Golfo di Napoli.

IV. DATI E METODI

A. Analisi armonica su dati mareografici di Ischia

La serie di misure eseguite dal mareografo di Ischia analizzate nel presente lavoro, si estende dal 1/01/2012 (ora 00:00:00) al 31/12/2012 (ora 23:00:00); una serie temporale continua, i.e priva di interruzioni, con lunghezza di 366 giorni e frequenza di campionamento 5 minuti. Per la valutazione della componente astronomica della marea si è proceduto a effettuare una analisi armonica delle misure di livello in modo da calcolare le costanti armoniche e scomporre le misure in componente astronomica e componente residua. Per il calcolo delle costanti armoniche è stato utilizzato il pacchetto software t_tide scritto in linguaggio MATLAB, sviluppato da Pawlowicz, Beardsley e Lentz3 [19]; t_tide è un insieme di routine, diffuso tra gli oceanografi, che può essere usato per eseguire una analisi armonica classica delle maree con correzioni nodali, inferenze e una varietà di altre opzioni. L'algoritmo usato per avere le stime di fase e ampiezza è basato su algoritmi in linguaggio FORTRAN sviluppati da Godin [13] e Foreman [11], pertanto le stime sono ricavate con la tecnica dei minimi quadrati. E' possibile includere nell'analisi un massimo di 126 costituenti, 45 dei quali sono di origine astronomica (costituenti principali) mentre i restanti 101 sono i costituenti shallow water: strutture dati contenenti i nomi

e altre informazioni su queste componenti vengono caricate dal codice $t_getconsts$. I costituenti da includere nell'analisi vengono selezionati secondo il criterio di Rayleigh: sia F_2 , F_1 e T rispettivamente la frequenza di un costituente da includere, la frequenza di un costituente già incluso e T la lunghezza della serie temporale, t_tide include nell'analisi F_2 se e solo se $|F_2 - F_1|T \geq 1$. Inoltre l'analisi può essere sintetizzata ai soli costituenti di marea caratterizzati da un rapporto segnale-rumore (snr) significativo (snr=1 oppure snr=2).

La presenza di circa 12 mesi di dati continui ha consentito di distinguere la componente P1 dalla K1 e la S2 dalla K2. Nella analisi armonica sono stati identificati e separati 67 componenti, 12 dei quali risultano essere significativi con un livello di confidenza del 95%. Nella Tabella 1. vengono mostrati ampiezza e fase dei nove costituenti più significativi. Nei grafici, invece, vengono illustrate andamento della serie temporale, della marea teorica e della marea meteorologica, andamento orario della marea teorica in alcuni mesi dell'anno 2012.

| Costanti Armoniche | | | |
|--------------------|-----------|---------|--------|
| Armonica | freq | amph(m) | pha |
| M2 | 0.0805114 | 0.1175 | 261.3 |
| S2 | 0.0833333 | 0.0441 | 283.06 |
| N2 | 0.0789992 | 0.0236 | 247.11 |
| K2 | 0.0835615 | 0.0120 | 280.22 |
| K1 | 0.0417807 | 0.0291 | 212.25 |
| O1 | 0.0387307 | 0.0108 | 124.86 |
| P1 | 0.0415526 | 0.0074 | 203.19 |
| M4 | 0.1610228 | 0.0035 | 201.73 |
| MS4 | 0.1638447 | 0.0022 | 259.48 |

Tabella 1. Le principali componenti di marea stimate attraverso l'analisi armonica nel Golfo di Napoli.

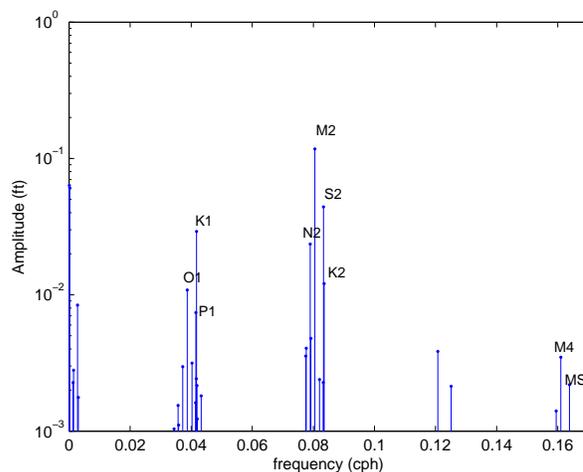


Figura 3. Illustrazione dello spettro delle più significative componenti mareali individuate.

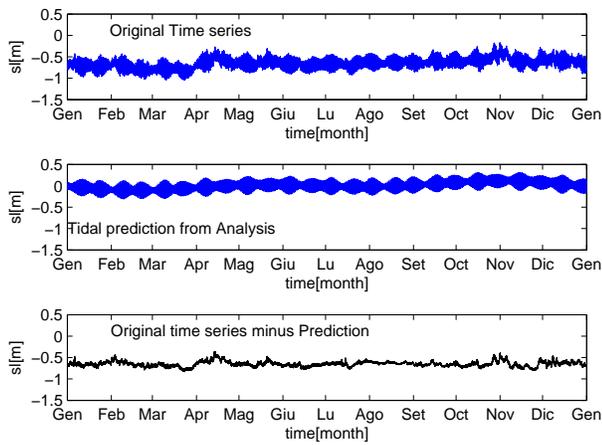


Figura 4. Risultato finale dell'analisi di marea da dati della stazione mareografica di Ischia acquisiti nel periodo Gennaio 2012 - Dicembre 2012. La prima curva rappresenta il livello del mare in metri, la seconda la variazione dovuta alla marea teorica, infine la curva in nero è il residuo (marea meteorologica) a seguito della rimozione dell'effetto della marea dai dati di sea level.

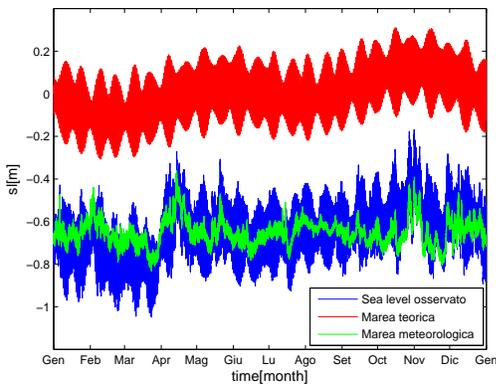


Figura 5. Subplot: Sea Level, Marea Teorica e Residuo.

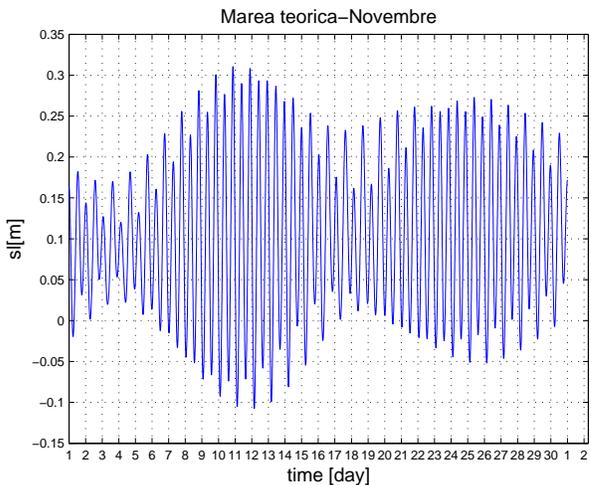
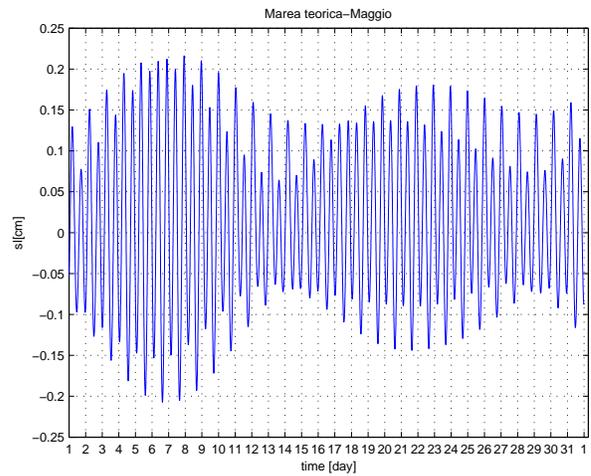
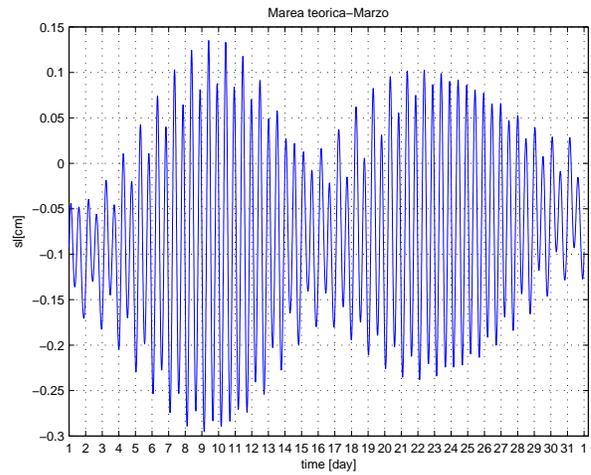
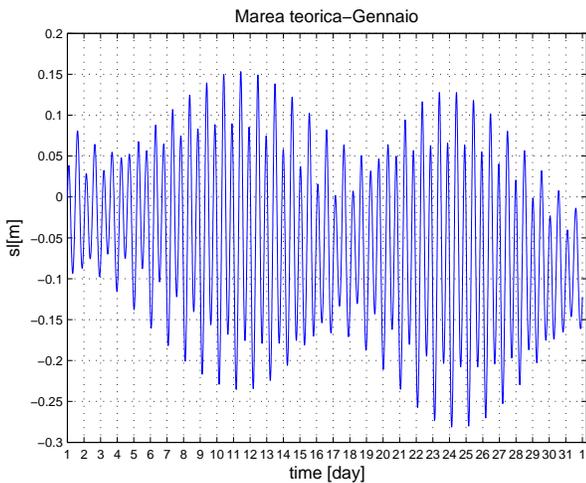


Figura 6. Marea Teorica relativa ai mesi Gennaio 2012, Marzo 2012, Maggio 2012, Novembre 2012.

B. Dal dato di sea level al dato in H_f

Dall'analisi della marea all'analisi della corrente mareale significa fondamentalmente passare dall'elaborazione di dati

di sea level (serie temporale monodimensionale) all'elaborazione di dati di corrente superficiale, dunque elaborazione di serie temporali bidimensionali: Marea e corrente mareale, la natura li fonde, la matematica ancor di più, ma son cose ben distinte. L'obiettivo è stimare il contributo della corrente mareale nel GoN è ciò è stato possibile utilizzando dati di corrente superficiale in HF totali ottenuti combinando i dati radiali processati dalle singole antenne; precisamente sono stati esaminati i dati dei campi di corrente registrati durante l'anno 2012 (dal 01/01/2012 ore 00:00:00 al 31/12/21 ore 22:00:00). Tale set di dati, contenete valori acquisiti ogni ora, non è continuo a causa di interruzioni accidentali, presentando una perdita totale di dati pari a 372 ore (Gaps). E' importante notare che a causa della non uniformità della copertura spaziale nel tempo, poiché questa è variabile in funzione delle condizioni ambientali in cui avvengono le osservazioni (effetto del vento sulle antenne, riduzione della propagazione a causa del diverso grado di umidità dell'aria, aumento del rumore all'aumentare del moto ondoso), si è reso necessario applicare un processo di interpolazione spaziale nel tempo costruendo un grigliato integrato regolare, caratterizzato da una risoluzione di $1km$. A seguito di questo processo di interpolazione alcuni punti del grigliato avranno come valore NaN. Successivamente per garantire maggiore corrispondenza del set di dati alla realtà si è ridotta l'area utile del grigliato ai soli punti compresi nella massima copertura teorica garantita dal sistema CODAR. Tale processo ha consentito di lavorare con un data set regolare spazialmente e temporalmente e pertanto compatibile con il toolbox HFR-Progs di MatLab [14] e specificamente il codice *t_tide_totals*, in grado di gestire un data set regolare contenenti valori NaN.

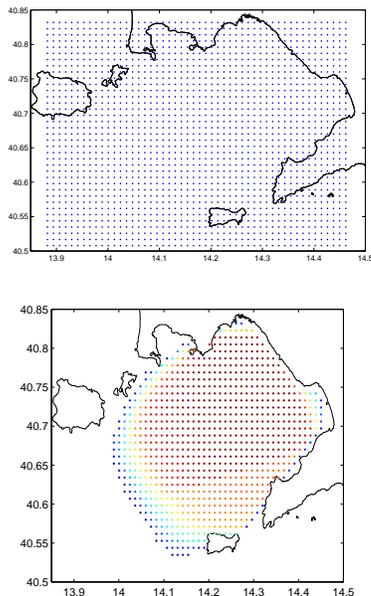


Figura 7. In alto griglia di lavoro con risoluzione spaziale $1km$. In basso subregione di analisi in accordo con la copertura del radar. I diversi colori indicano diversa copertura (da rosso massima copertura a blu minima copertura).

Il codice *t_tide_totals* consente di ricavare la corrente di marea dai dati codar totali opportunamente memorizzati effettuando un'analisi armonica sul campo di velocità in formato complesso, $U + iV$ (U e V componenti della velocità rispettivamente nord/est e sud/ovest), utilizzando la tecnica dei minimi quadrati: pertanto, inevitabilmente *t_tide_total* chiama *t_tide*. Precisamente dopo un filtraggio per controllare la qualità del dataset in termini di valori non NaN, delle serie temporali annuali, ognuna delle quali relativa ad punto specifico del grigliato, viene chiamata la function *t_tide* per procedere con l'analisi armonica ai minimi quadrati di ciscun serie. L'output è in termini dei parametri delle ellissi dei costituenti mareali: semiasse maggiore, semiasse minore, inclinazione e fase, attraverso i quali è possibile ricostruire il segnale mareale e proseguire nell'analisi. Togliendo il segnale mareale dai valori orari, si ottiene la parte non-mareale o residua.

Per ridurre l'effetto dei NaN introdotti nel dataset dall'interpolazione, e a seguito della sostituzione dei gap con valori NaN (nel caso vi siano dei dati mancanti si può inserire nel vettore della serie temporale di osservazioni il termine NaN che, in Matlab, costituisce la rappresentazione IEEE, acronimo di Institute of Electrical and Electronic Engineer, per un non numero (Not-a-Number) [19]), l'analisi armonica è stata limitata unicamente ai punti del grigliato caratterizzati da una copertura minima, in termini di valori significativi (non NaN), del 70 % [12]; In prima istanza l'analisi armonica è stata effettuata sul dataset completo i.e relativo all'intero anno 2012, in una seconda fase, con l'obiettivo di lavorare con un set di dati in condizioni prossime a quelle ideali (serie temporali senza gap), si è passati all'analisi armonica del dataset di 4 mesi relativo al periodo che va dal 10 Febbraio 2012 (ore 00:00:00) al 31 Maggio ore 23:00:00.

Nelle tabelle 2,3, e 4 vengono riportati i risultati dell'analisi armonica (asse maggiore(cm/s),asse minore (cm/s),inclinazione($^{\circ}$) e fase($^{\circ}$)), eseguita sul secondo dataset, relativi a 3 posizioni A($14^{\circ}17'36''$, $40^{\circ}47'13''$), B($14^{\circ}20'36''$, $40^{\circ}43'26''$), C(14° , $10'40''$, $40^{\circ}43'26''$) (fig 6.) caratterizzati da una copertura del 99% e precisamente vengono indicati solo i costituenti con ampiezza e rapporto segnale rumore significativi.

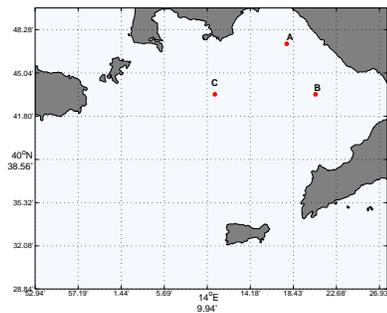


Figura 8. Posizione dei punti A, B, C, dove sono state analizzate le serie temporali della corrente superficiale.

| Parametri armonici punto A | | | | | |
|----------------------------|-------|--------|--------|--------|-----|
| tide | major | minor | Inc | Pha | snr |
| O1 | 1.242 | 0.457 | 40.77 | 249.79 | 2 |
| NO1 | 1.309 | 0.462 | 47.52 | 89.22 | 1.4 |
| K1 | 4.453 | 3.339 | 175.42 | 148.98 | 16 |
| UPS1 | 1.328 | 0.451 | 148.48 | 296.35 | 1.4 |
| S2 | 1.901 | 1.298 | 146.33 | 233.94 | 6.5 |
| MO3 | 0.319 | 0.049 | 59.71 | 96.38 | 1.1 |
| M3 | 0.372 | -0.018 | 73.62 | 7.80 | 1.2 |
| SK3 | 0.516 | 0.116 | 128.29 | 150.38 | 1.9 |
| MN4 | 0.224 | 0.181 | 47.42 | 124.43 | 1.8 |
| M4 | 0.225 | 0.126 | 2.42 | 180.14 | 1.5 |
| SN4 | 0.212 | 0.001 | 68.88 | 204.57 | 1.1 |
| MS4 | 0.207 | 0.143 | 47.31 | 223.35 | 1 |
| 2MN6 | 0.146 | 0.013 | 74.92 | 43.54 | 1.2 |
| 3MK7 | 0.112 | 0.027 | 55.07 | 174.68 | 1.1 |

Tabella 2. I parametri delle ellissi della marea relativi al punto A.

| Parametri armonici punto B | | | | | |
|----------------------------|-------|--------|--------|--------|-----|
| tide | major | minor | Inc | pha | snr |
| ALP1 | 1.096 | 0.035 | 35.84 | 354.25 | 1 |
| NO1 | 1.587 | 0.764 | 40.56 | 100.22 | 1.6 |
| K1 | 5.730 | 2.492 | 35.21 | 20.76 | 14 |
| N2 | 0.820 | 0.124 | 176.73 | 272.40 | 1.4 |
| L2 | 0.977 | 0.707 | 166.17 | 134.77 | 2.2 |
| S2 | 0.997 | 0.361 | 101.33 | 228.52 | 2.3 |
| SK3 | 0.550 | 0.070 | 162.79 | 136.31 | 1.5 |
| MN4 | 0.193 | 0.031 | 108.84 | 58.33 | 1.1 |
| 2SK5 | 0.231 | -0.066 | 1.52 | 181.02 | 1.4 |
| 2MN6 | 0.128 | -0.026 | 173.96 | 269.46 | 1.1 |
| M8 | 0.152 | 0.105 | 160.26 | 72.00 | 2.1 |

Tabella 3. I parametri delle ellissi della marea relativi al punto B.

| Parametri armonici punto C | | | | | |
|----------------------------|-------|--------|--------|--------|-----|
| tide | major | minor | Inc | pha | snr |
| MM | 3.624 | 0.931 | 64.76 | 200.33 | 1.1 |
| 2Q1 | 1.244 | 0.786 | 131.25 | 242.46 | 1.2 |
| K1 | 4.775 | 3.7924 | 35.21 | 342.96 | 18 |
| UPS1 | 1.505 | 0.843 | 74.83 | 209.72 | 1.5 |
| M2 | 0.498 | 0.098 | 53.22 | 319.01 | 1.4 |
| L2 | 0.746 | 0.265 | 140.24 | 123.98 | 3.5 |
| S2 | 1.469 | 0.736 | 165.00 | 283.28 | 9.4 |
| M3 | 0.338 | 0.121 | 144.64 | 204.18 | 1.3 |
| M4 | 0.245 | 0.111 | 139.44 | 168.21 | 1.5 |
| SN4 | 0.257 | -0.085 | 97.80 | 244.25 | 1.5 |
| 2MK5 | 0.265 | 0.034 | 140.67 | 166.51 | 2.2 |
| 2MN6 | 0.181 | -0.100 | 114.67 | 169.41 | 1.3 |

Tabella 4. I parametri delle ellissi della marea relativi al punto C.

Determinati i parametri delle ellissi della marea, si è passati all'analisi temporale e spaziale della corrente mareale. Nelle figure (da 9-20) vengono riportate la corrente superficiale, la corrente mareale e il residuo in ciascuna delle 3 stazioni, in quelle successive, viene illustrato l'andamento spaziale della corrente mareale in un periodo di 28 ore.

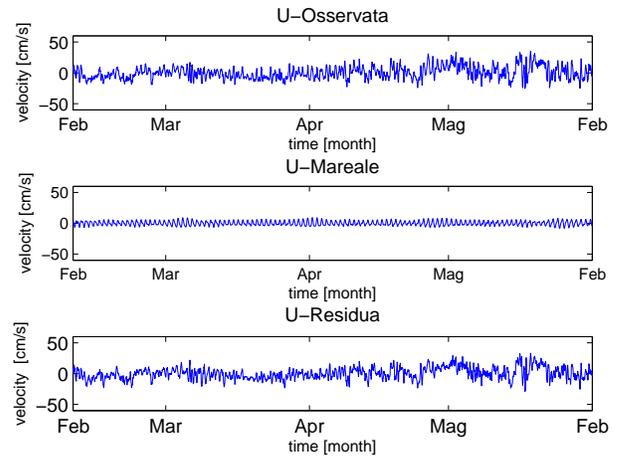


Figura 9. Componente U della corrente superficiale osservata, mareale e residua in A.

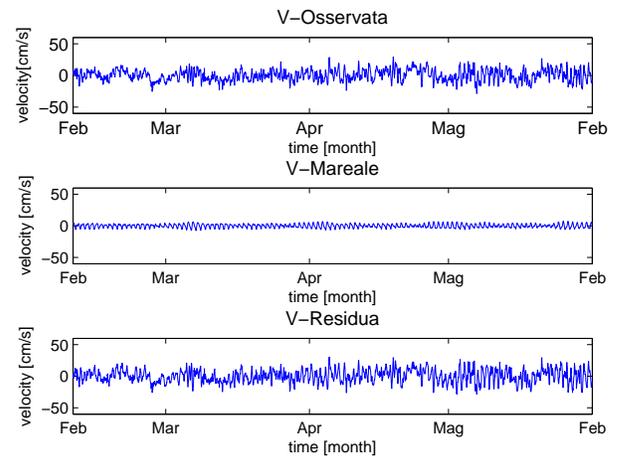


Figura 10. Componente V della corrente superficiale osservata, mareale e residua in A.

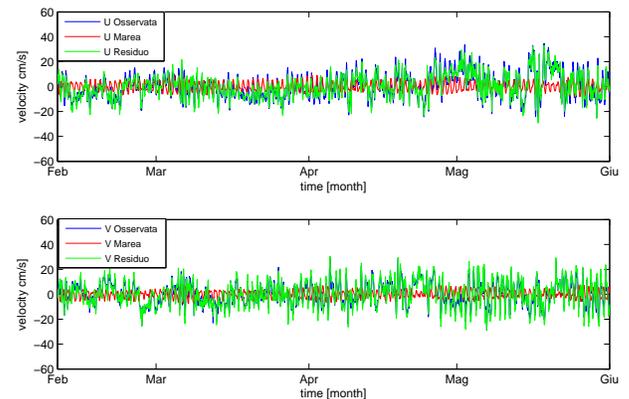


Figura 11. Subplot della componente U della corrente superficiale osservata, mareale e residua e subplot della componente V della corrente superficiale osservata, mareale e residua in A.

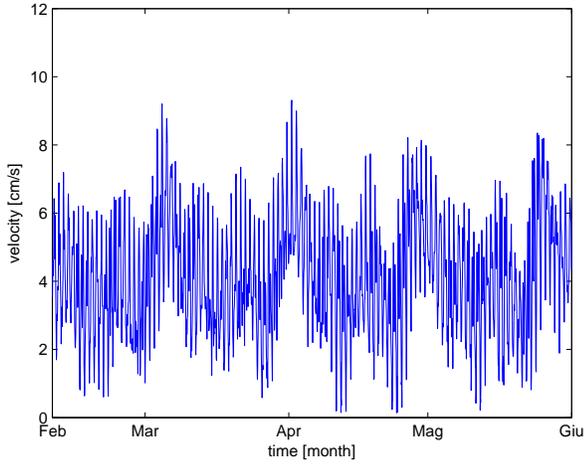


Figura 12. Intensità della corrente mareale in A.

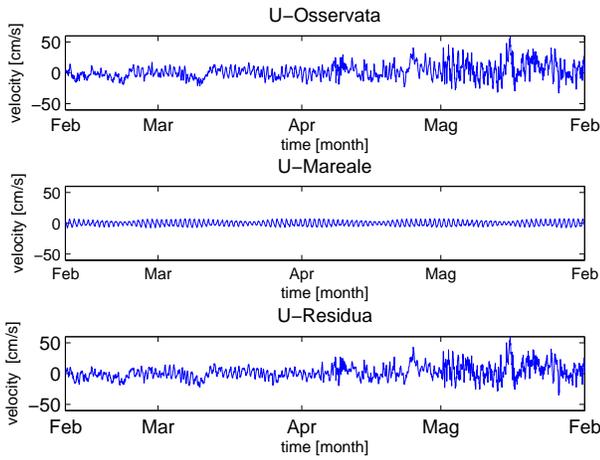


Figura 13. Componente U della corrente superficiale osservata, mareale e residua in B.

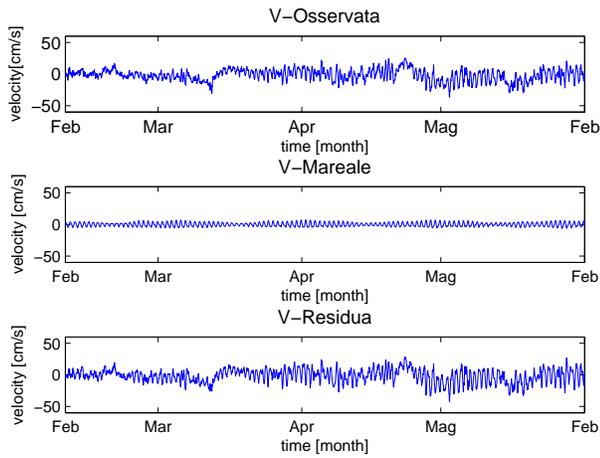


Figura 14. Componente V della corrente superficiale osservata, mareale e residua in B.

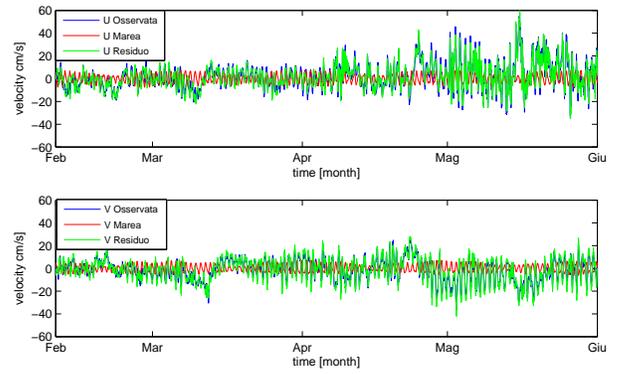


Figura 15. Subplot della componente U della corrente superficiale osservata, mareale e residua in C e subplot della componente V della corrente superficiale osservata, mareale e residua in B.

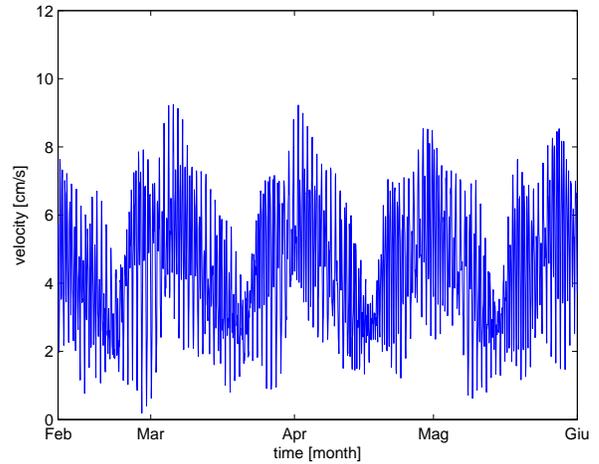


Figura 16. Intensità della corrente mareale in B.

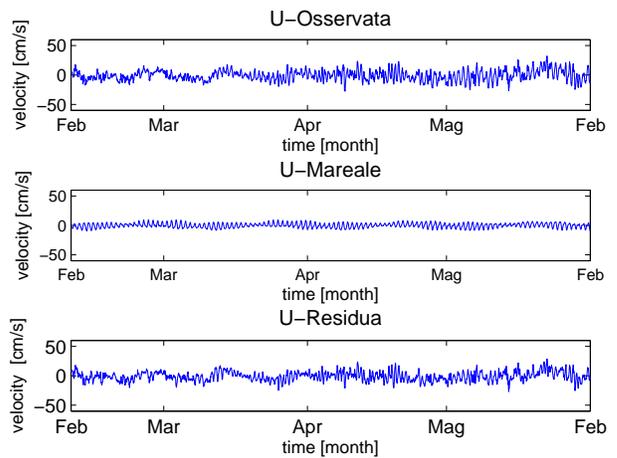


Figura 17. Componente U della corrente superficiale osservata, mareale e residua in C.

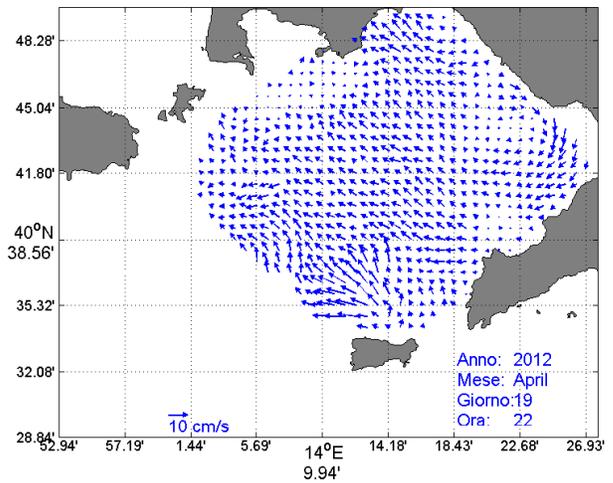
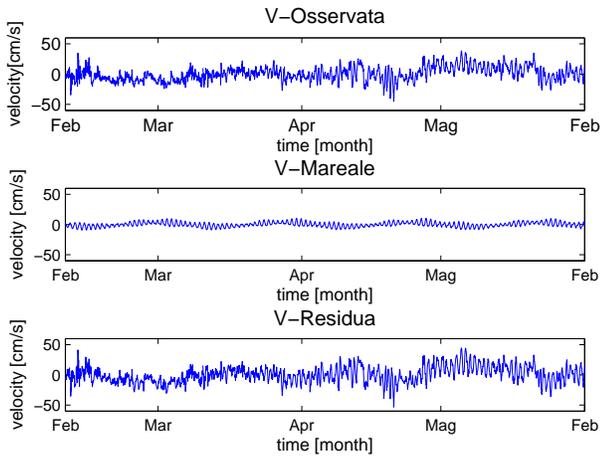


Figura 18. Componente V della corrente superficiale osservata, mareale e residua in C.

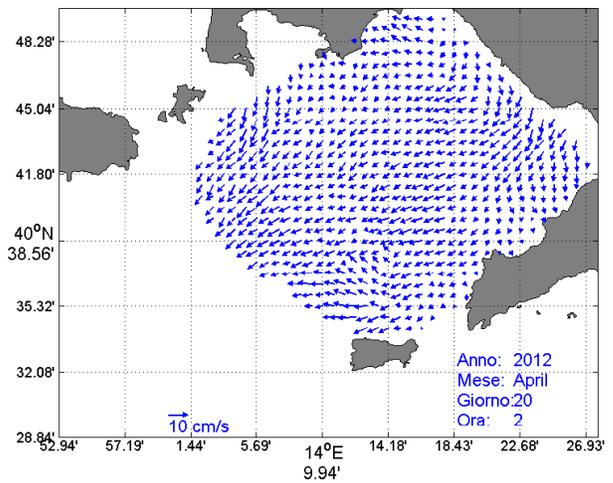
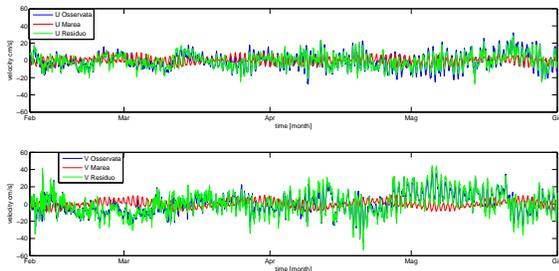


Figura 19. Subplot della componente U della corrente superficiale osservata, mareale e residua in C e subplot della componente V della corrente superficiale osservata, mareale e residua in C.

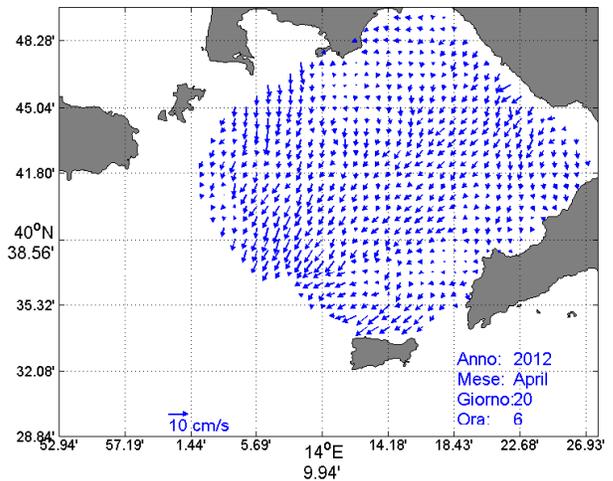
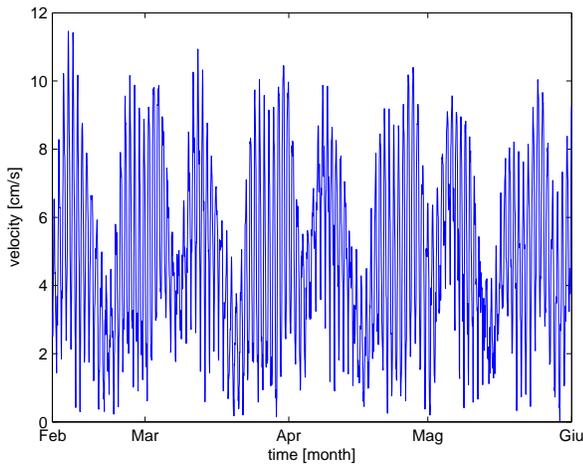


Figura 20. Intensità della corrente mareale in C.

Nei grafici che seguono viene illustrato il campo di corrente mareale ottenuto per un intervallo di 28 relativo al giorno 20/4/12, rappresentativo dell'andamento della corrente mareale nel GoN.

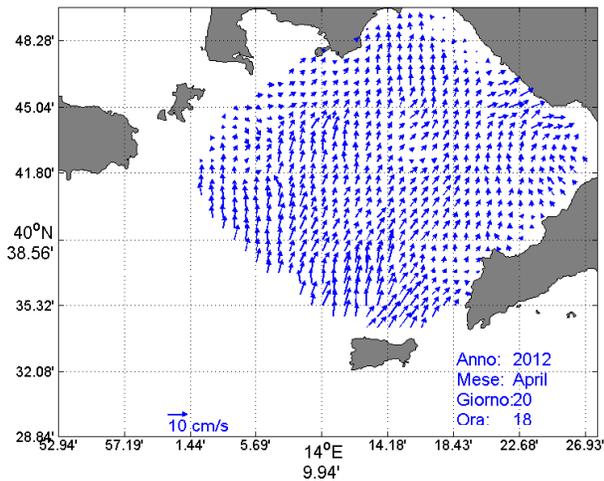
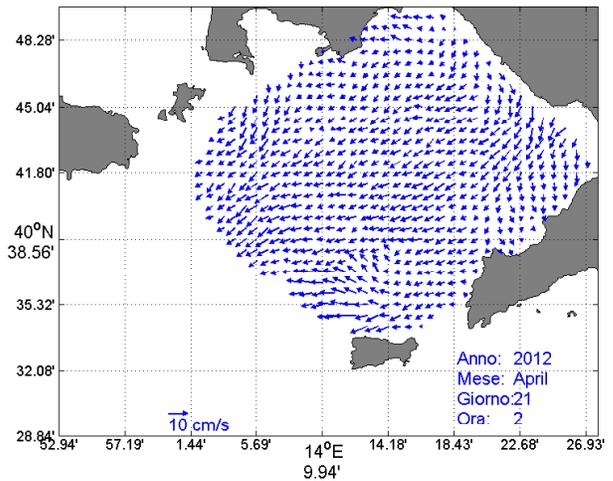
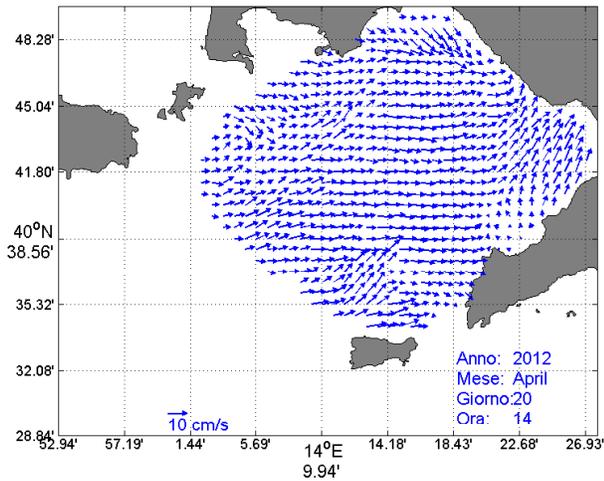
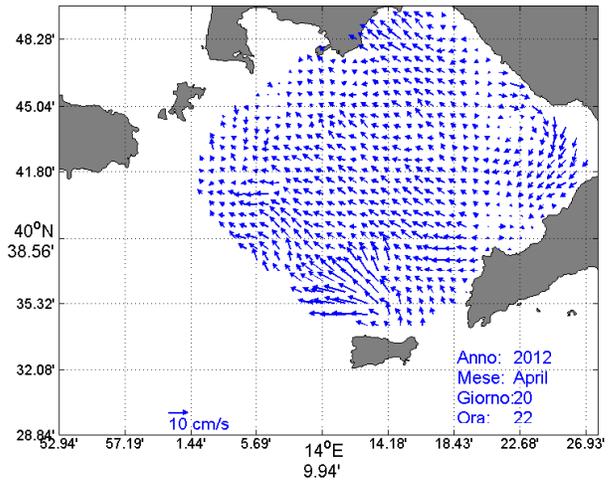
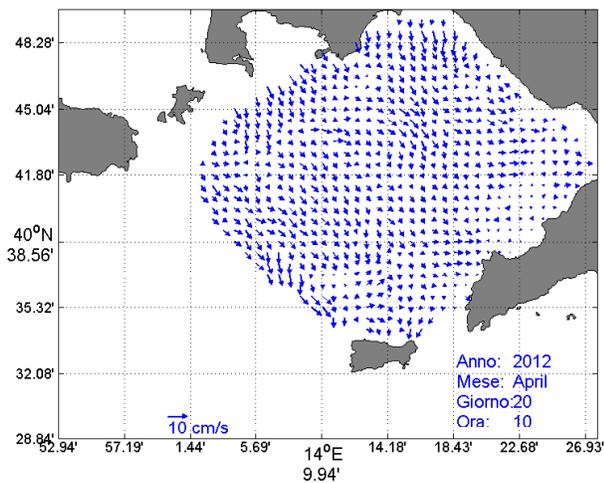


Figura 21. Andamento della corrente mareale nel GoN durante un intervallo di 28 ore.

Come si evince dai grafici la corrente mareale nel GoN influisce in maniera relativamente significativa sulla variabilità totale del campo della corrente raggiungendo intensità sino a 10 cm/s con andamento tipicamente diurno.

V. CONCLUSIONI

Il Golfo di Napoli rappresenta un'interessante area costiera dal punto di vista oceanografico per le sue peculiari caratteristiche morfologiche e per la presenza di una fascia costiera altamente urbanizzata, di scarichi urbani e immissioni di acqua dolce. Il GoN è probabilmente uno dei più rappresentativi sottobacini del Mediterraneo, caratterizzato da dinamiche fisiche complesse riflettendo, quest'ultime, le interazioni tra numerosi fattori che agiscono su diverse scale spaziali e temporali [10]. In questo lavoro sono state analizzate, per l'anno 2012, la marea e la corrente di marea, attraverso rispettivamente l'elaborazione di dati di sea level registrati presso la stazione

mareografica di Ischia e l'elaborazione di dati totali di corrente superficiale misurati dal sistema radar in HF, col fine ultimo di individuare il contributo della corrente dovuto all'azione della sola marea.

Lo studio della marea ha consentito di calcolare, per l'anno in esame, i valori di ampiezza e fase dei principali costituenti mareali. Tale determinazione, che ha trovato conferma nei risultati ottenuti da altri autori, ha consentito di calcolare l'andamento della marea teorica (marea astronomica) e quindi di ricavare l'andamento residuo della marea meteorologica.

La conoscenza sinottica, continuativa e dettagliata della corrente superficiale, acquisita dai dati Codar in HF, ha consentito di determinare, mediante il toolbox di MatLab *t_tide*, già impiegato nell'analisi armonica della marea e in analogia a quanto fatto in quella analisi, i parametri armonici dell'ellisse di marea (semiassi maggiori e minori, inclinazione e fase). Sono state determinate quindi le componenti u e v della corrente mareale teorica e conseguentemente la corrente residua. Tale analisi è stata condotta in 3 punti significativi del Golfo e su un intervallo temporale in cui fosse massimizzata la quantità di dati di osservazione. Tale determinazione ha evidenziato valori di corrente mareale anche di 10 cm/sec. Si è esaminato inoltre il comportamento spaziale della corrente mareale e ciò ha evidenziato un andamento tipicamente diurno. I risultati ottenuti, pur confermando la modesta entità del fenomeno mareale nel GoN, hanno evidenziato comportamenti finora non noti e meritevoli di ulteriori approfondimenti.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale Ricerca e Competitività 2007-2013, "Progetto Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' - TESSA".

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Aiello G., Budillon F., Cristofalo G. D'Argenio B., de Alteriis G., De Lauro M. Ferraro L., Marsella E., Pelosi N. Sacchi M. Tonielli R. (2001) *Marine geology and morphobathymetry in the bay of Naples (south-eastern Tyrrhenian sea, Italy)*. In: Structures and processes of the Mediterranean Ecosystems. (Ed. by F.M. Faranda, L. Guglielmo, G. Spezie), 1-8, Springer-Verlag, Italy.
- [2] Buonocore B., Menna M. (2006) *La variabilità del livello del mare nel Golfo di Napoli e la sua dipendenza dalla pressione atmosferica*.
- [3] Buonocore B., Flocco D., Zambianchi E. (2005) *Misure di correnti superficiali eseguite con radar costiero*. 16.
- [4] Buonocore B, Cianelli D, Falco P, Guida R, Uttieri M, Zambardino G, Zambianchi E (2010) *Hydrocarbon dispersal in the Gulf of Naples: a parametric study*. *Rapp Comm int Mer Médit* 39:725 .
- [5] Carrada G. C., Hopkins T. S., G. B., Ianora A., Marino D., Modigh M., Ribera d'Alcalà M., B. S. D. C. (1979) *Variability in the hydrographic and biological features of the Gulf of Naples*. P.S.Z.N.I: Marine ecology 1: 105-120.
- [6] Cianelli D, Uttieri M, Buonocore B, Falco P, Zambardino G, Zambianchi E (2011) *Dynamics of a very special Mediterranean coastal area: the Gulf of Naples*. In: Columbus F (ed). *Mediterranean Ecosystems: Dynamics, Management and Conservation*. Nova Science Publishers, Inc, New York.
- [7] D'Argenio B., Pescatore T. and Scandone P., (1973) Schema geologico dell'Appennino meridionale (Campania e Lucania). Atti del Convegno Moderne vedute sulla Geologia dell'Appennino: Roma, Accademia Nazionale dei Lincei, p. 183.

- [8] D'Argenio, B., Aiello, G., de Alteriis, G., Milia, A., Sacchi, M. et al. (2004) *Digital Elevation Model of the Naples Bay and adjacent areas, Eastern Tyrrhenian sea*. In: Mapping Geology in Italy, E. Pasquarè G. Venturini (Eds.), APAT, National Geological Survey of Italy, Spec. Vol. SELCA, Florence, 22-28.
- [9] De Maio A., Moretti M., Sansone E., Spezie G., Vultaggio M. (1979) *Dinamica delle acque nel Golfo di Napoli*. Atti del Convegno Scientifico Nazionale P.F. Oceanografia e fondali marini II: 1033-1045
- [10] De Maio A, Moretti M, Sansone E, Spezie G, Vultaggio M (1983) *Dinamica delle acque del Golfo di Napoli e adiacenze*. Risultati ottenuti dal 1977 al 1981. *Annali Ist Univ Nav LI*: 1-58.
- [11] Foreman. (1977) *Manual for Tidal Height Analysis and Prediction*.
- [12] Grieco L., Tremblay L., Zambianchi E. (2005) *A hybrid approach to transport processes in the Gulf of Naples: an application to phytoplankton and zooplankton population dynamics*. *Cont Shelf Res* 25:711-728.
- [13] Godin, G., (1972) *The Analysis of Tides*. University of Toronto Press, Toronto, 264pp.
- [14] Kaplan David M. (2006) *HFR_Progs Matlab Documentation*.
- [15] Matt K. Gough, Newell Garfield, and Erika McPhee-Shaw (2010) *An analysis of HF radar measured surface currents to determine tidal, wind-forced, and seasonal circulation in the Gulf of the Farallones, California, United States*
- [16] Menna M, Mercatini A, Uttieri M, Buonocore B, Zambianchi E (2007) *Wintertime transport processes in the Gulf of Naples investigated by HF radar measurements of surface currents*.
- [17] Moretti M, Sansone E, Spezie G, Vultaggio M, De Maio A (1976-1977) *Alcuni aspetti del movimento delle acque del Golfo di Napoli*. *Annali Ist Univ Nav XLV-XLVI*: 207-217.
- [18] Mosetti. (1987) *Distribuzione delle maree nei mari italiani*. Bollettino di oceanografia teorica e applicata.
- [19] Pawlowicz, R., B. Beardsley, and S. Lentz (2002) *Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T_TIDE*, Computers and Geosciences.
- [20] Pugh David T. (1996) *Tides, Surges and Mean Sea-Level*.

Validazione del sistema di previsione TSCRM mediante osservazioni CTD

Federica Pessini
CNR-IAMC Napoli
Email: federica.pessini@iamc.cnr.it

Leopoldo Fazioli
CNR-IAMC Oristano
Email: leopoldo.fazioli@cnr.it

Roberto Sorgente
CNR-IAMC Oristano
Email: roberto.sorgente@cnr.it

Sommario—Durante lo stage svolto presso l'IAMC CNR di Oristano è stato sviluppato un sistema di validazione del modello numerico di circolazione TSCRM (Tyrrhenian-SiCily strait Sub-regional Model) mediante l'utilizzo di osservazioni di temperatura e salinità acquisiti durante la campagna oceanografica *Ichnussa 2013*, svolta da ISMAR CNR di La Spezia e IAMC CNR di Oristano dal 15 al 29 ottobre 2013 nel Mar Mediterraneo Occidentale.

L'obiettivo che ci si è prefissati è stato quello di fornire uno strumento in grado di validare in *near real time* i dati di previsione del modello TSCRM, in modo da poter fornire successivamente la migliore stima dei parametri oceanografici di interesse attraverso la fase di calibrazione del modello.

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale Ricerca e Competitività 2007-2013, Progetto Sviluppo di Tecnologie per la *Situational Sea Awareness - TESSA*.

INTRODUZIONE

Stimare la traiettoria che compie un oggetto alla deriva può essere importante in diverse circostanze quali, per esempio, emergenze di sversamenti in mare di oggetti. In particolare l'inquinamento da idrocarburi desta grande preoccupazione per la salute dell'ecosistema marino e oltre agli sversamenti bisogna tenere in considerazione i principali flussi antropici di inquinamento provenienti da fonti terrestri, quali raffinerie, rifiuti, run-off di fiumi. Per gestire al meglio le situazioni di emergenza è pertanto necessario un sistema di previsione dello stato del mare.

Un efficiente sistema di previsione risulta pertanto imprescindibile sia da un'analisi chimico-fisica sia da uno studio approfondito dell'idrodinamica.

Durante questo stage ci si è occupati dello sviluppo di un sistema di validazione del modello TSCRM, svolgendo attività di campo nell'acquisizione di osservazioni di temperatura e salinità in diverse stazioni del Mar Mediterraneo e implementando codici per la validazione del modello in modalità operativa.

I dati CTD sono stati raccolti durante la campagna oceanografica *Ichnussa 2013*, organizzata da ISMAR-CNR di La Spezia e da IAMC-CNR di Oristano. Le misure dirette di alcune variabili oceanografiche non sono omogenee nello spazio e nel tempo a causa delle poche osservazioni in *near real time* disponibili. Solitamente le misure in situ non garantiscono quindi una ricostruzione dello stato idrodinamico complessivo di un'area. Da qui nasce la necessità di utilizzare modelli numerici di circolazione come "interpolatori dinamici" in

grado di replicare lo stato passato (analisi), presente (nowcast) e futuro (forecast) del mare.

Il modello idrodinamico utilizzato è il TSCRM (Tyrrhenian-SiCily strait Sub-regional Model), che verrà validato con i dati di temperatura e salinità acquisiti tra il 15 e il 29 ottobre 2013.

Lo Stretto di Sicilia è caratterizzato da una topografia del fondale molto articolata e costituisce un'area di grande importanza per gli scambi d'acqua tra i bacini orientale e occidentale attraverso due stretti passaggi di profondità massima di 430 metri [1]. Studi e osservazioni sperimentali effettuati mediante boe lagrangiane hanno messo in luce una complessa circolazione oceanografica in quest'area [2]. Le misure sono state effettuate lungo delle sezioni note, cruciali per lo studio della circolazione del Mediterraneo centrale. Un'altra area di fondamentale importanza, investigata durante questa campagna, è il Canale di Sardegna, dove la profondità massima raggiunge circa 1900 m e dove avviene lo scambio di acque profonde WMDW (*Western Mediterranean Deep Water*) e TDW (*Tyrrhenian Dense Water*).

Per studiare l'alta variabilità delle proprietà chimico-fisiche delle masse d'acqua sono stati utilizzati diversi modelli numerici [3] che hanno inoltre permesso di chiarire il rapporto tra le dinamiche di mesoscala con le forze fisiche in gioco, mediante l'analisi della variabilità spaziale e temporale delle componenti dell'energia cinetica [4].

Ciò che rende di difficile comprensione l'idrodinamica dello Stretto di Sicilia sono principalmente le masse d'acqua con così diverse proprietà chimico-fisiche, le numerose dinamiche a differenti scale spaziali e temporali e la batimetria molto irregolare.

I. STRUMENTI E METODI

Il modello che è stato utilizzato è il TSCRM, implementato all'interno del progetto TESSA [5]. Esso rappresenta una versione estesa del modello SCRM [6].

A. Il modello subregionale TSCRM

Il modello di simulazione numerica TSCRM (Tyrrhenian-SiCily strait sub-Regional Model) si basa su una versione tridimensionale del POM (*Princeton Ocean Model*) idrostatico, a superficie libera con coordinate verticali σ , in approssimazione di Boussinesq. Esso copre tutte le zone tirreniche, compreso l'arcipelago toscano, fino al sud Italia,

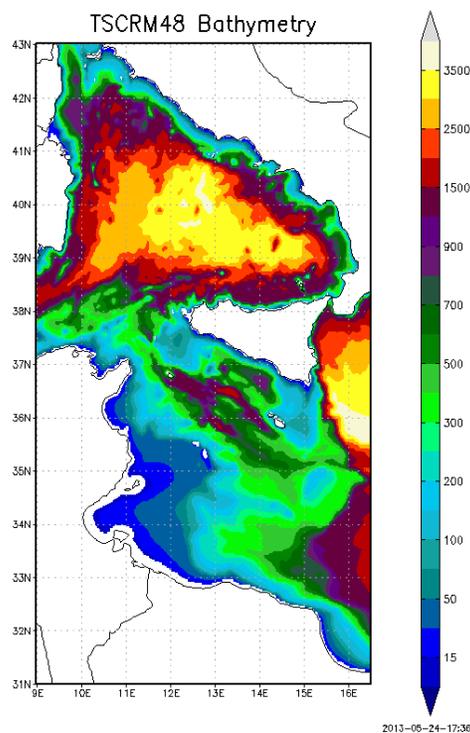


Figura 1. Batimetria dell'area relativa al modello numerico TSCRM. I dati sono stati ottenuti attraverso interpolazione bilineare del data set U.S. DBDB1

e i mari antistanti le coste della Sicilia. Più precisamente il dominio è compreso tra 9° e 16.5° E in longitudine e tra 31° e 43° N in latitudine ed è discretizzato attraverso una griglia ortogonale con passo costante pari a $\frac{1}{48}^\circ$ (circa 2 Km) per un totale di 362×578 punti griglia. La colonna d'acqua è risolta attraverso l'uso di 30 livelli verticali sigma, numero fisso indipendentemente dalla profondità, la cui distribuzione logaritmica risulta più fitta in prossimità della superficie.

Le condizioni ai boundary laterali aperti sono ottenute usando un *one-way asynchronous nesting* [3] dei campi di previsione di temperatura, salinità e velocità totale del modello NEMO, fornito dall'INGV di Bologna, con risoluzione spaziale di $\frac{1}{16}^\circ$ in latitudine e longitudine [7].

La batimetria (Fig.1) è ottenuta per interpolazione bilineare di dati U.S. DBDB1 a $\frac{1}{60}^\circ$ (Navy Digital Bathymetric Data Base), mentre l'innesto all'interfaccia aria-mare avviene attraverso i flussi di momento, di calore e d'acqua ottenuti mediante l'applicazione delle *Bulk Formulae* [8] ai parametri atmosferici prodotti giornalmente dal sistema di previsione atmosferica European Centre for Medium Weather Forecast - ECMWF. Tali parametri hanno una risoluzione temporale di 6 ore e una risoluzione spaziale di $\frac{1}{4}^\circ$ e sono forniti dall'Aeronautica Militare (in accordo con INGV).

La condizione iniziale è ottenuta a freddo mediante il downscaling dal modello del Mediterraneo NEMO ed è ottimizzata mediante l'utilizzo del VIFOP (Variational Initialization and FORcing Platform), strumento numerico in grado di ridurre le oscillazioni spurie ad alta frequenza tipiche della fase

iniziale di integrazione numerica dovute proprio al processo di downscaling [9].

Il modello TSCRM può essere utilizzato in modalità *freerun*, per fornire una stima dello stato passato del mare, in modalità *analisi*, che attraverso l'utilizzo di un modulo di *data assimilation* (es. 3Dvar) fornisce la miglior stima dello stato del mare, ed infine in modalità *forecast*, per la previsione dello stato futuro del mare fino a +5 giorni.

Output: L'uscita del modello è in formato binario libero e ciascuna variabile, calcolata dal modello, viene salvata in un suo specifico file che ha come estensione il nome stesso della variabile (esempio TSCRMfsS20140101.TEM per la temperatura). Tali file binari di TSCRM sono successivamente convertiti in formato NetCDF (*Network Common Data Form*) mediante un codice sviluppato in ambiente C++. Questo passaggio è necessario non solo per rendere i dati del modello utilizzabili da software di elaborazione e visualizzazione grafica (esempio GrADS, MATLAB), ma anche per avere accesso diretto alle informazioni attraverso il metadato. Vengono inoltre utilizzati operatori per la manipolazione e il calcolo (NCOs, CDO) in grado di modificare la struttura del dato, effettuare calcoli (esempio medie, minimi, massimi, *missing-value* etc) ed eliminare, aggiungere e modificare gli attributi globali o delle variabili nel metadato. I dati sono infine trasformati in NetCDF CF, archiviati in appositi *storage* (dischi RAID) ed utilizzati dai partner di vari progetti (TESSA [5], MedESS4MS [10] per i diversi obiettivi previsti (esempio pubblicazione sul portale www.sea-condition.com)).

Tra i prodotti delle catene operative di TSCRM più utilizzati vi sono i file creati per il progetto PRIMI (PRogetto pilota per l'Inquinamento Marino da Idrocarburi [11]), in questo contesto i dati vengono utilizzati in modelli per la simulazione della dispersione di inquinanti (MEDSLIK [12]). Tali file sono forniti, dopo una procedura di interpolazione dai livelli *sigma*, originari del modello, a 10 predefiniti livelli *z* (da 0.1 a 40 metri di profondità). La nomenclatura di tali file è stata proposta durante il progetto e mantenuta fino ad oggi in modo che tutti gli *output* dei modelli operativi del Gruppo Nazionale di Oceanografia Operativa (GNOO) potessero essere utilizzati come *input* per il modello di dispersione .

B. Campagna oceanografica Ichnussa 2013

Le osservazioni utilizzate per la validazione del modello numerico TSCRM sono stati acquisiti durante la campagna oceanografica Ichnussa 2013, eseguita nel bacino Algero-Provenzale (Canale e Mare di Sardegna, Mare Balearico, Tirreno sud-occidentale) e Canale di Sicilia a bordo della N/O Urania dal 15 al 29 ottobre 2013. Tali aree rappresentano una regione cruciale per comprendere gli scambi di calore, sale e massa tra i vari sotto-bacini del Mediterraneo.

In (Fig. 2) e (Fig. 3) sono riportate la mappa e l'elenco delle stazioni in cui sono state effettuate le misure durante la campagna, con le rispettive informazioni di posizione, profondità e data di campionamento, che rientrano nelle aree interessate dal modello TSCRM.

Gli obiettivi della campagna sono stati:

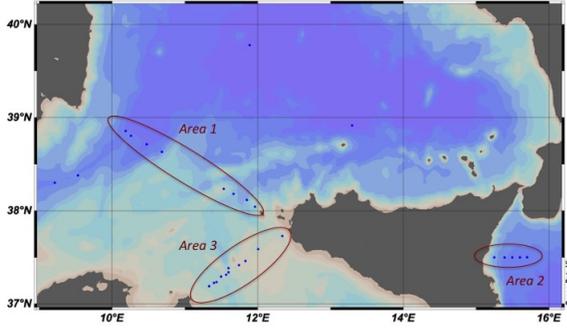


Figura 2. Distribuzione spaziale delle stazioni in cui sono state effettuate le misure CTD dal 15 al 19 ottobre 2013. Area 1: transetto Sicilia-Sardegna, Area 2: transetto Mar Ionio, Area 3: transetto Sicilia-Tunisia

| Data | Stazione | Latitudine | Longitudine | Profondità |
|------------|----------|------------|-------------|------------|
| 15 10 2013 | sn2 | 37.501167 | 15.7 | 2272 |
| 16 10 2013 | sn1 | 37.498333 | 15.496667 | 2007 |
| | sn3 | 37.5 | 15.60033 | 2068 |
| | sn4 | 37.49917 | 15.38933 | 2076 |
| | sn5 | 37.5 | 15.248 | 1115 |
| | geostar | 38.916167 | 13.296833 | 3511 |
| 18 10 2013 | 410 | 37.19 | 11.330167 | 269 |
| | 434 | 37.4155 | 11.741667 | 80 |
| | 436 | 37.226667 | 11.396333 | 408 |
| | 437 | 37.234 | 11.433167 | 436 |
| | 451 | 37.34 | 11.598333 | 541 |
| | 462 | 37.314 | 11.563 | 85 |
| | c01 | 37.384667 | 11.597333 | 377 |
| | c02 | 37.292667 | 11.495167 | 520 |
| 19 10 2013 | 213 | 38.042667 | 11.962167 | 465 |
| | 214 | 38.117167 | 11.851 | 1079 |
| | 217 | 38.181167 | 11.665833 | 761 |
| | 406 | 37.587333 | 12.0005833 | 156 |
| | 432 | 37.729167 | 12.335667 | 161 |
| | 438 | 37.458833 | 11.829333 | 64 |
| 20 10 2013 | 51 | 39.778333 | 11.889 | 3540 |
| | 218 | 38.234667 | 11.531 | 222 |
| 25 10 2013 | 227 | 38.632833 | 10.684167 | 1563 |
| | acq3 | 38.2995 | 9.211167 | 2055 |
| | acq5 | 38.379667 | 9.527833 | 2028 |
| 26 10 2013 | 231 | 38.804833 | 10.684167 | 2350 |
| | 241 | 38.856 | 10.18417 | 2541 |
| | 296 | 38.7135 | 10.472167 | 2493 |

Figura 3. Elenco stazioni con rispettive coordinate, profondità e data misurazione

- caratterizzare le masse d'acqua e le strutture biologiche del Canale di Sicilia, del mare Tirreno e del Canale di Sardegna mediante l'acquisizione di profili CTD integrati con dati di ossigeno disciolto, nutrienti, clorofilla;
- acquisire dati per la calibrazione e la validazione on-line del modello di *analisi e previsione TSCRM*.

I dati di pressione (P), salinità (S), temperatura potenziale (θ), concentrazione di ossigeno disciolto (DO) e fluorescenza sono stati raccolti con un sistema *CTD-rosette* consistente in un CTD SBE 911plus e una rosetta con 24 12-l bottiglie Niskin. In particolare le misure di temperatura sono state acquisite con un termometro SBE-3/F, con risoluzione di $0.00015^\circ C/bit$ at $-1^\circ C$ e le misure di conducibilità con un sensore SBE-4C, con risoluzione di 3×10^{-4} S/m. I profili verticali di tutti i parametri sono stati ottenuti campionando con frequenza di 24 Hz, con la CTD-rosette che viene calata ad una velocità pari a circa $1 \frac{m}{s}$.

I dati grezzi raccolti vengono poi trattati con un software apposito (SBE data processing). Le procedure di *processing* consistono in:

- *Data conversion*: applicazione di polinomi per convertire i *raw data* in dati fisici;
- *Align CTD*: allineamento dati. Poiché gli strumenti hanno tempi di risposta diversi è necessario allineare i dati in modo che a ciascuna profondità corrisponda il corretto dato di tutte le grandezze misurate;
- *Cellthermalmass*: correzione della sezione del sensore di conducibilità che si deforma per la pressione;
- *Filter*: filtrazione dati in modo da eliminare quelli che sono fuori dal range massimo di errore;
- *Derive*: estrazione dei dati derivati;
- *Binaverage*: media dei dati. Devono essere 24dati/m (la velocità media a cui scende la sonda è $1 \frac{m}{s}$, e la frequenza di acquisizione è di $24 \frac{dati}{s}$);
- *splitting*: separazione dei dati di discesa e risalita.

C. Sistema di validazione

La validazione si basa sul confronto tra i dati acquisiti in situ e i risultati del modello numerico TSCRM. Per ciascuna stazione sono stati calcolati i valori di *bias*, cioè la differenza, su tutta la colonna d'acqua, tra il valore misurato e la media dei risultati del modello nei punti di griglia distribuiti nell'intorno del punto di misura e il valore di *Root Mean Square Error* (*rmse*).

Il *Root Mean Square Error* è definito come:

$$rmse = \sqrt{\frac{\sum_{obs=1}^N (X_{obs} - \bar{X}_{TSCRM})^2}{N}} \quad (1)$$

dove X_{obs} è il valore misurato dalla sonda CTD a varie profondità, \bar{X}_{TSCRM} è la media pesata, ad ogni profondità del CTD, dei risultati del modello TSCRM nei punti di griglia primi vicini alla stazione in cui stiamo raccogliendo i dati, N è

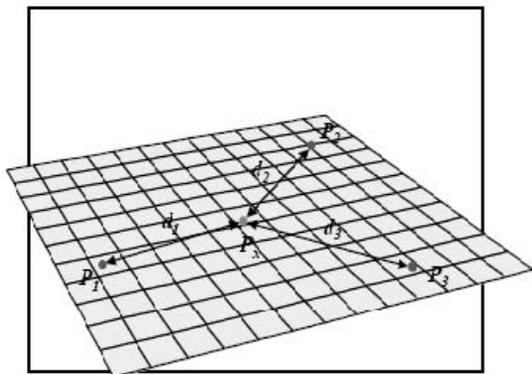


Figura 4. Esempio di una tecnica di interpolazione basata sul metodo di interpolazione (IDW)

il numero delle osservazioni considerate sulla colonna d'acqua e

$$X_{obs} - \bar{X}_{TSCRM} = bias \quad (2)$$

è lo scarto tra l'osservazione e il modello.

Le stazioni hanno coordinate che non necessariamente coincidono esattamente con un punto della griglia del modello. Risulta pertanto necessario effettuare un'interpolazione (metodo IDW) dei risultati del modello sui punti di griglia più vicini a quello della stazione in esame. Inoltre poiché il modello lavora sui livelli σ di profondità è stato necessario eseguire anche un'interpolazione verticale dalle coordinate σ del modello a quelle z del CTD.

1) *Metodo di interpolazione IDW*: Il metodo di interpolazione orizzontale utilizzato è l'*Inverse Distance Weighting*, il cui acronimo è IDW. Questo è un metodo di interpolazione a media mobile che rientra tra i metodi generici di *Tecniche pesate di interpolazione* [13].

Il metodo IDW si basa sull'assunzione che i valori dei punti di griglia più vicini al punto da interpolare contribuiscono maggiormente di quelli ad una maggiore distanza. In altre parole, per questo metodo di interpolazione, l'influenza che ha un dato in un punto noto è inversamente proporzionale alla distanza tra esso e il punto da interpolare. Il vantaggio di questa tecnica consiste nell'essere intuitiva ed efficiente.

Facendo riferimento alla Fig. 4, il valore attribuito al punto P_x dipenderà dalle distanze d_1 , d_2 e d_3 .

La forma più semplice di interpolazione IDW è chiamata *Metodo di Shepard* [14] e utilizza come *peso* la funzione seguente:

$$w_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=0}^n h_j^{-p}} \quad (3)$$

dove, n è il numero di punti noti, p è un numero reale positivo arbitrario, chiamato *power parameter*, tipicamente posto $p = 2$

e h_j sono le j distanze tra il punto da interpolare e i punti noti. In particolare gli h_j sono dati dalla formula seguente:

$$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (4)$$

dove (x, y) sono le coordinate del punto da interpolare e (x_i, y_i) sono le coordinate di ciascun punto noto della griglia. La funzione peso (3) varia da 1 quando il punto da interpolare è molto vicino ai punti noti, al valore 0 quando la distanza aumenta. Le funzioni peso sono normalizzate sulla somma dei pesi.

Quindi il valore di una variabile $u(x, y)$ nel punto di interpolazione assume il valore dato dalla seguente formula:

$$u(x, y) = \sum_{j=0}^n w_j u(x_j, y_j) \quad (5)$$

dove $u(x_j, y_j)$ è il valore assunto dalla variabile nei punti noti. Utilizzando questa tecnica di interpolazione, i punti di griglia noti possono anche essere in numero minore di 4, mentre nel caso dell'interpolazione bilineare, altra tecnica spesso utilizzata [15], non potevano essere in numero inferiore a 4. Questo offre diversi vantaggi poiché risultano interpolabili anche i valori molto vicini alla costa in cui sono disponibili i valori di soli due punti di griglia. I punti di griglia noti devono essere almeno 2.

Dopo l'interpolazione il codice di validazione esegue il calcolo del *bias* e del *rmse*, in modo da valutare la discrepanza tra valore osservato e previsto.

2) *Procedure e codici di validazione*: I codici di validazione sono stati sviluppati dal Gruppo di Oceanografia Operativa dello IAMC-CNR di Oristano. Essi consistono in una serie di script (*shell scripting*) che lanciano routine in linguaggio Fortran.

Ogni giorno alle ore 4 *am* il calcolatore per la validazione riceve operativamente i risultati del modello di previsione, sui 30 livelli *sigma*, validi fino a +5 giorni, dal server Neapolis, in formato NetCDF standard.

Durante la campagna oceanografica sono state effettuate numerose calate CTD (Fig. 3). I dati grezzi in formato binario sono stati immediatamente processati (vedi procedura I-B) e, mediante un codice Fortran, trasformati nel formato adatto ad essere letto dai codici di validazione.

A questo punto i dati sono operativamente spediti tramite FTP dal terminale della nave oceanografica al calcolatore di validazione. Esso riceve quindi operativamente i risultati del modello da Neapolis e in modalità semi-operativa i dati CTD dalla nave (Fig. 5).

Una volta raccolti i dati sperimentali e scaricati i risultati del modello si può effettuare il confronto.

Il codice principale di validazione (*run_validation.sh*) necessita, per il suo funzionamento, di 2 argomenti: la data (nel formato yyyy mm dd) e il nome della stazione (stz), espresso in 3 caratteri. Ad esempio, viene lanciato lo script in questo modo: *run_validation.sh 2013 10 16 sn4*, quando si vuole validare il modello di *forecast* del giorno 16 ottobre 2016,

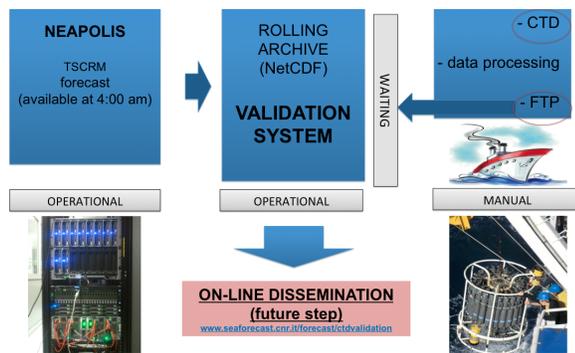


Figura 5. Schematizzazione del sistema di validazione: giornalmente, dal server Neapolis, il computer per la validazione riceve i risultati del modello numerico di previsione. Da nave, dopo essere stati processati, i dati sperimentali vengono spediti al sistema di validazione che ne effettua il confronto col modello. I codici di validazione rendono infine disponibili online i risultati ottenuti

per la stazione sn4, con i dati raccolti quel giorno in quella stazione. Esso è costituito da codici in *shell scripting* che lanciano rispettivamente alcuni codici Fortran. I codici in *shell scripting* sono tre e sono i seguenti:

- *read_mod.sh*;
- *do_average_TSCRM.sh*;
- *read_CTD_vs_TSCRM.sh*.

Il primo di questi script lancia una routine che scarica i dati del modello in formato NetCDF, relativi ai 5 giorni di *forecast* a partire dal giorno indicato dall'argomento dello script *run_validation.sh*. Ciò significa che ogni giorno il modello produce le previsioni dello stato del mare per l'intero dominio per il giorno stesso e per i 4 giorni successivi.

Il secondo script lanciato da *run_validation.sh*, cioè *do_average_TSCRM.sh*, si occupa invece di estrarre dal modello le medie giornaliere dei dati relativi alle variabili di interesse, quali la temperatura e la salinità. Il modello fornisce anche una serie di altre variabili relative allo stato idrodinamico del mare, come le velocità zonale e meridionale delle masse d'acqua, che non verranno però prese in considerazione in questo lavoro.

Read_CTD_vs_TSCRM.sh infine legge i dati del modello e li interpola linearmente sulle profondità dei dati CTD. A questo punto il codice calcola il *rmse* e il *bias* come descritto da Eq. (1) e Eq. (2) rispettivamente.

Al fine di analizzare i risultati della validazione nelle differenti profondità della colonna d'acqua, questa viene inizialmente suddivisa in strati, fino ad un massimo di 11 dove il fondo supera i 1500 m (Tabella I)

3) *Validazione a cicli*: La validazione dei risultati del modello è stata fatta a cicli. Ciò significa che i dati raccolti con la calata CTD di un certo giorno *D* vengono confrontati con i giorni di *forecast* relativi al giorno di misurazione e prodotti a partire dal giorno *D - N* (*N*-esimo ciclo), come indicato dallo schema in Fig. 6.

Tabella I
LIVELLI

| Livelli | Strati (m) |
|---------|------------|
| 1 | 0-bottom |
| 2 | 0-10 |
| 3 | 10-20 |
| 4 | 20-50 |
| 5 | 50-100 |
| 6 | 100-200 |
| 7 | 200-400 |
| 8 | 400-600 |
| 9 | 600-1000 |
| 10 | 1000-1500 |
| 11 | oltre 1500 |

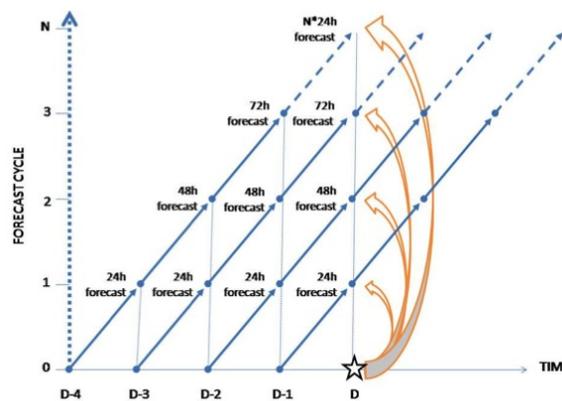


Figura 6. Schema di validazione a cicli. Posto *D* il giorno in cui viene fatta la misurazione, l'*N*-esimo ciclo è relativo al forecast inizializzato nel giorno *D - N*. Il ciclo 0 è relativo alla previsione per il giorno *D* prodotta inizializzando il modello il giorno stesso

II. RISULTATI

Il calcolo del *bias* e del *rmse* (Eq. (1)) è stato effettuato su tutta la colonna d'acqua e sugli *strati* riportati in Tabella I. Sono stati mostrati solo i risultati delle stazioni in grassetto nella Fig. 3, le quali sono state scelte poiché rappresentative della dinamica dell'area in esame.

Sono stati poi riportati i risultati medi della validazione a cicli per lo *strato 1* (intera colonna) e lo *strato 2* (0-10 m). Se da un lato lo *strato 1* fornisce una visione d'insieme dell'accuratezza del modello lungo tutta la colonna d'acqua, gli *strati* fino a 50 m possono dare, nel mese di ottobre, maggiori informazioni sulla capacità del modello di riprodurre lo strato mescolato fino alla profondità corrispondente al massimo gradiente di temperatura (termoclino stagionale).

Lo strato superficiale (primi 10 m dalla superficie) è inoltre quello di maggiore interesse anche perché influenzato da diverse componenti quali i flussi di calore, massa e sale all'interfaccia aria-mare.

Sono stati poi riportati i grafici dei profili verticali di temperatura e salinità contro i corrispondenti dati simulati per il primo ciclo di *forecast* per ciascuna delle stazioni scelte.

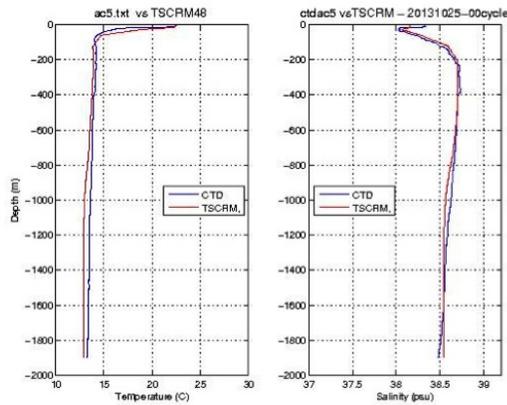


Figura 7. Profili di temperatura (sinistra) e salinità (destra) sia misurati (blu) che da modello (rosso) per il primo ciclo nella stazione *acq5*

Area 1: transetto Sicilia-Sardegna

Nell'Area 1 (transetto Sicilia-Sardegna Fig. 2) la stazione analizzata è la *acq5* (vedi Fig. 3 per coordinate geografiche e profondità). La calata CTD è stata effettuata il giorno 25 ottobre 2013.

In Fig. 7 sono riportati i profili di temperatura e di salinità misurati (CTD) sovrapposti a quelli del modello per il primo ciclo di *forecast*, cioè per l'output del modello numerico inizializzato il giorno precedente alla validazione. Nei primi 700 metri l'errore sulla temperatura rientra nei 0.4°C e quella sulla salinità 0.04 psu.

La forte dipendenza dalle condizioni iniziali rende difficile la previsione dello stato del mare man mano che ci si allontana dal giorno di inizzializzazione. Tale andamento non si riscontra nei valori del *rmse* calcolati su tutta la colonna d'acqua (Fig. 8), dove l'affidabilità del modello sembra restare pressoché invariata nel giorno di *forecast* inizializzato nei giorni precedenti. Tale andamento per la temperatura si aggira intorno ai 0.6°C di *rmse*, mentre per la salinità il valore di errore è inferiore a 0.05 psu.

Area 2: transetto Mar Ionio

Nell'Area 2 (transetto Mar Ionio, Fig. 2) le stazioni analizzate sono due: *sn4* e *sn5* (vedi Fig. 3). Le calate sono state entrambe effettuate il 16 ottobre 2013.

In Fig. 9 sono mostrati i profili di temperatura e di salinità misurati e simulati per il primo ciclo di *forecast*. Se i valori di temperatura forniti dal modello per l'intera colonna d'acqua si avvicinano molto a quelli osservati, con un *rmse* che tende allo zero nei primi 10 metri dalla superficie, non si può dire altrettanto di quelli relativi alla salinità (Fig. 10). Infatti quest'ultima, in superficie, è più alta di circa 0.3 psu rispetto a quella misurata. Questa discrepanza si osserva fino ad una profondità di circa 200 m (non mostrata).

Tuttavia, nonostante nei primi metri dalla superficie la salinità simulata non sia in accordo con quella misurata, il calcolo del suo errore lungo l'intera colonna d'acqua è relativamente piccolo, con valori attorno a 0.06 psu, che progressivamente

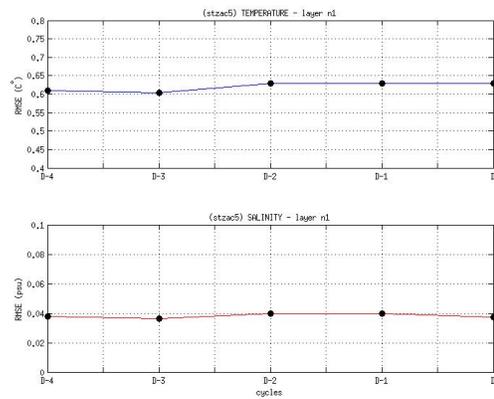


Figura 8. Andamento del valore *rmse* per la temperatura (in alto) e per la salinità (in basso) nei 5 cicli di *forecast* su tutta la colonna d'acqua per la stazione *acq5*.

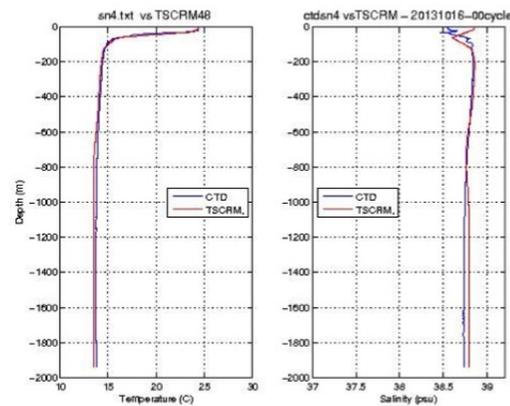


Figura 9. Profili di temperatura (sinistra) e salinità (destra) sia misurati (blu) che da modello (rosso) per il primo ciclo nella stazione *sn4*

aumentano negli ultimi cicli di *forecast*.

Gli errori sulla temperatura invece sono molto piccoli, attorno ai 0.3°C e sono tra i minori osservati nelle le stazioni analizzate (non mostrate).

Nella stessa area è stata analizzata anche la stazione *sn5*, più vicino alla costa rispetto a quella precedente (Fig. 2).

In Fig. 11 sono riportati i profili di temperatura e di salinità misurati e simulati per il primo ciclo di *forecast*. Come per la stazione *sn4*, i valori di temperatura forniti dal modello ricalcano abbastanza bene quelli osservati, presentando un errore di circa 0.4°C per il primo ciclo di *forecast*, che si stabilizza attorno al valore 0.48°C dal secondo ciclo in poi (Fig. 12). Anche per questa stazione i valori simulati di salinità sono molto distanti da quelli osservati nei primi 100 m dalla superficie; il *rmse* va da circa 0.058 psu per il primo ciclo fino a circa 0.068 psu negli ultimi cicli (Fig. 12). Tuttavia il modello è in grado di individuare la profondità relativa ad un minimo di salinità osservato (circa $40 - 50$ m) ed inoltre entrambi gli andamenti del *rmse* presentano il minimo in corrispondenza del primo ciclo.

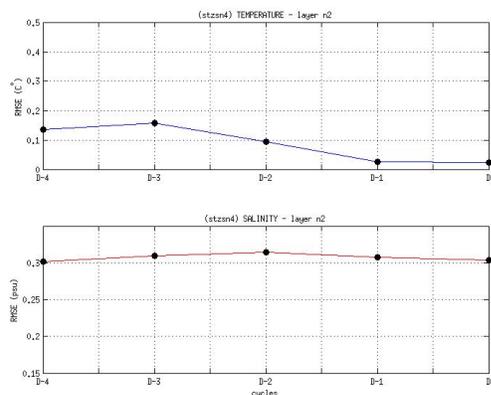


Figura 10. Andamento del valore di *rmse* per la temperatura (in alto) e per la salinità (in basso) nei 5 cicli di *forecast* sui primi dieci metri dalla superficie per la stazione *sn4*.

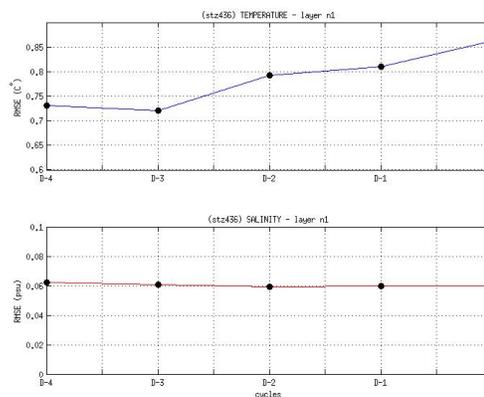


Figura 13. Andamento del valore di *rmse* per la temperatura (in alto) e per la salinità (in basso) nei 5 cicli di *forecast* su tutta la colonna d'acqua per la stazione 436.

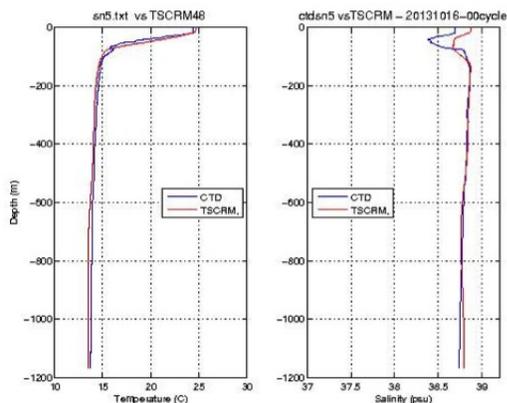


Figura 11. Profili di temperatura (sinistra) e salinità (destra) sia misurati (blu) che da modello (rosso) per il primo ciclo nella stazione *sn5*

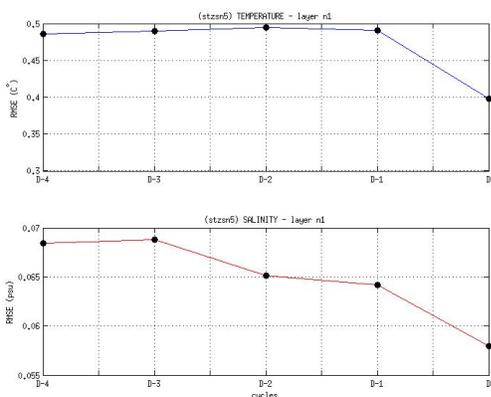


Figura 12. Andamento del valore di *rmse* per la temperatura (in alto) e per la salinità (in basso) nei 5 cicli di *forecast* sui primi dieci metri dalla superficie per la stazione *sn5*.

Area 3: transetto Sicilia-Tunisia

Nell'Area 3 (transetto Sicilia-Tunisia, Fig. 2) la validazione effettuata ha prodotto risultati abbastanza diversi di *rmse* per le varie stazioni. Questo è dovuto all'alta variabilità dell'idrodinamica che, insieme alla batimetria e al forzante atmosferico, influenza sensibilmente la circolazione, in particolare alla superficie.

In quest'area è stata presa in esame la stazione 436 (Fig. 3) che ha mostrato un andamento dell'errore inverso rispetto alle altre stazioni nei 5 cicli di *forecast*.

Su tutta la colonna d'acqua l'errore sulla temperatura rimane elevato per tutti i cicli di *forecast* (compreso tra 0.7°C e 0.9°C) e tende a diminuire man mano che si procede verso l'ultimo ciclo. Il valore di *rmse* per la salinità invece ha un andamento costante attorno ai 0.06 psu per tutti i cicli (Fig. 13).

In particolare, nei primi 10 metri dalla superficie il *rmse* di temperatura passa progressivamente da 0.6°C nel ciclo 0, a 0.1°C nell'ultimo ciclo (Fig. 14).

Gli andamenti peggiori di *rmse* di temperatura sono osservati tra i 20 e 50 m con valori intorno ai 1.5°C , e tra i 50 e 100 m, con valori tra 1.7°C e 1.3°C (non mostrati).

In Fig. 15 sono illustrati i profili di temperatura e di salinità misurati e simulati per il primo ciclo di *forecast*.

I dati di salinità del modello presentano un errore di circa 0.05 psu se confrontati con le osservazioni solo nella parte più profonda della colonna d'acqua (200 – 400 m). Tra i 130 e i 200 metri circa il modello presenta valori di salinità inferiori a quelli misurati, mentre avviene il contrario tra i 30 e i 100 metri, dove vi è il massimo di discrepanza (40 m, 0.3 psu). Per quanto riguarda invece la temperatura, fino ai 150 m dalla superficie, vi è una differenza tra modello e osservazioni che va da poco meno di 1°C a circa 2°C .

Il comportamento inverso che il modello può avere in alcune stazioni può essere legato alla modalità di inizializzazione (*slave*) che lo rende molto dipendente dal modello padre meno abile, per risoluzione spaziale, a simulare le zone di acqua

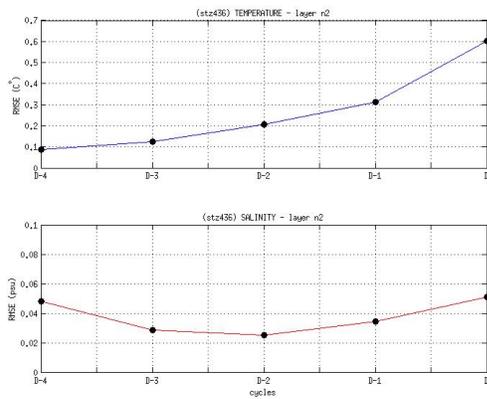


Figura 14. Andamento del valore di $rmse$ per la temperatura (in alto) e per la salinità (in basso) nei 5 cicli di *forecast* sui primi dieci metri dalla superficie per la stazione 436.

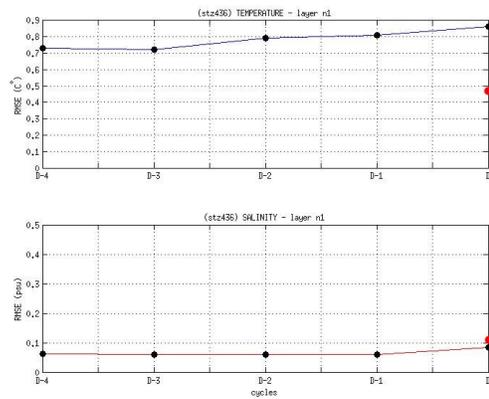


Figura 16. Andamento del valore di $rmse$ nei 5 cicli di *forecast* su tutta la colonna d'acqua per la stazione 436. Il pallino rosso rappresenta il valore di $rmse$ ottenuto con il modello TSCRM in *partially active mode* sul primo ciclo di *forecast*

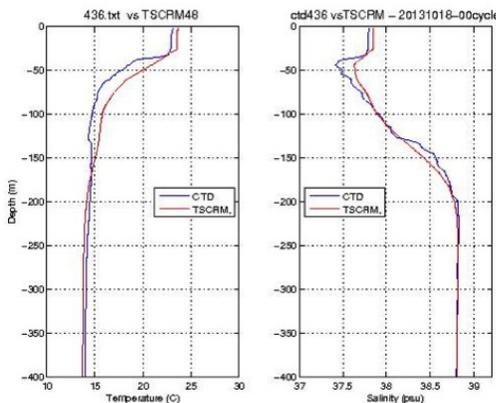


Figura 15. Profili di temperatura (sinistra) e salinità (destra) sia misurati (blu) che da modello (rosso) per il primo ciclo (D) nella stazione 436

bassa vicine alla costa. Per cui il Gruppo di Oceanografia di Oristano ha eseguito un unico esperimento di *forecast* (ciclo D) sulla stessa stazione considerata modificando il metodo di inizializzazione *slave* con un *partially active* in cui il modello TSCRM ottiene la condizione iniziale non più direttamente con *downscaling* dal modello padre (*cold start*) ma attraverso una simulazione dei 7 giorni precedenti (*warm start*). Come atteso, il modello è riuscito a meglio riprodurre l'idrodinamica marina costiera diminuendo al primo ciclo più del 40% il valore di $rmse$ di temperatura ($0.52^{\circ}C$) per tutta la colonna d'acqua (Fig. 16). È quindi auspicabile, per il futuro, indagare sui risultati ottenibili utilizzando quest'ultimo metodo di inizializzazione ed effettuando la stessa validazione su tutti i cicli di *forecast* e per l'intera campagna oceanografica utilizzata in questo lavoro.

III. CONCLUSIONI

Durante lo stage ci si è occupati dell'implementazione di un sistema di validazione on-line del modello di previsione sub-regionale TSCRM. A tale scopo sono state svolte attività per

ciascuna delle parti del sistema, dalla raccolta dei dati durante la Campagna Oceanografica Ichnussa 2013 (15-29 Ottobre 2013), al loro processamento a bordo ed invio alla macchina di calcolo, allo studio delle catene operative dei modelli di previsione e dei loro formati di output. Inoltre è stato affrontato lo studio dei codici di validazione implementati dal G3O al fine di contribuire allo sviluppo di un sistema automatizzato in grado di fornire le performance del modello in tempo quasi reale. I dati del modello ed i dati osservati, una volta spediti al server del sistema di validazione, in modo operativo per i dati modellistici e semi-operativo per quelli osservati, vengono elaborati dai codici di validazione restituendo i valori di metriche statistiche che definiscono il grado di accuratezza della previsione lungo tutta la colonna d'acqua e per *strati* verticali predefiniti e prefissati in modo da eventualmente identificare gli *strati* meglio o peggio riprodotti dal modello. Oltre al confronto tra dati misurati e dati modellistici sulla verticale è stato utilizzato uno schema di validazione a cicli di *forecast* per ottenere il grado di accuratezza della soluzione del modello allontanando la condizione iniziale dal giorno D validato. Il dominio di studio è stato suddiviso in tre sotto-aree specifiche in modo da raggruppare i risultati in zone a differenti caratteristiche idrologiche.

Dalla validazione sono stati ottenuti risultati in termini di *bias* e $rmse$ di temperatura e salinità e sono stati mostrati i profili delle stesse variabili contro quelli del dato osservato. Dal lavoro è emerso che i valori di $rmse$ di temperatura variano da un minimo di $0.3^{\circ}C$ al ciclo zero con aumento progressivo verso l'ultimo ciclo fino a $0.35^{\circ}C$, con valori prossimi allo zero nei primi 10m, nel transetto del Mar Ionio. Sempre in tale zona tuttavia si osservano i valori di $rmse$ di salinità dell'intera colonna d'acqua più alti, tra 0.06 e 0.07 psu, sia per la stazione sn4 che sn5, probabilmente a causa della difficoltà che il modello può incontrare nel replicare l'idrodinamica del tratto di mare antistante le coste orientali della Sicilia per il suo forte gradiente batimetrico e per la sua vicinanza

allo Stretto di Messina. Nei pressi del Canale di Sardegna si osservano andamenti costanti di *rmse* sulla temperatura nei 5 cicli pari all'incirca a $0.6^{\circ}C$ ed anche per la salinità con valori intorno 0.05 psu. Pur non essendo i valori più bassi di errore per entrambe le variabili, la soluzione del modello pare affidabile su tutti i cicli di *forecast*. Per entrambi i transetti, dalla validazione si sono ottenuti *rmse* di temperatura molto bassi sulle prime decine di metri della colonna d'acqua, in alcuni casi prossimi allo zero. Il contrario è avvenuto per la salinità nei primi 10m che in queste aree ha mostrato un massimo di errore attorno a 0.3 psu. Tutti gli andamenti dei grafici a cicli nel transetto del Mar Ionio e Sicilia-Tunisia, hanno presentato un andamento del *rmse* totale di temperatura e salinità progressivamente crescente dal ciclo 0 al ciclo 4, mostrando come il modello si comporti meglio nei primi cicli dove la condizione iniziale è più vicina al dato osservato. Nella stazione 436, rappresentativa del transetto Sicilia-Tunisia, si ottengono i valori di *rmse* sulla temperatura più alti in assoluto per l'intera colonna d'acqua. Inoltre tale massimo ricade sul primo ciclo di *forecast* (circa $0.9^{\circ}C$), dove ci si aspetta invece il minimo di errore vista la vicinanza della condizione iniziale al dato osservato. Per cui è stato utile, per tale stazione, indagare in diversi strati sotto la superficie dove si è infatti osservato lo stesso andamento descritto per l'intera colonna e si sono registrati valori molto alti nella fattispecie tra i 50 – 100m dove l'errore di temperatura al primo ciclo raggiunge $1.7^{\circ}C$. Non sono stati osservati andamenti anomali di *rmse* sulla salinità che rimane pressoché costante su tutti i cicli di *forecast*. Il comportamento anomalo del modello in quest'ultima area è stato approfondito modificando il metodo di inizializzazione del modello stesso, passando dalla modalità *slave* a quella *partially active*. In questo modo sono stati ottenuti valori di *rmse* notevolmente inferiori.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] A. Vetrano M. Astraldi F. Conversano G. Civitarese G.P. Gasparini M. Ribera d'Alcalà. Water mass properties and chemical signatures in the central mediterranean region. *Journal of Marine Systems*, (33-34):155–177, 2002.
- [2] P.M. Poulain E. Zambianchi. Surface circulation in the central mediterranean sea as deduced from lagrangian drifters in the 1990s. *Continental Shelf Research*, (27):981–1001, April 2007.
- [3] R. Sorgente A. F. Drago A. Ribotti. Seasonal variability in the central mediterranean sea circulation. *Annales Geophysicae*, (21):299–322, 2003.
- [4] R. Sorgente A. Olita P. Oddo L. Fazioli A. Ribotti. Numerical simulation and decomposition of kinetic energy in the central mediterranean: insight on mesoscale circulation and energy conversion. *Ocean Science*, (7):503–519, 2011.
- [5] Progetto tessa: <http://tessa.linksmt.it/il-progetto>.
- [6] L. Fazioli A. Olita A. Cucco C. Tedesco A. Ribotti R. Sorgente. Impact of different initialization methods on the quality of the sea forecasts for the sicily strait area. special issue operational oceanography, innovative technologies and applications (proceedings of the iii gnoo conference). *Journal of Operational Oceanography*, submitted 2015.
- [7] M. Tonani N. Pinardi S. Dobricic I. Pujol C. Fratianni. A high-resolution free-surface model of the mediterranean sea. *Ocean Sci*, (4):1–14, January 2008.
- [8] S. Castellari N. Pinardi K. Leaman. A model study of air-sea interactions in the mediterranean sea. *Journal of Marine Systems*, (18):89–114, May 1998.

- [9] S. Gabersek R. Sorgente S. Natale A. Ribotti A. Olita M. Astraldi M. Borghini. The sicily channel regional model forecasting system: initial boundary conditions sensitivity and case study evaluation. *Ocean Science*, (3):31–41, January 2007.
- [10] Progetto medess: <http://medess.org/2013/en/>.
- [11] Progetto primi: <http://spatial.telespazio.it/plone3.0/primi>.
- [12] M. De Dominicis N. Pinardi G. Zodiatis G. R. Archetti. Medslik-ii, a lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting - part.2: Numerical simulations and validations. *Geosci. Model Dev.*, pages 1871–1888, 2013.
- [13] M. Azpurua K. Dos Ramos. A comparison of spatial interpolation methods for estimation of average electromagnetic field magnitude. *Progress In Electromagnetics Research M*, pages 503–519, 2010.
- [14] Shepard D. A two dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *ACM Annual Conference/Annual Meeting*, (7):517–524, 1968.
- [15] F. Loparco. Interpolazione ed estrapolazione: www.ba.infn.it/loparco/geofisica/interpolazione.ppt.

Forze idrodinamiche indotte da onde irregolari su condotte sottomarine: analisi sperimentale

Giuseppe Triepi
Istituto per l'Ambiente Marino Costiero
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Calata Porta di Massa, 80133
Napoli, Italia
giu.triepi@gmail.com

Francesco Aristodemo
Facoltà di Ingegneria
Università degli Studi eCampus
via Isimbardi 10, 22060
Novedrate (CO), Italia
francesco.aristodemo@unicampus.it

Sommario—Il presente lavoro riguarda lo studio delle forze idrodinamiche indotte dall'azione di onde irregolari agenti su cilindri snelli posati sul fondo. I dati sperimentali utilizzati fanno riferimento ad un'indagine di laboratorio condotta nel canale di grandi dimensioni del Centro Sperimentale per i Modelli Idraulici di Voltabarozzo (Padova). Le forze idrodinamiche verticali (*lift*) ed orizzontali (*drag* e *inerzia*) agenti sulla condotta sono state calcolate con il modello semiempirico di Morison, largamente adottato nelle applicazioni ingegneristiche.

La calibrazione del modello è stata effettuata attraverso la stima dei coefficienti idrodinamici, in base alle misure sperimentali di velocità orizzontale in corrispondenza dell'asse trasversale della condotta e di pressioni sul suo contorno esterno. Il confronto tra le forze sperimentali e le forze calcolate mostra come il modello di Morison riproduca bene l'andamento temporale e la distribuzione energetica spettrale delle forze orizzontali. Tuttavia, esistono dei limiti nella stima dei valori delle forze verticali, essendo quest'ultime particolarmente affette dallo sviluppo asimmetrico dei vortici attorno alla condotta.

I. INTRODUZIONE

L'analisi delle forze che agiscono su una condotta cilindrica snella è indispensabile per la corretta progettazione degli elementi resistenti della stessa. In particolare, l'azione del moto ondoso in acque basse e intermedie produce una sollecitazione dinamica sulle strutture cilindriche posate sul fondo. Per determinare il regime delle forze d'onda è opportuno introdurre due parametri: il parametro di diffrazione D/L , dove D indica il diametro esterno della condotta e L la lunghezza d'onda e il numero di Keulegan-Carpenter KC , che dipende dalla velocità orizzontale u , dal periodo dell'onda T e dal diametro della condotta D . Il parametro di diffrazione rappresenta una variabile adimensionale che fornisce informazioni sulla intensità dello spargimento delle fluttuazioni dinamiche attorno una struttura cilindrica. Il numero di Keulegan-Carpenter KC è un parametro adimensionale che fornisce indicazioni sullo sviluppo dei fenomeni vorticosi a carattere turbolento nell'intorno di un corpo cilindrico.

Lo studio proposto riguarda condotte sottomarine snelle caratterizzate da valori di $D/L < 0.2$ e $KC > 4$ [1]. In questo range, il flusso incidente si separa dalla superficie esterna della condotta generando scie vorticosi nell'intorno della struttura. Il modello più diffuso per la determinazione delle forze idrodinamiche orizzontali indotte dal flusso oscillatorio del

moto ondoso su un corpo snello è stato introdotto da Morison [2]. La forza verticale, calcolata con un'espressione simile a quella della forza di *drag* di Morison, è stimata utilizzando il *transverse model*. La comunità scientifica ha prodotto diversi studi sulla calibrazione dei coefficienti di Morison adottando diverse configurazioni geometriche e stimando i coefficienti per un ampio range dei valori di KC [3] [4] [5]. Tuttavia, in tali studi, il calcolo delle velocità orizzontali e verticali è stato determinato analiticamente utilizzando solo le misure sperimentali della superficie libera dell'acqua. Gli esperimenti del CSMI segnano dunque un miglioramento di tale condizione poichè le velocità sono state misurate direttamente in canale, in corrispondenza dell'asse trasversale della tubazione, così come richiesto nella corretta applicazione del modello di forze idrodinamiche di Morison.

Nella prima parte del lavoro viene descritta in generale la fluidodinamica attorno ai cilindri, in particolare quelli snelli, e gli associati regimi di moto che si instaurano nell'intorno di essi. Nel paragrafo successivo invece si descrive il modello di Morison e il *transverse model*. La terza parte è relativa alla descrizione dell'indagine sperimentale. Nella quarta parte invece sono descritte le varie tecniche per determinare i coefficienti idrodinamici. Nell'ultimo paragrafo si mostrano i confronti fra forze idrodinamiche sperimentali e quelle calcolate in termini temporali e spettrali.

II. FLUIDODINAMICA ATTORNO AI CILINDRI

Il moto di un fluido che incontra un ostacolo cilindrico provoca una variazione della sua traiettoria. I filetti fluidi che colpiscono l'ostacolo subiscono una deviazione angolare grazie alla quale riescono ad aggirare l'ostacolo. Se il flusso raggiunge determinate velocità, i filetti dei fluidi che sussistono sulla superficie della condotta si separano dalla stessa generando zone vorticosi a carattere turbolento [6].

Il fenomeno fluidodinamico risulta essere legato al numero di Reynolds, che generalmente può essere definito come:

$$Re = \frac{uD}{\nu} \quad (1)$$

dove u è la velocità della corrente in corrispondenza dell'asse trasversale della condotta, D è il diametro esterno della condotta e ν è la viscosità cinematica del fluido.

Valori del numero di Reynolds inferiori a 5 non inducono alterazione dei filetti di fluido. Con $Re > 5$ si verifica il distacco dalla parete della condotta con la formazione di una regione di scia. All'aumentare di Re , il flusso di scia diventa instabile e si generano i vortici all'interno di essa. Per valori superiori a 40 si generano vortici sulla generatrice superiore del corpo cilindrico con la stessa direzione rotazionale della vorticità interna alla regione di scia. Il vortice inferiore che si sviluppa in una regione di scia più piccola, presenta una rotazione opposta (antioraria). Alla fine, il processo di formazione dei vortici in presenza di un ostacolo cilindrico risulta alternato. Il fenomeno della formazione dei vortici e del regime di moto che si instaura a tergo di una struttura cilindrica orizzontale di piccole dimensioni dipende da un'altra grandezza adimensionale, il numero di Keulegan-Carpenter KC . Nel caso di onde sinusoidali, esso può essere determinato come:

$$KC = \frac{u_m T}{D} \quad (2)$$

dove u_m rappresenta il valore massimo della velocità orizzontale di campo di moto indisturbato, T il periodo dell'onda e D il diametro esterno della condotta.

Sumer e Fredsøe [6], simulando un flusso sinusoidale, hanno classificato il comportamento fluidodinamico al variare del numero di Keulegan-Carpenter. Per valori di $KC < 1.1$, non si verifica il distacco dei filetti fluidi dalla superficie della condotta. Con $KC < 1.6$, si ha un primo distacco e si genera il cosiddetto regime di instabilità di Honji [7], un flusso bidimensionale che si espande formando lateralmente delle strisce a forma di fungo. Nel range compreso tra 1.6 e 4, si sviluppano due vortici simmetrici lungo la direzione principale del moto. Per $KC > 4$ i vortici risultano non più simmetrici. Il regime dunque di emissione dei vortici avviene per Sumer e Fredsøe per valori di $KC > 4$. Tuttavia, esistono altri studi in letteratura che hanno individuato la soglia di formazione del regime di vortici pari a 6 [1] [8]. L'intervallo compreso tra $7 < KC < 15$ è definito da una coppia di vortici che hanno diversa rotazione ma che si muovono nella stessa direzione perpendicolare al flusso (transverse vortex street). Aumentando ancora il numero di Keulegan-Carpenter, aumentano il numero dei vortici per ciclo d'onda.

La formazione dei vortici incide fortemente nei valori della forza idrodinamica verticale ed esiste una correlazione tra i picchi della forza verticale e la emissione dei vortici stessi.

Un altro fattore che incide sul regime dei vortici è la distanza dal fondo della condotta. Sumer *et al.* [9] hanno evidenziato sperimentalmente come la vicinanza della condotta dal fondo provoca una maggiore asimmetria nello sviluppo dei vortici. Per bassi valori di e/D , dove e rappresenta la distanza tra il fondo e la parte inferiore della condotta e D il diametro della condotta, si ha un maggiore contributo delle forze verticali.

Per evidenziare il complesso sviluppo dei vortici che si formano nell'intorno di una struttura cilindrica snella posata sul fondo, si mostrano alcune schematizzazioni della formazione dei vortici. In Figura 1 si nota come variano i vortici

in relazione a due diversi range del numero di Keulegan-Carpenter, in particolare tra 4 e 7 (a) e tra 7 e 15 (b) nel caso di onde sinusoidali [9].

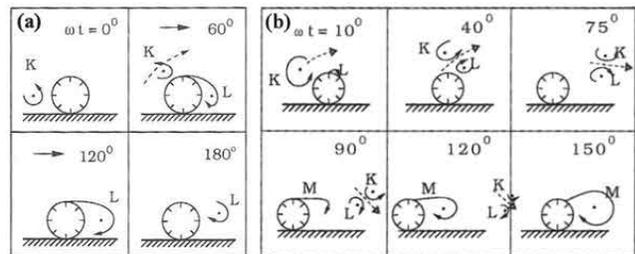


Figura 1. Evoluzione dei vortici per $e/D = 0$: (a) $4 < KC < 7$, (b) $7 < KC < 15$ [9]

Un altro studio di laboratorio che ha riprodotto schematicamente la formazione dei vortici sempre per valori di KC bassi e per cilindri snelli posati sul fondo è stato elaborato da Neill e Hinwood [10] (Figura 2). L'evoluzione dei fenomeni

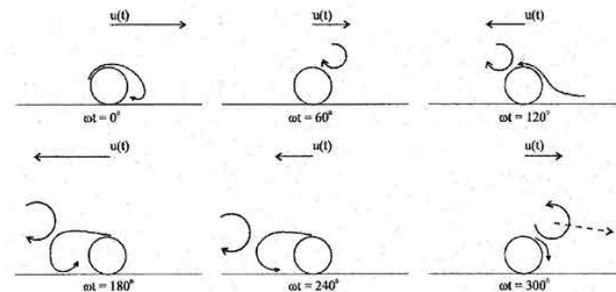


Figura 2. Evoluzione dei vortici per $KC = 6$ [10]

vorticosi risulta leggermente diversa dallo studio di Sumer *et al.* [9] confermando l'elevata complessità di tale processo e la difficile schematizzazione che ne segue. Gli schemi appena evidenziati sono relativi alla formazione dei vortici nell'intorno della condotta sottomarina sulla quale agisce una sollecitazione periodica di tipo sinusoidale. Lo studio proposto nel presente lavoro non analizza le forze idrodinamiche indotte da sollecitazioni sinusoidali ma considera un moto ondoso irregolare, più rappresentativo di quello che avviene realmente in mare. L'irregolarità della sollecitazione provoca una complessa evoluzione dei vortici rendendo il processo ancora più incerto e aleatorio. Studi effettuati su cilindri isolati [11] hanno confermato come un flusso oscillatorio irregolare implica una variabilità maggiore nella formazione dei vortici.

Le analisi che fanno riferimento a sollecitazioni prodotte da un flusso oscillatorio non-lineare impongono una leggera correzione ai parametri adimensionali appena introdotti. Analizzando onde irregolari, il numero di Reynolds e quello di Keulegan-Carpenter dipendono dalle caratteristiche statistiche e spettrali delle oscillazioni. I valori di Re e KC sono calcolate come:

$$Re = \frac{u_{m0} D}{\nu} \quad (3)$$

$$KC = \frac{u_m T_p}{D} \quad (4)$$

in cui u_{m0} indica la velocità significativa sul fondo indotta da un moto oscillatorio random in corrispondenza dell'asse trasversale e T_p il periodo di picco del moto ondoso irregolare.

III. MODELLI DI CALCOLO DI FORZE IDRODINAMICHE SU CILINDRI SNELLI

La valutazione delle forze idrodinamiche esercitate dal moto ondoso si basa su uno schema fluidodinamico di un corpo cilindrico immerso in un fluido in movimento. Tali modelli trascurano l'interazione tra il fluido esterno e la risposta dinamica della struttura. Le condotte sono considerate infinitamente rigide ($EI = \infty$, con E modulo di elasticità e I momento d'inerzia), per cui le forze idrodinamiche sono calcolate indipendentemente dalle deformazioni che la struttura cilindrica subisce. Le analisi fanno riferimento al regime di emissione dei vortici $D/L < 0.2$ e $KC > 4$. Le forze idrodinamiche orizzontali agiscono nella direzione di propagazione del moto mentre le forze verticali agiscono lungo la direzione normale ad essa.

Le componenti delle forze orizzontali sono due e sono schematizzate come sovrapposizione lineare. Le forze orizzontali che agiscono su un corpo immerso in un fluido sono: la forza di trascinamento o di *drag* F_D e la forza d'inerzia F_I . La forza di *drag* si genera per effetto sia degli sforzi tangenziali che nascono sulla superficie esterna del cilindro, sia per la distribuzione delle pressioni dinamiche relative alla deviazione dei filetti di fluido intorno alla condotta. La forza d'inerzia invece tiene conto dell'azione di un moto di tipo accelerato sul corpo ed è causato dalla variabilità temporale della massa fluida che incide sulla condotta. La prevalenza di una forza rispetto all'altra dipende dal numero di Keulegan-Carpenter. Per valori di KC compresi tra 4 e 20, sono le forze d'inerzia ad avere un maggiore peso. Per $KC > 20$ incidono maggiormente le forze di *drag*. La forza idrodinamica verticale è indotta dall'aumento di velocità nell'intorno della condotta a causa della sua presenza ed è definita come forza di sollevamento o di *lift*.

Le forze idrodinamiche non sono le sole forze che agiscono sulla condotta. Analizzando nel complesso il sistema condotta sul fondo-moto ondoso, ai fini delle analisi di stabilità, si devono considerare anche le forze di tipo statico:

- la spinta di Archimede o forza di galleggiamento, F_G , che agisce dal basso verso l'alto;
- la forza peso, F_P , che agisce dall'alto verso il basso;
- la forza di attrito, F_F , che agisce nella direzione opposta al moto.

Questo schema fa riferimento ad una sollecitazione ondosa periodica o random. Nel caso in cui la condotta è sollecitata solo da correnti uniformi e stazionarie, la forza d'inerzia non sussiste poiché viene meno la variabilità temporale della velocità del flusso incidente.

La formulazione analitica che Morison *et al.* [2] hanno proposto deriva da diversi esperimenti che hanno svolto su

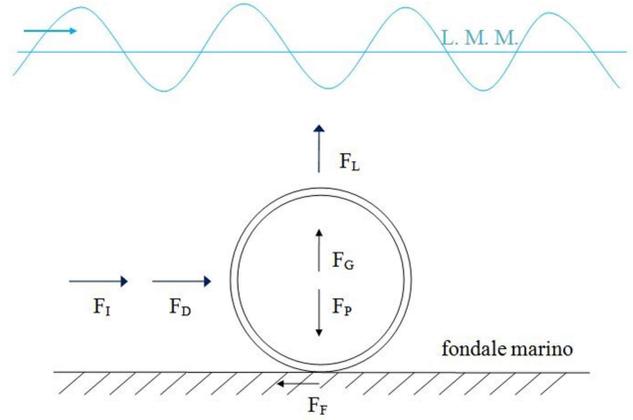


Figura 3. Schema delle forze agenti su una condotta sottomarina poggiata sul fondo

pile verticali. In realtà si è visto come tale modello può essere applicato a cilindri snelli con asse sia verticale che orizzontale.

La forza idrodinamica di *drag* F_D ha la seguente espressione:

$$F_D(t) = \frac{1}{2} \rho D C_D u(t) |u(t)| \quad (5)$$

dove ρ è la densità dell'acqua, D è il diametro della condotta, C_D è il coefficiente idrodinamico di *drag* e $u(t)$ è la velocità orizzontale in corrispondenza dell'asse trasversale della tubazione.

La forza di inerzia F_I è espressa secondo la seguente relazione:

$$F_I(t) = \frac{1}{4} \pi D^2 \rho C_M a(t) \quad (6)$$

in cui C_M è il coefficiente idrodinamico d'inerzia e $a(t)$ l'accelerazione orizzontale in funzione del tempo.

La forza di *lift*, espressione del *transverse model*, ha una relazione analoga a quella della forza di *drag*:

$$F_L(t) = \frac{1}{2} \rho D C_L u^2(t) \quad (7)$$

dove C_L è il coefficiente idrodinamico di *lift*.

La forza idrodinamica di sollevamento agisce lungo la verticale. Nel caso considerato nel presente lavoro ($e/D = 0$), la direzione della forza di *lift* è univoca ed è diretta dal basso verso l'alto. Tale forza è particolarmente influenzata dal comportamento dei vortici del flusso che, nel caso di condotta posata sul fondo, sono estremamente asimmetrici. Il modello di Morison si può applicare solo se il diametro della condotta D è molto minore della lunghezza d'onda L e, in ogni caso, inferiore all'altezza d'onda H ($D/L < 0.05$ e $H/D > 0.30$).

Si evince come la corretta applicazione di tale modello si basa sulla stima dei coefficienti idrodinamici C_D , C_M e C_L . Utilizzando semplici relazioni come quelle espresse nelle equazioni (5), (6) e (7), si riescono a stimare le forze idrodinamiche che agiscono su una condotta snella. Si sottolinea come tali coefficienti dipendono da molti fattori: regime di moto del fluido, scabrezza della condotta, distanza tra la

condotta ed il fondo, formazione dei vortici e variabilità del fluido. Nel corso degli ultimi decenni, sono stati effettuati diversi studi rivolti alla determinazione sperimentale di tali coefficienti, sia variando le dimensioni della condotta, la sua tipologia (liscia/scabra), la distanza della condotta dal fondo, sia variando quella che è la forzante, quindi onde regolari (sinusoidali e periodiche non-lineari) con e senza correnti, e onde irregolari con e senza correnti. Esistono degli abachi, costruiti sulla base di tali studi sperimentali di laboratorio, che consentono di ricavare i coefficienti idrodinamici in funzione delle grandezze del moto (KC , Re), dalla distanza tra la condotta ed il fondo (e/D) e in relazione alla scabrezza esterna del corpo cilindrico (k/D) [12] [9] [5] [13] [14].

Il modello di Morison risulta largamente adottato nelle applicazioni ingegneristiche poiché fornisce una rapida stima delle forze che entrano in gioco nel calcolo di una struttura cilindrica di piccole dimensioni. Esistono tuttavia dei limiti che hanno indotto diversi ricercatori a migliorare tale modellazione. I limiti del modello sono dovuti in primo luogo al campo di moto di riferimento che non considera il reale campo indotto dai vortici ma un campo di moto indisturbato. Inoltre, i diversi abachi presenti in letteratura hanno dei range limitati di KC e Re e dunque non sempre è possibile, per particolari condizioni, individuare un preciso valore dei coefficienti. Altra semplificazione è quella di presupporre costanti i valori dei coefficienti idrodinamici che in realtà variano a seconda della storia temporale del campo di moto. Tali limiti incidono soprattutto nel calcolo della forza idrodinamica di *lift*. La ricerca ha sviluppato diversi metodi per migliorare tale modello. In questo senso, è opportuno citare i modelli di scia come il Wake I [15], il Wake II [16] [17] ed il New Wake II [18], basati su una migliore interpretazione fisica della complessa interazione fluido-cilindro posato sul fondo.

IV. INDAGINE SPERIMENTALE

Gli esperimenti in laboratorio sono stati effettuati presso il canale di grandi dimensioni del Centro Sperimentale per i Modelli Idraulici di Voltabarozzo (Padova) [18]. Il canale utilizzato per le indagini sperimentali è lungo 131.30 metri, ha una larghezza totale di 1.94 m e una profondità massima di 2.50 m. Il fondale è piano e le pareti del canale hanno uno spessore di 0.30 m. Il canale ondogeno è dotato di diversi scarichi di fondo e di un sistema di immissione dell'acqua. A monte del canale vi è il generatore del moto ondoso che permette di simulare onde regolari ed irregolari. L'indagine sperimentale è stata eseguita utilizzando diversi strumenti di misura. Le sonde capacitive (wave gauges) hanno fornito la misura dell'elevazione d'onda $\eta(t)$. I trasduttori di pressione, posizionati sulla condotta, hanno registrato i valori di pressione $p(t)$. La lettura dei valori di pressione è stata eseguita grazie agli indicatori digitali di processo che hanno amplificato la potenza del segnale. Oltre alla misura dell'elevazione d'onda e delle pressioni sul contorno della condotta, sono state registrate simultaneamente anche le velocità orizzontali del campo di moto indisturbato in corrispondenza dell'asse trasversale della condotta grazie all'uso di un velocimetro ad ultrasuoni (Acou-

stic Doppler Velocimeter). Tali strumenti sono posizionati nella parte terminale del canale dove un muro longitudinale lo divide in due parti. La corretta posizione della strumentazione e la geometria del canale sono mostrati in Figura 4.

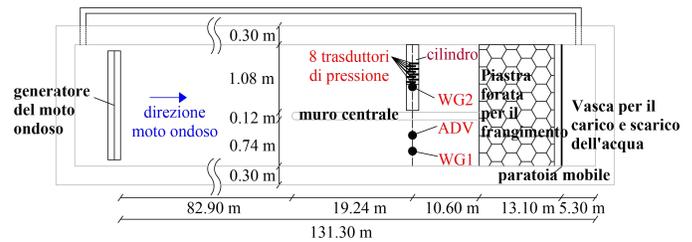


Figura 4. Pianta del canale ondogeno

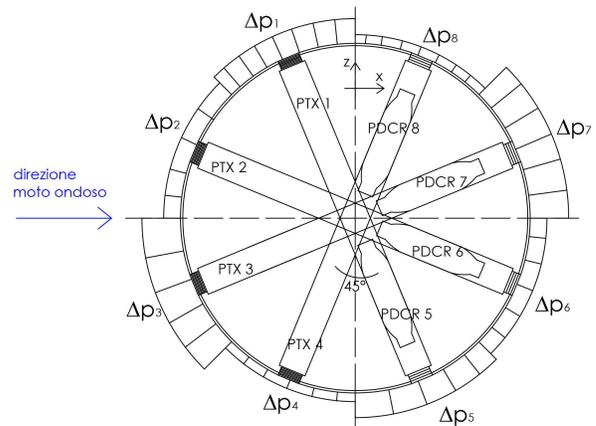


Figura 5. Sezione trasversale della condotta con il posizionamento dei trasduttori e rappresentazione schematica delle fluttuazioni di pressione con le relative aree di influenza

I misuratori d'onda sono indicati con WG1 e WG2. Sulla sommità della condotta è posizionato il WG2 mentre nel canale di destra, in corrispondenza dell'asse trasversale del cilindro sono posizionati il WG1 ed il velocimetro (ADV). In questo modo, tutte le misure di velocità, anche se acquisite non direttamente sulla condotta, risultano rappresentative delle velocità di campo di moto indisturbato. Tale deduzione è stata possibile poiché si è verificato che non esistesse nessuno sfasamento nelle serie temporali delle elevazioni d'onda tra i WG1 e WG2 [19]. Per quanto concerne il posizionamento dei trasduttori occorre far riferimento alla Figura 5. I trasduttori sono stati inseriti lungo la parte centrale della tubazione. Tali strumenti sono distanziati di 45° l'uno dall'altro e concorrono tutti alla valutazione delle forze idrodinamiche che agiscono sia orizzontalmente che verticalmente. Il cilindro posizionato nel canale di sinistra ha un diametro di 0.22 m ed una lunghezza di 1.05 m. L'altezza del tirante idrico è stato fissato a 1.2 m per tutte le prove delle indagini sperimentali. La stima delle forze che agiscono sulla condotta è fornita proprio dai trasduttori, in particolare sono stati adoperati 4 PDCR 1830 e 4 PTX/160-0241. Le misure puntuali restituiscono 8 valori di $p(t)$ che sono considerati costanti per ogni area

di influenza (Figura 5). Le forze idrodinamiche sono state calcolate secondo le seguenti relazioni:

$$F_O(t) = \left(\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{2}}{4}\right) D[\Delta p_1(t) + \Delta p_4(t) - \Delta p_8(t) - \Delta p_5(t)] + \frac{\sqrt{2}}{4} D[\Delta p_2(t) + \Delta p_3(t) - \Delta p_7(t) - \Delta p_6(t)] \quad (8)$$

$$F_V(t) = \left(\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{2}}{4}\right) D[\Delta p_3(t) + \Delta p_6(t) - \Delta p_2(t) - \Delta p_7(t)] + \frac{\sqrt{2}}{4} D[\Delta p_4(t) + \Delta p_5(t) - \Delta p_1(t) - \Delta p_8(t)] \quad (9)$$

I dati sperimentali utilizzati per il presente studio fanno riferimento a 14 test effettuati con un moto onduoso di tipo irregolare e con una condotta liscia. Le sollecitazioni fluidodinamiche prodotte nel canale ondogeno erano tali da instaurare un regime di emissione dei vortici caratterizzato da valori del numero di $KC > 4$.

Tutte le prove sono state classificate in base al valore dell'altezza d'onda significativa, H_s , e dal periodo di picco, T_p , calcolati dallo spettro dell'elevazione d'onda. L'altezza d'onda significativa è stata determinata in base alla seguente relazione:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (10)$$

in cui m_0 rappresenta il momento di ordine zero della densità di energia spettrale dell'elevazione d'onda dedotta dal WG2.

Lo spettro dell'onda è stato modellato mediante la formula dello spettro JONSWAP [20]:

$$S(f) = \alpha \frac{g^2}{(2\pi)^4} \frac{1}{f} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right] \gamma \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{f-f_p}{\sigma f_p}\right)^2\right] \quad (11)$$

dove $\alpha = 8.1 \cdot 10^{-3}$ (parametro di Phillips), f la generica frequenza, $\gamma = 3.3$ (coefficiente di picco dello spettro), $\sigma = 0.07$ (per $f \leq f_p$) e $\sigma = 0.09$ (per $f > f_p$).

Nella Tabella 1 sono riassunte tutte le prove utilizzate per l'analisi sperimentale in funzione dei relativi parametri caratteristici. KC e Re sono calcolati utilizzando le relazioni 3 e 4. La viscosità cinematica dell'acqua ν è pari a $1.15 \cdot 10^{-6}$ m²/s. La velocità significativa sul fondo u_{m0} è calcolata secondo la definizione fornita da Bryndum *et al.* [21] [5]:

$$u_{m0} = 2\sqrt{\sigma_u} \quad (12)$$

in cui σ_u è lo scarto quadratico medio nell'andamento oscillatorio irregolare della velocità $u(t)$.

I test elencati in Tabella 1 rientrano in una serie più ampia di indagini sperimentali di laboratorio in cui si sono valutate oltre alle onde irregolari, sollecitazione di tipo sinusoidale periodiche con e senza correnti su cilindri sia lisci che scabri [18].

| Test | $H_s(m)$ | $T_p(s)$ | $u_{m0}(m/s)$ | KC | Re |
|------|----------|----------|---------------|------|-------------------|
| T1 | 0.395 | 2.44 | 0.40 | 4.46 | $8.76 \cdot 10^4$ |
| T2 | 0.344 | 3.01 | 0.54 | 6.31 | $1.18 \cdot 10^5$ |
| T3 | 0.362 | 3.01 | 0.39 | 5.32 | $8.54 \cdot 10^4$ |
| T4 | 0.392 | 3.01 | 0.42 | 5.82 | $9.20 \cdot 10^4$ |
| T5 | 0.351 | 3.66 | 0.45 | 7.51 | $9.86 \cdot 10^4$ |
| T6 | 0.396 | 3.66 | 0.53 | 8.92 | $1.16 \cdot 10^5$ |
| T7 | 0.322 | 3.94 | 0.37 | 6.70 | $8.11 \cdot 10^4$ |
| T8 | 0.322 | 3.94 | 0.40 | 7.19 | $8.76 \cdot 10^4$ |
| T9 | 0.378 | 3.94 | 0.43 | 7.79 | $9.42 \cdot 10^4$ |
| T10 | 0.163 | 4.65 | 0.21 | 4.46 | $4.60 \cdot 10^4$ |
| T11 | 0.257 | 4.65 | 0.30 | 6.42 | $6.57 \cdot 10^4$ |
| T12 | 0.199 | 5.69 | 0.24 | 6.18 | $5.26 \cdot 10^4$ |
| T13 | 0.214 | 5.69 | 0.26 | 6.81 | $5.70 \cdot 10^4$ |
| T14 | 0.228 | 5.69 | 0.27 | 7.14 | $5.92 \cdot 10^4$ |

Tabella I
VALORI CARATTERISTICI DEI TEST SPERIMENTALI

V. DETERMINAZIONE DEI COEFFICIENTI IDRODINAMICI

Il calcolo dei coefficienti idrodinamici richiede una valutazione preliminare sulla qualità dei dati. Dean [22] ha introdotto un criterio sulla affidabilità dei dati relativi ai coefficienti C_D e C_M . Tale rapporto, definito come *reliability ratio*, è calcolato in funzione della velocità orizzontale indisturbata u e dell'accelerazione a in corrispondenza dell'asse trasversale della condotta:

$$R = \frac{2}{\pi D} \sqrt{\frac{\langle u^4 \rangle}{\langle a^2 \rangle}} \quad (13)$$

Per valori compresi tra 0.25 e 4, il dato può essere ritenuto affidabile [22]. Il valore di R è stato analizzato in relazione al numero di Keulegan-Carpenter rappresentativo dei test sperimentali analizzati (Figura 6).

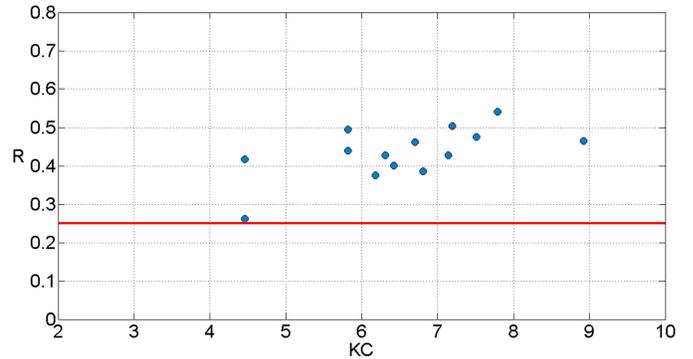


Figura 6. Variazione del *reliability ratio*, R , in funzione di KC

Tutti i valori di R risultano al di sopra della soglia individuata da Dean e variano da un massimo di 0.54 ad un minimo di 0.26. Inoltre, dal confronto con KC si nota la presenza di un trend crescente che conferma la bontà dei dati. Un risultato analogo lo si può ritrovare nella stima dei coefficienti idrodinamici condotta da Wolfram e Naghipour [23] e Aristodemo *et al.* [14].

I coefficienti idrodinamici orizzontali possono essere stimati utilizzando diverse tecniche. Il principio comune è quello di

minimizzare la differenza tra forze sperimentali, cioè quelle stimate grazie ai valori di pressione registrati sulla superficie esterna della condotta, e quelli calcolati mediante l'utilizzo di formule semiempiriche come quella di Morison. Una suddivisione delle tecniche utilizzate per la stima dei coefficienti è relativa al tipo di approccio da condurre, l'analisi può avvenire sull'intera registrazione del dato o wave-by-wave. Un metodo che può essere utilizzato in entrambe i casi è stato introdotto da Wolfram e Naghipour [23]. Il metodo calcola la forza orizzontale F_O^k in cui k è un indice positivo che si può far variare per meglio rappresentare i picchi delle forze idrodinamiche. Il coefficiente di drag C_D e il coefficiente di inerzia C_M sono stimati mediante le seguenti relazioni:

$$C_D = \frac{\sum_{i=1}^{nn} F_O^{2k+1} u|u| \sum_{i=1}^{nn} F_O^{2k} a^2 - \sum_{i=1}^{nn} F_O^{2k+1} a \sum_{i=1}^{nn} F_O^{2k} u|u| a}{K_D \left[\sum_{i=1}^{nn} F_O^{2k} u^4 \sum_{i=1}^{nn} F_O^{2k} a - \left(\sum_{i=1}^{nn} F_O^{2k} u|u| a \right)^2 \right]} \quad (14)$$

$$C_M = \frac{\sum_{i=1}^{nn} F_O^{2k+1} a \sum_{i=1}^{nn} F_O^{2k} u^4 - \sum_{i=1}^{nn} F_O^{2k+1} u|u| \sum_{i=1}^{nn} F_O^{2k} a u|u|}{K_M \left[\sum_{i=1}^{nn} F_O^{2k} a^2 \sum_{i=1}^{nn} F_O^{2k} u^4 - \left(\sum_{i=1}^{nn} F_O^{2k} a u|u| \right)^2 \right]} \quad (15)$$

dove $K_D = 1/2\rho D$ e $K_M = 1/4\rho\pi D^2$.

Il valore dell'indice k può variare ma deve in ogni caso assumere un valore intero. Nello studio in esame, la variazione ha interessato un minimo di 0 ed un massimo pari a 4. Da sottolineare come per $k = 0$ il metodo è riconducibile al metodo dei minimi quadrati ordinario. La stima di tali coefficienti ha interessato molti autori che hanno formulato diversi metodi nel corso degli anni. Per quanto concerne l'analisi wave-by-wave è opportuno citare Bearman *et al.* [24] e Klopman e Kostense [25], sull'intera registrazione invece, oltre al metodo dei momenti [26] è da citare il recente metodo di Boccotti [27].

Il calcolo del coefficiente di lift risulta più semplice da determinare poiché l'incognita è una così come l'equazione. Nota la forza verticale, misurata sperimentalmente, il coefficiente idrodinamico si determina mediante la seguente relazione:

$$C_L = \frac{\sum_{i=1}^{nn} F_V(t)}{\frac{1}{2}\rho D \sum_{i=1}^{nn} u^2(t)} \quad (16)$$

In riferimento ai test introdotti nel precedente paragrafo, sono stati stimati i coefficienti idrodinamici ricavati nel range $4 < KC < 10$. La durata di ogni singolo test di onde irregolari agenti sulla condotta è pari a 15 minuti. I risultati fanno riferimento al metodo dei minimi quadrati pesato con il valore dell'indice k pari a 1. L'approccio utilizzato è stato quello wave-by-wave, determinando i coefficienti per le singole onde e utilizzando la media come valore di riferimento. La scelta dell'indice è giustificata dai minori errori osservati fra le forze calcolate con il modello di Morison e quelle sperimentali.

In base all'applicazione dei metodi proposti, nelle Figure 7, 8 e 9 sono mostrati, rispettivamente, gli andamenti dei coefficienti idrodinamici C_D , C_M e C_L in funzione di KC . Valutando i grafici si nota come in questo range caratterizzato da valore di KC bassi (< 9) e a cui corrispondono velocità significative sul fondo comprese tra 0.21 e 0.54 m/s, tutti i coefficienti presentano una tendenza a diminuire con l'aumentare di KC . Solo nella stima del coefficiente di drag C_D si è riscontrato una leggera controtendenza, in particolare per $KC < 6$. Tale fenomeno trova un riscontro anche nello studio sperimentale di Jothi Shankar *et al.* [4]. I valori dei coefficienti

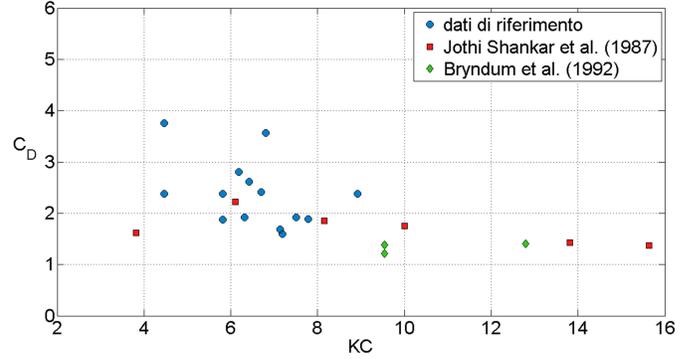


Figura 7. Variazione del coefficiente idrodinamico di drag, C_D , in funzione di KC

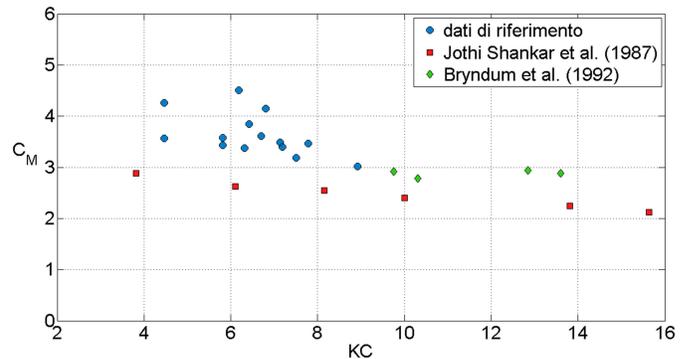


Figura 8. Variazione del coefficiente idrodinamico di inerzia, C_M , in funzione di KC

sono stati confrontati con altri studi afferenti al calcolo dei coefficienti idrodinamici relativi a cilindri snelli posati sul fondo sollecitati da un moto ondoso irregolare [4] [5], in cui si osserva un buon accordo. In generale, i presenti dati sperimentali risultano meglio coprire il range compreso da $4 < KC < 7$, ovvero quando inizia la fase di distacco di vortici dalla condotta. Si osserva comunque che la maggior parte degli studi sono stati sviluppati considerando sollecitazioni periodiche prodotte da onde regolari e, in generale, con valori più alti del numero di Keulegan-Carpenter.

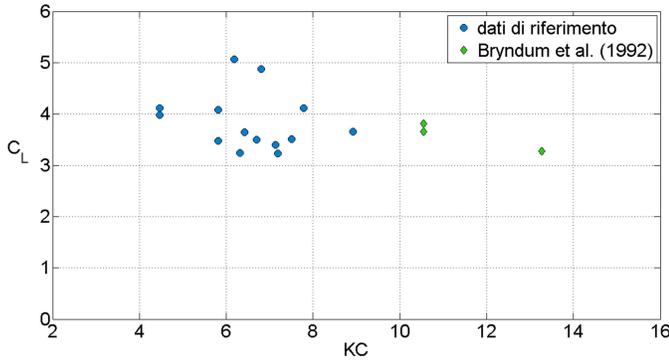


Figura 9. Variazione del coefficiente idrodinamico di lift, C_L , in funzione di KC

VI. ANALISI DELLE FORZE IDRODINAMICHE

Dopo aver opportunamente calibrato i coefficienti idrodinamici, è stato effettuato un confronto tra le forze idrodinamiche misurate sperimentalmente e le forze calcolate mediante il modello semiempirico di Morison e il *transverse model*. Si sono considerati rappresentativi dell'intero studio i test T1 e T2 dei dati sperimentali analizzati. Estrapolando dall'intera registrazione un intervallo di 60 s si mostra l'andamento della forza idrodinamica orizzontale che agisce sulla condotta per i 2 test considerati. Dalle Figure 10 e 11 si vede in modo

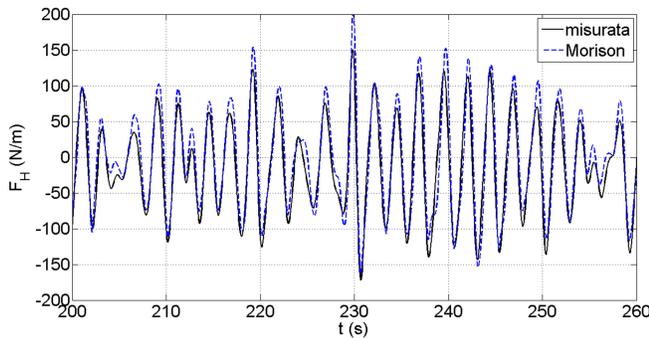


Figura 10. Confronto fra la forza orizzontale misurata e calcolata con il modello di Morison (Test1 - $H_s = 0.395$ m, $T_p = 2.44$ s)

chiaro come il modello di Morison, a meno di qualche piccola differenza, è in grado di riprodurre abbastanza bene l'ampiezza e la fase delle forze orizzontali. Il maggior contributo delle F_O è da ascrivere alla componente inerziale F_I che incide maggiormente nel calcolo totale della forza orizzontale. Tale comportamento si è osservato sperimentalmente e risulta confermato dalla letteratura per $KC < 20$ (vedi, ad esempio, Sumer e Fredsøe [6]).

La validità dei modelli di forze idrodinamiche adottati è stata verificata anche in base alla distribuzione energetica nel dominio delle frequenze. Analizzando le densità di energia spettrale relative alle forze idrodinamiche orizzontali sperimentali e calcolate con la formula di Morison mediante Fast

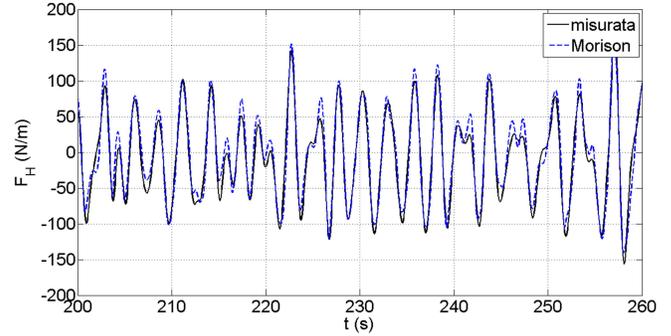


Figura 11. Confronto fra la forza orizzontale misurata e calcolata con il modello di Morison (Test2 - $H_s = 0.344$ m, $T_p = 3.01$ s)

Fourier Transform, si vede come gli andamenti sono molto simili.

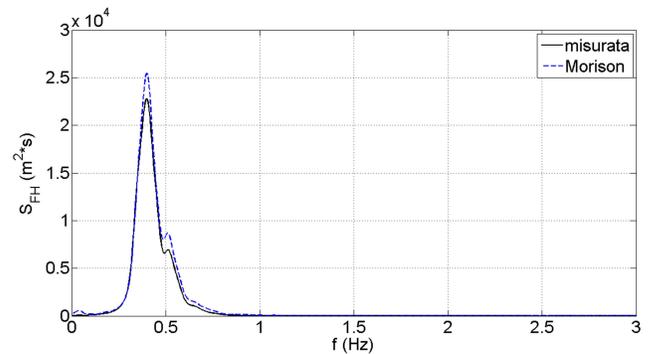


Figura 12. Densità di energia spettrale delle forze idrodinamiche orizzontali (Test1 - $H_s = 0.395$ m, $T_p = 2.44$ s)

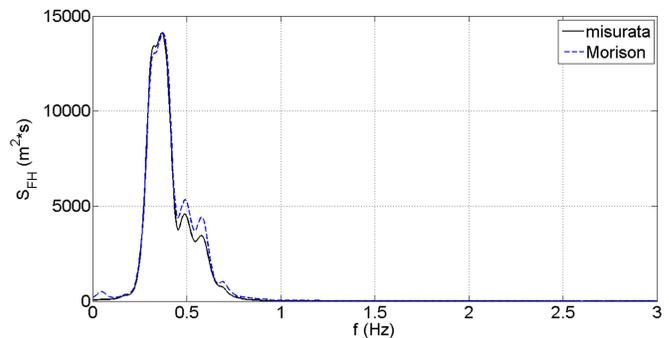


Figura 13. Densità di energia spettrale delle forze idrodinamiche orizzontali (Test2 - $H_s = 0.344$ m, $T_p = 3.01$ s)

L'analisi delle forze verticali risulta più complessa. Come accennato nei primi paragrafi, la presenza dello sviluppo asimmetrico dei vortici influenza molto la forza verticale. Il *transverse model* non riesce a riprodurre bene quello che si osserva sperimentalmente a livello temporale. La differenza tra le forze osservate sperimentalmente e quelle relative al modello sono evidenti nelle Figure 14 e 15.

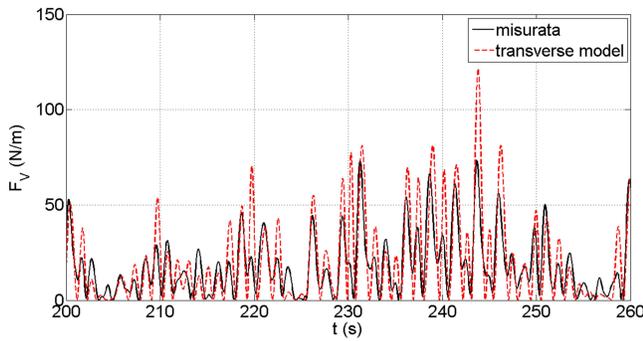


Figura 14. Confronto fra la forza verticale misurata e calcolata con il modello di Morison (Test1 - $H_s = 0.395$ m, $T_p = 2.44$ s)

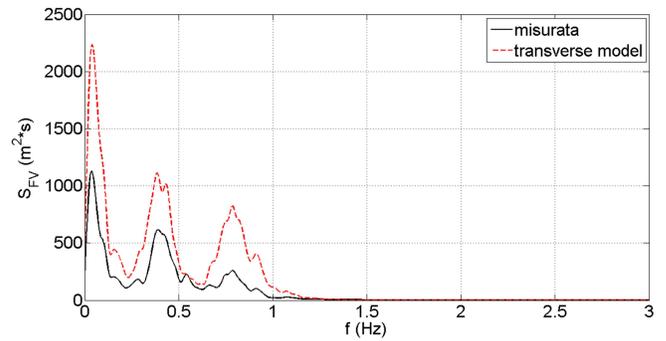


Figura 16. Densità di energia spettrale delle forze idrodinamiche verticali (Test1 - $H_s = 0.395$ m, $T_p = 2.44$ s)

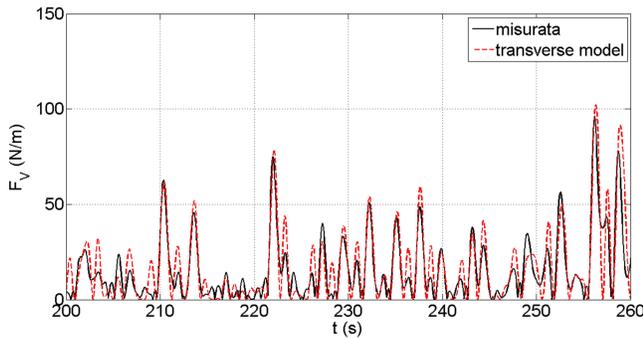


Figura 15. Confronto fra la forza verticale misurata e calcolata con il modello di Morison (Test2 - $H_s = 0.344$ m, $T_p = 3.01$ s)

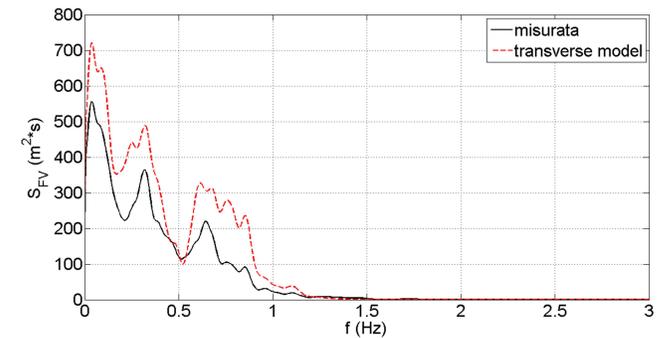


Figura 17. Densità di energia spettrale delle forze idrodinamiche verticali (Test2 - $H_s = 0.344$ m, $T_p = 3.01$ s)

Per migliorare il calcolo delle forze verticali, la ricerca scientifica si è adoperata proponendo nuovi modelli, i cosiddetti modelli di scia. Tali modelli sono validi per sollecitazioni ondose di tipo sinusoidale. Un'estensione del modello Wake II [16] [17] è stato sviluppato recentemente da Aristodemo *et al.* [18]. Grazie ad una modifica nel calcolo della velocità agente sulla condotta, è possibile applicare il modello anche al caso di onde irregolari riproducendo bene le forze verticali generate nell'interazione fluido-condotta. L'analisi sperimentale ha permesso di determinare anche le densità di energia spettrale delle forze verticali che agiscono sulla struttura cilindrica e relative ai test T1 e T2 (Figure 16 e 17).

Le distribuzioni energetiche spettrali relative alle forze verticali presentano, a differenza di quelle relative alle forze orizzontali, diverse frequenze di picco. Nel confronto tra gli spettri determinati in funzione della forza di *lift*, i due andamenti risultano abbastanza differenti a livello di ampiezza. Dalla Figura 16 si nota la sovrastima del modello di Morison che, in corrispondenza del primo picco, raddoppia il valore della $S_{FV}(f)$, confermando il limite del modello in tutte le analisi delle forze idrodinamiche verticali.

VII. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha affrontato lo studio delle forze idrodinamiche agenti su condotte snelle posate sul fondo sollecitate da onde irregolari. La valutazione delle forze idrodinamiche è

stata condotta utilizzando lo schema di Morison e il *transverse model*. Per determinare i coefficienti idrodinamici, è stata effettuata un'analisi su dati sperimentali di laboratorio. In particolare, è stato utilizzato il metodo dei minimi quadrati opportunamente pesato per ridurre al minimo le differenze tra forze osservate sperimentalmente e forze calcolate con formule semiempiriche e calibrare i modelli di forze idrodinamiche. Gli andamenti del coefficiente idrodinamico di *drag* C_D , del coefficiente idrodinamico d'inerzia C_M e del coefficiente idrodinamico di *lift* C_L risultano abbastanza in linea con altri studi sperimentali presenti in letteratura. La risposta del modello di Morison è positiva sull'andamento temporale delle forze idrodinamiche orizzontali e sulla loro distribuzione energetica spettrale. Il *transverse model* presenta invece dei limiti sulla valutazione della storia temporale delle forze idrodinamiche di *lift* e sulla loro distribuzione energetica spettrale.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale Ricerca e Competitività 2007-2013, Progetto Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' - TESSA.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Sarpkaya, T., Isaacson, M., 1981. Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures. Van Nostrand Reinhold Company, 650 pp.

- [2] Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W., Schaaf, S.A., 1950. The forces exerted by surface waves on piles. *Petroleum Transaction* 189, 149-156.
- [3] Cheong, H.F., Jothi-Shankar, N., Subbiah, K., 1987. Wave forces on submarine pipelines near a plane boundary. *Ocean Engineering* 14, 181-200.
- [4] Jothi-Shankar, N., Cheong, H.F., Subbiah, K., 1987. Forces on a smooth submarine pipeline in random waves - A comparative study. *Coastal Engineering* 11, 189-218.
- [5] Bryndum, M.B., Jacobsen, V., Tsalhalis, D.T., 1992. Hydrodynamic forces on pipelines: model tests. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 114, 231-241.
- [6] Sumer, B.M., Fredsøe, J., 1997. Hydrodynamics around cylindrical structures. *Advances Series on Coastal Engineering*, World Scientific, 530 pp.
- [7] Honji, H., 1981. Streaked flow around an oscillating circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 197, 509-520.
- [8] Boccotti, P., 2000. *Wave Mechanics for Ocean Engineering*. Elsevier Science.
- [9] Sumer, B.M., Jensen, B.L., Fredsøe, J., 1991. Effect of a plane boundary on oscillatory flow around a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics* 225, 271-300.
- [10] Neill, I.A.R., Hinwood, J.B., 1998. Wave and wave-current load on a bottom-mounted circular cylinder. *International Journal of Offshore and Polar Engineering* 2, 122-129.
- [11] Sumer, B.M., Kozakiewicz, A., 1995. Visualization of flow around cylinders in random waves. *International Journal of Offshore and Polar Engineering* 5, 270-27.
- [12] Sarpkaya T., Rajabi, F., 1979. Hydrodynamic drag on bottom-mounted smooth and rough cylinders in periodic flow. *Proc. 11th Annual Offshore Technology Conference*, Houston, Paper OTC 3761, 2, 219-226.
- [13] Benassai G., 1993. Azioni idrodinamiche su un cilindro orizzontale in prossimità del fondo: indagine sperimentale. *Giornate italiane di ingegneria costiera*, Genova, 116-127.
- [14] Aristodemo, F., Tomasicchio, G.R., Veltri, P., 2013. Wave and current forces at a bottom-mounted submarine pipeline. *Journal of Coastal Research SI* 65, 1-6.
- [15] Lambrakos, K.F., Chao, J.C., Beckmann, H.B., Brannon, H.R., 1987. Wake model of hydrodynamic forces on pipelines. *Ocean Engineering* 14, 117-136.
- [16] Soedigdo, I.R., Lambrakos, K.F., Edge, B.L., 1999. Prediction of hydrodynamic forces on submarine pipelines using an improved Wake II Model. *Ocean Engineering* 26, 431-462.
- [17] Sabag, S.R., Edge, B.L., Soedigdo, I.R., 2000. Wake II model for hydrodynamic forces on marine pipelines including waves and currents. *Ocean Engineering* 27, 1295-1319.
- [18] Aristodemo, F., Tomasicchio, G.R., Veltri, P., 2011. New model to determine forces at on-bottom slender pipelines. *Coastal Engineering* 58, 267-280.
- [19] Aristodemo, F., Tomasicchio, G.R. e Veltri, P., 2006. Modelling of periodic and random wave forces on submarine pipelines. *Proc. of 25th OMAE Conf.*, Hamburg, pp. 1-10.
- [20] Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E., Carlson H., Cartwright D.E., Enke K., Ewing J.A., Gienapp H., Hasselmann D.E., Kruseman P., Meerburg A., Miller P., Olbers D.J., Richter K., Sell W., e Walden H., 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), A(8) (Nr. 12), p.95.
- [21] Bryndum M. B., Jacobsen, V., Brand, L. P. (1983). Hydrodynamic forces from wave and current loads on marine pipelines. *Offshore Technology Conference*, Houston, Paper OTC 4454, 95-102.
- [22] Dean, R.G., 1976. Methodology for evaluating suitability of wave and wave force data for determining drag and inertia coefficients. *Proc. of 1st International Conference on Behavior of Offshore Structures*, Trondheim, pp. 40-64.
- [23] Wolfram, J., Naghipour, M., 1999. On the estimation of Morison force coefficients and their predictive accuracy for very rough circular cylinders. *Applied Ocean Research* 21, 311-328.
- [24] Bearman, P.W., Chaplin, J.R., Graham, J.M.R., Kostense, J.K., Hall P.F., Klopman, G., 1985. The loading on a cylinder in post-critical flow beneath periodic and random waves. *Proc. of 4th International Conference on Behavior of Offshore Structures*, Delft, pp. 213-225.
- [25] Klopman, G., Kostense, J.K., 1989. The loading on a vertical cylinder in random waves at high Reynolds numbers. *Proc. of NATO Advanced Workshop on Water Wave Kinematics*, Molde, pp. 697-700.
- [26] Piersol, W.J., Holmes, P., 1965. Irregular wave forces on piles. *Journal of Waterways and Harbours Division*, 91, WW4, 1-10.
- [27] Boccotti, P., Arena, F., Fiamma, V., Barbaro, G., 2012. Field experiment on random wave forces acting on vertical cylinders. *Probabilistic Engineering Mechanics* 28, 39-51.

Distribuzione e densità di micro litter nel Mare di Sardegna in relazione alle formazioni di strutture di meso-scala

Fabrizio Carmelo Serrentino
IAMC-CNR
Napoli, Italy
fabrizioserrentino@gmail.com

Giuseppe Andrea De Lucia
National Research Council IAMC-CNR
Oristano, Italy
giuseppe.delucia@cnr.it

Sommario - Tale progetto ha previsto, dopo un periodo di formazione presso l'istituto IAMC-CNR di Napoli, un successivo periodo di stage svolto, in questo caso, presso la sede dell'IAMC-CNR di Oristano. I dati del presente lavoro sono stati acquisiti durante la campagna oceanografica denominata "Ichnussa 2014" nel Mare di Sardegna, sulla nave *Urania* del CNR attraverso l'utilizzo di una speciale rete planctonica *manta trawl*. I campioni d'acqua delle varie stazioni di campionamento sono stati analizzati al microscopio per rilevare la densità di microlitter (ML) allo scopo di correlarla alla presenza/assenza di strutture di mesoscala e considerando i relativi meccanismi di trasporto orizzontale e verticale che queste innescano. Le strutture sono state individuate grazie all'utilizzo di modelli oceanografici su dati altimetrici immagini satellitari e circolazione superficiale. I dati preliminari confermano una certa relazione tra accumulo di ML e presenza di strutture di mesoscala nel Mediterraneo occidentale. Il valore della densità media di ML calcolata nel Mare di Sardegna risulta di 0,321 items/m³.

Keywords—Marine litter; Strutture a mesoscala; Marine Strategy; Mare di Sardegna; Impatto ambientale

INTRODUZIONE

A. Circolazione generale nel Mediterraneo occidentale

Il bacino *Algerino*, grazie alle sue caratteristiche geografiche ha una circolazione dominata dall'interazione tra acque meno dense di recente origine atlantica e acque più dense. La caratteristica principale della sua circolazione è la *Corrente Algerina* (AC), il cui flusso lungo lo *slope* porta l'acqua atlantica modificata (MAW) in arrivo da *Gibilterra*, dal bacino occidentale a quello orientale del Mediterraneo [1]. A causa dell'instabilità e della complessità dei processi idrodinamici, l'AC può sviluppare meandri, celle di *upwelling* e un vortice *anticiclonico* interno lungo la *scarpata* continentale. Di solito, si sviluppa una circolazione *ciclonica* superficiale e di breve durata [2] mentre i meandri sono di per sé la parte più energetica della struttura a mesoscala. I vortici *anticiclonici*, invece, possono rapidamente crescere fino a 50-100 km di diametro e derivare verso est lungo lo *slope* percorrendo pochi km al giorno. In alcuni casi, sono associati ad una più grande e

profonda circolazione *anticiclonica* [3]. Tali eventi energetici sono condizionati dalla topografia all'ingresso del *Canale di Sardegna* e possono derivare verso il mare aperto dove i vortici sia superficiali che di acque profonde si fondono e diventano grandi *eddies anticiclonici* (100-200 km di diametro). Successivamente, essi tendono a spostarsi di nuovo verso ovest, descrivendo quindi un grande circuito antiorario. Queste strutture di mesoscala come l'*Algerian Anticyclonic Eddy* (AE) sono state osservate già nel 1980 con immagini satellitari a infrarossi [4] e possono durare per molti mesi o addirittura anni [5]. Esse svolgono un ruolo importante nella configurazione della circolazione generale, della distribuzione delle masse d'acqua, dei parametri biogeochimici e di conseguenza degli ecosistemi nel bacino occidentale del Mediterraneo [6]. Il Mare di Sardegna è fortemente influenzato dalla circolazione a meso-scala generale, caratterizzata principalmente da AE e episodicamente influenzata da avvezione indotta dal vento sulle acque costiere [7]. In letteratura è documentato che a grande scala le zone di accumulo di detriti possono essere influenzate da questi processi di meso-scala quali correnti superficiali, fronti, spirali e zone di convergenza. Nei processi locali, invece, gli accumuli detritici possono essere correlati con *inflow* fluviali, eventi di tempesta, zone di pesca, vie navigabili, zone turistiche e la vicinanza ai centri urbani [8]. Nel Mar Mediterraneo occidentale le variazioni altimetriche della superficie marina sono il risultato combinato dell'effetto stagionale del forzante atmosferico e dell'attività di circolazione a mesoscala, in particolare nei bacini di *Alboran* e *Algerino*, così come le variazioni del bilancio di massa di acqua tra cui le variazioni di flusso attraverso gli Stretti di *Gibilterra* e di *Sicilia* [9]. Lo strato superficiale del Mar Mediterraneo occidentale è principalmente composto da acqua di origine Atlantica che segue una circolazione ciclonica. L'*Atlantic Water* (AW) entra nel Mar Mediterraneo attraverso lo Stretto di *Gibilterra* e si estende sopra le acque locali più salate. La AW scorre verso est, formando la corrente algerina, lungo la costa nord-africana fino al Canale di *Sardegna* [1]. Più a est, il flusso di AW si divide in due rami, il primo si dirige verso il bacino tirrenico e il secondo verso lo Stretto di

Sicilia [10]. La AC diventa instabile ad est del Meridiano di Greenwich e genera meandri e *eddies* che possono sporadicamente deviare il flusso di AW a nord. Questi vortici *anticiclonici* possono raggiungere un diametro di circa 130 km interagendo con l'intera AC. Nella parte occidentale del Canale di Sardegna, [11] è stato confermato da osservazioni in situ e di telerilevamento che vortici *anticiclonici* interagiscono fortemente con l'ambiente circostante e con le correnti medie, dalla superficie fino agli strati profondi. Il bacino Algerino, dunque, è caratterizzato da una grande attività a *mesoscala* che funge da zona cuscinetto tra l'ingresso di AW del flusso atlantico tramite lo Stretto di Gibilterra e la AW che scorre verso est attraverso il Canale di Sardegna [1].

B. Strutture di Mesoscala

In mare, il movimento del fluido crea zone di convergenza e di divergenza di acqua con successivi movimenti di tipo verticale della colonna d'acqua in affondamento o in risalita. Questi movimenti, dunque creano degli abbassamenti o innalzamenti relativi della *sea level* (SL) in termini di cm che vengono "letti" dai modelli o dalle immagini altimetriche satellitari. In particolare, la struttura di tipo ciclonico (Fig.1) genera una circolazione antioraria con una divergenza al nucleo della cella e un abbassamento relativo della SL con conseguente risalita di acqua più profonda (zona di *upwelling*); nella struttura anticiclonica (Fig.1) la circolazione è di tipo oraria con una convergenza al nucleo della cella e un innalzamento relativo della SL con conseguente affondamento dell'acqua superficiale (zone di *downwelling*).

C. Marine Litter

Le materie plastiche sono prodotte dalla conversione di composti chimici primari, generalmente dal petrolio, gas naturale e carbone. Dopo la conversione, le plastiche diventano base primaria di materiali per migliaia di manufatti [12]. Il *Litter* in ambiente marino arreca numerosi problemi che incidono negativamente soprattutto sullo sviluppo costiero. Il ML è definito come materiale solido di origine umana che viene rigettato in mare o lo raggiunge attraverso corsi d'acqua, sbocchi domestici o industriali [13]. Invece, il *beach litter* porta ad una serie di effetti negativi sia per la salute umana sia per la vita selvatica sulle spiagge. La prevenzione alla fonte è una delle strategie più importanti per consentire la riduzione dell'inquinamento da *litter*. La produzione mondiale (Fig.2) di materie plastiche tra il 1950 e il 2009 ha mostrato un incremento medio annuo del 9% passando da 1,5 milioni di tonnellate di plastica alle 230 milioni di tonnellate del 2009 [14].

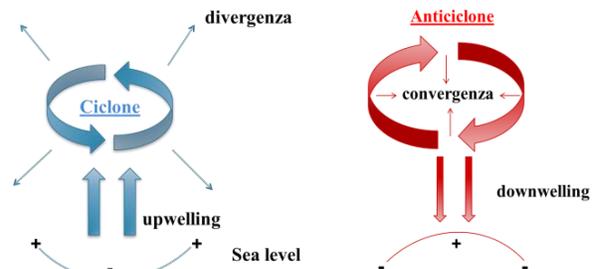


Fig. 1. Schema di circolazione ciclonica e anticiclonica

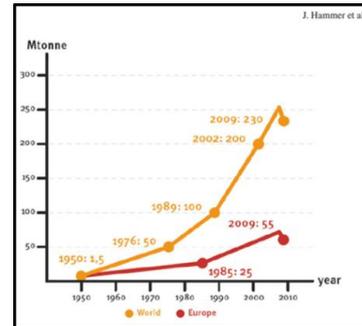


Fig. 2. Produzione di plastica dal 1950 al 2009 in milioni di tonnellate (PEMRG 2010).

La presenza ubiquitaria di detriti di origine antropica nell'ambiente marino è ormai riconosciuta come uno delle forme di inquinamento più pervasivo che interessa gli oceani di tutto il mondo [15]. Circa il 18% dei rifiuti plastici trovati nell'ambiente marino è attribuito al settore della pesca, anche l'acquacoltura può dare un contributo significativo di detriti plastici negli oceani [16]. Il resto è derivato in gran parte dalle fonti di base a terra, tra cui la plastica spiaggiata. I *pellet* di resina, componente base della plastica, si trovano spesso negli oceani per cause accidentali: perdite durante il trasporto su cargo o tramite *run-off* dalla lavorazione [17]. L'accumulo di detriti è stato identificato in tutti i principali vortici oceanici [18] e nonostante un crescente riconoscimento del problema, quantità crescenti di rifiuti si trovano sul fondo del mare, galleggianti sulla superficie dell'oceano o spiaggiati sulle coste di tutto il mondo. Lungi dall'essere un problema estetico, questa massiccia invasione di ML costituisce una minaccia ambientale ed economica che, insieme ad altre questioni fondamentali globali come la pesca eccessiva, il riscaldamento globale e l'acidificazione degli oceani contribuisce alla perdita di biodiversità degli ecosistemi marini e dei beni e servizi che questa fornisce. Ci sono forti interazioni negative tra i rifiuti marini e gli organismi marini per 663 specie diverse [19]. Questo dato è in aumento del 40% rispetto all'ultima revisione. L'ingestione di detriti galleggianti da mammiferi marini, uccelli marini, tartarughe, pesci e altri animali è un fenomeno in crescente aumento [20]. Ad esempio, in un caso studio su 91 esemplari di *Caretta caretta*, il *litter* ritrovato nei *fecal pellet* è stato del 14% circa; questo studio mette in evidenza per la prima volta, l'incidenza del *litter* sulle tartarughe nel Mar di Sardegna [21]. Inoltre, è stato evidenziato che i detriti, andando alla deriva, fungono da vettore per la dispersione di

specie marine invasive per la fioritura di alghe, batteri patogeni e contaminanti organici e inorganici. Le ripercussioni socio-economiche di rifiuti marini includono danni a impianti di attrezzi da pesca, a impianti di acquacoltura e inoltre rappresentano una minaccia alla sicurezza della navigazione [22] e una perdita di reddito per l'industria del turismo in relazione all'inquinamento di spiagge e coste con relativo aumento del costo delle attività di bonifica per i governi locali. Le plastiche sono i detriti più abbondanti campionati nel *Mar Mediterraneo*, pari all'82% di tutti gli oggetti artificiali, confermando, in questo modo, la schiacciante presenza di residui di plastica sulla superficie marina [20]. La presenza ubiquitaria di detriti di origine antropica in ambiente marino è ormai riconosciuta come uno dei maggiori problemi che interessano gli oceani di tutto il mondo [23]. Il ML permea gli ecosistemi marini di tutto il mondo [24] e viene trasportato dalle correnti oceaniche, dai venti, dal deflusso fluviale e dalla deriva [25] e può essere trasportato per lunghe distanze in zone remote [26]. Tuttavia, mentre i rifiuti di plastica si possono trovare in tutto l'ambiente marino, la distribuzione di questi detriti è eterogenea [15]. La galleggiabilità e l'elevata longevità delle materie plastiche, combinata con il loro uso diffuso, sono probabilmente le cause della loro posizione dominante tra detriti galleggianti campionati [27]. Sono stati segnalati incidenti con rifiuti marini per 663 specie [28] di cui circa 370 sono state danneggiate da ingestione di ML con un incremento di oltre il 40% rispetto all'ultimo report del 1997. Il carico globale di plastica sulla superficie dell'oceano aperto è stata stimata essere dell'ordine di decine di migliaia di tonnellate molto meno del previsto [29], infatti le osservazioni mostrano che grandi quantità di frammenti di plastica, con dimensioni che variano dal micron a qualche millimetro, non compaiono negli ammassi galleggianti censiti [30]. La quantità di plastica che galleggia nel mare e la sua destinazione finale sono ancora sconosciute, in quanto le acque di superficie non sono la destinazione finale. La nano-frammentazione, la predazione, le incrostazioni o la deposizione sulle spiagge sono stati proposti come possibili meccanismi di rimozione dalla superficie [31]. La plastica mancante si trova da qualche parte, in mezzo all'oceano, in profondità, ingerita dalla fauna marina, oppure ridotta a particelle così microscopiche da non poter essere recuperate con le reti. L'effetto che questi frammenti di plastica avranno sulle profondità oceaniche, l'ecosistema più ampio e meno esplorato del pianeta, è ancora un mistero [29]. La maggior parte dei materiali polimerici che entrano nell'ambiente sono sottoposti a degradazione, che è causata da una combinazione di fattori, tra cui l'*ossidazione termica*, la *foto-ossidazione*, la *biodegradazione* e l'*idrolisi* [32]. Le microplastiche sono generate dalla continua frammentazione di grandi oggetti, principalmente dovuta all'azione della radiazione solare [33]. I rifiuti plastici si ritrovano ovunque in ambiente marino e costiero dai poli all'equatore, dalle coste continentali alle piccole isole remote; poiché essi viaggiano su lunghe distanze spinti dalle correnti e dai venti oceanici [23]. Oltre all'assorbimento dall'esterno, nella matrice plastica sono contenuti vari additivi di particolare rischio come coloranti,

stabilizzatori UV, agenti opacizzanti, ritardanti di fiamma *bromurati*, plastificanti *ftalati* e anti-microbica agenti *bisfenolo* [12]. Durante il processo di degradazione i composti chimici presenti nella matrice plastica sfuggono e vengono trasportati a lunga distanza [12]. Le plastiche introdotte nell'ambiente si trovano flottanti sulla superficie del mare, affondate o spiaggiate. Le materie plastiche sembrano accumularsi principalmente nei grandi *gyres* oceanici spinti dalle correnti. Per avere informazioni sulle origini geografiche delle zone sorgente dei rifiuti e quindi realizzare le necessarie azioni di prevenzione dell'inquinamento, è indispensabile eseguire regolarmente campionamenti e analizzare i risultati in relazione alle condizioni meteorologiche locali ed alla geomorfologia delle coste. I metodi di campionamento devono essere adattati e armonizzati per tener conto delle differenze regionali, ad esempio il tipo di costa o le correnti prevalenti nelle aree *offshore*. Il ML persisterà in mare per anni, decenni e secoli, pertanto, la sola valutazione delle fonti non sarà sufficiente, ma è necessario il monitoraggio costante e a lungo termine in ambiente marino per capire le tendenze [34].

D. *Marine litter nella Marine Strategy*

Ci sono stati numerosi cambiamenti di origine antropica sul nostro pianeta nel corso dell'ultimo mezzo secolo. Uno dei cambiamenti più evidenti è l'ubiquità e l'abbondanza di rifiuti nell'ambiente marino. La direttiva quadro sulla strategia marina dell'UE [33], stabilisce un quadro all'interno del quale gli Stati membri dell'Unione europea si adoperano per raggiungere o mantenere un buono stato ecologico (GES) entro il 2020. Il GES si basa su 11 descrittori qualitativi indicati nella direttiva europea della *Marine strategy* (MSFD).

Il descrittore 10 (D10) si riferisce ai rifiuti marini. Per sostenere tale direttiva, la Direzione generale per l'Ambiente (CE), su richiesta della Comunità europea, ha istituito un sottogruppo tecnico per i rifiuti marini (STG ML) sotto il gruppo di lavoro sulla GES. Il ruolo di TSG ML è quello di sostenere gli Stati membri fornendo un *background* scientifico e tecnico per l'attuazione dei requisiti MSFD per quanto riguarda la D10. Iniziato nel 2011, TSGML offre suggerimenti su tecniche per l'attuazione dei requisiti MSFD per i rifiuti marini. Essa riassume le informazioni disponibili sugli approcci di monitoraggio allo scopo di prevenire ulteriori ingressi di *litter* riducendone la quantità totale nell'ambiente marino. Il TSGML individua inoltre le esigenze di ricerca, le priorità e le strategie a sostegno dell'attuazione della D10; il suo lavoro si concentra anche su la specificazione dei metodi di monitoraggio sviluppandone dei protocolli adeguati in relazione anche ai costi associati.

I. MATERIALI E METODI

E. *Manta Trawl*

La *manta trawl* è una particolare rete planctonica usata per i campionamenti di ML in acqua di mare (Fig.3).

Il vantaggio principale è del suo utilizzo e che grandi volumi di acqua passano attraverso setacci o reti in contenitori e

successivamente vengono analizzate le microplastiche intrappolate al suo interno.

La rete ha una dimensioni delle maglie di 333 μm e una lunghezza di 6 m e la stima del volume di acqua campionato viene misurata dal flussimetro in modo da rendere le misure confrontabili e standard. Il campionamento viene eseguito dopo una durata minima di calma dello stato del mare in modo che non vi è alcun errore nelle misure dipendente dai detriti che sono stati miscelati nella colonna d'acqua da recenti tempeste.

Viene usata questa particolare rete a strascico (Fig. 4) come tecnica di campionamento per quantificare l'abbondanza e la distribuzione di microplastiche nel *Mare di Sardegna* e la loro correlazione con la presenza di strutture oceanografiche di *meso-scala* e i relativi meccanismi di trasporto. Un lavoro simile del 2013 nel *Mare di Sardegna* ha evidenziato un valore medio di microplastica di 0,15 articoli/ m^3 paragonabile ai livelli riscontrati in altre zone del *Mediterraneo* [34]. Per ogni campione le micro-particelle in plastica vengono separate dal *plankton* e da altre sostanze organiche quindi ordinate e misurate tramite uno *stereoscopio* (Fig.4).



Fig. 3. Campionamenti con la manta trawl durante la campagna oceanografica "Ichnussa 2014"



Fig. 4. Campionamenti con la manta trawl durante la campagna oceanografica "Ichnussa 2014"



Fig. 5. Sorting in laboratorio, modello, AxioCam ERc5s per l'analisi delle immagini, Carl Zeiss MicroImaging GmbH, Germania.

F. Campagna oceanografica

I campionamenti sono stati svolti durante la campagna oceanografica "Ichnussa 2014" con la nave "Urania". La

nave oceanografica *Urania* (Fig.6) è gestita dal *Consiglio Nazionale delle Ricerche* (CNR). Ha un'autosufficienza di 45 giorni e può ospitare un massimo di 36 uomini tra personale scientifico ed equipaggio. La gamma di velocità per il rilevamento continuo varia tra 1.5 e 11 nodi.

Il sistema di propulsione è costituito da due eliche a passo variabile azionate da due motori da 1000 KW e da un'elica prodiera da 220 KW. La nave ospita laboratori per analisi, campionamento geologico, laboratori chimici e radiologici e consente l'elaborazione di dati di navigazione, geofisici e acquisiti con il *R.O.V.* e con la sonda *multiparametrica*. Gli strumenti geofisici comprendono un *profilatore Chirp Datasonic*, uno *Sparker*, un *profilatore Sub-Bottom* da 3.5 KHz, un *Uniboom*, un *sonar a scansione laterale* da 100 - 500 KHz e un *magnetometro*. Per quel che riguarda i sistemi di campionamento sono disponibili campionatori a gravità ed a pistone, *box corer*, *benne* e *draghe*. E' inoltre possibile utilizzare sonde *multiparametriche* e *multicampionatori*, *CTD*, dispositivi per analisi biologiche e *R.O.V.*



Fig. 6. Nave da ricerca del CNR "Urania"

G. Criteri di campionamento e modelli di circolazione

Le stazioni di campionamento (fig.7) sono state scelte in funzione delle previsioni dei modelli circa l'individuazione delle strutture. I cerchi in giallo indicano la posizione dei due vortici considerati, si tratta del vortice AE presente a largo delle coste *Algerine* e del più piccolo vortice anticiclonico a largo dell'*Asinara*.

Le previsioni delle posizioni delle strutture di mesoscala sono state individuate utilizzando modelli *forecast* di *surface elevation* (Fig.8), di circolazione superficiale (Fig.9) e immagini altimetriche satellitari (Fig.12) che mostrano la *Sea Surface Temperature* (SST).

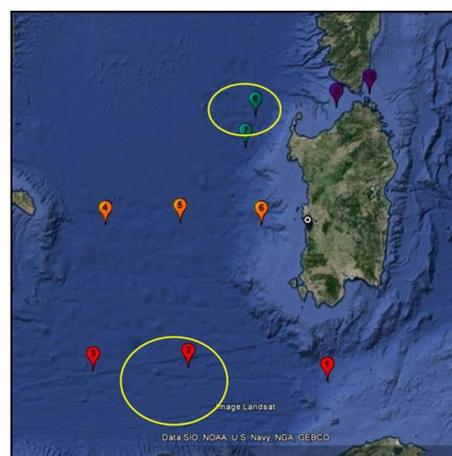


Fig. 7. Stazioni di campionamento

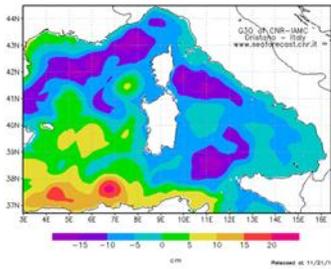


Fig. 8. Surface elevation – seaforecast.cnr.it

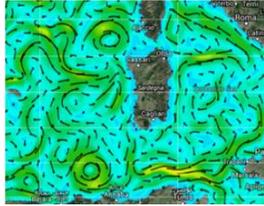


Fig. 9. Circolazione superficiale Sea Condition-Tessa

II. RISULTATI

Da questi primi risultati, tenendo conto dell'esiguo dataset e dei valori molto casuali delle tre repliche per stazione, si possono ipotizzare delle indicazioni di tipo qualitativo in forma speculativa. Il grafico (Fig.10) descrive l'abbondanza assoluta di ML nelle varie stazioni campionate, si nota come la 7, 2, 9 e 8 risultano essere quelle più abbondanti; mentre le stazioni 3 e 5 risultano avere un minore numero di ML con rispettivamente 124 e 28 items.

La massima densità in termini di $items/m^3$ (Fig. 11) si misura nelle stazioni 7 e 9 rispettivamente con 0.766 e 0.566, confermando queste stazioni come quelle con i valori più elevati e quelle con una minore densità sono la 3 e la 5 con rispettivamente 124 e 28 items.

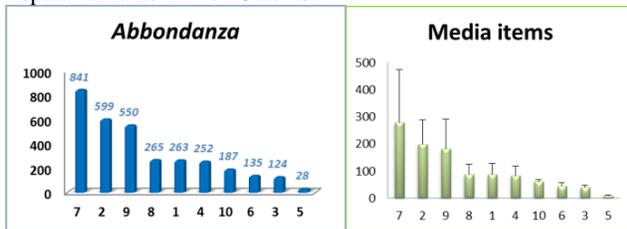


Fig. 10. Abbondanza assoluta in num. di items (sinistra) e Media delle stazioni di campionamento (destra)

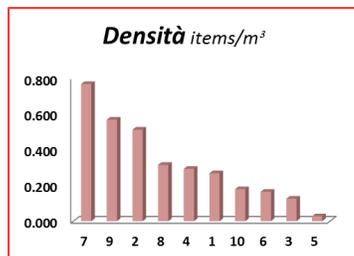


Fig. 11. Densità delle stazioni di campionamento

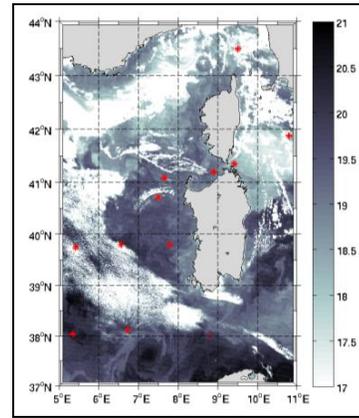


Fig. 12. Stazioni di campionamento su cartina SST (figura a cura del Dott. A. Oliva)

I valori medi dell'abbondanza delle microplastiche sul totale delle 10 stazioni è 125,4 numero di items mentre la media di densità sul totale delle stazioni è di $0,321 \text{ n. items}/m^3$. Si nota una correlazione con la presenza/assenza dei vortici dunque un ruolo di questi nel trasporto del litter su lunghe scale temporali e su ampie distanze, infatti le stazioni con un maggiore abbondanza di ML risultano essere quelle che si trovano nella zona delle strutture anticicloniche rilevate.

III. CONCLUSIONI

I dati preliminari confermano una certa relazione tra zone di accumulo di ML e presenza di strutture di mesoscala nel Mediterraneo occidentale. Il valore della densità media di ML è di $0.16 \text{ items}/m^3$, correlabile con il valore di $0,15 \text{ items}/m^3$ riscontrato nel 2013 nel Mare di Sardegna al largo di Oristano [34]. Più elevato, invece, risulta essere il valore della densità media di ML calcolata sull'intero dataset con un valore di $0,321 \text{ items}/m^3$. Durante la campagna oceanografica sono stati individuati Gyre a rotazione anticiclonica. In futuro sarebbe interessante campionare l'intera sezione di una struttura per comprendere meglio i meccanismi di accumulo e i movimenti di trasporto. Inoltre, sarebbe auspicabile ripetere questi campionamenti nel tempo, così da paragonare i vari risultati ed ottenere un andamento generale della situazione, che potrebbe confermare questa relazione tra zone di accumulo di ML e presenza di strutture di mesoscala. Altro possibile sviluppo potrebbe essere quello di ampliare i campionamenti in altri settori del bacino del Mediterraneo, così da avere una visione più completa e approfondita del problema.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' – TESSA.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] C. Millot, 1985; "Some features of the Algerian current." *Dynamics of Atmospheres and Oceans* Volume 15, Issues 3–5, April 1991, Pages 179–214
- [2] C. Millot, 1999; "Circulation in the western Mediterranean Sea." *Journal of Marine Systems* 20 1999 423–442 Ž .
- [3] C. Millot, 1994; "Models and data: a synergetic approach in the western Mediterranean Sea." *Ocean Processes in Climate Dynamics: Global and Mediterranean Examples* NATO ASI Series Volume 419, 1994, pp 407–425
- [4] I. Taupier-Letage, C. Millot, 1988; "Surface circulation in the Algerian Basin during 1984." *Earth-Science Reviews* Volume 27, Issue 3, May 1990, Pages 203–219
- [5] I. Puillat, I. Taupier-Letage, C. Millot, 2002; "Algerian Eddies lifetime can near 3 years." *Journal of Marine Systems* Volume 31, Issue 4, January 2002, Pages 245–259
- [6] S. Ruiz a, J. Font, M. Emelianov, J. Isern-Fontanet, C. Millot, J. Salas, I. Taupier-Letage, 2001; "Deep structure of an open sea eddy in the Algerian Basin." *Journal of Marine Systems* Volumes 33–34, 1 June 2002, Pages 179–195
- [7] A. Ribotti, I. Puillat, R. Sorgente, S. Natale, 2004; "Mesoscale circulation in the surface layer off the southern and western Sardinia island in 200–2002." *Chemistry and Ecology* Volume 20, Issue 5, 2004
- [8] G. Suaria, S. Aliani 2014; "Floating debris in the Mediterranean Sea." *Marine Pollution Bulletin* Volume 86, Issues 1–2, 15 September 2014, Pages 494–504
- [9] C. Bouzinac, J. Font, J. Johannessen, 2003; "Annual cycles of sea level and sea surface temperature in the western Mediterranean Sea". *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012) 108.C3 (2003).
- [10] Bethoux J.-P., 1980. "Mean water fluxes across sections in the Mediterranean Sea, evaluated on the basis of water and salt budgets and of observed salinities." *Oceanologica Acta* 3.1 (1980): 79–88.
- [11] C. Bouzinac, J. Font, C. Millot, 1999; "Hydrology and currents observed in the Channel of Sardinia during the PRIMO-1 experiment from November 1993 to October 1994." *Journal of Marine Systems* 20.1 (1999): 333–355.
- [12.] R.C. Thompson , C.J. Moore, F. S. Vom Saal, S. H. Swan, 2009b; "Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 364.1526 (2009): 2153–2166.
- [13] Williams, M., W. Eugster, E.B. Rastetter, J.P. McFadden, F.S. Chapin, III. 2000; "The controls on net ecosystem productivity along an arctic transect: a model comparison with flux measurements." *Global Change Biology* 6.S1 (2000): 116–126.
- [14] R. Gioia, K. C. Jones, R. Lohmann, L. Nizzetto, J. Dachs, 2008; "Field- derived Henry's law constants for polychlorinated biphenyls in oceanic waters." *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012) 115.C5 (2010).
- [15] C. J. Moore, 2008; "Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat." *Environmental research* 108.2 (2008): 131–139.
- [16] I.A. Hinojosa, M. Thiel. 2009; "Floating marine debris in fjords, gulfs and channels of southern Chile." *Marine pollution bulletin* 58.3 (2009): 341–350.
- [17] Ogata, Y., Takada, H., Mizukawa, K., Hirai, H., Iwasa, S., Endo, S., Mato, Y., Saha, M., Okuda, K., Nakashima, A., Murakami, M., Zurcher, N., Boonyatumanond, R., Zakaria, M.P., Dung, L.Q., Gordon, M., Miguez, C., Suzuki, S., Moore, C., Karapanagiotis, H.K., Weerts, S., McClurg, T., Burres, E., Smith, W., Van Velkenburg, M., Lang, J.S., Lang, R.C., Laursen, D., Danner, B., Stewardson, N., Thompson, R.C., 2009; "International pellet watch: global monitoring of persistent organic pollutants (POPs) in coastal waters." *Marine pollution bulletin* 58.10 (2009): 1437–1446.
- [18] Moore, C.J., Moore, S.L., Leecaster, M.K., Weisberg, S.B., 2001; " A comparison of plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre." *Marine Pollution Bulletin* 42.12 (2001): 1297–1300.
- [19] Convention on Biological Diversity (CBD), 2012. Parks Durban+ 5 The international journal for protected area managers 17.2 (2010): 35–42.
- [20] Derraik, J.G.B., 2002. "The pollution of the marine environment by plastic debris: a review." *Marine pollution bulletin* 44.9 (2002): 842–852.
- [21] A. Camedda, S. Marra, M. Matiddi, G. Massaro, S. Coppa, A. Perilli, A. Ruiu, P. Briguglio, G. A. de Lucia, 2014; "Interaction between loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) and marine litter in Sardinia (Western Mediterranean Sea)". *Marine environmental research* 100 (2014): 25–32.
- [22] Sheavly S.B. (2005). "Sixth Meeting of the UN Open-ended Informal Consultative Processes on Oceans & the Law of the Sea. Marine debris – an overview of a critical issue for our oceans."
- [23] UNEP (United Nations Environment Programme), 2005. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. 2007.
- [24] Ryan, P.G., Moore, C.J., van Franeker, J.A., Moloney, C.L., 2009. "Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 364.1526 (2009): 1999–2012.
- [25] Barnes D. K. A., Galgani F., Thompson R. C., Barlaz M., 2009; "Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 364.1526 (2009): 1985–1998.
- [26] Ivar do Sul et al., 2009, J.A. Ivar do Sul, A. Spengler, M.F. Costa, 2009; "Here, there and everywhere, small plastic fragments and pellets on beaches of Fernando de Noronha." *Marine Pollution Bulletin*, 58 (2009), pp. 1236–1238
- [27] Viola Fischera, Nikolaus O. Elsnner, Nils Brenke, Enrico Schwabe, Angelika Brandt. "Plastic pollution of the Kuril–Kamchatka Trench area (NW pacific)." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 111 (2015): 399–405.
- [28] Coad, Lauren, Burgess, Neil David, Fish, Lucy, Ravillious, Corinna, Corrigan, Colleen, Pavese, Helena, Granziera, Arianna, Besancon, Charles "Progress towards the Convention on Biological Diversity terrestrial2010 and marine 2012 targets forprotected area coverage." *Parks Durban+ 5 The international journal for protected area managers* 17.2 (2010): 35–42.
- [29] A. Cózar, F. Echevarría, J. I. González-Gordillo, X. Irigoien, B. Úbeda, S. Hernández-Leónd, Á. T. Palma, S. Navarro, J. García-de-Lomas, A. Ruiz, M. L. Fernández-de-Puelles, C. M. Duarte, 2014; "Plastic debris in the open ocean". *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111.28 (2014): 10239–10244.
- [30] Andrady, 1994; "Assessment of environmental biodegradation of synthetic polymers: a review" *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews* 34.1 (1994): 25–76.
- [31] Andrady, 2010; "Measurement and Occurrence of Microplastics in the Environment. Presentation at the 2nd Research Workshop on Microplastic Debris." *Marine Pollution Bulletin* 62.8 (2011): 1596–1605.
- [32] F. Galgani, G. Hanke, S. Werner, L. De Vrees, 2013; "Marine litter within the European Marine Strategy Framework Directive." *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil* 70.6 (2013): 1055–1064.
- [33] MSFD, 2008/56/CE; "Marine Strategy Framework Directive." A contribution to the application of European Union's Marine Strategy Framework Directive (MSFD). Part I. Spatial distribution." (2010).
- [34] G. A. De Lucia, I. Caliani, S. Marra, A. Camedda, S. Coppa, L. Alcaroe, T. Campani, M. Giannetti, D. Coppola, A. Cicero, C. Panti, M. Bains, C. Guerranti, L. Marsili, G. Massaro, M. C. Fossi, M. Matiddi, 2014; "Amount and distribution of neustonic micro-plastic of the western Sardinian coast (Central-Western Mediterranean Sea)." *Marine environmental research* 100 (2014): 10–16.

Individuazione di eventi grandigeni nell'area urbana di Napoli attraverso misure radar in banda X

Marzia Moccia
Istituto per l'Ambiente Marino Costiero
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Napoli, Italia
marziamoccia.g@gmail.it

Vincenzo Capozzi, Giorgio Budillon
Dipartimento di Scienze e Tecnologie
Università degli Studi di Napoli "Parthenope"
Napoli, Italia
vincenzo.capozzi@uniparthenope.it
giorgio.budillon@uniparthenope.it

Sommario—L'area urbana di Napoli è spesso teatro di forti eventi temporaleschi che si manifestano in maniera frequente durante tutto l'arco temporale annuale. Le precipitazioni, talvolta, specialmente durante la stagione estiva, assumono un carattere grandinigeno, causando rilevanti danni alla comunità agricola ed inficiando la sicurezza marittima e aerea. Lo scopo del presente lavoro è quello di sviluppare un indice di probabilità di occorrenza della grandine (POH), che possa essere utilizzato ai fini di una migliore gestione dei rischi derivanti dalla caduta di grandine. A tale scopo, sono stati analizzati 37 eventi temporaleschi verificatisi tra Aprile 2012 e Dicembre 2014, utilizzando le misure di riflettività acquisite da un radar meteorologico in banda X in singola polarizzazione e i dati raccolti in situ. Al fine di identificare la grandine all'interno delle nubi temporalesche, è stata adottata una metodologia basata sul VIL-Density (VLD), un prodotto derivante esclusivamente dalle acquisizioni del radar. L'affidabilità di tale algoritmo è stata testata ricorrendo ad un'analisi statistica basata su una tabella di contingenza 2x2. I risultati ottenuti hanno consentito di determinare una soglia ottimale di VLD (pari a 2.6 g m^{-3}), al di sopra della quale vi è un'elevata probabilità di riscontrare grandine. L'indice POH è stato testato per due eventi temporaleschi, uno verificatosi il 26 Maggio 2012 ed uno occorso il 16 Dicembre 2014: in entrambi i casi, esso si è mostrato particolarmente affidabile nell'identificazione del nucleo di precipitazione grandinigena.

Keywords—*radar meteorologico, eventi grandinigeni, VIL Density, POH.*

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, lo studio di fenomeni temporaleschi e grandinigeni ha assunto particolare rilievo nell'ambito della comunità scientifica. Ai fini delle attività di ricerca, si è rivelato particolarmente utile l'impiego dei radar meteorologici, i quali forniscono una stima dell'intensità di precipitazione su aree relativamente vaste. La Regione Campania, sebbene sia esposta, per motivi geografici ed

orografici, ad un elevato rischio idrogeologico, è stata sprovvista di un radar meteorologico fino al Novembre 2011, quando l'Università degli Studi di Napoli "Parthenope" ha installato un sistema-radar in singola polarizzazione operante in banda X, denominato WR-10X. Quest'ultimo è posto nella zona collinare di Napoli (40.8438°N , 14.2385°E , 280 m slm) e consente di monitorare le precipitazioni atmosferiche in un raggio di 72 km. Tra le possibilità offerte in ambito applicativo dal WR-10X, riveste particolare importanza quella inerente la stima della probabilità di occorrenza di fenomeni grandinigeni. Questi, infatti, soprattutto se originati da temporali estivi, sono in grado di arrecare danni alle colture e alle infrastrutture, nonché al traffico aereo e a quello marittimo. I potenziali pericoli in cui gli aerei possono incorrere per il manifestarsi di tale precipitazione riguardano soprattutto la perdita di potenza e la rottura del parabrezza; la precipitazione grandinigena, inoltre, è stata individuata come causa principale di arresti del motore in volo [1]. A tale proposito, nell'area investigata dal radar sono presenti due aeroporti: quello di Capodichino (40.883185°N , 14.286547°E), di tipo civile, e quello di Grazzanise (41.055771°N , 14.081409°E), di tipo militare. Oltre agli aeroporti, all'interno dell'area monitorata dal radar rientra l'intero golfo di Napoli; poiché ad eventi grandinigeni sono associati forti eventi temporaleschi, disporre di informazioni in merito può essere di aiuto per conoscere in maniera completa le condizioni meteomarine a cui un'imbarcazione può andare incontro lungo la sua rotta.

Un algoritmo che fornisca in real-time la probabilità di occorrenza della grandine potrebbe rivelarsi, pertanto, un valido supporto nell'ambito della gestione del traffico aereo, della sicurezza marittima nonché della comunità agricola locale. Tale informazione si andrà ad integrare con quelle già fornite dal radar del CCMMMA (Centro Campano per il Monitoraggio e la Modellistica Marina ed Atmosferica-dell'Università Parthenope), relative alla stima del tasso di

precipitazione (rain rate) e della quantità di pioggia cumulata al suolo [9].

In letteratura sono riportati numerosi metodi finalizzati all'identificazione della grandine attraverso radar meteorologici in singola polarizzazione [2]. Nel presente studio è stata adottata la tecnica della VIL-Density, la quale è stata testata per 37 manifestazioni temporalesche avvenute in Campania tra Aprile 2012 e il Dicembre 2014. Lo scopo è quello di sviluppare un indice di probabilità di precipitazione grandinigena che possa essere impiegato per emanare avvisi in real-time, utili ai fini della gestione del traffico aereo, di quello marittimo, per la comunità agricola e le infrastrutture.

I. METODI DI INDIVIDUAZIONE DELLA GRANDINE BASATI SUL RADAR METEOROLOGICO IN SINGOLA POLARIZZAZIONE

In questa sezione sono brevemente illustrati i metodi più utilizzati per l'individuazione della grandine attraverso l'utilizzo dei radar meteorologici in singola polarizzazione. Seguirà una descrizione più dettagliata della metodologia utilizzata nel presente lavoro, quella del VLD.

La prima tecnica sviluppata per distinguere la grandine dalla pioggia utilizzando un radar in singola polarizzazione è basata sul CAPPI (Plan-Position Indicator of radar reflectivity at Constant Altitude) [2]. Tale tecnica sfrutta la proiezione, su un piano parallelo al terreno, di una delle superfici coniche descritte dal radar durante la sua rotazione, ognuna caratterizzata da un valore di elevazione. L'individuazione della grandine con il metodo CAPPI avviene utilizzando una soglia di riflettività, pari a 55 dBZ [3] o di 54 dBZ [4], superata la quale scatta l'allerta grandine.

Il metodo del VMI (Vertical Maximum Intensity), invece di considerare la riflettività fissata ad una specifica quota, tiene conto del valore massimo di riflettività lungo la verticale di ogni punto. La mappa rappresentativa del VMI è quella che meglio di ogni altra si presta a descrivere la situazione meteorologica; l'individuazione della grandine avviene con le medesime soglie sopra descritte [2].

In [4] è stato sviluppato un approccio basato su una combinazione tra la riflettività del radar e la temperatura del top della nuvola. Quest'ultima è determinata da misure di radianza infrarossa acquisite da un satellite geostazionario. L'analisi della relazione funzionale che intercorre tra le due variabili appena citate ha offerto la possibilità di definire una soglia di allerta per la presenza di grandine, relativa ad un intervallo di riflettività compreso tra 36 e 53 dBZ e ad un intervallo di temperature comprese fra -11 e -55 °C. Tale metodo è risultato essere migliore rispetto all'ordinaria soglia fissata mediante il metodo CAPPI [4].

Un miglioramento nelle tecniche di *hail detection* è stato apportato dallo sviluppo dell'algoritmo NEXRAD, il quale utilizza una combinazione di sette indicatori di grandine. Tra questi, quelli più importanti sono: la presenza di un nucleo di riflettività maggiore o uguale a 50 dBZ, un nucleo compreso

tra i 5 e i 12 Km di altezza, la presenza di un echotop con altezza maggiore di 8 Km, ed una larghezza massima del nucleo, misurata in corrispondenza del suo centro, maggiore di 4 Km rispetto alla larghezza minima, misurata in corrispondenza della sua estremità inferiore. Questi sette indicatori sono combinati, utilizzando diversi pesi, per ottenere un unico indice; l'output dell'algoritmo restituisce così solo 4 possibilità: grandine, probabile grandine, no grandine, dati insufficienti [2].

Il metodo di Waldvogel per l'individuazione della grandine mette in relazione l'altezza massima alla quale si riscontra una riflettività di 45 dBZ (H_{Z45}) e la quota dello zero termico (H_0); le due informazioni sono combinate tramite il calcolo della loro differenza ($H_{Z45} - H_0$). I risultati mostrano che quando H_{Z45} ha un'altezza maggiore o uguale a 1.4 Km rispetto ad H_0 , è probabile la caduta di grandine. Tale probabilità aumenta al crescere della distanza tra il nucleo di riflettività e l'altitudine dello zero termico [5].

Il *NEXRAD severe hail algorithm* sfrutta una relazione semi-empirica tra il flusso cinetico della grandine e l'echotop a 45 dBZ di Waldevogel, ottenendo il Severe Hail Index (SHI). Quest'ultimo risulta essere più sensibile alle alte riflettività e alle temperature minori di -20 °C, condizioni per le quali è favorito l'accrescimento dei chicchi di grandine [2].

A. Vertically Integrated Liquid water (VIL)

La tecnica del VIL ha lo scopo di fornire una misura istantanea del contenuto d'acqua che risiede all'interno di uno strato atmosferico [6]. Tale metodo consiste, in prima istanza, nel convertire i dati di riflettività (Z) misurati dal radar in una stima del contenuto d'acqua equivalente (M), attraverso una funzione semi-empirica e non lineare tra M [kg m^{-3}] e Z [$\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$]:

$$M = 3.44 \times 10^{-6} Z^{4/7} \quad (1)$$

In seconda istanza, poi, i valori di contenuto di acqua liquida sono integrati verticalmente per ogni pixel.

$$VIL \equiv \int_0^{H_{\text{top}}} M \cdot dh = 3.44 \times 10^{-6} \int_0^{H_{\text{top}}} Z^{4/7} dh \quad (2).$$

I valori di VIL hanno unità di misura in kilogrammi su metro quadro (Kg m^{-2}); H_{top} è la massima altezza dello strato verticale, che varia in funzione della distanza dal radar e dell'angolo di elevazione dell'antenna. Un esempio del *modus operandi* della tecnica del VIL è mostrato in Fig. 1.

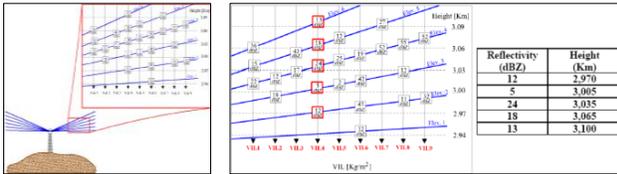


Fig. 1 Descrizione del prodotto VIL. In questo caso è presa ad esempio la colonna nella posizione 4: i valori di riflettività, convertiti prima in contenuto d'acqua equivalente, sono trasformati poi in valori di VIL integrando lungo la verticale sia le altezze sia i valori di contenuto d'acqua equivalente corrispondenti, come secondo l'eq. (1).

Alti valori di VIL sono spesso associati con il verificarsi di intensi eventi temporaleschi accompagnati da precipitazione grandinigena. Le problematiche insite nell'utilizzo del VIL riguardano, innanzitutto, la forte dipendenza dello stesso dalle caratteristiche termodinamiche della massa d'aria da cui prende origine l'evento temporalesco. I fenomeni convettivi che hanno luogo nelle masse d'aria fredda, infatti, possono dar vita a precipitazioni grandinigena associate a bassi valori del VIL; i processi convettivi che si manifestano nelle masse d'aria calda, invece, possono dar luogo ad eventi temporaleschi non grandinigeni, associati, tuttavia, ad alti valori del VIL. Il VIL, inoltre, è dipendente dall'estensione verticale di una determinata cellula temporalesca [7]; pertanto, esso può rilevarsi non adeguato nel discernere fra strutture temporalesche caratterizzate da notevole estensione verticale ma da riflettività relativamente bassa e strutture temporalesche contraddistinte da una limitata estensione verticale ma da elevata riflettività. Al fine di ovviare ad alcune delle problematiche relative all'utilizzo del VIL, in [8] è stato proposto l'utilizzo del VLD.

B. VIL-Density (VLD)

Il VLD è semplicemente definito come il VIL diviso per l'EchoTOP e moltiplicato per mille, al fine di esprimere il risultato in $g m^{-3}$. L'EchoTOP è la quota (espressa in metri) della più alta eco misurata dal radar.

$$VIL-Density = \frac{VIL}{EchoTOP} \times 1000 \quad (3)$$

Il VLD può essere utilizzato per identificare celle temporalesche caratterizzate da alta riflettività relativamente alla propria estensione verticale; queste strutture, di solito, contengono nuclei grandinigeni. Sin dal 1997, anno in cui il VLD fu utilizzato per la prima volta ai fini dell'identificazione del potenziale grandinigeno dei sistemi temporaleschi, la ricerca scientifica ha prodotto numerosi contributi tesi a migliorare le performances di tale metodologia nell'ambito della previsione meteorologica operativa. In [8] è stata proposta una soglia di avviso per eventi grandinigeni pari a $3.5 g m^{-3}$; in letteratura, tuttavia, non vi è accordo sulla effettiva bontà di tale soglia [2]. È opportuno porre in evidenza che il VLD è indicatore della presenza di grandine in quota, in quanto i radar meteorologici non sono in grado di osservare le precipitazioni che cadono in prossimità del suolo. L'aspetto appena illustrato può costituire un vantaggio per la gestione del traffico aereo, ma è spesso fonte di incongruenza fra i

valori di VLD e le osservazioni al suolo. Siffatta problematica sovrviene soprattutto nei casi in cui la quota dello zero termico è molto alta oppure nelle circostanze in cui la grandine incontra, durante la caduta, abbondanti precipitazioni liquide.

II. DATI E METODI

C. Dati Radar

Il sistema-radar installato nella città di Napoli (Fig. 2), denominato WR-10X e prodotto dalla ELDES srl, è posto sulla parte sommitale di Castel Sant'Elmo (40.8438°N, 14.2385°E, 230 m slm) e lavora alla frequenza di 9.4 GHz in singola polarizzazione. Il radar opera in maniera continua, scansionando sezioni di 360° per i seguenti angoli di elevazione: 1°, 2°, 3°, 4°, 5° e 10°. Le scansioni avvengono ad intervalli di 5 minuti e con range alternati di 36 e 72 km. L'antenna è caratterizzata da un'ampiezza del fascio di 3° e da una velocità di rotazione di 20 (°/s); la frequenza di ripetizione dell'impulso è di 800 Hz, mentre la risoluzione in range è pari a 300 m.



Fig. 2 Il radar meteorologico WR-10X installato nella città di Napoli presso il sito di Castel Sant'Elmo.

Prima di qualsiasi utilizzo operativo, il dato grezzo di riflettività radar subisce un processo di controllo di qualità. Quest'ultimo è finalizzato alla rimozione di targets non meteorologici e alla correzione di alcuni errori che inficiano la qualità del dato radar. La catena di controllo è focalizzata su alcuni errori sistematici, quali i residui di retrodiffusione da parte del terreno, la retrodiffusione prodotta dalla superficie del mare, il blocco del fascio elettromagnetico dovuto all'orografia e l'attenuazione dello stesso lungo il suo percorso [9]. Quest'ultima problematica, in particolare, risulta essere di particolare rilievo per i radar in banda X in presenza di pioggia intensa o grandine.

Una volta corretto, il dato di riflettività è stato convertito in contenuto di acqua liquida equivalente M utilizzando la (1). Successivamente, attraverso la (2), il contenuto di acqua liquida equivalente è stato integrato sulla colonna verticale, al fine di ottenere i valori di VIL. Infine, a partire dal VIL e dall'EchoTOP, sono stati determinati i valori di VLD mediante la (3).

D. Eventi grandinigeni

Al fine di determinare un indice di probabilità di occorrenza dei fenomeni grandinigeni, sono stati analizzati 37 eventi temporaleschi verificatisi nell'area monitorata dal WR-

10X fra Aprile 2012 e Dicembre 2014. Delle manifestazioni temporalesche prese in considerazione, 19 hanno prodotto grandine e 18 hanno dato luogo solo a pioggia di forte intensità. Gli eventi temporaleschi sono stati identificati mediante tre stazioni synop, i cui dati sono disponibili su base oraria. Tuttavia, a causa della limitata estensione spaziale della maggior parte degli eventi di grandine, le osservazioni synop riportano solo una piccola frazione del numero totale di eventi. Pertanto, nel dataset di osservazioni in situ sono state incluse anche le segnalazioni di grandine fornite dai meteo-amatori e dalle testate giornalistiche locali. Tali informazioni, spesso corredate da testimonianze fotografiche, si sono rivelate particolarmente utili, in quanto comprensive di indicazioni molto precise sull'orario e sul luogo in cui si sono manifestati gli eventi grandinigeni. Con l'intento di ridurre gli effetti legati a possibili mancate corrispondenze spaziali, il confronto tra i valori di VLD e i dati in situ è stato effettuato selezionando i pixel della matrice-radar che ricadono entro una distanza di 10 km dal luogo in cui è stato segnalato l'evento; tra questi, è stato considerato quello contraddistinto dal valore più alto di VLD. Per ovviare a possibili mancate corrispondenze temporali, dovute allo spostamento della cellula temporalesca fra due scansioni consecutive, è stato adottato un margine di tolleranza di 10 minuti per entrambe le estremità della finestra temporale considerata.

Degli eventi grandinigeni analizzati, fanno parte sia eventi primaverili/estivi, in cui è favorita la formazione di nubi a maggiore sviluppo verticale con precipitazione più violenta e maggior tasso di accrescimento dei chicchi di grandine, sia eventi grandinigeni autunnali/invernali, in cui le nubi sono in genere caratterizzate da un minor sviluppo verticale, con conseguente minor tasso di accrescimento dei chicchi di grandine.

La Tab. 1 mostra la distribuzione del numero di eventi temporaleschi, con e senza grandine, per determinati range di VLD. Il numero degli eventi senza grandine decresce al crescere dei valori di VLD: in particolare, per valori maggiori di 4.5 g m^{-3} sono stati registrati solo eventi temporaleschi che hanno dato luogo a grandine, mentre per valori di VLD minori di 2.5 g m^{-3} la maggior parte degli eventi osservati non ha prodotto grandine.

Tab. 1. Numero di eventi temporaleschi con o senza grandine per determinati range di VIL-Density.

| Eventi verificati tra il periodo 2012-2014 | Ranges di VIL-Density (g m^{-3}) | | | | |
|--|---|-----------|-----------|-----------|-------|
| | < 2.5 | 2.5 – 3.5 | 3.6 – 4.0 | 4.1 – 4.5 | > 4.5 |
| Numeri di eventi grandinigeni | 2 | 7 | 2 | 3 | 5 |
| Numero di eventi non grandinigeni | 10 | 4 | 2 | 2 | 0 |

E. Analisi statistica

Il confronto tra il prodotto radar VLD e le segnalazioni al suolo di grandine è volto principalmente alla determinazione

di una soglia ottimale che identifichi correttamente la quasi totalità degli eventi con un minimo di falsi allarmi. Gli eventi temporaleschi sono stati classificati mediante una tabella di contingenza 2x2 [2] e poi sottoposti ad un'analisi statistica. Quest'ultima è incentrata sul calcolo dei seguenti indici: Probability Of Detection (POD), Fals Alarm Ratio (FAR), Critical Success Index (CSI) e Probability Of Hail (POH).

Il POD è definito come:

$$\text{POD} = \frac{H}{H+M} \quad (4)$$

dove (H) è il numero di eventi di grandine caratterizzati da un valore di VLD maggiore o uguale a una certa soglia ed (M) è il numero di eventi di grandine contraddistinti da un valore di VLD minore della stessa soglia.

Il FAR è definito come:

$$\text{FAR} = \frac{F}{H+F} \quad (5)$$

dove (H) è lo stesso definito in (4) ed (F) è il numero di eventi non grandinigeni con un valore di VLD maggiore o uguale alla stessa soglia considerata poc'anzi.

Il CSI è una combinazione del POD e del FAR ed è definito nella seguente maniera.

$$\text{CSI} = \frac{H}{H+M+F} \quad (6).$$

Il CSI sintetizza efficacemente i risultati dell'analisi statistica: la determinazione della soglia ottimale, pertanto, è avvenuta ricercando la soglia di VLD corrispondente al valore più alto del CSI.

Il POH, infine, è definito come:

$$\text{POH} \equiv \frac{H}{H+F} = 1-\text{FAR} \quad (7),$$

dove (H) e (F) hanno lo stesso significato assunto nella (4) e nella (5), rispettivamente.

III. RISULTATI

Gli indici statistici sono stati calcolati per alcune soglie di VLD, variabili fra 1.4 g m^{-3} e 5.0 g m^{-3} , con l'intento di determinarne il valore migliore. La Fig. 3 (pannello di sinistra) mostra che il CSI si massimizza in corrispondenza di un valore di VLD pari a 2.6 g m^{-3} . A tale soglia corrisponde un POD di 0.84 ed un FAR di 0.30. Se fosse stata adottata tale soglia, 16 eventi sarebbero stati correttamente identificati come grandinigeni, per 7 eventi temporaleschi sarebbe stato emesso un avviso grandine che non avrebbe trovato riscontro nelle osservazioni in situ, mentre 3 celle temporalesche grandinogene non sarebbero state identificate come tali. Il trend degli indici statistici pone in evidenza un decremento del POD e del FAR all'aumentare della soglia di VLD. La diminuzione del FAR con il crescere dei valori di VLD è indice del fatto che l'affidabilità della metodologia testata è proporzionale alla soglia di avviso considerata.

L'analisi dei casi studio ha offerto la possibilità di determinare una relazione empirica tra VLD e POH, che può essere adottata in sede operativa. Tale relazione, di natura euristica, è stata espressa mediante un fit polinomiale del terzo ordine:

$$POH = p_1(VLD)^3 + p_2(VLD)^2 + p_3(VLD) + p_4 \quad (8)$$

Il fit migliore fra le soglie di VLD ed il POH si ottiene quando $p_1 = 0.03363$, $p_2 = -0.2904$, $p_3 = 0.8719$ e $p_4 = 0.2422$ (Fig. 3, pannello di destra). La soglia di avviso per il probabile manifestarsi della grandine, dunque, è stata fissata in corrispondenza di un valore di POH pari a 0.65, il quale è associato ad un valore di VLD pari a 2.6 g m^{-3} .

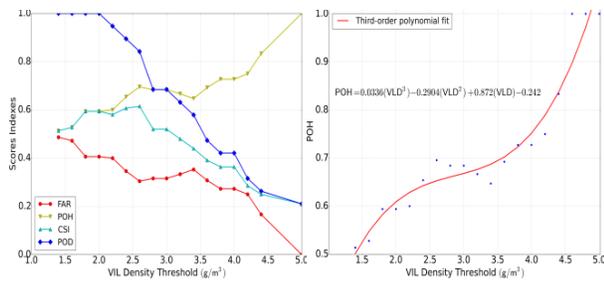


Fig. 3. Andamento degli indici statistici al variare della soglia di VLD (pannello di sinistra) e fit polinomiale del terzo ordine tra VIL-Density e POH (pannello di destra).

Applicazione al caso studio del 26 Maggio 2012

Il giorno 26/05/2012 il settore settentrionale della Provincia di Napoli ed il casertano sono stati interessati da intense manifestazioni temporalesche, le quali hanno dato luogo ad abbondanti precipitazioni grandinogene. Le condizioni su sala sinottica erano caratterizzate da un'ampia area ciclonica sull'Europa orientale e da un robusto sistema di alta pressione sull'Inghilterra e sulla Scandinavia. Sulla penisola italiana, di conseguenza, affluivano correnti di provenienza settentrionale, favorevoli all'innesco di attività convettiva pomeridiana a ridosso dei rilievi. Il sistema temporalesco si sviluppò sul massiccio del Matese intorno alle 12:20 UTC, per poi muoversi gradualmente verso sud-est ed interessare la provincia di Caserta. Le precipitazioni grandinogene, riportate da numerosi meteo-amatori, causarono rilevanti problemi ai trasporti, soprattutto lungo le arterie autostradali.

In Fig. 4 sono mostrati alcuni prodotti generati dal WR-10X nel momento in cui la cella convettiva raggiunse il picco di intensità. Nel pannello superiore sono riportate le mappe di VMI e di VIL, mentre in quello inferiore sono mostrate le mappe di VLD e POH. L'indice POH, espresso in percentuale, varia fra lo 0% (corrispondente a nessuna probabilità di grandine) ed il 100% (corrispondente alla certezza della presenza di grandine). In accordo con le segnalazioni in situ, nel settore settentrionale dell'area urbana di Napoli è stata riscontrata una probabilità di grandine compresa fra l'80 ed il 90%. Tali valori, dunque, risultano essere superiori alla soglia di POH (65%) individuata nel paragrafo precedente.

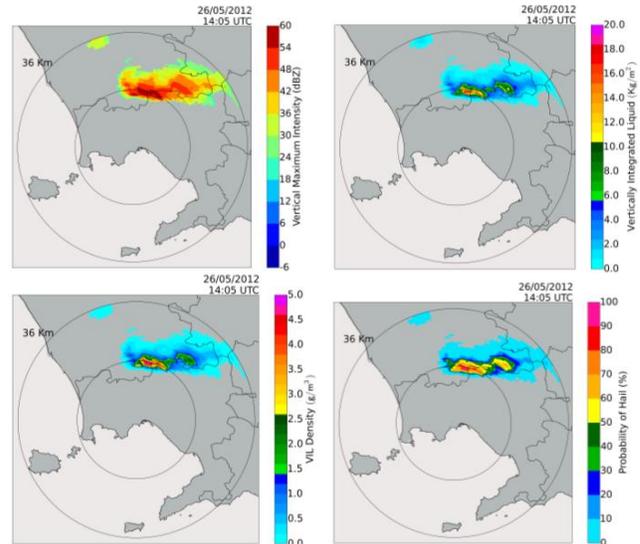
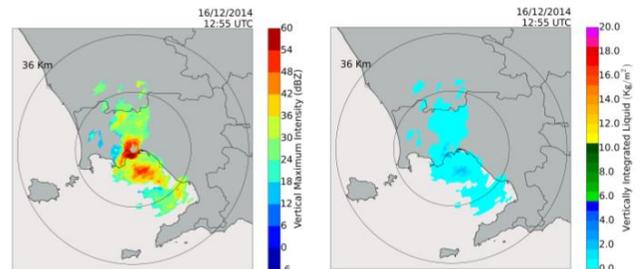


Fig. 4. Prodotti generati dal WR-10X in data 26/05/2012 (14:05 UTC), quando un'intensa cella convettiva interessò il settore settentrionale della Provincia di Napoli ed il casertano. In alto a sinistra è mostrata la mappa di Vertical Maximum Intensity, mentre in alto a destra quella relativa al Vertically Integrated Liquid. Nel pannello in basso a sinistra è mostrata la mappa di VIL-Density, in quello in basso a destra la mappa di Probability of Hail.

Applicazione al caso studio del 16 Dicembre 2014

In data 16/12/2014 l'area urbana di Napoli fu interessata da frequenti manifestazioni temporalesche, le quali assunsero sovente carattere grandinogeno. Il quadro sinottico indicava la presenza di linee di instabilità sul Mar Tirreno, generate dall'ingresso di aria fredda di origine polare sul Mediterraneo centrale. Quest'ultima, interagendo con aria più umida e calda di provenienza nord-africana, favorì lo sviluppo di un rilevante forcing convettivo sulle regioni del basso Tirreno. L'evento grandinogeno più significativo ebbe origine da un temporale di natura marittima, il quale, nel suo moto da sud-ovest verso nord-est, interessò intorno alle 13:00 UTC la città di Napoli ed in particolare il settore sud-occidentale della stessa (Posillipo). Come mostrato dalla Fig. 5, in linea con le segnalazioni fornite dai meteo-amatori e con i messaggi synop, nella zona interessata dall'evento è stata riscontrata una probabilità di grandine compresa tra il 70 e l'80% in corrispondenza dei nuclei grandinogeni. Tali valori, anche in questo caso, sono risultati superiori alla soglia derivante dall'analisi statistica.



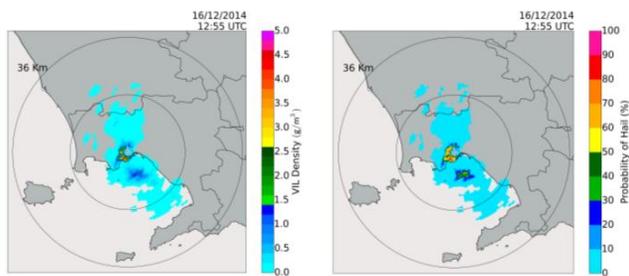


Fig. 5. Prodotti generati dal WR-10X in data 16/12/2014 (12:55 UTC), quando una cella temporalesca grandinigena interessò l'area urbana di Napoli. In alto a sinistra (pagina precedente) è mostrata la mappa di Vertical Maximum Intensity, mentre in alto a destra quella relativa al Vertically Integrated Liquid (pagina precedente). Nel pannello a sinistra è mostrata la mappa di VIL-Density, in quello in basso a destra la mappa di Probability of Hail.

IV. CONCLUSIONI

Il presente studio si è posto l'obiettivo di sviluppare un indice di probabilità di precipitazione grandinigena, che possa essere impiegato in modalità operativa, basato sulle acquisizioni di un radar meteorologico in banda X in singola polarizzazione operativo nell'area urbana di Napoli. Sulla scorta di osservazioni synop e di altre fonti di informazione, sono stati individuati 37 eventi temporaleschi occorsi nell'area di indagine tra Aprile 2012 e Dicembre 2014, per i quali si dispone di indicazioni precise relative all'orario e al luogo in cui si sono manifestati.

La metodologia adottata per l'identificazione della grandine all'interno delle nubi temporalesche è basata sul calcolo del VLD, un prodotto derivante esclusivamente dalle acquisizioni radar. La probabilità di grandine è stata determinata attraverso un confronto tra il VLD e le osservazioni effettuate al suolo. L'analisi statistica effettuata ha offerto la possibilità di determinare una soglia ottimale di VLD, ossia una soglia che identifichi tutti gli eventi di grandine con un margine di errore quanto più basso possibile. La relazione tra VLD e POH è stata determinata mediante un approccio euristico, utilizzando un fit polinomiale di terzo grado. La soglia ottimale di VLD risultante dalla disamina statistica, pari a 2.6 g m^{-3} , è associata ad un POD di 0.84 e ad un FAR di 0.30. Quest'ultimo valore, da un punto di vista operativo, non risulta particolarmente soddisfacente e necessita di essere migliorato.

Le performances dell'indice POH sono state testate per due casi studio, uno relativo ad un evento grandinigeno occorso in data 26/05/2012 ed un altro ad un evento verificatosi in data 16/12/2014. In entrambi i casi, l'algoritmo si è rivelato affidabile nell'individuazione del nucleo grandinigeno. Sebbene tali risultati siano basati su un numero

relativamente limitato di eventi di grandine, essi sono piuttosto incoraggianti e potranno certamente apportare benefici nell'ambito della gestione dei rischi connessi alla caduta di tale idrometeora. Le attività di ricerca future saranno mirate ad un miglioramento delle performances del metodo VLD e ad una riduzione del valore del FAR. In merito a tale aspetto, sarà necessario includere nell'analisi statistica un numero maggiore di eventi.

E' opportuno evidenziare, che l'incremento delle informazioni ottenibili dai dispositivi radar risulta essere molto importante in vista della piena operatività delle reti radar nazionali ed internazionali, le quali, integrate con altri sensori al suolo o in quota e con i satelliti meteorologici, renderanno possibile una visione sempre più completa delle osservabili meteorologiche, dando così un importante contributo nel campo scientifico.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' - TESSA" ed è stato svolto in collaborazione con il Centro Campano per il Monitoraggio e la Modellistica Marina ed Atmosferica dell'Università degli Studi di Napoli 'Parthenope'.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] C.J. Kessinger and E.A. Brandes, "A comparison of hail detection algorithms", FAA Summary Project Report, 1995.
- [2] I. Holleman, "Hail detection using single-polarization radar", Scientific Report, KNMI WR-2001-01, 2001.
- [3] B.J. Mason, The physics of clouds, Clarendon Press, Oxford UK, 1971.
- [4] A.H. Auer, "Hail recognition through the combined use of radar reflectivity and cloud-top temperatures", Mon. Wea. Rev., Vol. 122, pp. 2218-2221, 1994.
- [5] A. Waldvogel, B. Federer, and P. Grimm, "Criteria for the detection of hail cells", J. Appl. Meteor., Vol. 18, pp. 1521-1525, 1979.
- [6] D.R. Greene and R.A. Clark, "Vertically integrated liquid water – a new analysis tool", Mon. Wea. Rev., Vol. 100, pp. 548-552, 1972.
- [7] D. H. Kitzmiller, W. E. McGovern, and R. E. Saf-e (1995), *The wsr-88d severe weather potential algorithm*. Wea. and Forecasting, 10, 141-159
- [8] S.A. Amburn and P.L. Wolf, "VIL Density as a hail indicator", Wea. Forecasting, Vol. 12, pp. 473-478, 1997.
- [9] V. Capozzi, E. Picciotti, G. Budillon, and F.S. Marzano, "X-band weather radar monitoring of precipitation fields in Naples urban areas: data quality, comparison and analysis", The Eighth European Conference On Radar in Meteorology and Hydrology, 2014.

Geologia



Assetto morfo-strutturale dei Golfi di Patti e di Milazzo (Sicilia) in base a dati morfo-batimetrici e sismici di alta risoluzione.

Alessia Iannotta, Salvatore Passaro
CNR-IAMC
Napoli, Italia
iannottaalessia@yahoo.it

SOMMARIO - Esistono a tutt'oggi numerose incertezze sul regime tettonico dominante e le strutture geologiche attive in diversi settori della Sicilia. Uno di questi è la zona compresa tra le isole Eolie e la costa della Sicilia. Recenti ricerche sulla fascia costiera di Capo Milazzo hanno evidenziato forti terremoti tardo-olocenici le cui sorgenti sono ubicate in mare ed ancora parzialmente sconosciute. La difficoltà nella caratterizzazione di queste strutture sismogenetiche è dovuta alla mancanza di studi morfologici e strutturali di alta risoluzione in mare. Per tale motivo risulta di grande importanza una dettagliata mappatura del fondo mare e l'esecuzione di profili sismici ed acustici ad altissima risoluzione, che possano permettere di evidenziare le strutture geologiche profonde.

A tale scopo è stata condotta una crociera oceanografica nell'anno 2013 dal CNR IAMC Sede di Napoli a bordo della N/O Urania del CNR. Lo scopo dell'elaborazione di tali dati è quello di costruire una rappresentazione del fondale marino sotto forma di Modello Digitale del Terreno (DTM). I nuovi dati morfo-batimetrici hanno consentito di ottenere una visione morfologica del settore compreso fra la costa nord-occidentale della Sicilia (Golfi di Patti e Milazzo) e la porzione di mare prospiciente le Isole Eolie (Isola di Vulcano).

Keywords—DTM; Morfo-batimetria; Sicilia

INTRODUZIONE

La conoscenza dell'evoluzione geologica e petrografica della porzione sottomarina del settore settentrionale della Sicilia è, contrariamente a quanto avviene per la parte emersa, ad oggi poco sviluppata.

Nella zona compresa tra le isole Eolie e la costa della Sicilia settentrionale la deformazione cambia da estensionale ad est, tipica dell'Arco Calabro e della Sicilia orientale con terremoti distruttivi, a compressiva ad ovest. Il limite tra le due aree è rappresentato da una stretta fascia di deformazione trascorrente, che decorre tra le Eolie centrali e la costa sicula settentrionale.

La tettonica estensionale attiva ad est è accompagnata da un marcato sollevamento regionale nel corso del Quaternario [24]. Tale sollevamento tettonico è generalmente associato ad un'alta sismicità. Il settore costiero della Calabria ha subito un sollevamento anche durante il tardo Olocene e quindi i processi di deformazione potrebbero essere ancora attivi.

Un'anomalia in questo quadro è rappresentata dal settore compreso tra le Isole Eolie e Capo Milazzo (Fig. 1), dove nonostante i sollevamenti documentati, la sismicità strumentale e storica mostra livelli bassi [24].

Recenti ricerche sulla fascia costiera di Capo Milazzo [1] hanno evidenziato forti terremoti tardo-olocenici, le cui sorgenti sono ubicate in mare ed ancora parzialmente sconosciute.

Lo scopo di questo lavoro è documentare l'esplorazione sismo-stratigrafica e morfo-batimetrica del settore nord-occidentale della Sicilia tra i Golfi di Patti e di Milazzo e l'Isola di Vulcano (Arco Eolico). In quest'area è stata ipotizzata la presenza di strutture sismogenetiche [1].

Tali strutture tettoniche non sono ben conosciute a causa della mancanza di dati morfologici e strutturali ad alta e altissima risoluzione in mare.

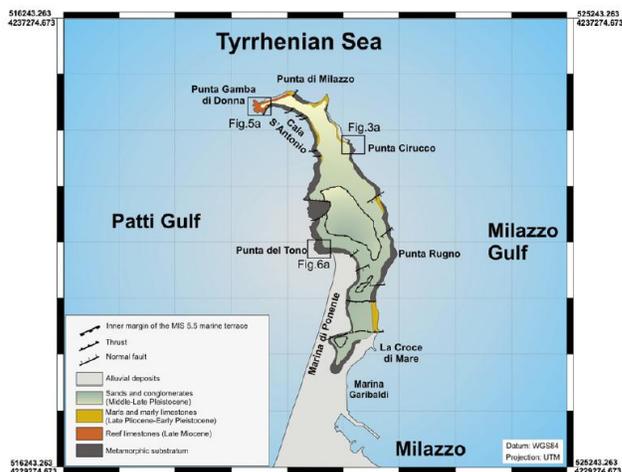


Fig. 1: Carta geologica di Capo Milazzo[1].

A tale finalità, la crociera oceanografica "Milazzo 2013" organizzata dall'Istituto per l'Ambiente Marino Costiero del CNR ha realizzato una dettagliata mappatura del fondo mare ed acquisito profili sismici di alta risoluzione, in modo da evidenziare deformazioni recenti e ricostruire il quadro morfo-strutturale dell'area in esame.

I. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'arcipelago delle isole Eolie è un arco vulcanico situato nel sud del Mar Tirreno, tra il bacino oceanico del Marsili e l'Arco Calabro (Fig. 2) [35].

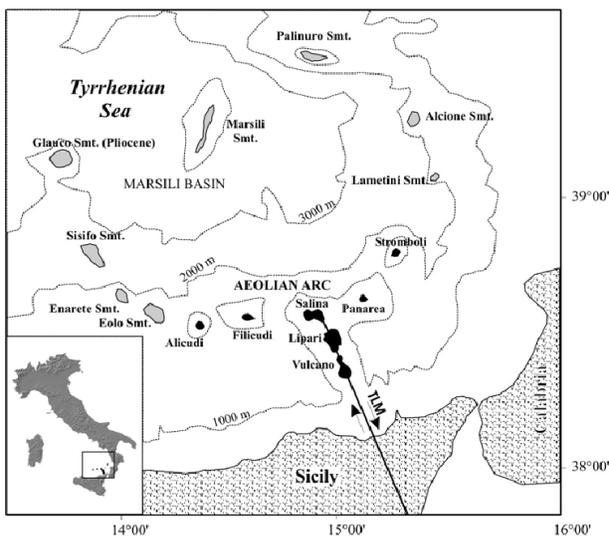


Fig. 2: Posizione delle isole Eolie e delle montagne sottomarine. TLM: faglia Tindari, Letojanni, Malta..

L'area di indagine è localizzata nell'immediato offshore della Sicilia settentrionale ed è situata alla transizione tra l'orogene siculo-magrebide ad ovest, sviluppato nel Neogene-Quaternario durante la collisione tra Africa ed Europa, e l'Arco Calabro ad est, migrato verso sud-est a seguito della subduzione e *roll-back* dello *slab* ionico [2].

I due domini sono separati da un sistema di faglie trascorrenti destre noto in letteratura come faglia Eolie-Tindari-Letojanni (ATLF) [3].

La zona di faglia mette a contatto due differenti regimi deformativi, come documentato da dati geodetici e sismologici: compressione in una vasta fascia della Sicilia settentrionale a W ed estensione sul margine tirrenico dell'Arco Calabro ad est [4];[5]; [6]; [7]. In questo quadro, la ATLF viene interpretata come una zona di trasferimento crostale tra la fascia compressiva nell'offshore nord-siciliano [8] oppure come una faglia di strappo litosferica che limita a W lo *slab* ionico [9]; [10]; [11].

La zona di faglia della ATLF presenta una complessa cinematica alto-crostante, connessa alla presenza di numerosi segmenti *en-echelon* a causa dei quali la traccia del sistema non risulta rettilinea. Grossolanamente il sistema è orientato lungo la direzione NNW-SSE. [12]; [13]; [8].

I meccanismi focali dei terremoti mostrano la presenza di faglie inverse fra Salina e Vulcano, di faglie trascorrenti destre tra Vulcano e Capo Milazzo e di faglie dirette e trascorrenti destre nel Golfo di Patti [4]. Questo quadro tettonico è confermato dai campi di velocità GPS, che mostrano compressione tra costa e isole e trascorrenza a terra [14];[15]; [3].

Le interpretazioni di profili sismici multicanale [14] hanno documentato che il settore meridionale dell'arcipelago delle Eolie fra Capo Milazzo e l'isola di Vulcano, sul bordo

settentrionale del Golfo di Patti, è caratterizzato da una fascia di deformazione transpressiva orientata NW-SE, responsabile della formazione di *flower structures*. In particolare, i profili sismici hanno messo in luce la presenza di due ampie anticlinali poste ad andamento *en-echelon* sinistro e denominate pieghe di Capo Milazzo e Vulcano (Fig. 1).

Secondo Argnani et al. (2007) la deformazione transpressiva ha agito a partire dal Pleistocene medio e si è sovrapposta ad una precedente tettonica estensionale.

A. L'arco delle Isole Eolie

L'Arco Eolico è costituito da tre settori principali, ognuno dei quali mostra distinte caratteristiche magmatiche, vulcaniche e strutturali. Tre sistemi di faglie principali (Fig. 4) interessano le Isole Eolie e la Sicilia nord-orientale: (1) un sistema di faglie ad andamento WNW-ESE che caratterizza il settore occidentale; (2) un sistema di faglie ad andamento NNW-SSE (sistema di Tindari-Letojanni) che interessa il settore centrale; (3) un sistema di faglie ad andamento NNE-SSW e NE-SW che interessa il settore orientale (Fig. 3).



Fig. 3: Caratteristiche strutturali e network sismico dell'area eoliana [25].

La contrazione riguardante il settore occidentale è associata ad una cintura compressiva allungata in direzione E-W che si estende dall'Arco Eolico fino all'Isola di Ustica. Al contrario, il settore orientale è dominato da fenomeni estensionali del tardo Quaternario, accompagnati da un marcato sollevamento tettonico, documentato da terrazzi marini pleistocenici ed olocenici [1].

Il passaggio tra questi due settori avviene attraverso una struttura tettonica orientata NNW-SSE qui denominata come sistema ATLF [16]; [8], che si estende attraverso il complesso Lipari-Vulcano nella parte centrale dell'arcipelago fino al Golfo di Patti, ai Monti Peloritani ed alla costa ionica della Sicilia nord-orientale.

La distribuzione dei terremoti suggerisce la presenza di un altro sistema di faglie destre con andamento WNW-ESE, localizzato nel settore occidentale dell'arcipelago tra l'isola di Alicudi e il complesso Lipari-Vulcano. Tale sistema è noto come *Sisifo-Alicudi fault system* [17];[18]; [19]; [20]; [8]; [21].

B. I Golfi di Patti e di Milazzo

Il Mar Tirreno è il bacino oceanico estensionale più recente del Mar Mediterraneo, sviluppatosi dal Miocene fino ad oggi. Si tratta di un bacino di retro-arco sul cui fondale è presente la crosta oceanica risultante dalla convergenza tra la Placca Europea e quella Africana. Tale collisione ha determinato la subduzione della litosfera ionica al di sotto dell'Arco Calabro [22].

Le caratteristiche morfo-sedimentarie attuali e la distribuzione dei sistemi deposizionali del Mar Tirreno riflettono la recente evoluzione geologica del territorio caratterizzata da distinti episodi di tettonica estensionale diretta verso est. Il confine meridionale del Mar Tirreno è caratterizzato dalla presenza di una marcata scarpata continentale [36].

A nord dell'Arco Eolico è presente un'importante incisione nota come canyon di Stromboli con una lunghezza di circa 120 km [26]. Lungo il Thalweg riceve numerosi tributari drenati dai margini continentali siciliano e calabrese e dal versante vulcanico delle Eolie. La porzione costiera di questa incisione è costituita dal canyon di Milazzo, che si sviluppa tra la costa settentrionale siciliana del Golfo di Patti e il bacino di Gioia. Si estende per almeno 200 km e riceve molto materiale dal lato orientale del canyon di Gioiosa e di Angitola, ed in misura minore dallo *slope* eoliano sottomarino (Fig. 4).

Nella parte NE della costa siciliana sono localizzati i Golfi di Patti e di Milazzo, separati dalla Penisola di Capo Milazzo. La Penisola di Capo Milazzo presenta un andamento morfologico N-S ed è lunga circa 7 km, localizzata lungo la costa tirrenica della Sicilia nord-orientale. La penisola è separata dai Monti Peloritani, che rappresentano la terminazione sud-occidentale dell'Arco Calabro da una piana costiera di età olocenica [1]. Tale struttura collega l'Appennino con la catena Siculo-Maghrebide sviluppata dopo la collisione tra la placca Africana e quella Europea avvenuta durante il Neogene-Quaternario.

La Penisola di Capo Milazzo, pur facendo parte del contesto tettonico che interessa l'Arco Eolico, non appare coinvolta dai principali sistemi di faglie attivi dell'area studiata; tuttavia, i recenti studi sul livello del mare tramite indicatori morfologici e biologici hanno documentato che il settore costiero della penisola è stato interessato da un sollevamento durante il tardo Olocene, e quindi processi di deformazione in questa regione potrebbero essere ancora attivi [1].

Il forte sollevamento tettonico avvenuto durante il Quaternario è testimoniato dalla presenza di terrazzi marini. Il vertice della penisola di Capo Milazzo è caratterizzato dalla presenza di un ampio terrazzo marino che si estende ad un'altezza compresa tra 50 e 85 m sopra l'attuale livello del mare [1].

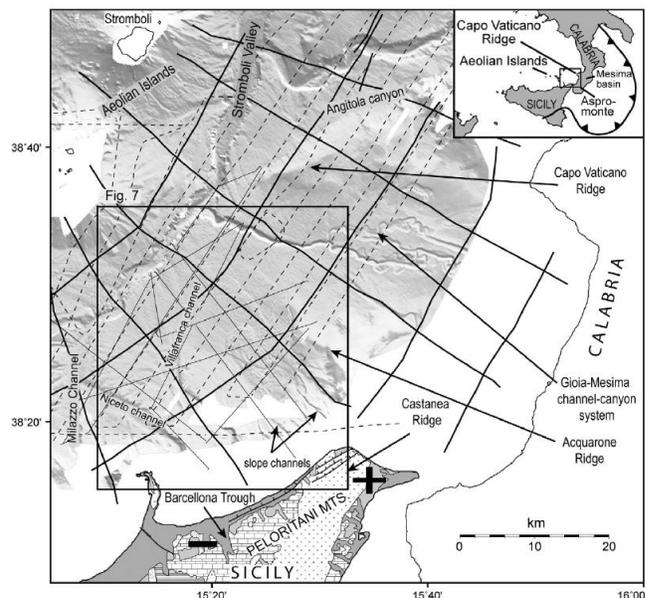


Fig. 4: Shaded map del bacino di Gioia dei dati batimetrici multibeam [24].

II. DATI E METODI

Il *survey* si è svolto a bordo della Nave Oceanografica Urania, un'imbarcazione in dotazione al Consiglio Nazionale delle Ricerche di circa 67 m di lunghezza, equipaggiata per lo svolgimento di campagne di ricerca multidisciplinari. La nave consente l'acquisizione di dati geofisici. Tra gli strumenti geofisici sono presenti un Ecoscandaglio multifascio Kongsberg EM710, un Subbottom profiler Chirp (Datasonics) ed uno Sparker Multitip da 1 kJoule della GeoResources.

A. Metodi di geofisica marina basati sull'acustica

Tali metodi consistono nella generazione di un'onda acustica di forma, ampiezza e frequenza opportuna, che attraversa spessori di acqua o di altri materiali e nella misura dei tempi di ritorno tramite specifici ricevitori, che vengono disposti secondo geometrie prefissate. I materiali si comportano come un filtro passa-bassa, per cui la quantità di colonna d'acqua o di roccia che devono essere investigate è il parametro su cui si basa la scelta dello spettro di frequenza emesso dalla sorgente. Per misurare la profondità del fondale del mare in acque basse si utilizzano frequenze elevate, nell'ordine delle centinaia di kHz, fino a decine di kHz per profondità elevate, mentre la penetrazione dei livelli rocciosi si ottiene con l'utilizzo di frequenze più basse.

B. Ecoscandaglio multifascio

La tecnica del rilievo acustico multifascio utilizza l'energia acustica per acquisire misure della profondità del fondale marino e rappresenta uno tra i metodi più efficaci di rilievo morfo-batimetrico, in quanto consente, in tempi relativamente brevi, di ottenere una notevole quantità di informazioni correttamente georeferenziate sui fondali investigati (Fig. 5).



Fig. 5: Tecnica di acquisizione multibeam. Il fondale viene insonificato per spazzate, in modo da ottenere la copertura totale.

Lo strumento utilizza una spazzata (*swath*) acustica del fondale, la cui estensione è una funzione delle caratteristiche intrinseche dello strumento e della profondità del fondale investigato.

I dati batimetrici sono stati acquisiti lungo linee di navigazione parallele utilizzando un Multibeam Kongsberg EM710 installato a scafo, che permette di effettuare rilievi fino a profondità di 2000 metri.

Il software di acquisizione, Seafloor Information System (SIS) registra i dati batimetrici e permette all'operatore di regolare parametri come il *Pulse Length*, il valore massimo della *Coverage* e l'angolo di *Nadir*, al fine di ottimizzare la qualità del dato acquisito. Il software applica inoltre in tempo reale i dati provenienti dal GPS differenziale e dal sensore di assetto, necessari per compensare i movimenti dell'imbarcazione (*heave, roll e pitch*).

Una sonda multiparametrica CTD, montata in prossimità dei trasduttori del Multibeam, ha fornito i valori di velocità del suono nell'acqua necessari per il corretto *beam forming* tramite l'esecuzione di profili CTD.

Il software Reson PDS2000 è stato utilizzato per la navigazione, ovvero per la gestione delle linee di acquisizione e la visualizzazione dei punti di campionamento.

C. Sistema Subbottom Chirp Profiler

Il Subbottom Teledyne Benthos Chirp III, montato a scafo, fornisce profili sismici ad alta risoluzione attraverso l'emissione di un impulso comprendente una banda di frequenze da 10 a 30 kHz e di lunga durata (da 1 a 100 msec). Queste caratteristiche del segnale permettono allo strumento di restituire un dato ottimale sia per risoluzione che per penetrazione nel substrato. I dati sono stati acquisiti mediante il software SwanPro, che permette di agire sui parametri come il *Power Gain* ed il *Pulse Length* del segnale emesso e sul TVG (*Time Variant Gain*) del segnale sismico.

D. Sistema Sparker

I profili sismici sono stati acquisiti mediante uno Sparker Multitip da 1 kJoule della GeoResources. Il sistema è alimentato da generatori di corrente continua che caricano una batteria di condensatori ad alta tensione (3-10 kV). La scarica elettrica produce una bolla gassosa sugli elettrodi posti in acqua, la cui esplosione genera l'impulso acustico. La frequenza operativa dello strumento varia tra i 200 Hz e 10

kHz. I dati sono stati acquisiti mediante il software Triton SBLogger.

E. Processing dei dati batimetrici Multibeam

Lo scopo finale dell'elaborazione dei dati Multibeam è quello di costruire una rappresentazione di dettaglio del fondale marino sotto forma di Modello Digitale del Terreno (DTM; Fig. 6). La dimensione della cella elementare che caratterizza il DTM finale deve necessariamente essere coerente con i limiti dell'accuratezza, spaziale e verticale, imposti dalle caratteristiche strumentali, nonché dai parametri di acquisizione. La risoluzione verticale dipende solo dalla frequenza della strumentazione e dalla velocità del suono nella colonna d'acqua, mentre quella orizzontale dipende dalle caratteristiche strumentali e dalla profondità.

I dati sono stati processati in ambiente PDS2000, nel quale sono state eseguite una serie di correzioni.

La prima è la correzione del disturbo mareale, in cui i dati batimetrici sono stati corretti rispetto al livello medio delle basse maree sigiziali.

La seconda è la correzione della navigazione. I dati della campagna sono stati acquisiti con sistema di posizionamento satellitare differenziale DGPS. Grazie a tale correzione le spazzate vengono automaticamente riposizionate una volta spostati i punti di navigazione.

Un'ulteriore correzione consiste nella rimozione degli *spikes* locali e laterali, eliminando le misure errate in una fase di *editing* specifica, evitando quindi l'utilizzo di filtri di tipo statistico. Sono stati utilizzati:

- *Swath model editor*, che consente l'*editing* grafico di numerose spazzate, dal quale è possibile eliminare le misure errate;
- *Grid model editor*, che invece si occupa della griglia di valori interpolati sui quali l'operatore interviene per celle.

Il vantaggio dello *Swath model editor* risiede nella precisione, poiché questo consente di eliminare i soli valori errati, mentre con il *Grid model editor* l'annullamento del valore di una cella presuppone l'eliminazione di tutti i *beams*, il cui posizionamento cade all'interno della cella stessa.

Terminata tale fase è stato possibile procedere con lo *step* successivo, che consiste nell'elaborazione dei dati e nella restituzione cartografica.

Tale fase è stata realizzata tramite diverse modalità di elaborazione:

- 1) estrazione delle terne xyz di diversa provenienza;
- 2) georeferenziazione di tali terne in un sistema geodetico unitario;
- 3) interpolazione dei dati e generazione di un Modello Digitale del Terreno (DTM);
- 4) generazione di una mappa a curve di livello (*contour map*) e del rilievo ombreggiato (*shaded relief map*), oltre a carte tematiche (*slope map, dipping map*);
- 5) carte e profili (nelle zone di maggiore interesse) interpretativi.

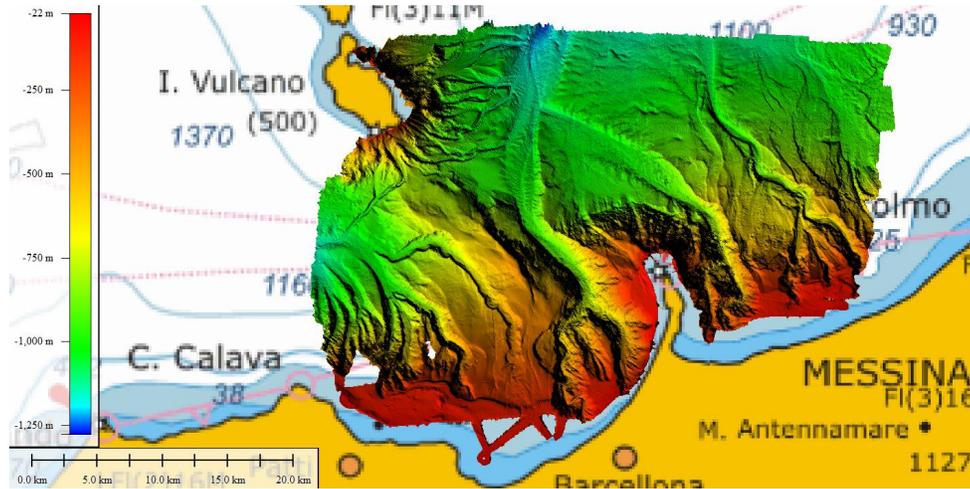


Fig. 6: DTM dei Golfi di Patti e Milazzo.

III. RISULTATI

Il rilievo batimetrico effettuato nell'area costiera che comprende i Golfi di Patti e di Milazzo si estende su di un'area di 1057 km². Le quote massime e minime riscontrate sono rispettivamente di 21,6 m e di 1276 m, mentre il valore medio risulta di circa 717 m.

Per comprendere l'andamento morfologico dell'area è stato utilizzato il software Surfer che permette di convertire i dati acquisiti in carte tematiche. Le prime carte realizzate sono: *Terrain Slope* e *Terrain Aspect*, che mostrano rispettivamente la pendenza delle strutture morfologiche presenti e la direzione verso la quale un elemento del *grid* è inclinato (Fig. 7 e Fig. 8). La *Terrain Slope* calcola la pendenza di ogni nodo della griglia sulla superficie e assume valori che vanno da 0 (orizzontale) a 90 (verticale).

È possibile produrre anche delle isolinee che uniscono punti in cui la pendenza massima è costante.

Tale operazione è simile al modo in cui la derivata prima direzionale definisce la pendenza in ogni punto della superficie, ma è più potente perché definisce la direzione del gradiente su ogni punto della mappa.

Il *Terrain Aspect* è stato calcolato punto per punto in termini di azimuth rispetto al nord utilizzando la seguente equazione:

$$At = 270 - \frac{360}{2\pi} \times \tan^{-1} \left[\frac{\partial L}{\partial y} / \frac{\partial L}{\partial x} \right]$$

Le statistiche relative a questo parametro possono fornire elementi circa la direzione media delle pendenze in una carta.

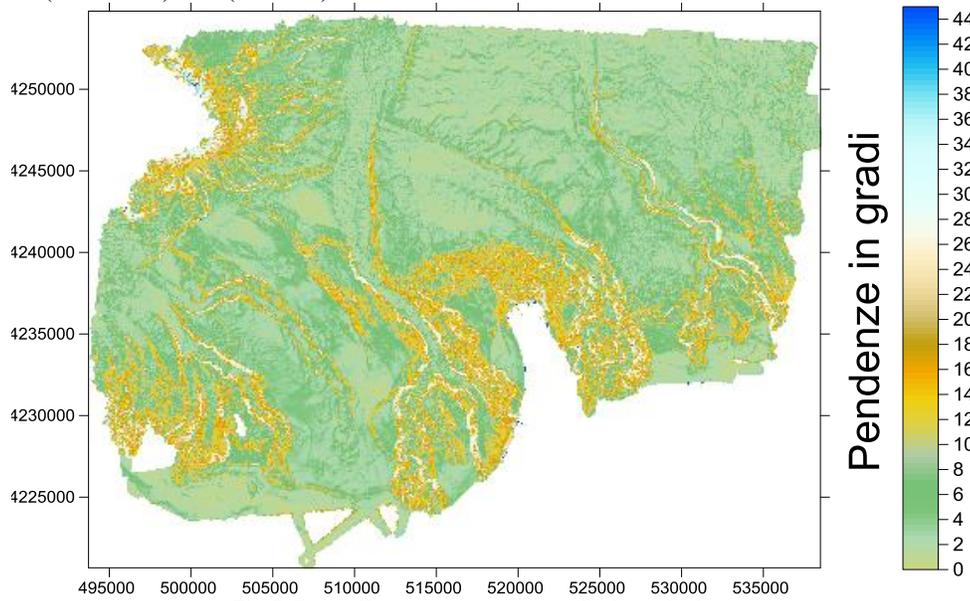


Fig. 7: Terrain Slope mappa costruita con il software Surfer.

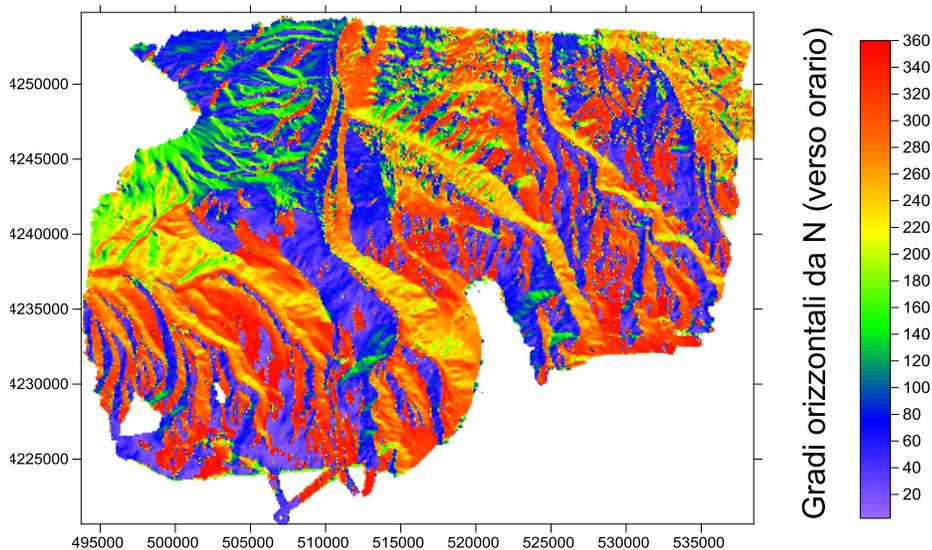


Fig. 8: Terrain Aspect Map calcolata con il software Surfer.

Inoltre, è stato realizzato un diagramma che mette in relazione le quote e le relative pendenze (Fig. 9).

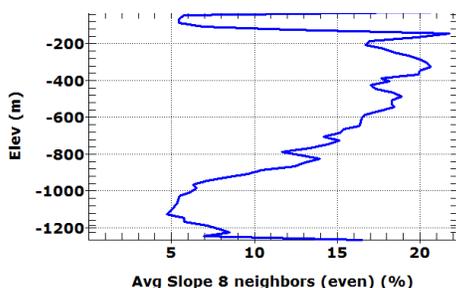


Fig. 9: Diagramma delle quote in funzione delle pendenze.

Osservando la Fig. 9 possono essere individuati alcuni valori di quota, ai quali è associata una pendenza massima in corrispondenza dei picchi mostrati dal grafico.

| Quota (m) | Pendenza (°) |
|-----------|--------------|
| -145 | 21.50 |
| -320 | 20.57 |
| -483 | 18.90 |
| -820 | 13.90 |
| -1210 | 8.36 |

A profondità minori le strutture morfologiche presentano pendenze maggiori rispetto a quelle riscontrate a profondità maggiore di 1000 m.

Da tale diagramma si evince anche la presenza di un minimo relativo di pendenza, alla quota di -1115 m, probabilmente associabile ad un livello di base dell'erosione (quota media del fondo della sella formatasi fra l'Isola di Vulcano e la scarpata), ovvero la quota alla quale i sedimenti raggiungono il minimo della deposizione.

E' stato analizzato il diagramma della distribuzione delle quote calcolate dall'analisi morfobatimetrica dell'intera area in studio (Fig. 10).

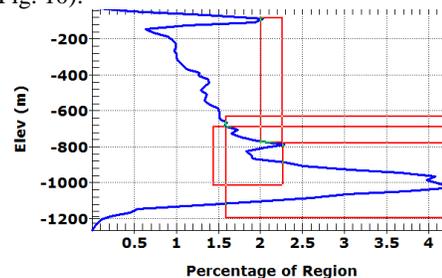


Fig. 10: Diagramma di distribuzione delle quote.

Tale diagramma permette di individuare le quote predominanti presenti nell'area e di conseguenza associarle a specifiche morfo-strutture.

| Quota (m) | Percentuale (%) | Interpretazione geologica |
|-----------|-----------------|---|
| -82 | 2 | Terrazzi da stazionamento relativo del mare |
| -780 | 2.27 | Terrazzi e/o bassi strutturali |
| -1018 | 4.23 | Thalweg dei canyons sottomarini |

La prima quota è associabile alla presenza di terrazzi da stazionamento relativo del mare; la seconda probabilmente indica terrazzi o bassi strutturali, mentre la terza rappresenta il punto di canalizzazione del *thalweg* dei *canyons* che costituiscono il sistema morfo-sedimentario preponderante sulla porzione di fondale analizzato.

Infine, affinché il riconoscimento delle morfo-strutture presenti risulti soddisfacente, sono stati analizzati preliminarmente due profili sismici acquisiti rispettivamente tramite i sistemi Chirp e Sparker e ubicati entrambi nel Golfo di Patti (Fig. 11 e 12).

In Fig. 11 è rappresentato un profilo sismico, ubicato nel settore occidentale del Golfo di Patti, acquisito mediante il

sistema Chirp. Spostandosi da W a E la quota del fondale diminuisce seguendo un andamento irregolare dovuto alla presenza di *canyon* incontrati lungo il tragitto.

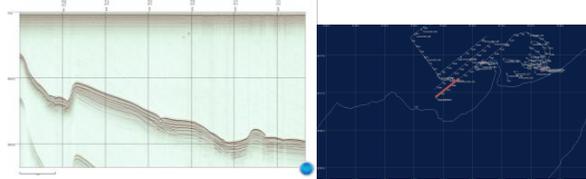


Fig. 11: Profilo sismico acquisito tramite sistema Chirp a sinistra e a destra la sua localizzazione in mappa.

In Fig. 12 è mostrato il profilo sismico registrato mediante il sistema Sparker e ubicato nel settore orientale del Golfo di Patti. Tale profilo mette in evidenza la presenza di un'importante valle, che raggiunge grandi profondità e che è probabilmente associabile al canyon di Stromboli.

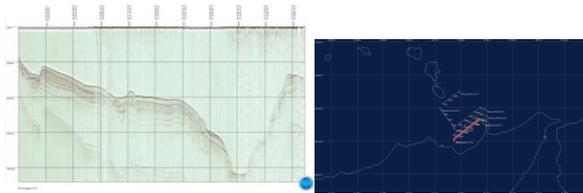


Fig. 12: Profilo sismico acquisito mediante sistema Sparker a sinistra e a destra la sua localizzazione in mappa.

IV. DISCUSSIONE

È possibile tracciare sulla base dell'elaborazione cartografica un quadro completo della geomorfologia dell'area di studio.

Il confine meridionale del Tirreno è caratterizzato da una scarpata continentale da cui sono risalite le isole Eolie e la piattaforma continentale. Su quest'ultima, si poggiano il bacino di Cefalù e il bacino di Gioia (Fig. 16). Nella porzione sud-occidentale del bacino di Gioia si trovano il canyon di Milazzo, il canale di Niceto e le numerose valli che percorrono l'area vulcanoclastica nei pressi di Vulcano, che si uniscono originando l'asse del canyon di Stromboli.

Un rilievo batimetrico dettagliato nei pressi del Golfo di Patti ha mostrato la presenza di un complesso sistema di valli sottomarine che rappresentano le principali vie di apporto di materiali terrigeni dalla costa al canyon di Stromboli [24].

Nel settore centro-occidentale del Golfo di Patti si sviluppa un'ampia placca continentale che raggiunge un'estensione massima di circa 2 km nel settore orientale.

Il Golfo di Milazzo invece è compreso tra Capo Milazzo e il canyon di Villafranca (Fig. 13).

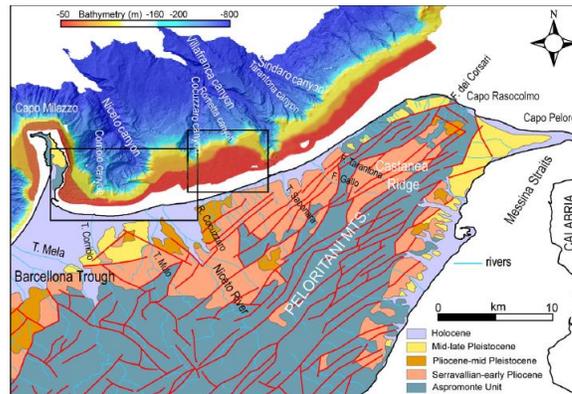


Fig. 13: Mappa geostrutturale della Sicilia nord orientale, in cui sono indicati i due settori in cui è suddivisa la piattaforma continentale nel golfo di Milazzo [26].

In prossimità della costa, l'area può essere suddivisa in due zone di piattaforma continentale.

La prima zona di piattaforma si trova tra il canyon di Villafranca e il canyon di Cocuzzaro (Fig. 14). Ha un gradiente che dai 2.38° in corrispondenza di 50 m di profondità decresce distalmente fino ad un valore 1.06° [26].

Un secondo settore di piattaforma continentale si trova nel margine sud-occidentale dell'area di studio. L'area è dominata dai canyon di Niceto e di Corriolo, sviluppati in corrispondenza dei fiumi omonimi. La testata del canyon di Niceto è caratterizzata da una zona semicircolare di 3000 m di larghezza, che presenta un improvviso aumento del gradiente del fondo marino fino a 15° alla profondità di 80 m. Verso terra, la piattaforma è meno ripida con un gradiente di circa 4° ed è composta da una zona incisa da un canale che si collega con la parte orientale della testata del canyon di Niceto. L'area tra le testate dei canyon di Cocuzzaro e di Niceto è caratterizzata da contorni discendenti convessi, canali centrali diritti e canali con flessione laterali. I canali centrali diritti muoiono nel tratto discendente, mentre i canali laterali convergono verso il mare nella testa dei canyon di Cocuzzaro e di Niceto. Questa zona è interpretata come un proseguimento orientale verso il largo del delta del fiume Niceto, paragonabile in larghezza alla valle alluvionale del fiume Niceto.

I canyon sottomarini precedentemente analizzati hanno una caratteristica che li accomuna, cioè il loro andamento è articolato probabilmente a causa di movimenti tettonici.

Nonostante le evidenze di geofisica marina, l'area attorno a Capo Milazzo e a W di esso mostra una bassa sismicità strumentale e storica, e dunque l'attuale attività di tali strutture non risulta vincolata nel breve termine. Tuttavia, recenti dati morfostrutturali nella fascia costiera hanno evidenziato importanti deformazioni co-sismiche oloceniche e dunque la possibilità che tali strutture, se responsabili della deformazione osservata, siano attive, in accordo con i dati geodetici. Infatti, uno studio di dettaglio di paleo-linee di riva oloceniche dislocate alcuni metri sopra l'attuale livello del mare ha messo in luce che il loro sollevamento è stato causato sia da processi lenti di tipo regionale che da importanti eventi rapidi, di origine co-sismica [1].

La ricerca proposta contribuirà a vincolare la geometria, la cinematica e i tassi di dislocazione di strutture cieche e

sottomarine, non investigabili attraverso le comuni tecniche paleo-sismologiche.

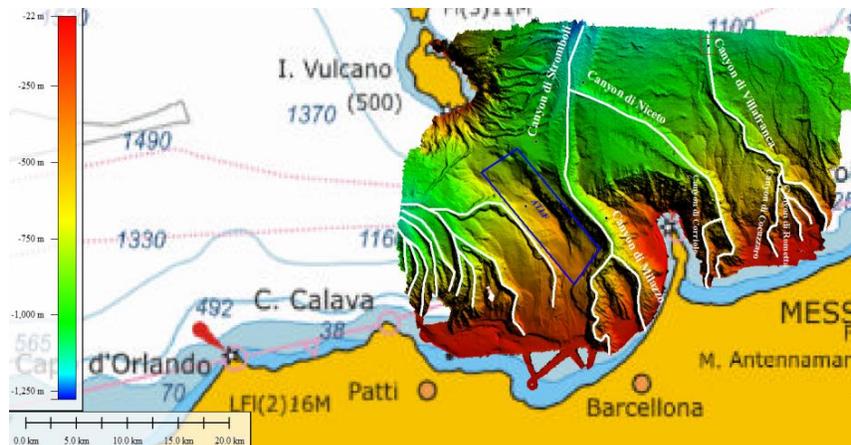


Fig. 14: DTM dei Golfi di Patti e Milazzo. Attraverso le linee colorate sono evidenziate le morfostrutture presenti.

IV. CONCLUSIONI

Lo scopo di questo lavoro è documentare l'esplorazione sismo-stratigrafica e morfo-batimetrica del settore nord-occidentale della Sicilia nelle aree dei Golfi di Patti e Milazzo, nella fascia compresa fra la linea di costa e l'Isola di Vulcano (Arco Eolico), area in cui è stata ipotizzata la presenza di strutture sismogenetiche [1].

I dati, processati in ambiente PDS2000, sono stati elaborati allo scopo di condurre un'analisi morfo-strutturale dettagliata dell'area, con lo sviluppo di carte quali quella delle pendenze, mappe di aspect e curvatura del profilo, etc. I dati così elaborati hanno consentito di ottenere una visione d'insieme morfologica dell'area in studio. Sono state messe in risalto, le caratteristiche morfologiche dei sistemi di canyon che incidono in modo profondo le aree dei due golfi e governano il sistema sedimentario dell'area, in particolare per quanto concerne il trasporto costa-largo.

Un'analisi geomorfologica dettagliata evidenzia che i fondali del Golfo di Patti sono caratterizzati da una morfologia complessa con una cresta a tendenza NW-SE, che separa le zone più lontane del bacino di la Gioia da quelle del bacino di Cefalù, e la presenza di un complesso sistema di valli sottomarine che rappresentano le principali vie di apporto di materiali terrigeni dalla costa al canyon di Stromboli.

Il Golfo di Milazzo invece in prossimità della costa presenta due zone di piattaforma. La prima si trova tra il canyon di Villafranca e il canyon di Cocuzzaro.

L'area circostante Capo Milazzo mostra una bassa sismicità strumentale e storica, ma recenti dati morfostrutturali nella fascia costiera hanno evidenziato importanti deformazioni co-sismiche oloceniche e dunque la possibilità che tali strutture, se responsabili della deformazione osservata, siano attive, in accordo con i dati geodetici [1].

Infatti, uno studio di dettaglio di paleo-linee di riva oloceniche dislocate alcuni metri sopra l'attuale livello del mare hanno messo in luce che il loro sollevamento è stato causato sia da processi lenti di tipo regionale che da importanti eventi rapidi, di origine co-sismica.

La ricerca proposta contribuirà a vincolare la geometria, la cinematica e i tassi di dislocazione di strutture cieche e sottomarine, non investigabili attraverso le comuni tecniche paleo-sismologiche.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' - TESSA.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Scicchitano, G., C.R. Spampinato, L. Ferranti, F. Antonioli, C. Monaco, M. Capano, C. Lubritto, (2011), Uplifted Holocene shorelines at Capo Milazzo (NE Sicily, Italy): Evidence of co-seismic and steady-state deformation, *Quaternary International*, Volume 232, Issues 1–2, 15 February 2011, Pages 201–213, ISSN 1040-6182.
- [2] Malinverno, A., and W.B.F. Ryan (1986), Extension in the Tyrrhenian Sea and shortening in the Apennines as result of arc migration driven by sinking of the lithosphere, *Tectonics*, 5(2), 227–245, doi:10.1029/TC005i002p00227.
- [3] Palano M., Ferranti L., Monaco C., Mattia M., Aloisi M., Bruno V., Cannavò F., Siligato G., (2012) - GPS velocity and strain fields in Sicily and southern Calabria, Italy: Updated geodetic constraints on tectonic block interaction in the central Mediterranean. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, B07401, doi:10.1029/2012JB009254, 2012.
- [4] Neri, G., G. Barberi, G. Oliva, and B. Orecchio (2005), Spatial variations of seismogenic stress orientations in Sicily, south Italy, *Phys. Earth Planet. In.*, 148, 175–191, doi:10.1016/j.pepi.2004.08.009.
- [5] Pondrelli, S., S. Salimbeni, G. Ekström, A. Morelli, P. Gasperini, and G. Vannucci (2006), The Italian CMT dataset from 1977 to the present, *Phys. Earth Planet. In.*, 159, 286–303, doi:10.1016/j.pepi.2006.07.008.
- [6] Ferranti, L., J.S. Oldow, B. D'Argenio, R. Catalano, D. Lewis, E. Marsella, G. Avellone, L. Maschio, G. Pappone, F. Pepe, and A. Sulli (2008), Active deformation in Southern Italy, Sicily and southern Sardinia from GPS velocities of the Peri-Tyrrhenian Geodetic Array (PTGA), *Boll. Soc. Geol. It., (Ital. J. Geosci.)*, 127(2), 299–316.
- [7] Mattia M., M. Palano, V. Bruno, and F. Cannavò (2009), Crustal motion along the Calabro-Peloritan Arc as imaged by twelve years of

- measurements on a dense GPS network, *Tectonophysics*, 476, 528-537, doi:10.1016/j.tecto.2009.06.006.
- [8] Billi, A., G. Barberi, C. Faccenna, G. Neri, F. Pepe, and A. Sulli (2006), Tectonics and seismicity of the Tindari Fault System, southern Italy: crustal deformations at the transition between ongoing contractional and extensional domains located above the edge of a subducting slab. *Tectonics*, 25, TC2006, doi:10.1029/2004TC001763.
- [9] Doglioni, C., F. Innocenti, and G., Mariotti (2001), Why Mt Etna?, *Terra Nova*, 13, 25-31, doi: 10.1046/j.1365-3121.2001.00301.x.
- [10] Faccenna, C., L. Civetta, M. D'Antonio, F. Funicello, L. Margheriti, and C. Piromallo (2005), Constraints on mantle circulation around the deforming Calabrian slab, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L06311, doi:10.1029/2004GL021874.
- [11] Rosenbaum, G., and G. S. Lister (2004), Neogene and Quaternary rollback evolution of the Tyrrhenian Sea, the Apennines and the Sicilian Maghrebides, *Tectonics*, 23, TC1013, doi:10.1029/2003TC001518.
- [12] Ventura, G., (1994), Tectonics structural evolution and caldera formation on Vulcano Island (Aeolian Archipelago, southern Tyrrhenian Sea), *J. Volc. Geoth. Res.*, 60(3-4), 207-224, doi: 10.1016/0377-0273(94)90052-3.
- [13] Mazzuoli, R., L. Tortorici, and G. Ventura (1995), Oblique rifting in Salina, Lipari and Vulcano islands (Aeolian islands, southern Italy), *Terra Nova*, 7, 444-452, doi:10.1111/j.1365-3121.1995.tb00540.x.
- [14] Argnani, A., E. Serpelloni, and C. Bonazzi (2007), Pattern of deformation around the central Aeolian Islands: evidence from multichannel seismic and GPS data, *Terra Nova*, 19, 317-323, doi:10.1111/j.1365-3121.2007.00753.x.
- [15] Mattia M., M. Palano, V. Bruno, F. Cannavò, A., Bonaccorso, and S. Gresta (2008), Tectonic features of the Lipari-Vulcano complex (Aeolian archipelago, Italy) from ten years (1996-2006) of GPS data, *Terra Nova*, 20, 370-377, doi:10.1111/j.1365-3121.2008.00830.x.
- [16] Lanzafame, G., Bousquet, J.C., (1997), The Maltese escarpment and its extension from Mt. Etna to the aeolian islands (Sicily): importance and evolution of a lithosphere discontinuity, *Acta Vulcanologica*. 9, 113e120.
- [17] Finetti, I., Del Ben, A., Geophysical study of the Tyrrhenian opening, (1986), *Boll. Geofis.Teor. Appl.* 28, 110.
- [18] Neri, G., Caccamo, D., Cocina, O., Montalto, A., (1996), Geodynamic implications of earthquake data in the southern Tyrrhenian sea, *Tectonophysics* 258, 233-249.
- [19] De Astis, G., Ventura, G., Vilardo, G., (2003), Geodynamic significance of the Aeolian volcanism (Southern Tyrrhenian Sea, Italy) in light of structural, seismological and geochemical data, *Tectonics* 22 (4), 1040.
- [20] Favalli, M., D. Karátson, R. Mazzuoli, M.T. Pareschi, G. Ventura, (2005), Volcanic geomorphology and tectonics of the Aeolian archipelago (Southern Italy) based on integrated DEM data, *Bull. Volcanol*, 68: 157-170.
- [21] Scarfi, L., Messina, A., Cassisi, C., (2013), Sicily and Southern Calabria focal mechanism database: a valuable tool for the local and regional stress field determination, *Ann. Geophys.* 56 (1), D0109.
- [22] Bonforte, A., Guglielmino F., (2008), Transpressive strain on the Lipari-Vulcano volcanic complex and dynamics of the "La Fossa" cone (Aeolian Island, Sicily) revealed by GPS surveys on a dense network. *Tectonophysics*, volume 457, Issues 1-2, September 2008, Pages 64-70.
- [23] Ghisetti, F., Vezzani, L., (1982), Different styles of deformation in the Calabrian arc (Southern Italy): implications for a seismotectonic zoning. *Tectonophysics*, volume 85, Issues 3-4, May 1982, Pages 149-165.
- [24] Gamberi, F., M. Rovere, M. Marani, (2011), Mass-transport complex evolution in a tectonically active margin (Gioia Basin, Southeastern Tyrrhenian Sea), *Marine Geology*, Volume 279, Issues 1-4, 15 January 2011, Pages 98-110.
- [25] Gambino, S., A. Laudani, S. Mangiagli, (2010), Seismicity pattern changes before the M=4.8 Aeolian Archipelago (Italy) earthquake August 16, 2010, *Scientific World Journal*.
- [26] Gamberi, F., M. Rovere, A. Mercorella, E. Leidi, G. Dalla Valle, (2014), Geomorphology of the NE Sicily continental shelf controlled by tidal currents, canyon head incision and river-derived sediments, *Geomorphology*, Volume 217, 15 July 2014, Pages 106-121.
- [27] Barbano, M.S., A. Bottari, P. Carveni, M. Cosentino, B. Federico, G. Fonte, E. Lo Giudice, G. Lombardo, G. Patanè, (1978-1979), Macroseismic study of the Gulf of Patti earthquake in the geostructural frame of north-eastern Sicily, *Boll. Soc. Geol.*, 155-174, 12 ff., 2 tabb., 3 tavv.
- [28] Barreca, G., V. Bruno, F. Cultrera, M. Mattia, C. Monaco, L. Scarfi, (2014), New insights in the geodynamics of the Lipari-Vulcano area (Aeolian Archipelago, southern Italy) from geological, geodetic and seismological data, *Journal of Geodynamics*.
- [29] Beccaluva, L., Gabbianelli G, Lucchini F, Rossi PL, Savelli C., (1985), Petrology and K/Ar ages of volcanics dredged from the Eolian seamounts: implications for geodynamic evolution of the Southern Tyrrhenian basin, *Earth Planet Sci Lett* 74:187-208.
- [30] Gillot, P.Y., (1987), Histoire volcanique des Iles Eoliennes: arc insulaire ou complexe orogénique anulaire?, *Le détroit de Messine (Italie). Evolution tectono-sédimentaire récente (pliocène et Quaternaire) et environnement actuel*, DT IGAL 11:35-42.
- [31] Lavecchia, G., F. Ferrarini, R. de Nardis, F. Visini, and M. S. Barbano (2007), Active thrusting as a possible seismogenic source in Sicily (southern Italy): Some insights from integrated structural-kinematic and seismological data, *Tectonophysics*, 445, 145-167, doi:10.1016/j.tecto.2007.07.007.
- [32] Passaro, S., (2005), Integrazione di dati magnetici e morfobatimetrici in aree marine vulcaniche e non vulcaniche, Tesi di dottorato.
- [33] Saccà, C., D. Saccà, P. Nucera, A. De Fazio, (2011), Composition and geochemistry of clay sediments offshore the northeastern Sicilian coast (Southeastern Tyrrhenian Sea, Italy), *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume 92, Issue 4, 20 May 2011, Pages 564-572.
- [34] Ventura, G., G. Vilardo, G. Milano, N. A. Pino, (1999), Relationships among crustal structure, volcanism and strike-slip tectonics in the Lipari-Vulcano Volcanic Complex (Aeolian Islands, Southern Tyrrhenian Sea, Italy), *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Volume 116, Issues 1-4, December 1999, Pages 31-52.
- [35] Bragagni, A., R. Avanzinelli, H. Freymuth, L. Francalanci, (2014), Recycling of crystal mush-derived melts and short magma residence times revealed by U-series disequilibria at Stromboli volcano, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 404, 15 October 2014, Pages 206-219.
- [36] Gamberi, F., Marani, M.P., 2004. Deep-sea depositional systems of the Tyrrhenian Basin. In: Marani, M., Gamberi, F., Bonatti, E. (Eds.), *From Seafloor to Deep Mantle: Architecture of the Tyrrhenian Backarc Basin*. *Memorie Descrittive Della Carta Geologica D'Italia*, vol. 64, pp. 127e146. Roma.

Studio geochimico dei sedimenti e delle acque superficiali del fiume Sele finalizzato alla modellazione matematica della diffusione degli inquinanti in mare. (Golfo di Salerno)

Angela Frunzo
CNR IAMC Sede di Napoli
Napoli
angelafrunzo@yahoo.it

Marco Race
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale -
DICEA
Università degli studi di Napoli "Federico II", Napoli
marco.race@unina.it

Giuseppe Nardi
Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle
Risorse – DISTAR
Università degli Studi di Napoli "Federico II", Napoli,
nardi@unina.it

Luigi Frunzo
Dipartimento di Matematica e Applicazioni "Renato
Caccioppoli" Università degli studi di Napoli "Federico II"
luigi.frunzo@unina.it

Sommario— Lo studio in oggetto, condotto nell'ambito del corso di formazione OTTIMA, progetto TESSA ha avuto come obiettivo principale la valutazione dell'inquinamento del fiume Sele mediante la determinazione delle concentrazioni di metalli pesanti e Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA) nei sedimenti e di azoto ammoniacale e COD nelle acque superficiali. L'indagine geochimica sperimentale ha permesso l'individuazione delle aree sorgenti di contaminazione. I campionamenti sono stati effettuati in punti nodali lungo l'asta principale del bacino del fiume Sele, ovvero alle immissioni di canali consortili e in corrispondenza dei suoi principali affluenti. È stato inoltre elaborato un modello matematico, in ambiente MATLAB, basato essenzialmente su un sistema di equazioni differenziali a derivate parziali paraboliche, volto a modellare la distribuzione lungo la costa dei contaminanti presenti esclusivamente nelle acque superficiali. I risultati ottenuti mostrano come: i valori quantitativi dei metalli pesanti rilevati lungo l'asta del fiume Sele e alla foce sono inferiori ai limiti prescritti dal D. Lgs 152/06 e s.m.i, mentre i valori di piombo e nichel sono superiori a quelli prescritti dalla legge D.M 59/09. La loro provenienza nel sistema fluviale principale è dovuta all'apporto del fiume Calore e dei canali consortili. Le analisi geochimiche sulle acque hanno messo in evidenza valori di ammoniaca e COD superiori a quanto prescritto dal D. Lgs 152/06; le aree di provenienza sono uguali alle precedenti. L'elaborazione del modello fisico-matematico applicato alle acque, con la discretizzazione dell'equazione di convezione-diffusione ha permesso di ottenere una simulazione del fenomeno in tre casi fisici differenti. Le simulazioni numeriche effettuate hanno mostrato che, dopo la definizione del campo di moto, le concentrazioni dell'inquinante all'interno del dominio spaziale d'integrazione possono essere stimate in dettaglio.

Parole-chiave: sedimenti; acque superficiali; metalli pesanti; azoto ammoniacale; COD; modello matematico.

INTRODUZIONE

Il presente lavoro, svolto presso il Dipartimento DISTAR - Università degli studi di Napoli "Federico II", nell'ambito Progetto TESSA - (PON01-02823) – Corso di formazione "OTTIMA" presso l'IAMC-CNR, Sede di Napoli, ha avuto come obiettivo principale lo studio dell'area sorgente dei contaminanti presenti nei sedimenti e nelle acque fluviali del fiume Sele, la loro concentrazione nella zona di foce e la probabile distribuzione lungo la costa degli inquinanti presenti nelle acque superficiali, mediante l'utilizzo di un modello matematico opportunamente definito. Durante una prima fase di lavoro è stata effettuata la caratterizzazione qualitativa e quantitativa degli inquinanti presenti nel fiume Sele, basata su una maglia di campionatura lungo il bacino imbrifero e finalizzata all'individuazione delle probabili aree di apporto di inquinanti. Una seconda fase di lavoro è stata rivolta alla stesura del modello matematico ed alla sua discretizzazione. Una terza fase di lavoro è consistita nell'applicazione del modello al caso fisico in studio. I campionamenti dei sedimenti sono stati effettuati in punti nodali lungo l'asta principale del bacino del fiume Sele, alle immissioni di canali consortili o in corrispondenza dei suoi principali affluenti. I campioni di acque superficiali sono stati prelevati nei punti nodali suddetti ed in aree in cui le acque presentavano evidenze di potenziale inquinamento per densità e colorazione. Entrambi i campionamenti sono stati effettuati nel periodo di magra, in cui si ha la potenziale massima concentrazione di inquinanti nelle acque superficiali. La campionatura unica per le acque è stata determinata dal tempo disponibile per l'esecuzione dello Stage, ben sapendo che l'inquinamento delle acque presuppone un monitoraggio continuo e distribuito in un significativo arco temporale. Sui campioni dei sedimenti prelevati, conservati e catalogati, sono state condotte accurate analisi di laboratorio

per determinare le concentrazioni dei metalli pesanti: Antimonio, Arsenico, Berillio, Cadmio, Cobalto, Cromo Totale, Nichel, Piombo, Ferro, Rame, Selenio, Stagno, Tallio, Vanadio e Zinco e analisi qualitative degli IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici). Sui campioni delle acque sono state eseguite analisi per la determinazione dei seguenti parametri chimico-fisici: Azoto Ammoniacale e COD (Richiesta chimica di ossigeno). Successivamente, è stata eseguita la definizione e la stesura del modello matematico volto a modellare la distribuzione lungo la costa dei contaminanti presenti nelle acque superficiali. Il modello si basa essenzialmente su un sistema di equazioni differenziali a derivate parziali paraboliche. Definite le opportune condizioni iniziali e le necessarie condizioni al bordo, il sistema di equazioni è stato integrato utilizzando un approccio alle differenze finite. Infine, il modello matematico è stato applicato al caso fisico in esame. Le simulazioni numeriche sono state eseguite in tre casi specifici: un primo caso, in cui è stata ipotizzata una situazione di assenza di correnti costiere; un secondo caso, in cui vi è una forte corrente costiera verso sud; un terzo caso in cui vi è assenza di correnti costiere, ma presenza di una corrente verso il largo.

I. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DELL'AREA

Il bacino del fiume Sele si imposta all'interno di un'ampia morfo-struttura depressa di forma triangolare che continua a mare nel Golfo di Salerno [Bartole et al., 1984] ed è delimitata nella parte emersa a nord dagli alti strutturali della penisola Sorrentina – Monti Picentini e a sud-est dai Monti Alburni e dal Promontorio del Cilento. Il Fiume Sele, con i suoi tributari principali Tanagro e Calore Lucano, è il più importante tra i numerosi corsi d'acqua che scorrono lungo la Piana del Sele. Il fiume sorge da una sorgente carsica posta in prossimità del Monte Cervialto, anche se la principale sorgente è situata a Caposele (AV) ad una quota di 420 m s.l.m. L'asta principale del fiume Sele, ha una ampiezza di 3.236 km² per una lunghezza totale di 64 km. La portata media annua del Sele a 10 km dalla foce è di oltre 69 m³/s, di cui quasi 11 provengono dal Tanagro. Il Sele possiede un bacino di drenaggio di estensione pari a 3.314 km².

II. MATERIALI E METODI

Lo studio si è sviluppato in più fasi ed ha portato all'acquisizione di nuovi dati sulla distribuzione dei contaminanti nell'area in esame. E' stata eseguita un'approfondita ricerca di dati bibliografici e cartografici.

A. Caratterizzazione dei sedimenti

Si è proceduto poi, alla caratterizzazione dei sedimenti, con riferimento al testo pubblicato da APAT "Manuale per le indagini ambientali e dei siti contaminati" 2007 che è consistita in:

- 1) Ubicazione e densità di campionamento
- 2) Modalità di campionamento
- 3) Modalità di analisi

1) Ubicazione e densità di campionamento

Sono stati prelevati 19 campioni; in punti nodali lungo l'asta principale del bacino del fiume Sele, alle immissioni o di

canali consortili e/o dei suoi principali affluenti (Fig.1), il cui scopo principale è stato quello di individuare e valutare il contributo di ogni singolo tributario o canale sulla contaminazione dell'intero bacino, o meglio individuare le potenziali sorgenti dei contaminanti.

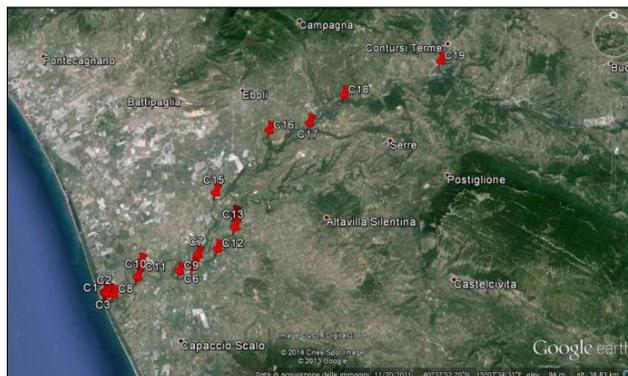


Fig. 1. Ubicazione punti di campionamento-sedimenti.

In particolare sono state privilegiate le aree prossime agli immissari e di massimo accumulo quali:

- C1 Fiume Sele, asta principale, 50 m dalla Foce; Capaccio-Paestum [N40.48102, EO14.94570]
- C2 Fiume Sele, asta principale, 40 m dalla Foce; Capaccio-Paestum [N40.48108, EO14.94569]
- C3 Fiume Sele, asta principale, 10 m dalla Foce; Eboli [N40.48139, EO14.94425]
- C4 Fiume Sele, asta principale, 20 m dalla Foce; Eboli [N40.48227, EO14.94502]
- C5 Fiume Sele, sbocco canale idrovore Consorzio destra Sele; Eboli [N40.48228, EO14.94632]
- C6 Fiume Sele, presso Ponte Barizzo, Capaccio-Paestum; [N40.29493, EO15.00576]
- C7 Fiume Sele, nel tratto tra la confluenza con il fiume Calore Lucano, Capaccio-Paestum; [N40.50471, EO15.01955]
- C8 Fiume Sele, sbocco canale idrovore Consorzio sinistra Sele; Capaccio Paestum; [N40.48054, EO14.95117]
- C9 Fiume Sele, nel tratto tra la confluenza con il Torrente Cerlito, Capaccio-Paestum, [N40.49453, EO15.00479]
- C10 Fiume Sele, canale di scarico nei pressi dell'isola, Santa Cecilia, Eboli; [N40.29284, EO14.58124]
- C11 zona industriale San Vito in località Santa Cecilia (Eboli) [N40.30015, EO14.58185]
- C12 Fiume Sele, alveo Calore, nel tratto presso l'abitato B. S. Cesareo, Albanella; [N40.30302, EO15.02088]

- C13 Fiume Sele, alveo Calore confluenza con il torrente Cosa, Albanella, [N40.52184, EO15.05049]
- C14 Fiume Sele, alveo Calore confluenza con il torrente Lama, Altavilla Silentina, [N40.53094, EO15.05225]
- C15 Fiume Sele, ansa nei pressi di Persano. [N40.32407, EO15.01579]
- C16 Fiume Sele, canale nei pressi di Eboli. [N40.35098, EO15.04414]
- C17 Fiume Sele, confluenza torrente Alimenta, Biancaneve, Serre, [N40.35312, EO15.06451]
- C18 Fiume Sele, nel tratto a monte della diga di Persano (Oasi WWF), [N40.36363, EO15.08379]
- C19 Fiume Sele, nel tratto con la confluenza del fiume Tanagro, Contursi Terme, [N40.38001, EO15.13453]

2) Modalità di campionamento

Per ogni stazione di campionamento è stata compilata una scheda di rapporto campionamento, dove vengono riportate le seguenti informazioni:

- identificativo del campione;
- data e ora del prelievo;
- nominativo rilevatore;
- identificativo del sito (provincia, comune e corso d'acqua)
- ubicazione del sito, determinata utilizzando un GPS differenziale in grado di definire le coordinate (latitudine e longitudine) con un errore massimo di 1m con relativa quota (m s.l.m.);
- battente idraulico (utilizzando un'asta graduata);
- stima dello spessore dei sedimenti (mediante infissione di un picchetto metallico);
- descrizione fisica del campione (caratteri organolettici, colore, tessitura, evidenze di contaminazione, vicinanza a scarichi e tipologia);
- metodologia di prelievo;
- foto della sezione con indicato il punto di prelievo.

Il prelievo ha interessato la parte superficiale del sedimento, per uno spessore di circa 15-20 cm, mediante campionatore manuale (cucchiaio metallico o spatola).

I prelievi sono stati effettuati con controlli di qualità in campo, quali:

- Manutenzione e calibrazione degli strumenti;
- Decontaminazione attrezzatura;
- Campioni di controllo;
- Conservazione e gestione dei campioni.

I campioni raccolti sono stati subito refrigerati e portati presso il Laboratorio di Analisi e Ricerche Ambientali "L.A.R.A." dell'Università degli studi di Napoli "Federico II" dove è stata effettuata la procedura di trattamento preliminare.

3) Modalità di analisi

Prima delle determinazioni analitiche i campioni sono stati pre-trattati. La procedura di trattamento preliminare adottata in questo studio, si è articolata nei seguenti passaggi:

a) Filtrazione

Questo trattamento ha avuto lo scopo di eliminare l'acqua interstiziale dal campione ed è consistito in una disidratazione parziale che si effettua usando filtri da 2 µm di porosità. I filtri vengono prima lavati in una apparecchiatura Soxhlet, per 24 ore con una miscela esano: acetone 1:1, e successivamente, sciacquati con acqua deionizzata, per rimuovere eventuali impurità. Il filtro, su cui viene posto il sedimento, viene messo in un imbuto di Buchner, collocato su di una beuta collegata ad una pompa a membrana. La pompa, aspirando, crea una forte depressione che favorisce la filtrazione.

b) Essiccazione

Il sedimento umido, ottenuto dal processo di filtrazione, viene posto in un cristallizzatore di vetro pyrex, per aumentarne la superficie di contatto con l'aria. I cristallizzatori, che sono stati preventivamente lavati con una soluzione acida e poi sciacquati con acqua deionizzata, vengono posti in una camera ventilata alla temperatura di circa 25 °C, fino alla completa essiccazione del campione.

c) Macinazione

Il sedimento secco viene disgregato manualmente in un mortaio di agata. La polvere ottenuta viene setacciata manualmente, con un setaccio di acciaio inox di 2 mm di porosità, al fine di eliminare il materiale grossolano ancora presente nel campione.

Terminata la fase di pre-trattamento, ciascun campione prelevato è stato suddiviso in quattro differenti aliquote, sottoposte ad analisi di laboratorio:

- due aliquote per le analisi chimiche;
- un'aliquota per la determinazione della granulometria
- un'aliquota per le analisi da parte di enti di controllo.

La determinazione della granulometria è stata eseguita tramite setacciatura manuale. Per la determinazione della distribuzione delle classi granulometriche adottate per la matrice dei sedimenti è stata utilizzata la scala di Shepard (1954).

TABELLA 1: CLASSI GRANULOMETRICHE ADOTTATE PER LA MATRICE DEI SEDIMENTI

| |
|--------------------------------|
| Ghiaia > 2 mm |
| 0,063<sabbia<2 mm |
| Pelite (limo+argilla)<0,063 mm |

Per le metodologie analitiche utilizzate si è fatto riferimento al testo pubblicato da APAT "Manuale per le indagini

ambientali e dei siti contaminati” 2007, e sono state finalizzate alla determinazione dei seguenti parametri:

- **Composti inorganici “Metalli pesanti”:** Antimonio, Arsenico, Berillio, Cadmio, Cobalto, Cromo Totale, Nichel, Piombo, Ferro, Rame, Selenio, Stagno, Tallio, Vanadio, Zinco.
- **Composti organici :** IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici)

In una prima fase sono state condotte le analisi su frazioni granulometriche diverse appartenenti a tre campioni che hanno confermato la presenza di metalli pesanti nelle frazioni più sottili. Pertanto, le analisi chimiche sono state condotte esclusivamente sulla frazione fine pelitica (limo + argilla).

d) Determinazione dei metalli pesanti:

Prima di procedere alle analisi, i campioni sono stati sottoposti a mineralizzazione. In questo studio si è utilizzata una digestione acida sotto pressione. I campioni sono stati mineralizzati, nel forno a microonde, con perossido di idrogeno/HNO₃ ultra puro (in rapporto volume/volume 1:9) secondo la procedura EPA 3051 in un recipiente, in quarzo, posto sotto pressione. In questo modo sono stati ridotti i rischi di contaminazione e la perdita di elementi volatili. Al termine del processo di digestione si è proceduto alla filtrazione in appositi matracci e alla diluizione di ciascun campione mediante acqua distillata fino ad un volume finale di 50 ml. I campioni così diluiti sono trasferiti in vials di polietilene conservati a 4 °C fino al momento dell'analisi. La determinazione analitica dei metalli è stata eseguita tramite spettrofotometro di assorbimento atomico a fiamma (FAAS) e per alcuni metalli è stata utilizzata la spettroscopia di assorbimento atomico con fornetto di grafite (GF-AAS) con l'utilizzo di standard di riferimento per ogni singolo metallo per una corretta gestione degli scostamenti reali o presunti dagli standard mediante azioni correttive e/o preventive.

e) Determinazione degli IPA (idrocarburi policiclici aromatici)

La determinazione qualitativa degli IPA è avvenuta mediante un processo di estrazione. Esistono diverse metodologie di attuazione di questo processo. Nel laboratorio dove ho operato, l'estrazione è stata eseguita mediante una miscela n-esano/acetone (in rapporto volume/volume 1:1) Inoltre ad ogni campione prima dell'estrazione è stato aggiunto uno Standard interno (“Standard Deuterati di Estrazione”), con funzione di “traccianti” che ha permesso di verificare l'assenza di errori grossolani.

L'estrazione del campione è avvenuta a caldo in forno a microonde. L'estratto ottenuto è stato concentrato, con evaporatore rotante, in bagno termostatico a 40 °C, e ad una pressione di 350 mBar. Quando il volume dell'estratto si è ridotto a circa 1÷2 mL è stata eseguita la purificazione.

Successivamente l'estratto concentrato, è stato trasferito in una colonna di 1 cm di diametro, munita di rubinetto di teflon, contenente della lana di vetro sul fondo, 10 cm di gel di silice 70÷230 mesh, 1 cm di solfato di sodio anidro, e ancora della lana di vetro, preventivamente “attivata” facendo eluire 10 mL

di n-esano. Una volta trasferito l'estratto sulla sommità di tale colonna, è stato eluito con 10 mL di n-esano (Frazione 1, da scartare) e, successivamente, con 20 mL di una miscela n-esano/diclorometano 1:1(Frazione 2). Quest'ultima frazione viene portata a secchezza, con cautela, sotto flusso di azoto. All'estratto purificato portato a secco si aggiungono 50 µL della soluzione “Standard di Siringa” e 1 µL della soluzione ottenuta e successivamente viene iniettato nello spettrometro di massa (GC/MS).

B. Caratterizzazione delle acque superficiali

La caratterizzazione delle acque superficiali è consistita in:

1) Ubicazione e densità di campionamento

Durante il corso del campionamento dei sedimenti lungo l'asta fluviale sono state riscontrate evidenti situazioni anomale del colore e densità delle acque fluviali. Ciò ha determinato la scelta di effettuare dei campionamenti anche di acque superficiali e di non limitarsi al solo prelievo di sedimenti.

Occorre sottolineare che la campionatura unica per le acque è stata determinata dal tempo disponibile per l'esecuzione dello Stage, ben sapendo che l'inquinamento delle acque presuppone un monitoraggio quasi continuo.

Sono stati prelevati 19 campioni, distribuiti omogeneamente lungo l'asta principale; prelevati sia a monte/valle delle confluenze con i principali affluenti e sia in prossimità di canali di scarico, per valutare il contributo di ogni tributario sul chimismo delle acque del fiume Sele (Fig.2)

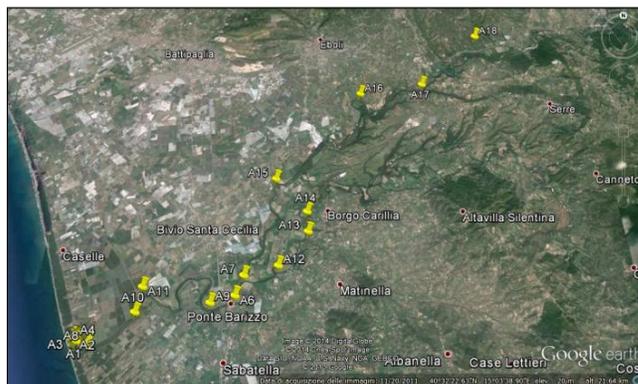


Fig. 2. Ubicazione dei punti di campionamento-acqua.

Tali prelievi sono stati effettuati immergendo un contenitore appena al di sotto della superficie dell'acqua con l'ausilio di un braccio o corda. Dopo il prelievo sono state adottate tutte le precauzioni per evitare che le analisi venissero falsate dall'alterazione del campione stesso. A questo proposito, i campioni sono stati riposti all'interno di frigo box portatili, evitando l'esposizione a fonti di calore o a sorgenti di contaminazione.

Ciascun campione prelevato è stato suddiviso in tre differenti aliquote, sottoposte ad analisi di laboratorio:

- due aliquote per le analisi chimiche;
- un'aliquota per le analisi da parte di enti di controllo

Le determinazioni analitiche sono state effettuate presso il Laboratorio di Analisi e Ricerche Ambientali "L.A.R.A." dell'Università degli studi di Napoli "Federico II" (Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, gruppo di Ingegneria Sanitaria) finalizzate alla determinazione dei seguenti parametri chimico-fisici:

- **Azoto Ammoniacale**
- **COD (Richiesta chimica di ossigeno)**

La determinazione di tali parametri chimico-fisici, ha permesso di poter ottenere effettivamente informazioni sugli sversamenti in atto, presenza di scarichi organici e sulle condizioni di "base" dell'ecosistema fluviale.

2) Metodi analitici

a) Azoto ammoniacale

L'ammoniaca, essendo una base debole facilmente volatile, può essere separata quantitativamente da una soluzione acquosa mediante distillazione ad un pH intorno a 7,4. Poiché le acque naturali hanno in genere differenti valori di pH e diverse proprietà tamponanti, al fine di mantenere il pH necessario durante il processo di distillazione, viene aggiunto al campione in esame una soluzione tampone di fosfato. L'ammoniaca raccolta nel distillato viene determinata per titolazione con una soluzione di riferimento di un acido minerale forte, utilizzando un indicatore con viraggio intorno a pH 5. Si raccoglie il distillato in una soluzione di acido borico al fine di evitare eventuali perdite.

Per l'esecuzione della misura sono stati adoperati i seguenti strumenti:

- Distillatore;
- pipetta monouso da 10 ml;
- cuvettone;
- beuta;

b) COD (Richiesta chimica di ossigeno)

Il COD rappresenta la misura dell'ossigeno necessario ad ossidare chimicamente le sostanze presenti in un campione, per mezzo di un ossidante forte in ambiente acido a caldo. Questo parametro rappresenta un indice che misura la quantità di sostanze organiche presenti in un campione. Il metodo prevede l'ossidazione delle sostanze organiche ed inorganiche, presenti in un campione, mediante una soluzione di dicromato di potassio in presenza di acido solforico concentrato e di solfato di argento, come catalizzatore dell'ossidazione. L'eccesso di dicromato è misurato attraverso metodo fotometrico. La concentrazione delle sostanze organiche ed inorganiche ossidabili, nelle condizioni del metodo, è proporzionale alla quantità di dicromato di potassio consumato.

Per l'esecuzione della misura sono stati adoperati i seguenti strumenti:

- agitatore per provette;
- pipetta;
- provette;

- digestore;
- fotometro;

C. Elaborazione Modello

1) Determinazione geometria del problema

Il modello analizzato esamina il trasporto di materia all'interno di una striscia di mare costiera a sezione longitudinale rettangolare di dimensioni $L_x=5$ km e L_y 20 km (10km a nord e 10 km a sud della foce); in cui, assunto un sistema di riferimento di assi cartesiani Oxy , la portata entrante s'immette al centro del tratto $x=L_x$ per una lunghezza di 0.05 Km. Il restante tratto risulta isolato. Le rimanenti pareti sono state considerate aperte (Fig. 3)

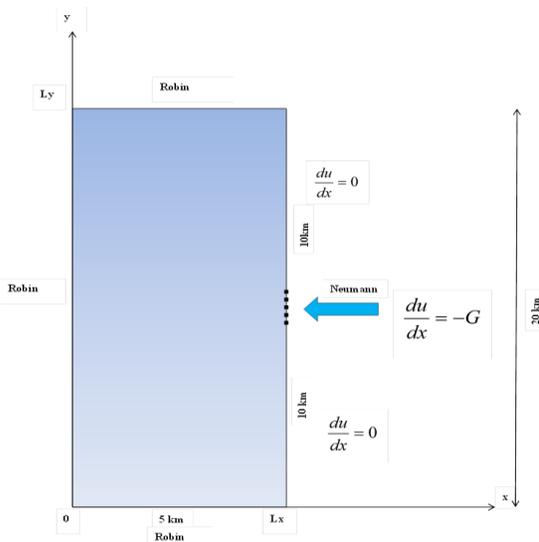


Fig. 3. Sezione longitudinale rettangolare del tratto di mare considerato

In base a tali ipotesi si assumono la componente orizzontale della velocità minore o pari a zero, mentre la componente verticale positiva o nulla, ed entrambe sono ritenute costanti in tutta la trattazione dei singoli casi in cui è stato analizzato il problema. Sia la portata entrante (foce) che la portata uscente (tre lati di mare aperto), nel momento in cui si verifica, sono caratterizzate da un'aliquota convettiva, legata al moto stesso del fluido che si introduce nel tratto di mare modellato e un'aliquota diffusiva, legata alla distribuzione di concentrazione non uniforme tra la foce e il mare.

2) Richiami teorici sul trasporto di massa

a) Equazione di convezione-diffusione

L'equazione di convezione e diffusione regola il trasferimento di materia all'interno di un sistema fluido, in cui tale materia è presente sotto forma di particelle sospese oppure è disciolta. La diffusione è il fenomeno di trasporto di materia, basato sulla legge di Fick, per la quale, se all'interno del sistema sono presenti zone a differente concentrazione, le particelle si muovono da zone a concentrazione maggiore a zone a concentrazione minore in modo da uniformare la concentrazione. Tale legge assume la seguente espressione:

$$\mathbf{q} = -\alpha \nabla U \quad (1)$$

dove “ α ” rappresenta la diffusività, espressa in m^2/s ; “ U ” rappresenta la concentrazione espressa in kg/m^3 ; “ \mathbf{q} ” indica il vettore flusso di massa per unità di area e unità di tempo (kg/m^2s).

Tale legge dice che il flusso “ \mathbf{q} ” è opposto al gradiente di concentrazione, cioè muove da zone a concentrazione maggiore a zone a concentrazione minore.

Se il fluido è in movimento avviene un trasporto di particelle per convezione e il vettore flusso di materia per unità di superficie e di tempo assume la seguente espressione:

$$\mathbf{q} = U \mathbf{v} \quad (2)$$

dove “ \mathbf{v} ” è la velocità della particella in m/s

Prendendo in considerazione un volume di controllo all’interno del sistema fluido, il principio di conservazione della massa applicato a tale volume suggerisce che la variazione di concentrazione nel tempo e all’interno del volume di controllo è uguale al flusso entrante o uscente attraverso la superficie di contorno (salvo che ci sia produzione interna di massa)

$$\int_V U_t dx = 0 = - \int_V \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dS \quad (3)$$

Dove “ \mathbf{n} ” è la normale uscente alla superficie di contorno del punto di integrazione. Il teorema della divergenza di Gauss permette di trasformare l’integrale di superficie in integrale di volume:

$$\int_V \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dS = \int_V \nabla \cdot \mathbf{q} dx \quad (4)$$

Di conseguenza il bilancio di massa sul volume di controllo assume la seguente espressione:

$$\int_V U_t + \nabla \cdot \mathbf{q} dx = 0 \quad (5)$$

E quindi, essendo V un volume qualsiasi, discende che:

$$U_t + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (6)$$

Se il trasporto di materia è imputabile al solo fenomeno di diffusione l’equazione sopra diventa:

$$U_t = \nabla(\alpha \nabla U) \quad (7)$$

chiamata “equazione di diffusione”, che per α costante assume la seguente forma

$$U_t = \alpha \Delta U \quad (8)$$

Se il trasporto per diffusione si aggiunge quello per convezione, cioè nel caso di fluidi in movimento, il bilancio di massa sul volume di controllo diviene:

$$\begin{aligned} U_t + \nabla \cdot (-\alpha \nabla U + U \mathbf{v}) &= 0 \\ U_t - \alpha \nabla U + \nabla \cdot (U \mathbf{v}) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Ovvero:

$$U_t - \alpha \nabla U + U \nabla v + v \cdot \nabla U = 0 \quad (10)$$

Se il fluido è incomprimibile $\nabla \cdot v = 0$ per cui:

$$U_t - \alpha \nabla U + v \cdot \nabla U = 0 \quad (11)$$

Nel caso monodimensionale l’espressione si può scrivere nel seguente modo:

$$U_t - \alpha U_{xx} + v_x \cdot U_x = 0 \quad (12)$$

Nel caso bidimensionale l’espressione si può scrivere nel seguente modo:

$$U_t - \alpha(U_{xx} + U_{yy}) + v_x \cdot U_x + v_y \cdot U_y = 0 \quad (13)$$

Nel caso tridimensionale l’espressione si può scrivere nel seguente modo:

$$\begin{aligned} U_t - \alpha(U_{xx} + U_{yy} + U_{zz}) + \\ v_x \cdot U_x + v_y \cdot U_y + v_z \cdot U_z = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

3) Risoluzione del problema

a) Discretizzazione dell’equazione di convezione-diffusione

L’equazione di convezione-diffusione è discretizzabile mediante metodi espliciti ed impliciti. Il metodo “Eulero forward” è un metodo esplicito che prevede l’approssimazione della derivata temporale mediante la formula di approssimazione forward e l’approssimazione delle derivate nello spazio mediante le formule centrali. Il metodo “upwind”, invece, prevede l’approssimazione backward o forward per le derivate prime nello spazio a seconda del segno della velocità: se la velocità è positiva si utilizza l’approssimazione backward, se la velocità è negativa l’approssimazione forward. Un esempio di metodo implicito è il metodo “Eulero backward” che a differenza del forward prevede un’approssimazione backward nel tempo.

Sia il metodo forward che il backward hanno un’accuratezza superiore al metodo upwind, ma quest’ultimo è preferibile perché offre buoni risultati anche nel caso di coefficiente di diffusività “ α ” prossimo allo zero, quando la convezione è preponderante rispetto alla diffusione, ovvero lì dove il metodo forward può diventare instabile e il backward, pur rimanendo stabile, può presentare risultati poco attendibili.

Si dice quindi che il metodo “upwind” lavora bene anche per numeri di Péclet di maglia elevati, in quanto il numero di Péclet rappresenta il rapporto tra la convezione e la diffusione [D’Acunto 2011].

In definitiva si è scelto di utilizzare in questa trattazione il metodo upwind che lavora bene anche quando “ α ” diventa nullo, cioè l’equazione parabolica di convezione-diffusione diventa l’equazione iperbolica di convezione o di advezione.

L’equazione che governa tale problema di convezione-diffusione bidimensionale è la seguente:

$$U_t - \alpha(U_{xx} + U_{yy}) + v_x \cdot U_x + v_y \cdot U_y = 0 \quad (15)$$

Il metodo “upwind” permette quindi di scrivere la seguente discretizzazione:

$$\begin{aligned} \frac{u_{i,k}^{j+1} - u_{i,k}^j}{\Delta t} + v_1 \cdot \frac{(u_{i+1,k}^j - u_{i,k}^j)}{\Delta x} \\ + v_2 \cdot \frac{(u_{i,k}^j - u_{i,k-1}^j)}{\Delta y} = \alpha \frac{(u_{i+1,k}^j - 2u_{i,k}^j + u_{i-1,k}^j)}{\Delta x^2} \\ + \alpha \frac{(u_{i,k+1}^j - 2u_{i,k}^j + u_{i,k-1}^j)}{\Delta y^2} \end{aligned} \quad (16)$$

dove si è usata la derivata forward per la derivata spaziale U_x relativa alla componente di velocità negativa v_1 e la derivata backward per la derivata dello spazio U_y relativa alla velocità positiva v_2 .

Si ricava che:

$$\begin{aligned} u_{i,k}^{j+1} = (1 - 2r) \cdot u_{i,k}^j + r_1(u_{i+1,k}^j + u_{i-1,k}^j) \\ + r_2(u_{i,k+1}^j + u_{i,k-1}^j) - v_1 s_1 \cdot (u_{i+1,k}^j - u_{i,k}^j) \\ - v_2 s_2 (u_{i,k}^j - u_{i,k-1}^j) \end{aligned} \quad (17)$$

dove

$$\begin{aligned} r_1 = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2}; r_2 = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta y^2}; \\ s_1 = \frac{\Delta t}{\Delta x}; s_2 = \frac{\Delta t}{\Delta y}; \\ r = r_1 + r_2; \end{aligned} \quad (18)$$

v_1 e v_2 sono le componenti di velocità all’interno del dominio.

Tale metodo è condizionatamente stabile. La condizione di stabilità è la seguente:

$$2r_1 + 2r_2 - s_1 v_1 + s_2 v_2 \leq 1 \quad (19)$$

cioè per valori di $\Delta x, \Delta y, \Delta t$ che rispettano questa condizione l’errore che nasce ad un passo di calcolo non si incrementa nei passi successivi.

b) Definizione delle condizioni a contorno

La risoluzione del problema richiede la definizione di opportune condizioni al contorno che consistono nel porre dei vincoli sui valori assunti dall’incognita sui bordi del dominio di calcolo all’istante iniziale alla luce della definizione del problema. Le condizioni a bordo per il caso oggetto di studio assumono la seguente formulazione:

Condizioni iniziali

Come condizione iniziale è stata scelta una concentrazione nulla all’interno di tutto il dominio.

Condizioni al bordo

Quali condizioni al bordo sono state utilizzate:

- **Condizione di Neumann:**
 - Flusso=0 per simulare il tratto di spiaggia ove non vi è scambio di materia fra il dominio di integrazione e lo spazio circostante;
 - Flusso $\neq 0$ per simulare il tratto di foce.
- **Condizione di Robin** per simulare lo scambio di materia tra il dominio di integrazione ed il tratto di mare circostante.

III. RISULTATI

A. Sedimenti

Le analisi eseguite sui campioni di sedimento superficiale del bacino del fiume Sele campionati nei punti nodali lungo l’asta principale, alle immissioni o di canali consortili e/o dei suoi principali affluenti hanno permesso di determinare:

- **Composti inorganici: “Metalli Pesanti”:** Antimonio, Arsenico, Berillio, Cadmio, Cobalto, Cromo Totale, Nichel, Piombo, Ferro, Rame, Selenio, Stagno, Tallio, Vanadio, Zinco.
- **Composti organici:** IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici).

In assenza di normativa specifica nazionale per i sedimenti fluviali ci si può riferire a:

D. Lgs. 3 aprile 2006, n. 152 e s.m.i. “Norme in materia ambientale”, Allegato 5, Parte IV, Titolo V, Tabella 1: *Concentrazioni soglia di contaminazione (CSC) nel suolo e nel sottosuolo riferite alla specifica destinazione d’uso dei siti da bonificare*. In tale testo normativo, all’art. 54 e 74, vengono riportate le definizioni di acque superficiali, acque interne, fiumi, laghi e standard di qualità ambientale, in recepimento della direttiva europea 2000/60/CE. **DM 367/03 “Regolamento concernente la fissazione di standard di qualità nell’ambiente acquatico per le sostanze pericolose, ai sensi dell’art.3, comma 4, del D. Lgs. 11 maggio 1999, n. 152”**. Introduce gli standard di qualità dei corpi idrici superficiali (marino-lagunari e acque dolci superficiali) e dei sedimenti, limitatamente agli ambienti di acque marine costiere, lagune e stagni costieri. Non

contempla la qualità dei sedimenti delle acque dolci superficiali. **DM n. 56/2009** Monitoraggio dei corpi idrici. Regolamento recante “*Criteri tecnici per il monitoraggio dei corpi idrici e l’identificazione delle condizioni di riferimento per la modifica delle norme tecniche del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152*” Norme in materia ambientale, predisposto ai sensi dell’articolo 75, comma 3, del decreto legislativo medesimo”. Riguarda standard di qualità dei sedimenti nei corpi idrici marino - costieri e di transizione, (parte III, alleg.1.) **ISPRA, giugno 2009 (Revisione 1)** “*Proposta per la valutazione dello stato qualitativo dei sedimenti fluviali nel sito di interesse nazionale. Fiumi Saline ed Alento.*” Introduce i Livelli Chimici di Riferimento (LCR) definiti come le concentrazioni di riferimento per ogni singolo contaminante, “non sito specifiche”. In analogia alle CSC (Concentrazioni Soglia di Contaminazione) per i suoli definite nel D. Lgs. 152/06 concorrono alla individuazione di tratti di alveo da sottoporre eventualmente ad interventi di bonifica.

I risultati analitici ottenuti dal presente studio sono stati confrontati con i valori di concentrazione soglia di contaminazione nel suolo e nel sottosuolo D. Lgs 152/2006 e s.m.i. (allegato 5 Tabella I) e DM n. 56/2009 (allegato 1, parte III) per gli standard di qualità per i sedimenti di ambiente marino-costiero e lagunare. Dal confronto si evince che nei campioni analizzati non sono stati riscontrati superamenti rispetto alle “*Concentrazioni soglia di contaminazione CSC nel suolo e nel sottosuolo*” come da D. Lgs 152/2006 e s.m.i. relativamente ai seguenti metalli: Antimonio, Arsenico, Berillio, Cadmio, Cobalto, Cromo tot, Nichel, Piombo, Rame, Selenio, Tallio, Vanadio, Zinco, Stagno.(Tab. 2).

Per il DM n. 56/2009 riguardante gli standard di qualità per i sedimenti di ambiente marino-costiero e lagunare sono stati riscontrati superamenti relativi ai seguenti metalli: piombo e nichel e cadmio (Tab. 2). Su alcuni campioni (C1-C5-C6-C8-C9-C10) sono stati analizzati qualitativamente gli IPA, riscontrando la presenza di benzopirene e naftalene, in concentrazioni nei limiti normativi.

Nonostante i valori ottenuti siano inferiori ai limiti delle concentrazioni soglia nel suolo e nel sottosuolo, si nota un arricchimento delle concentrazioni dei contaminanti nell’ area di piana e di foce (Fig. 4).

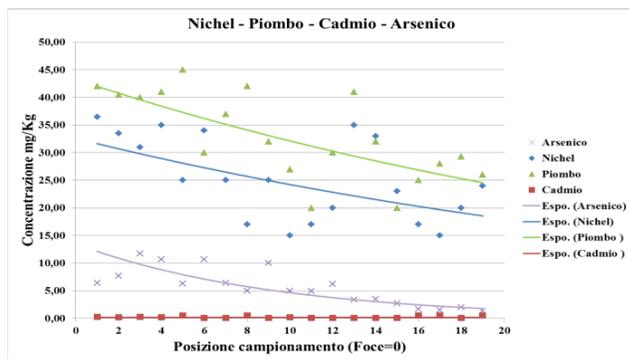


Fig. 4. Distribuzione spaziale dell’andamento delle concentrazioni “metalli pesanti” nei sedimenti in funzione delle posizioni di campionamento

Inoltre, dall’analisi effettuata è stato possibile individuare gli immissari responsabili di tale inquinamento. Nello specifico vengono mostrate (Fig. 5 e 6) le concentrazioni di nichel e piombo per ogni punto di campionamento e come esse in alcuni punti siano superiori alla media che riportati sul reticolo idrografico del fiume Sele è stato possibile individuare le principali aree di apporto di tale inquinante. In particolare l’arricchimento di nichel e piombo nell’area di foce (punti C1-C2-C3-C4) è ascrivibile all’apporto solido dei canali consortili della piana ed in particolare del fiume Calore e dei suoi affluenti. (C5 C6-C7-C8-C13-C14)

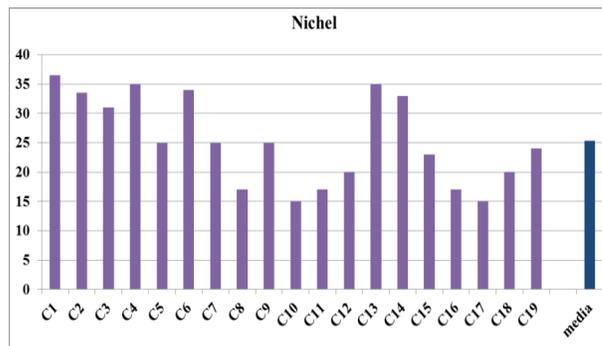


Fig. 5. Istogramma concentrazioni Nichel in funzione dei punti di campionamento

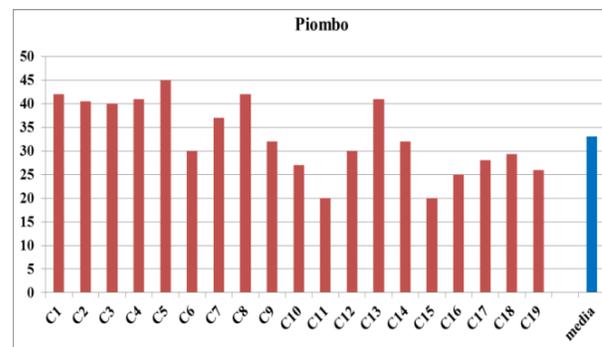


Fig. 6. Istogramma concentrazioni di piombo in funzione dei punti di campionamento

B. Acque superficiali

Dalla tabella 3 si evince un forte inquinamento di azoto ammoniacale, soprattutto in prossimità degli affluenti e dei canali di scarico, come dimostrano i valori riscontrati nei punti: A5, A6, A7, A8, A9, A12, A13, A14, A15, A17, A18 prossimi rispettivamente ad allevamenti zootecnici, zone agricole e a valle di impianti di depurazione /fogne.

I risultati analitici sono stati confrontati con i valori delle “qualità delle acque idonee alla vita dei pesci salmonidi e ciprinidi” del D. Lgs 152/06 (allegato II, parte terza, sezione II), che per l’azoto ammoniacale:

- Salmonidi: 1.00 mg/L NH₄
- Ciprinidi: 0.04 mg/L NH₄

L’azoto ammoniacale, è considerato indice di inquinamento recente di origine civile e zootecnica, in quanto deriva dalla

degradazione di composti organici azotati. In corsi d'acqua ben ossigenati, l'azoto ammoniacale risulta assente o presente in basse concentrazioni poiché viene ossidato rapidamente ad azoto nitrico. Nel bacino del Sele, le principali fonti di azoto ammoniacale sono gli scarichi zootecnici (liquami). Le maggiori concentrazioni di COD, si sono evidenziate in corrispondenza degli affluenti e dei canali di scarico dove vi è presente un alto contenuto ammoniacale. Le attività antropiche costituiscono la fonte principale di inquinamento da sostanze organiche che, attraverso gli scarichi urbani, industriali, e zootecnici, possono essere rilasciate nei corpi idrici. La presenza elevata di sostanza organica di origine animale e/o vegetale può ridurre il contenuto di ossigeno disciolto nelle acque, compromettendo la vita degli organismi acquatici. Nonostante la normativa sulle acque superficiali non fissi un limite di concentrazione vero e proprio per il COD, si può affermare che valori superiori ai 15 mg/l siano da considerarsi impattanti per l'ecosistema fluviale (Dlgs.152/99 Allegato 1, cap.3).

E' stato riscontrato un aumento della sostanza organica nella parte centrale del bacino con una diminuzione verso la foce (Fig. 7). In particolare, le concentrazioni più elevate di inquinanti sono state individuate in corrispondenza degli immissari e dei canali consortili.

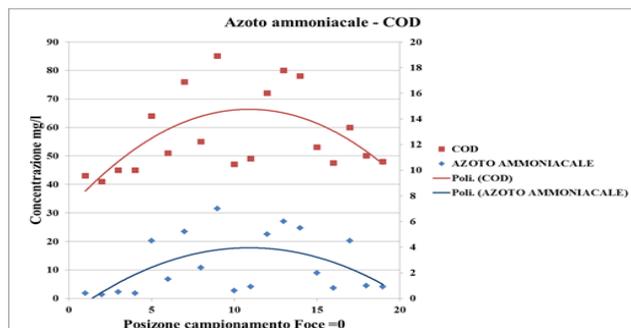


Fig. 7. Distribuzione spaziale dell'andamento delle concentrazioni di azoto ammoniacale e COD nelle acque superficiali in funzione delle posizioni di campionamento

Inoltre, la maglia di campionatura utilizzata, ha permesso di individuare e valutare il contributo di ogni singolo tributario o canale sulla distribuzione quantitativa dei contaminanti lungo il bacino e nell'area di foce.

Osservando le concentrazioni di azoto ammoniacale e di COD (Fig. 8 e 9) per ogni singolo punto di prelievo si evince un forte inquinamento in prossimità dei punti: A7, A9, A12, A13 e A14 che riportati lungo il reticolo idrografico del fiume Sele, corrispondono all'immissione del Calore Lucano ed ai suoi affluenti Lama, Cosa e Cerlito. Essi infatti, attraversano porzioni di territorio caratterizzate da intensi allevamenti zootecnici fornendo un forte contributo al degrado ambientale del fiume Calore, tributario del Sele.

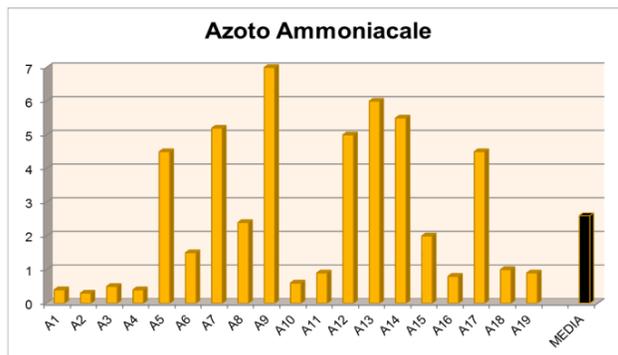


Fig. 8. Istogramma concentrazioni azoto ammoniacale in funzione dei punti di campionamento

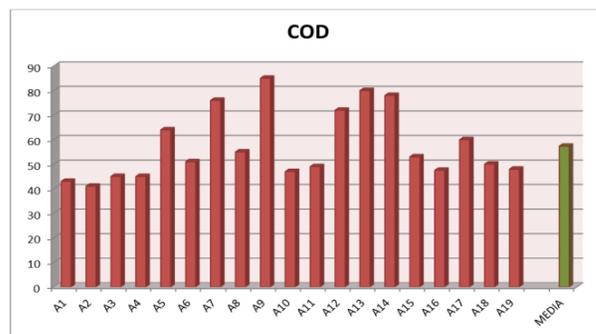


Fig. 9. Istogramma concentrazioni COD

C. Modello matematico

Il problema fisico appena descritto è stato implementato in Matlab al fine di ottenere una simulazione del fenomeno di tre casi fisici differenti.

1) Simulazione del fenomeno in Matlab

a) Caso 1

La prima simulazione ha riguardato il caso in cui, nei pressi della foce, non vi sia presenza di correnti.

$$v1=0 \quad v2=0$$

Dall'analisi dei risultati, mostrati nelle figure seguenti, si evince che l'assenza di correnti genera un aumento della concentrazione dell'inquinante nei pressi della foce. (Fig. 10 e 11).

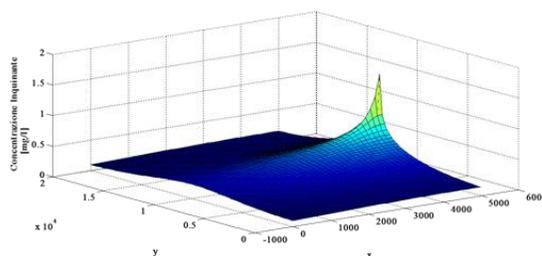


Fig. 10. Andamento della concentrazione dell'inquinante nel dominio considerato CASO 1, 3D

TABELLA 2: RISULTATI ANALITICI PER I METALLI PESANTI. CONFRONTO TRA VALORI PROPOSTI DA NORMATIVE/ORGANISMI NAZIONALI

| Metalli | Unità di misura | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 | C11 | C12 | C13 | C14 | C15 | C16 | C17 | C18 | C19 | D.M. 56/09 SQA-MA (mg/kg) | Col. A mg/kg D. Lgs. 152/06 | LCR APAT mg/kg |
|------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-------|-----|------|-----|-----|------|-----|---------------------------|-----------------------------|----------------|
| Arsenico | mg/kg | 6.4 | 7.7 | 11.7 | 10.7 | 6.3 | 10.7 | 6.4 | 5.0 | 10 | 5.0 | 4.9 | 6.2 | 3.4 | 3.5 | 2.7 | 1.7 | 1.5 | 2.0 | 1.4 | 12 | 20 | 14 |
| Cadmio | mg/kg | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 0.5 | 0.1 | 0.5 | 0.3 | 2 | 0.55 |
| Cromo tot. | mg/kg | 36 | 34.5 | 10.8 | 29.5 | 25.3 | 25 | 13 | 7.5 | 21 | 14.5 | 11 | 28.4 | 32 | 24 | 30 | 21 | 23 | 26 | 12 | 50 | 150 | 100 |
| Nichel | mg/kg | 36.5 | 33.5 | 31 | 35 | 25 | 34 | 25 | 17 | 25 | 15 | 17 | 20 | 35 | 33 | 23 | 17 | 15 | 20 | 24 | 30 | 120 | 73 |
| Piombo | mg/kg | 42 | 40.5 | 40 | 41 | 45 | 30 | 37 | 42 | 32 | 27 | 20 | 30 | 41 | 32 | 20 | 25 | 28 | 29.3 | 26 | 30 | 100 | 41 |
| Rame | mg/kg | 41.5 | 30 | 43 | 25 | 25.5 | 26 | 22 | 25.5 | 30 | 23 | 16 | 30 | 27 | 30 | 21 | 23 | 21 | 17 | 10 | - | 120 | - |
| Zinco | mg/kg | 100 | 97 | 52.5 | 94 | 119 | 76 | 86 | 37.5 | 55 | 52.5 | 65 | 92 | 102.5 | 98 | 53.4 | 52 | 63 | 38 | 52 | - | 150 | - |
| Ferro | mg/kg | 31 | 13 | 24 | 32 | 52 | 6 | 37 | 18 | 21 | 32 | 23 | 40 | 34 | 24 | 17 | 15 | 17 | 20 | 17 | - | - | - |
| Antimonio | mg/kg | 0.3 | 0.4 | 0.2 | 1.1 | 2.6 | 1.0 | 0.5 | 0.2 | 0.6 | 0.9 | 1.0 | 2.0 | 3.3 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 0.9 | 0.3 | - | 10 | - |
| Cobalto | mg/kg | 2 | 4 | 3 | 5 | 10 | 6 | 7 | 9 | 5 | 7 | 4 | 5 | 2 | 7 | 9 | 4 | 3 | 3 | 4 | - | 20 | - |
| Berillio | mg/kg | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 1.0 | 0.6 | 0.5 | 1.2 | 0.1 | 0.5 | 0.3 | 0.6 | 0.4 | 0.1 | 0.9 | 0.2 | 0.1 | 0.3 | 0.1 | - | 2 | - |
| Selenio | mg/kg | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.2 | 1.7 | 0.8 | 0.7 | 1.6 | 0.6 | 0.2 | 0.3 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 1.0 | 0.3 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | - | 3 | - |
| Tallio | mg/kg | 0.2 | 0.1 | 0.3 | 0.1 | 0.6 | 0.3 | 0.3 | 0.7 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | - | 1 | - |
| Vanadio | mg/kg | 16 | 14 | 8 | 22 | 49 | 21 | 29 | 50 | 15 | 11 | 25 | 16 | 13 | 23 | 39 | 21 | 14 | 16 | 20 | - | 90 | - |
| Stagno | mg/kg | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.3 | 0.8 | 0.2 | 0.6 | 0.7 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | - | 1 | - |

TABELLA 3: RISULTATI ANALITICI PER IL CONTENUTO DI AZOTO AMMONIACALE. CONFRONTO TRA VALORI PROPOSTI DA NORMATIVE/ORGANISMI NAZIONALI

| PARAMETRI CHIMICI | Unità di misura | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 | A11 | A12 | A13 | A14 | A15 | A16 | A17 | A18 | A19 |
|-------------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| AZOTO AMMONIACALE | mg/L NH4 | 0,4 | 0,3 | 0,5 | 0,4 | 4,5 | 1,5 | 5,2 | 2,4 | 7 | 0,6 | 0,9 | 5 | 6 | 5,5 | 2 | 0,8 | 4,5 | 1 | 0,9 |
| COD | mg/L O2 | 43 | 41 | 45 | 45 | 64 | 51 | 76 | 55 | 85 | 47 | 49 | 72 | 80 | 78 | 53 | 47,5 | 60 | 50 | 48 |

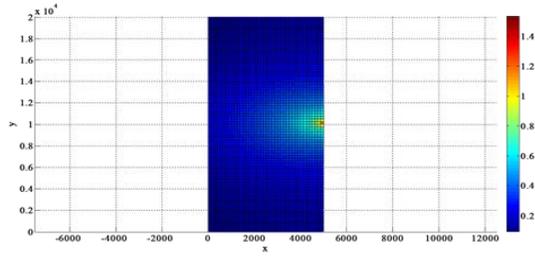


Fig. 11. Andamento della concentrazione dell'inquinante nel dominio considerato CASO 1, sezione x-y.

L'assenza di correnti costiere genera una distribuzione dell'inquinante simmetrica rispetto alla foce (Fig. 12). È possibile notare come la concentrazione dell'inquinante rimanga elevata (pari al 25%) anche a 10 km di distanza dalla foce.

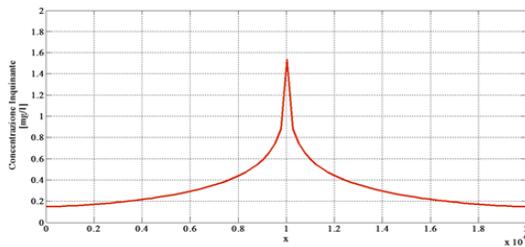


Fig. 12. Andamento delle concentrazione dell'inquinante lungo la linea costiera. CASO 1

b) Caso 2

La seconda simulazione ha riguardato il caso in cui, il tratto di mare considerato risulta interessato da una corrente costiera verso sud pari a 2m/sec e da una corrente verso il largo pari a 0.5m/sec.

$$v1=0.5 \quad v2=-2$$

Dall'analisi dei risultati, mostrati nelle figure seguenti, si evince che la presenza delle suddette correnti genera un aumento della concentrazione dell'inquinante di minore importanza rispetto al caso 1 (Fig. 13 e 14). Tale risultato era attendibile in quanto la presenza di correnti genera un trasporto di materia e quindi un effetto di "diluizione" dell'inquinante stesso.

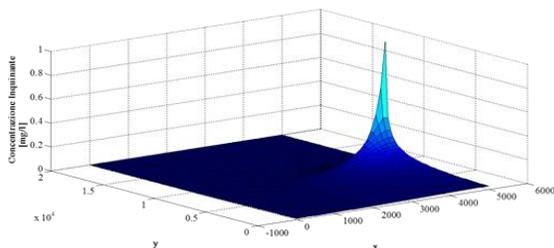


Fig. 13. Andamento della concentrazione dell'inquinante nel dominio considerato CASO 2, 3D

La presenza della corrente costiera genera una distribuzione dell'inquinante asimmetrica rispetto alla posizione della foce (Fig. 15). È possibile rilevare come si abbiano aumenti di concentrazioni solo nel lato a sud della foce.

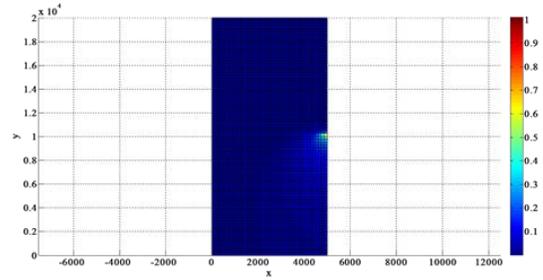


Fig. 14. Andamento della concentrazione dell'inquinante nel dominio considerato CASO 2, sezione x-y.

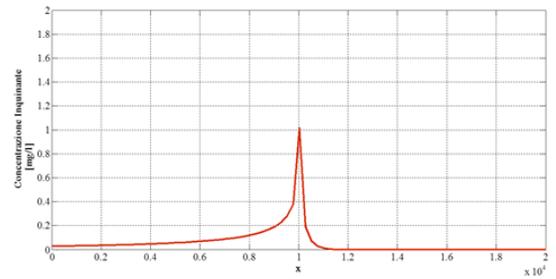


Fig. 15. Andamento delle concentrazione dell'inquinante lungo la linea costiera. CASO 2.

c) Caso 3

Il problema fisico appena descritto è stato implementato in Matlab al fine di ottenere una simulazione del fenomeno in cui vi è assenza di correnti costiere ma presenza di una corrente verso il largo.

$$v1=3 \quad v2=0$$

In presenza di una corrente diretta verso il largo le concentrazioni di inquinanti risultano molto più basse (Fig. 16 e 17). Ciò è dovuto al fatto che la situazione fisica modellata prevede un trasporto di materia verso il largo e quindi una diminuzione della stessa nei pressi della costa.

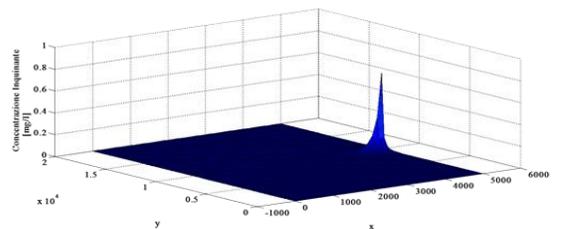


Fig. 16. Andamento della concentrazione dell'inquinante nel dominio considerato CASO 3, sezione x-y.

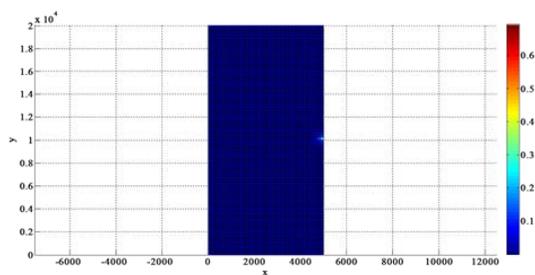


Fig. 17. Andamento della concentrazione dell'inquinante nel dominio considerato CASO 3, sezione x-y.

A dimostrazione di quanto espresso in precedenza, dalla figura 18 è possibile rilevare che già dopo poche centinaia di metri dalla foce la concentrazione d'inquinante risulta essere nulla (Fig. 17).

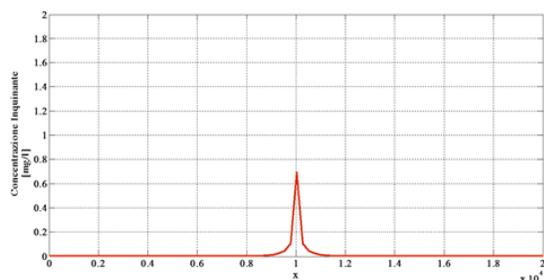


Fig. 18. Andamento delle concentrazioni dell'inquinante lungo la linea costiera. CASO 1

IV. CONCLUSIONI

I dati raccolti con le metodologie descritte hanno permesso di individuare la distribuzione quantitativa e qualitativa dei principali contaminanti presenti nei sedimenti e nelle acque superficiali lungo il bacino del fiume Sele.

Sui campioni dei sedimenti prelevati, sono state misurate le concentrazioni dei metalli pesanti, quali: Antimonio, Arsenico, Berillio, Cadmio, Cobalto, Cromo Totale, Nichel, Piombo, Ferro, Rame, Selenio, Stagno, Tallio, Vanadio, Zinco e degli IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici).

Sui campioni delle acque sono stati determinati i seguenti parametri chimico-fisici: Azoto Ammoniacale e COD (Richiesta chimica di ossigeno).

Inoltre la maglia di campionatura utilizzata, ha permesso di individuare e valutare il contributo di ogni singolo tributario o canale sulla distribuzione quantitativa dei contaminanti lungo il bacino e nell'area di foce.

I grafici realizzati mostrano un arricchimento di inquinanti nell'area di piana e di foce non spiegabile con gli apporti da monte e quindi dovuta a un maggiore apporto dei contaminanti

dalla stessa area fortemente antropizzata ed interessata soprattutto da allevamenti zootecnici. L'arricchimento presente nell'area di foce, infatti è ascrivibile all'apporto solido dei canali della piana ed in particolare dal fiume Calore e dai suoi affluenti. Non vi sono evidenze di un apporto significativo dei contaminanti dalle aste montane così come dai fiumi Tanagro. Lo stesso dicasi per la presenza di contaminanti quali ammoniaca e COD nelle acque.

Lo studio ha incluso anche la stesura e l'elaborazione in ambiente MATLAB di un modello matematico che ha permesso di modellare la distribuzione lungo la costa dei contaminanti presenti, in particolare nelle acque superficiali. Il modello è basato essenzialmente su un sistema di equazioni differenziali a derivate parziali paraboliche. Definite le opportune condizioni iniziali e le necessarie condizioni al bordo, il modello è stato integrato utilizzando un approccio alle differenze finite.

L'applicazione del modello così ottenuto al caso fisico in esame, ha riguardato tre casi specifici: un primo caso in cui si ipotizza una situazione di assenza di correnti costiere; un secondo caso in cui vi è una forte corrente costiera verso sud; un terzo ed ultimo caso in cui vi è una corrente diretta verso il largo. Le simulazioni hanno mostrato come una volta definito il campo di moto sia possibile valutare le concentrazioni dell'inquinante all'interno del dominio spaziale d'integrazione.

RINGRAZIAMENTI

"Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' - TESSA";

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] APAT Agenzia per la protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici – Manuale per le indagini ambientali nei siti contaminati, manuali e linee guida 43/2006
- [2] Bartole, R., Savelli, D., Tramontana, M. & Wezel, F.C. (1984) Structural and sedimentary features in the Tyrrhenian margin off Campania, Southern Italy. *Marine Geology*, 55, 163-180
- [3] Brancaccio, L., Cinque, A., D'Angelo, G., Russo, F., Santangelo, N. & Sgroso, I. "Evoluzione tettonica e geomorfologica della Piana del Sele (Campania, Appennino meridionale)" *Geografia fisica e dinamica* 10. 1987, pp.47-55.
- [4] Computational Partial Differential Equations for Engineering Science, Berardino D'Acunto, 2011. Nova Science Publishers (UK).
- [5] ISPRA Servizio Interdipartimentale per le Emergenze - Settore Siti Contaminati - Proposta per la valutazione dello stato qualitativo dei sedimenti fluviali nel sito di interesse nazionale Fiumi Saline ed Alento, Giugno 2009 (revisione 1).
- [6] ISPRA L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Standard di qualità di sedimenti fluviali e lacuali. Criteri e proposta. Rapporti 154/2011.

Metodologie geologiche-geofisiche per lo studio delle strutture sedimentarie di fondo mare rilevate in ambiente marino costiero per una definizione morfologica delle forme di fondo da analisi di backscatter e batimetria multibeam

Roberta Laterza
GEOMARINE S.r.l.
Via Guidi, 3/4 - 60019
Senigallia (AN), Iatlia

Sara Innangi
Istituto per l'Ambiente Marino Costiero
IAMC - CNR
Napoli, Italia
sara.innangi@iamc.cnr.it

Gabriella Di Martino
Istituto per l'Ambiente Marino Costiero
IAMC - CNR
Napoli, Italia
gabriella.dimartino@iamc.cnr.it

Renato Tonielli
Istituto per l'Ambiente Marino Costiero
IAMC - CNR
Napoli, Italia
renato.tonielli@iamc.cnr.it

Sommario— Sono state messe a punto nuove tecniche e metodologie geologico-geofisiche per lo studio delle strutture sedimentarie di fondo mare (ripples e megaripples) in ambiente marino costiero di spiaggia sommersa e piattaforma interna con la finalità di definire le dinamiche energetiche che hanno controllato la deposizione e l'orientamento delle forme di fondo e l'andamento del profilo deposizionale della spiaggia sommersa. L'analisi dei dati è stata effettuata tramite lo studio dei dati batimetrici e di backscatter acquisiti con il Multibeam Reson Seabat 7125. L'area in studio è localizzata nel settore marino prospiciente l'offshore della Sardegna sud-occidentale al di sopra del Golfo di Oristano (S. Giovanni di Sinis, Cabras). I dati batimetrici sono stati processati con il PDS2000 ed è stato, poi, costruito un Modello Digitale del Terreno (DTM) ad alta risoluzione (0.5X0.5 m). E' stata quindi effettuata un'analisi di backscatter dei dati geofisici acquisiti tramite l'opzione Sidescan sonar del Multibeam. L'interpretazione del DTM ha evidenziato che l'area è caratterizzata da un fondale di bassa pendenza con profondità comprese tra 0 e 22.5 m. Nell'area prospiciente la costa fino ai 5 m di profondità esiste un dislivello controllato dalla presenza di affioramenti rocciosi. Affioramenti rocciosi isolati con andamento preferenziale NE-SW (anti-Appenninico) sono probabilmente controllati dalla presenza di lineamenti tettonici ad andamento NE-SW nell'area marina studiata. Lo studio delle forme di fondo ha evidenziato che tali strutture si impostano su fondale prevalentemente sabbioso fino ad una profondità di 20 m e sono orientate parallelamente alla costa con un andamento NNW-SSE. Tali strutture sedimentarie sono state quindi controllate da correnti along-shore prevalenti nell'area in studio rispetto alle correnti perpendicolari alla linea di costa.

Keywords—*Multibeam; Backscatter; Sedimentologia; Oceanografia.*

INTRODUZIONE

Il concetto di morfodinamica, reciproco adattamento della topografia e della idrodinamica in seguito al trasporto dei sedimenti (Masselink e Hughes, 2003), è applicato da alcuni decenni allo studio dei sistemi costieri e, in particolare, dei litorali sabbiosi, per inquadrare in un unico schema concettuale le complesse relazioni, e le relative retroazioni, esistenti tra le forzanti meteo-marine (onde, correnti e venti), la morfologia delle spiagge, il trasporto dei sedimenti, la stratigrafia e la variabilità di questi sistemi in diversi intervalli temporali. In questo lavoro di tirocinio sono state affrontate le metodiche per lo studio dei fondali costieri. In particolare è stata analizzato il fondale marino del tratto costiero di San Giovanni di Sinis, appartenente al comune di Cabras in provincia di Oristano. La costa di quest'area sarda è caratterizzata da un continuo alternarsi di spiagge, cordoni dunali fossili, dune desertiche e falesie. Il paesaggio sottomarino di San Giovanni di Sinis è caratterizzato da zone a sabbie fini coralligene e praterie di posidonia che si spingono alle maggiori profondità per il mediterraneo occidentale, oltre i 40 metri, indice di acque molto limpide e di ricchezza di vita. In questa parte del Mediterraneo, inoltre, dominano i venti del III e IV quadrante, il maestrale e il libeccio, che raggiungono velocità spesso molto elevate e in poco tempo possono

generare forti mareggiate in grado di variare fortemente l'equilibrio nell'ambiente marino costiero. A risentirne sono soprattutto i litorali sabbiosi a componente organogena, come San Giovanni di Sinis, il quale reagisce in maniera abbastanza evidente con fenomeni erosivi e di trasporto dei sedimenti. Gli obiettivi specifici del lavoro sono:

- effettuare una ricostruzione morfologica di dettaglio del fondale con relativo studio delle forme e dei profili di spiaggia sommersa,
- studio del grid di batimetria con relativo profilo di spiaggia,
- studio delle forme di fondo rilevate da backscatter,
- relazione tra forme di fondo e regime idrodinamico.

Per effettuare questo lavoro è stato effettuato un survey geofisico con acquisizione di dati acustici con il Multibeam Seabat 7125, in grado di acquisire anche il backscatter (Opzione Sidescan sonar) ». Sia l'acquisizione, sia l'elaborazione dei dati è stato eseguito nell'ambiente software PDS2000. Tale lavoro è stato terminato mediante restituzione di un DTM (Digital Terrain Model) con risoluzione di 0,50 m.

I. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO DELL'AREA DI STUDIO

Il tratto costiero di San Giovanni di Sinis è locato nella parte occidentale della Sardegna a 10 km ovest da Oristano ed è compreso amministrativamente nel comune di Cabras. Si presenta come una lunga spiaggia alternata a zone rocciose che si sviluppa per circa 3 km da Capo San Marco, che rappresenta l'estremità settentrionale del grande Golfo di Oristano. Il litorale è costituito da sabbie quarzose fini miste a quelle di origine organogena, soprattutto gusci di conchiglie ed organismi marini. Queste mostrano una colorazione più scura rispetto ai litorali più a nord dovuta alla presenza di componenti mineralogiche provenienti dall'alterazione delle rocce vulcaniche (basalti) che caratterizzano la zona.

La Sardegna è una delle più grandi isole del Mar Mediterraneo (Fig. 1). Dal punto di vista geologico rappresenta un segmento della piastra sud-europea, separata dal continente europeo durante il Miocene inferiore (Cherchi e Montadert, 1982; Doglioni et al, 1999). Attualmente, sia la Sardegna sia l'isola della Corsica, costituiscono il margine continentale orientale del bacino delle Baleari.



Figure 1 - Area di studio: San Giovanni in Sinis (comune di Cabras, provincia di Oristano).

Questo bacino è il risultato di un importante fase di rifting che ha avuto luogo durante l'Oligocene-Miocene inferiore (Carmignani et al, 1995; Casula et al. 2001), ed è rimasto tettonicamente stabile dal Pliocene superiore (Ferranti et al., 2006). Associata a questa fase di rifting si sono sviluppati diversi bacini con andamento NW-SE. Il bacino più ad est è il Campidano graben il quale contiene più di 600 m di depositi del rift del Miocene inferiore-Pliocene, e 100 m di depositi marini superficiali e continentali del Pliocene-Quaternario (Casula et al., 2001). La subsidenza verificatasi durante il quaternario ha permesso la deposizione marina e di strati alluvionali che affiorano ampiamente in tutta l'isola. Generalmente, i depositi marini sono costituiti da arenarie poco profonde e conglomerati, e si riferiscono alla trasgressione del Tirreno (125 ky). I sovrastanti depositi non marini sono formati da arenarie di origine eolica e alluvioni sabbiosi-conglomeratici attribuibili all'ultima fase di regressione glaciale che è iniziata circa 75 ky (Oppes, 1973; Ozer, 1976; Carboni e Lecca, 1985). Altri autori suggeriscono che in alcune località le arenarie in questione sono state depositate durante la fase Tirrenica o prima (Pecorini, 1954, 1963; Federici et al. 1987; Kindler et al., 1997). La zona di San Giovanni di Sinis è locata a nord-ovest del graben Campidano (39 ° 80'N-8 ° 50'E). La sezione costiera di San Giovanni è caratterizzata da lunghe scogliere relativamente basse (max 10 m) con piccole spiagge sparse delimitate da promontori di roccia. Le spiagge si sono formate grazie all'azione di correnti parallele alla costa che riescono a trasportare sabbia ricca di bioclasti provenienti dalla zona

marina poco profonda, dove ampie distese di piante acquatiche marine, come la posidonia, sono presenti. Solo una piccola quantità di sedimenti sabbiosi-ghiaiosi derivano dall'erosione delle scogliere. In alcuni casi, dove le spiagge sono molto estese, si ha un buono sviluppo di dune e depositi eolici. La sezione costiera di San Giovanni è caratterizzata da lunghe scogliere relativamente basse (max 10 m) con piccole spiagge sparse delimitate da promontori di roccia. Le spiagge si sono formate grazie all'azione di correnti parallele alla costa che riescono a trasportare sabbia ricca di bioclasti provenienti dalla zona marina poco profonda, dove ampie distese di piante acquatiche marine, come la posidonia, sono presenti. Solo una piccola quantità di sedimenti sabbiosi-ghiaiosi derivano dall'erosione delle scogliere, e, in alcuni casi, dove le spiagge sono molto estese, si ha un buono sviluppo di dune e depositi eolici.

Nell'intera area del Sinis i litotipi affioranti sono individuabili nel basamento delle vulcaniti oligomioceniche, nei sedimenti marini depositisi dal Miocene inferiore al Pliocene inferiore, nelle coperture continentali del Pliocene medio, nelle vulcaniti e nei depositi marini e continentali del Pliocene superiore e infine nei depositi di spiaggia e nelle coperture continentali pleistoceniche e oloceniche (Fig. 2).

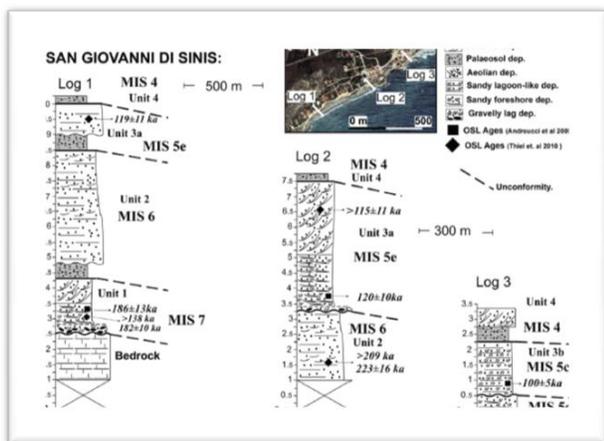


Figure 2 - Stratigrafia San Giovanni in Sinis (V. Pascucci et al, 2014).

Tra i litotipi sopracitati, quello più rappresentativo del Sinis si colloca indubbiamente nei materiali depositisi durante la sedimentazione miocenica, comunemente suddivisa in "Formazione di Capo San Marco", "Formazione di Calcari Laminati del Sinis" e "Formazione di Torre del Sevo". Il settore costiero di San Giovanni di Sinis, stratigraficamente, è caratterizzato dalla presenza di una successione di corpi sedimentari del Pleistocene medio-superiore, in appoggio su basamento costituito dalle argille marnoso-siltose appartenenti alla Formazione di Capo San Marco. La successione affiora lungo questo tratto di costa per circa 3 km; la parte meridionale di questa successione è costituita da arenarie di spiaggia sommersa ed emersa che rappresentano tre complessi marini di ambiente di transizione a bassa energia alternati a

due complessi continentali. La parte settentrionale mostra in affioramento un complesso continentale in prevalenza olocenico (Carboni & Lecca, 1985)(Fig.3).

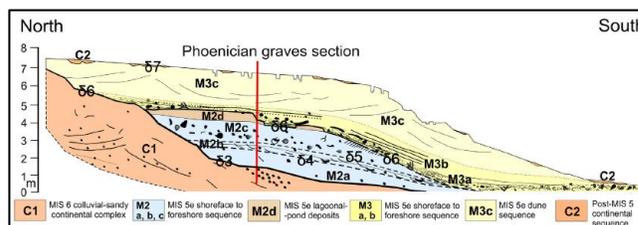


Figure 3 - Sezione stratigrafica delle sequenze marine e continentali del medio-alto Pleistocene in San Giovanni in Sinis (Lecca e Carboni, 2007).

II. AMBIENTE: CLIMA ANEMOMETRICO E ONDAMETRICO DELLA SPIAGGIA DI SAN GIOVANNI IN SINIS

La spiaggia di S. Giovanni è esposta ai venti del secondo, terzo e quarto quadrante, con lo Scirocco costituente vento di terra, e alle ondatazioni del terzo e quarto quadrante. Dalle rose dei venti e del moto ondoso (in termini di altezza significativa spettrale), relative rispettivamente alla stazione anemometrica dell'Aeronautica Militare di Capo Frasca e alla boa della rete ondometrica nazionale (RON) di Alghero, riportate in figura 4 il vento e il moto ondoso da Maestrale risultano prevalenti (sia regnanti che dominanti). E' noto che il contenuto energetico del moto ondoso incidente sulla costa occidentale della Sardegna è il più elevato dell'intero Mare Mediterraneo; in particolare, Atzeni (2003) ha stimato un flusso longitudinale di energia in direzione Nord-Sud pari a circa 1900 W/m per l'unità fisiografica di appartenenza del litorale di S. Giovanni, determinata sulla base del criterio idrodinamico proposto da Silvester (1997) e della soluzione analitica del problema della rifrazione su fondale piano secondo la teoria lineare.

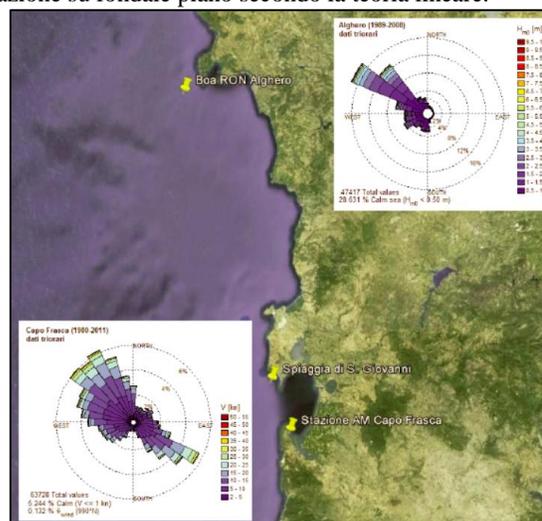


Figure 4 - Rose dei venti relative alla stazione anemometrica dell'Aeronautica Militare di Capo Frasca e alla boa della rete ondometrica nazionale (RON) di Alghero (S. Simeone et al., 2014).

III. RELAZIONE TRA STRUTTURE SEDIMENTARIE DI FONDO E CORRENTI MARINE

Una corrente che esercita al limite una forza di taglio maggiore della forza di taglio critica, oltre a trasportare, può erodere e creare strutture sedimentarie, che, essendo dovute a trazione sul fondo, si dicono trattive. Dopo che la rimozione dei granuli comincia, la morfologia del fondo si modifica: da piano diventa increspato, con una ripetuta alternanza nel senso della corrente, di piccole creste e depressioni di pochi cm (ripple marks) o al massimo di qualche decina di cm (megaripples). Aumentando la velocità della corrente e il flusso stazionario con stessa profondità, i ripples tendono a scomparire e si formano vere e proprie dune. Ripples e dune vengono definite strutture di fondo (Fig. 5). Essendo il fondo costituito da materiale incoerente, quindi rimovibile, avviene un trasporto. Essendo però la corrente in equilibrio con il fondo, tanti granuli vengono rimossi quanti ne vengono depositati. Lo spostamento laterale delle increspature è dovuto essenzialmente al deposito sul lato anteriore o frontale delle forme di fondo, che avviene per impulsi (gruppi di granuli per volta). In condizioni stazionarie non vi è deposito sul lato posteriore, o addirittura si ha erosione.

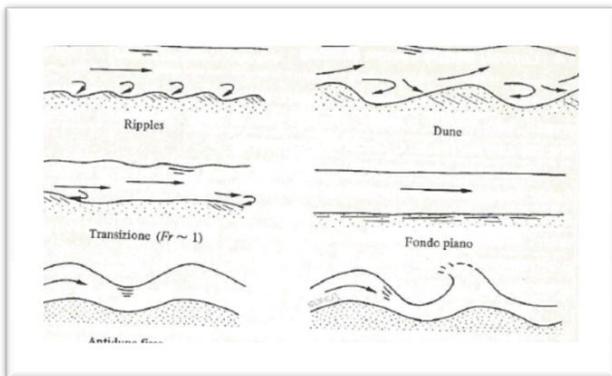


Figure 5 - Strutture di fondo mare (Ricci Lucchi, Sedimentologia)

L'altezza dei ripples è indipendente da quella della corrente, ma per le dune non è così: esse possono alzarsi oltre 1/10 o 1/5 della profondità della corrente. Aumentando ancora la velocità della corrente le dune diventano instabili, si ha un forte aumento di turbolenza e di diffusione del materiale in sospensione, una brusca caduta della resistenza morfologica dovuta alla ruvidezza e infine il fondo diventa piano come all'inizio del movimento. A questo punto si è passati a un diverso regime di flusso della corrente chiamato superiore o supercritico. Nella fase di fondo piano si sviluppa un tappeto di trazione al cui interno (urti tra granuli in movimento) e al cui limite inferiore (urti tra granuli in moto e granuli fermi) si sono trasferiti gli attriti morfologici creati dalle strutture delle fasi precedenti. Con un ulteriore aumento della corrente il fondo si increspa di nuovo formando le antidune alte fino ad 1 m e lunghe anche 6-7 m: queste hanno profilo simmetrico e la loro curvatura è in fase con quella delle onde superficiali.

Queste possono essere fisse o mobili. Se la corrente rallenta bruscamente o si interrompe le antidune scompaiono e il fondo diventa piano (Fig. 6). Se la diminuzione di velocità è graduale, si ripetono le configurazioni viste prima e si ripassa attraverso le fasi di instabilità, dune e ripples. Questi ultimi hanno la peculiarità di conservarsi anche al cessar del moto del fluido sovrastante e li possiamo trovare facilmente allo stato fossile.

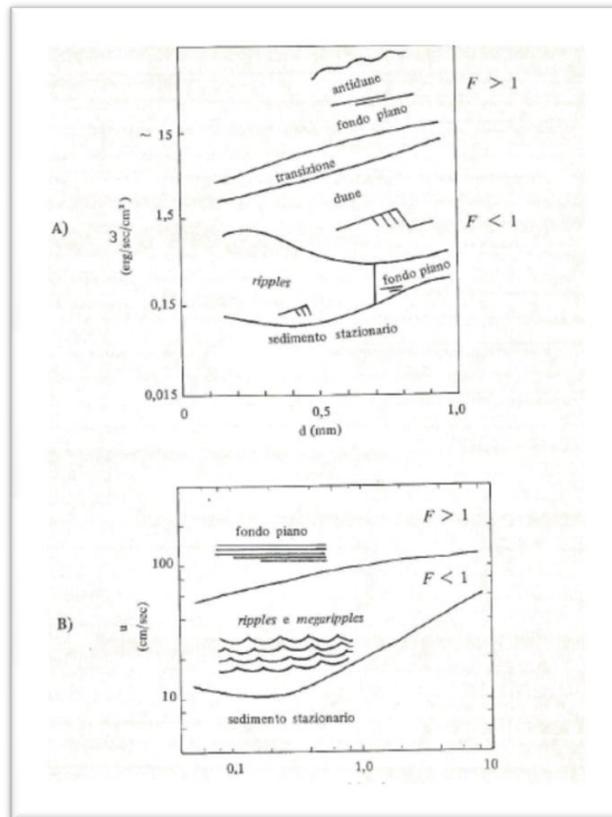


Figure 6 - Forme di fondo in relazione alla potenza di una corrente (A) e alla velocità presso il fondo del moto ondoso (B). (Allen, 1968).

In mare le correnti trattive dipendono da diversi fattori: il vento, le onde (strettamente connesse alla direzione dei venti) e da correnti marine, in particolare quelle lungo costa. Le onde ad esempio esercitano i loro effetti lungo spiaggia, battigia e spiaggia sommersa fino ad una profondità chiamata livello base del moto ondoso. Nei nostri mari questo livello si aggira intorno ai 10 m.

La velocità orbitale u di un'onda (Fig. 7) può raggiungere vari m/s. In acqua profonda ($D > L/2$) il diametro dell'orbita diminuisce esponenzialmente verso il basso. A $D = L/2$ è già ridotto del 5% di quello superficiale. L'agitazione dell'acqua e lo sforzo superficiali sono dunque trascurabili: il sedimento non si muove e l'onda non è decelerata dall'attrito. In acque basse ($D < L/2$) le onde si modificano:

- Si riduce la celerità, producendo quindi rifrazione,

- Diminuisce la lunghezza,
- Aumenta la pendenza (H/L),
- L'orbita circolare diventa ellittica, sempre più schiacciata verso il fondo,
- La forma diventa asimmetrica, i fronti si inclinano e si rompe (frangenza).

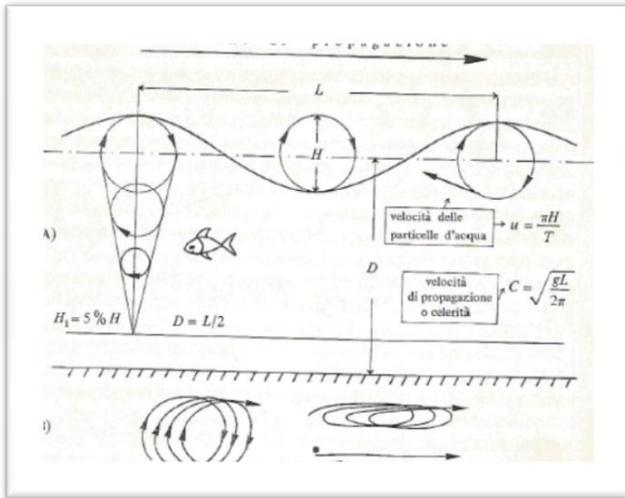


Figure 7 - Onda in acqua alta (A) e deformazioni del moto orbitale in acqua bassa (B) (Blatt, Middleton & Murray, 1972).

MATERIALI E METODI

Il survey si è svolto a bordo della M/B Sinis, un'imbarcazione appartenente all'area marina protetta del Sinis e concessa in dotazione al Consiglio Nazionale delle Ricerche. Per l'esecuzione dei lavori di acquisizione, il M/B Sinis è stato opportunamente equipaggiato con la strumentazione di seguito elencata:

- Trasduttori e UP del Reson Seabat 7125
- Sensore di movimento iXBlue Octans subsea 3000
- Sonda in continuo Reson SVP 70
- Profilatore di velocità Reson SVP 15
- GPS differenziale High Precision Trimble SPS 852
- Mareografo portatile Valeport Tide Master

IV. BREVI CENNI SULL'ACUSTICA IN ACQUA

Il suono viaggia nell'acqua come un'onda di compressione, ossia attraverso una serie di movimenti di fronti di pressione. La figura 8 mostra, attraverso una scala di grigio, le tipiche variazioni di pressione del mezzo di propagazione. Le parti scure rappresentano alta pressione, quindi un fenomeno di compressione, le parti chiare pressione bassa, quindi un fenomeno di rarefazione. Le onde di compressione si propagano con una determinata velocità nell'acqua, chiamata Local Speed of Sound (LSS). La LSS, che in mare è mediamente di 1500 m/s, varia in relazione alla salinità, alla pressione e alla temperatura dell'acqua. Tra le caratteristiche

principali di un'onda acustica ricordiamo la lunghezza d'onda e la frequenza; la prima è la distanza tra due fronti di pressione, mentre la seconda è il numero di fronti di pressione che passano in un punto stazionario per unità di tempo. La lunghezza d'onda è misurata in metri, mentre la frequenza è misurata in cicli per secondo (Hz) e sono legate attraverso la velocità del suono (m/s):

$$c = \lambda * f$$

dove c è la velocità del suono, λ è la lunghezza d'onda e f è la frequenza. Quando un'onda acustica subisce un cambiamento nella LSS, è la sua lunghezza d'onda a variare, mentre la frequenza resta invariata; questo è il motivo per cui le onde acustiche vengono generalmente descritte in termini di frequenza. Un'onda acustica è caratterizzata anche da una certa quantità di energia, che può essere misurata da un dispositivo noto come idrofono in grado di misurare le oscillazioni di pressione. La distanza di queste oscillazioni è chiamata ampiezza dell'onda, definita anche come la distanza massima percorsa da una particella dalla sua posizione di riposo durante l'oscillazione. La figura 9 mostra le componenti principali di un'onda acustica rispetto al tempo di propagazione. L'ampiezza e l'energia dell'onda acustica sono strettamente legate, e ad un valore elevato di ampiezza corrisponde un'elevata energia dell'onda. L'energia di un'onda acustica per unità di tempo (ossia la potenza dell'onda) è proporzionale al quadrato della sua ampiezza.

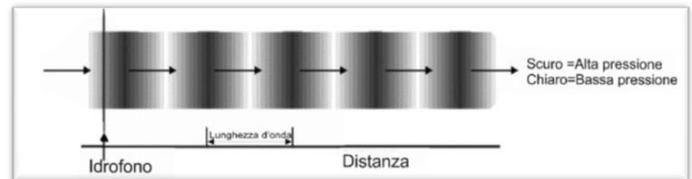


Figure 8 - Cammino di un'onda acustica. Rappresentazione dei fronti di pressione; parti scure sono alta pressione o creste, le parti chiare bassa pressione o valli (S. Innangi,2003).

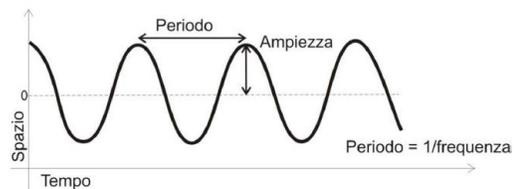


Figure 9 - Schema delle componenti dell'onda acustica (S. Innangi,2003).

L'energia dell'onda acustica viene man mano assorbita durante il suo percorso in acqua; tale perdita viene chiamata attenuazione, ed è legata alla frequenza dell'onda (bassa frequenza bassa attenuazione).

V. ECOSCANDAGLIO MULTIFASCIO (MBES MULTIBEAM ECHOSOUNDERS)

Un classico ecoscandaglio emette un'onda acustica che si espande con un fronte sferico lungo la colonna d'acqua, disperdendo l'energia acustica ugualmente in tutte le direzioni (figura 10).

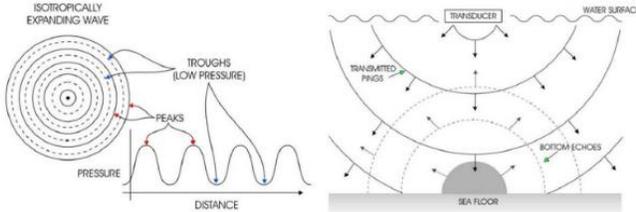


Figure 10 - Un singolo impulso acustico emesso da un classico ecoscandaglio si espande sfericamente con un'ampiezza e un'energia uniforme in tutte le direzioni (espansione isotropica o isotropic expansion) (S. Innangi,2003).

La figura 10 mostra come l'onda sferica emessa da un ecoscandaglio si espanda in tutte le direzioni e come diventa quasi impossibile determinare la direzione esatta dell'eco di ritorno. Utilizzando un array di proiettori (trasduttori elettroacustici) è possibile emettere onde acustiche la cui ampiezza varia in funzione della posizione angolare, consentendo così di formare un fascio acustico con una direzione preferenziale. In questo modo è possibile insonificare aree specifiche del fondale marino. Consideriamo due proiettori che emettono due onde acustiche identiche che si propagano nel mezzo con fronti d'onda sferici. Queste si sovrapporranno e interferiranno tra di loro (Fig. 11).

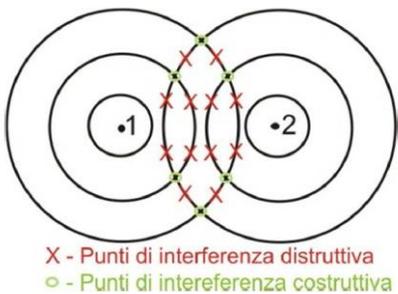


Figure 11 - Due onde acustiche emesse da due proiettori interferiranno tra loro in modo costruttivo quando i picchi dell'una corrispondono ai picchi dell'altra, in modo distruttivo in tutti gli altri punti (S. Innangi,2003)

Le interferenze sono costruttive quando i picchi di un'onda coincidono con i picchi dell'altra onda, come mostra la figura 11. E' dimostrato che la maggior parte dell'energia emessa da due proiettori si propaga perpendicolarmente agli assi di

separazione dei due proiettori (Fig. 12), formando quello che viene chiamato beam pattern.

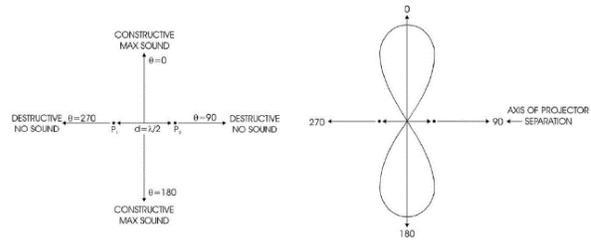


Figure 12 - Direzioni delle interferenze costruttive e distruttive di due proiettori distanti $\lambda/2$ (S. Innangi, 2014)

Il livello più alto di energia è diretto perpendicolarmente agli assi di separazione dei proiettori (Fig. 12) e gli oggetti, in queste direzioni, sono insonificati con un'energia maggiore e, di conseguenza, produrranno un eco di ritorno più forte rispetto agli oggetti insonificati nelle altre direzioni. Questa proiezione selettiva dell'energia è quella che consente di direzionare l'emissione acustica. Una classica configurazione di array di proiettori è formata da più di due elementi con un beam pattern molto complesso, di cui eviteremo la descrizione matematica, ma di cui è mostrato lo schema in figura 13. Il lobo principale (main lobe) corrisponde alla massima energia del beam pattern e il picco di proiezione corrisponde al centro del lobo, mentre il beamwidth e l'angolo solido del lobo principale (Fig. 13).

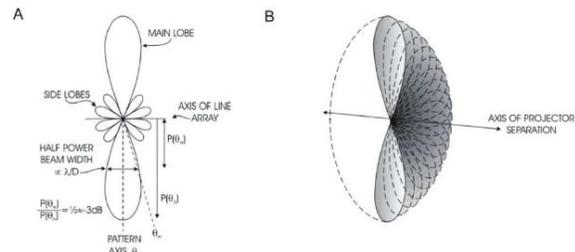


Figure 13 - Beam pattern di un array di proiettori (S. Innangi,2003)

Dall'interferenza costruttiva parziale delle onde acustiche si formano su entrambi i lati del lobo principale una serie di lobi laterali (side lobe). Poiché la direzione del lobo acustico e la localizzazione di un oggetto nella colonna d'acqua è data dal lobo principale, i lobi laterali rappresentano un disturbo nella costruzione del beam pattern, anche perché parte dell'energia viene dispersa nella loro formazione. I lobi laterali in un array di proiettori sono inevitabili, anche se esistono varie tecniche di costruzione dei trasduttori acustici per ridurre gli effetti di side lobe. In sintesi, è bene tener presente che: più è largo un array in una direzione, più stretto sarà il lobo principale nel piano perpendicolare a quella direzione; la larghezza del lobo (beamwidth) e l'angolo solido del lobo principale; i lobi laterali rappresentano un disturbo, ma la loro formazione è inevitabile, anche se è possibile ridurre la loro energia di

emissione. Un Ecoscandaglio MultiFascio, meglio conosciuto come MultiBeam (MB), è formato da un array di ricevitori perpendicolari all'array di proiettori. L'intersezione tra gli impulsi trasmessi e quelli ricevuti forma una serie di aree ellittiche sul fondo chiamate footprint. Il footprint ha una forma circolare al centro dell'array (nadir del MB) e diventa sempre più ellittico verso le parti più esterne al fascio (Fig. 14).

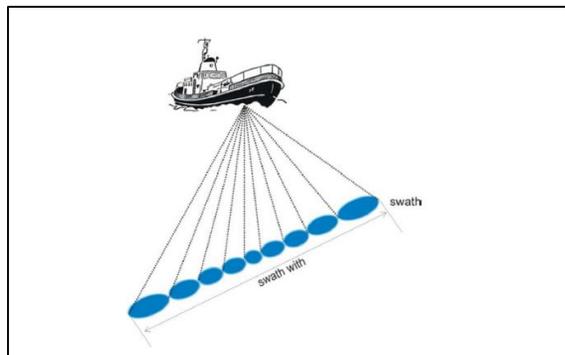


Figure 14 - Il footprint è circolare al nadir e diventa sempre più ellittico nelle parti esterne del fascio. (S. Innangi,2003)

La grandezza del footprint varia con la profondità e dipende dall'angolo tra i beam. Al nadir del MB la grandezza del footprint è uguale a:

$$Xf = \tan(\alpha) * P$$

Dove Xf è la grandezza del footprint, α è l'angolo solido dei beam e P è la profondità. Quindi ad esempio un MB con una distanza angolare di 1.5° potrà risolvere oggetti di 80 cm alla profondità di 30 m, mentre risolverà al massimo oggetti di 1.30 m alla profondità di 50 m. L'unità centrale del MB (Central Unit - CU), misura la profondità per ogni footprint (più precisamente misura il valore medio della profondità in ogni footprint) lungo l'intero swath, calcolando il tempo che ogni singolo impulso impiega ad andare e tornare (Two-Way Travel Time - TWTT) conoscendo la velocità del suono in acqua. I MB più moderni calcolano la TWTT utilizzando la fase e l'ampiezza del segnale acustico di ritorno, ed in particolare utilizzano il massimo del valore di ampiezza rilevato per gli impulsi al nadir, dove i footprint sono più circolari e l'ampiezza del segnale presenta un picco di energia ben distinguibile, mentre utilizza la fase del segnale acustico nelle parti più esterne al fascio, dove la grandezza del footprint aumenta e l'eco dei segnali acustici possono avere più picchi di ampiezza comparabili tra loro rendendo più difficile il calcolo della TWTT. Esistono differenti MB con differenti caratteristiche tecniche in termini di frequenza, numero di beam e angolo solido tra i beam che ne determinano la risoluzione orizzontale e verticale e la massima profondità operativa. La figura 15 riassume le specifiche dei principali MB. La frequenza operativa del multibeam è la caratteristica principale che distingue tutti i sistemi tra loro, infatti essa determina la massima profondità operativa e la risoluzione

verticale dello strumento. Le basse frequenze, infatti, possono viaggiare maggiormente lungo la colonna d'acqua in quanto l'attenuazione dell'onda acustica è meno forte, mentre le alte frequenze vengono attenuate molto più rapidamente dal mezzo acqua, ma hanno un potere risolutivo verticale maggiore (lunghezza dell'onda più piccola). La risoluzione orizzontale è funzione, oltre che dall'angolo tra i beam anche dalla velocità di acquisizione della nave e dal numero di impulsi emessi per secondo (ping rate). Mentre il beamwidth è una caratteristica propria dello strumento e non può essere modificata, si può migliorare la risoluzione orizzontale diminuendo la velocità della nave e aumentando il ping rate, soprattutto a profondità minori. La risoluzione orizzontale diventa indipendente dal beamwidth nelle parti più esterne al fascio, quando la TWTT è calcolata con la fase del segnale e non con l'ampiezza. Infatti l'utilizzo della fase consente al sistema di risolvere oggetti più piccoli rispetto alla reale grandezza del footprint.

| Specifiche | Bassa frequenza Acque profonde Bassa risoluzione | Frequenza medio-bassa Acque medio-profonde Risoluzione medio-alta | Alta frequenza Acque basse Alta risoluzione |
|------------------------------|--|---|---|
| Frequenza operativa | 18 - 50 kHz | 50 - 100 kHz | 100 - 455 kHz |
| Massima Profondità operativa | 10 000 m | 3000 m | 800 m |
| Angolo tra i beam | Da 1° a 4° | Da $1,2^\circ$ a 2° | Da $0,5^\circ$ a $1,5^\circ$ |
| Risoluzione Verticale | Da 7,6 m a 50 cm | Da 1,5 m a 9 cm | Da 1 cm a 12 mm |

Figure 15 - Specifiche tecniche che differenziano le caratteristiche dei multibeam e ne determinano la risoluzione verticale e orizzontale.

VI. ELABORAZIONE DATI MULTIBEAM

Lo scopo finale dell'elaborazione dei dati multibeam è quello di raggiungere la più veritiera e accurata rappresentazione del fondale marino sotto forma di modello digitale del terreno (DTM). La dimensione della cella elementare che caratterizza il DTM deve essere coerente con i limiti di accuratezza, spaziale e verticale, imposti dalle caratteristiche strumentali, nonché dai parametri di acquisizione. La risoluzione verticale dipende solo dalla frequenza della strumentazione e dalla velocità del suono nella colonna d'acqua, mentre quella orizzontale dipende dalle caratteristiche strumentali e dalla profondità. Tipiche fonti di errore possono essere:

- Un'errata calibrazione strumentale
- Un errore nel posizionamento dell'imbarcazione (salti GPS o salti della correzione differenziale)
- Mancata o incompleta correzione dell'assetto dell'imbarcazione (pitch, roll, yaw, heave)
- Problemi legati alla marea ed al profilo di velocità del suono
- Problemi connessi all'insonificazione in senso stretto.

A. Correzione del disturbo mareale

I dati acquisiti vengono corretti rispetto al livello medio delle basse maree sigiziali. Per l'acquisizione del livello di marea, eseguito sui dati di San Giovanni di Sinis (Oristano), è stata utilizzata una stazione mareografica a pressione portatile Valeport Tide Master. Questa correzione è stata effettuata in ambiente software PDS2000 (Reason-Thales). Il gap fra la bassa marea e alta nel periodo di acquisizione ha raggiunto il valore massimo di 0.40 metri (Fig. 16).

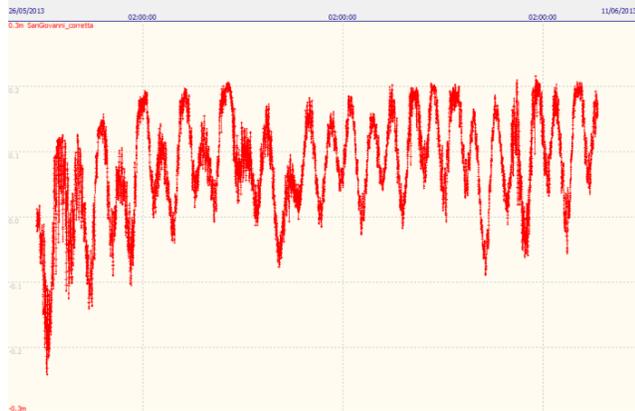


Figure 16 - Marea acquisita a San Giovanni in Sinis dal 26/05/2013 al 11/06/2013 dal mareografo portatile Valeport Tide Master.

B. Correzione dell'assetto dell'imbarcazione (pitch, roll e yaw)

Per la grande precisione del sistema diventa critica la fase di calibrazione che viene eseguita dal software di acquisizione mediante un modulo per il calcolo dei parametri di compensazione necessari al corretto funzionamento del multibeam. La calibrazione viene effettuata da specifiche linee di acquisizione (chiamate linee di calibrazione), con un confronto ricorsivo di tipo prova-errore sui profili acquisiti che consente di valutare i corretti parametri iniziali di yaw, pitch, roll e di correggere il posizionamento georeferenziato di ogni singolo beam (Fig. 17).

Sono previste:

- La misura degli offset della strumentazione in relazione allo scafo (offset orizzontali e verticali dell'antenna GPS rispetto ad un sistema di coordinate scelto, etc.)
- Una calibrazione della strumentazione e del sistema di acquisizione per roll, pitch e yaw operata svolgendo percorsi di navigazione specificatamente consigliati dalla guida PDS2000.

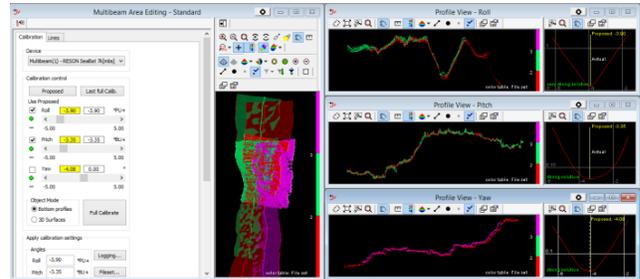


Figure 17 - Calibrazione roll, pitch e yaw in fase di processing in PDS2000

C. Correzione della navigazione

I dati della campagna di acquisizione sono stati acquisiti con sistema di posizionamento DGPS Trimble SPS 852 con precisione centimetrica. La correzione delle linee di navigazione è stata effettuata in ambiente software PDS2000 mediante il modulo "Position editor view", che riposiziona automaticamente le spazzate una volta inseriti i punti di navigazione (fix) (Fig. 18).

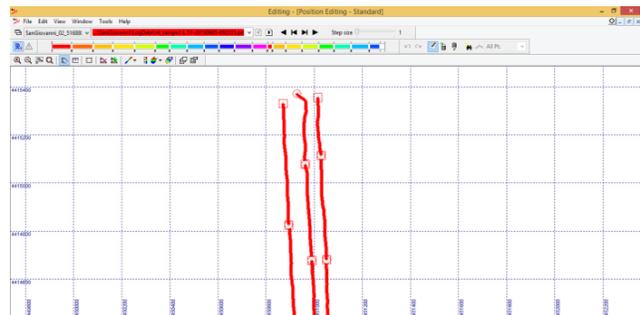


Figure 18 - Correzione spikes di navigazione dovuti a salti del segnale DGPS.

D. Rimozione degli spikes

La rimozione degli spikes locali e laterali è stata eseguita con la rimozione delle misure errate in una fase di editing specifica, evitando quindi l'utilizzo di filtri di tipo statistico in accordo con gli standard internazionali. Nella modulo di editing del PDS2000 è possibile eliminare o con filtri o manualmente gli errori sui dati. In questo lavoro è stata effettuata una pulizia manuale del dato per preservare la qualità del dato e restituire alla migliore risoluzione possibile. Le figure 19 e 20 mostrano due swath multibeam, di due linee adiacenti, prima dell'eliminazione degli spikes (Fig. 19) e dopo la rimozione degli stessi (Fig. 20), procedimento effettuato a mano per evitare errori grossolani nella batimetria.

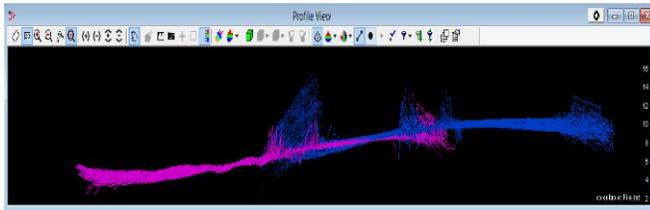


Figure 19 - Visualizzazione a schermo della pulizia dei dati. Swat MBES prima della correzione degli spikes.

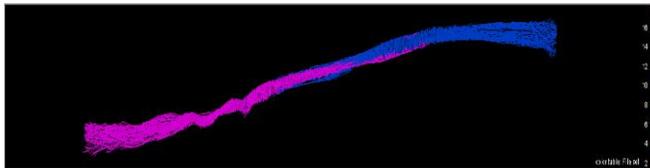


Figure 20 - Visualizzazione a schermo della pulizia dei dati. Swat MBES dopo la correzione degli spikes.

E. Il segnale di backscatter

Quando l'onda acustica viaggia lungo la colonna d'acqua e incontra un mezzo con una diversa impedenza acustica (grandezza che descrive come un fluido si oppone al passaggio delle onde sonore), viene in parte riflessa, in parte trasmessa, propagandosi nel mezzo stesso, e in parte dispersa (Fig. 21).

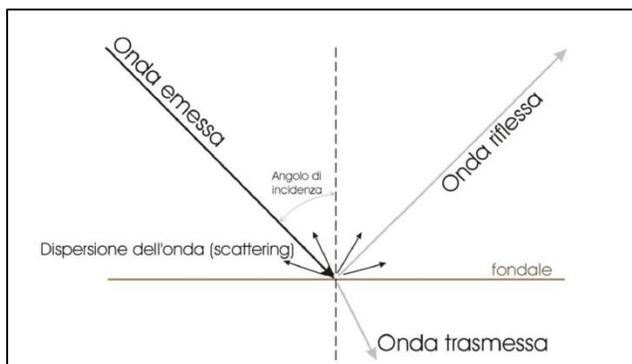


Figure 21 - Comportamento di un'onda acustica che incontra un mezzo con una differente impedenza acustica (S. Innangi,2003)

La quantità di energia dell'onda retrodiffusa che torna al ricevitore del MB viene chiamata Backscatter Strength (BS). Il BS è dipendente dall'angolo di incidenza dell'onda con il mezzo e dalle caratteristiche fisiche del mezzo stesso; se consideriamo il fondale marino, il BS dipende dalla sua tessitura, dalla sua densità e dalla sua rugosità (roughness). La figura 22 schematizza la relazione che esiste tra il contrasto di

impedenza acustica dei due mezzi e la roughness. La quantità di energia che si disperde è minore all'aumentare della roughness e al diminuire del contrasto dell'impedenza acustica; quindi un fondale articolato è poco compatto causa una diminuzione del BS.

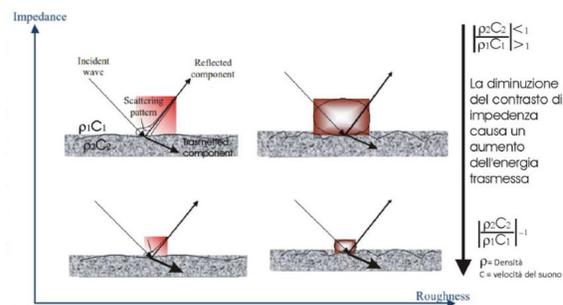


Figure 22 - Schematica rappresentazione della riflessione, della trasmissione e della dispersione dell'energia acustica in relazione alla roughness del fondale e del contrasto di impedenza acustica tra i due mezzi (S. Innangi,2003)

In molti lavori è stato dimostrato che il BS è fortemente legato alle proprietà del sedimento e in generale sedimenti fini mostrano una intensità del backscatter bassa a causa della diminuzione in densità e velocità del suono; di contro i sedimenti più grossolani presentano un più alto valore di backscatter grazie alla bassa porosità e una densità più alta dei sedimenti, oltre che ad una roughness maggiore. Infine è stato dimostrato che nei sedimenti sabbiosi il backscatter diminuisce al diminuire della dimensione media dei granuli. Nella figura 23 sono stati raggruppati alcuni esempi di sedimento in relazione alla granulometria, alla densità, alla velocità del suono e all'indice di riflessione. In generale, l'assorbimento aumenta al diminuire delle dimensioni dei granuli.

| Sedimento | Granulometria mm | ρ Kg/m ³ | v m/s | Impedenza | R |
|-------------------|------------------|--------------------------|---------|-----------|-------|
| Rocchia | >256 | 4200 | 1907 | 5134090 | 0.542 |
| Ciottoli | >64 | 2350 | 1874 | 4109130 | 0.460 |
| Sabbia grossolana | >1 | 2030 | 1836 | 3727080 | 0.420 |
| Sabbia fine | >0.125 | 1980 | 1742 | 3449160 | 0.388 |
| Silt sabbioso | >0.031 | 1560 | 1552 | 2421120 | 0.228 |
| Silt | >0.0078 | 1430 | 1535 | 2195050 | 0.181 |

ASSORBIMENTO

Figure 23 - Tabella di alcune delle proprietà fisiche dei sedimenti principali.

Lo studio del segnale di backscatter, combinato con le informazioni batimetriche, consente di ricavare le caratteristiche morfo-composizionali del fondale marino. Di conseguenza, i dati che si ottengono dai MB (sia di batimetria che di backscatter) sono stati utilizzati per ricavare le proprietà fisiche, geologiche e biologiche del fondo marino, come la

roughness, la granulometria, la presenza di Posidonia oceanica e altri bioti. In generale lo studio del backscatter è stato impiegato soprattutto per segmentare il fondale in classi e per assegnare, grazie alle verità mare, una descrizione ad ogni classe. Tutto ciò ha consentito di utilizzare il backscatter per discriminare e classificare differenti tipi di fondali. Sono differenti i metodi di registrazione del segnale di backscatter da parte dei multibeam e spesso si differenziano soprattutto a seconda del tipo di modello utilizzato (ad esempio se viene utilizzato un Reson o un Simrad, due dei principali multibeam attualmente in commercio). In generale si possono impiegare quattro modalità differenti di registrazione dei dati MB, elencate di seguito in ordine crescente rispetto alla dimensione dei dati acquisiti:

- Registrazione di un singolo valore di backscatter intorno al bottom detection di ogni footprint registrato. Questo unico valore può essere registrato o dal picco dell'intensità (beam intensity) dell'eco di ritorno, o dalla intensità media dell'ampiezza (beam average).
- Due ricevitori esterni (a destra e a sinistra) del MB registrano il segnale di ritorno (backscatter) mediandolo per tutto lo swath ed imitando la registrazione di un classico Side Scan Sonar. Questo metodo produce quello che viene chiamato SideScan-like ed è una tipica modalità di funzionamento dei sistemi Reson.
- Registrazione di un frammento dell'intero BS centrato intorno al bottom detection di ogni footprint, in un intervallo di tempo $T_0 - T_n$. Questa metodologia è chiamata Snippet nei sistemi Reson, mentre è conosciuta come Footprint Time Series nei sistemi Simrad.
- La registrazione del segnale di backscatter avviene per l'intero eco di ritorno lungo ogni beam pattern, registrando sia la fase che l'ampiezza del segnale acustico. Questa è la registrazione del backscatter di tutta la colonna d'acqua.

F. Processamento dati backscatter sidescan like

I dati sono stati elaborati nell'ambiente software SONARWIZ seguendo le seguenti fasi:

- Controllo della navigazione (navigation smooting).
- Controllo del Time Variable Gain (TVG control).
- Correzione radiometrica e geometrica del dato.
- Realizzazione del mosaico acustico.

Il controllo del TVG consente di amplificare o diminuire il segnale di backscatter per produrre un mosaico finale quanto più omogeneo possibile. Infatti uno dei problemi dell'acquisizione del segnale di backscatter da MB è l'influenza delle variazioni di power, pulse e gain che bisogna

aumentare all'aumentare della profondità per stabilizzare il fascio. Attraverso le correzioni di TVG del modulo di Isis queste variazioni possono essere diminuite, anche se non escluse del tutto, soprattutto lì dove i cambi di power sono molto bruschi, come ad esempio in presenza di piccole scarpate. Una delle correzioni geometriche più importanti da applicare è quella dello slant range. Lo slant range è definito come la linea che congiunge la distanza tra il trasduttore e il punto insonificato (Fig. 24).

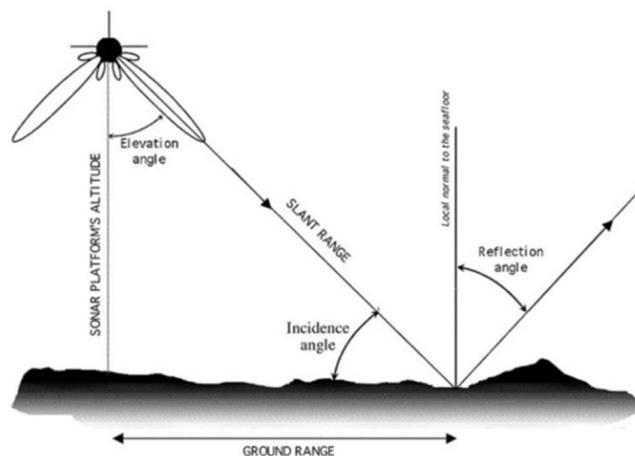


Figure 24 - Lo slant range è l'ipotenusa del triangolo compreso tra l'altezza del trasduttore dal fondo (sonar platform's altitude) e la distanza tra il centro del trasduttore e il punto insonificato (ground range) (S. Innangi,2003)

La correzione dello slant range serve ad eliminare le distorsioni sulle strutture insonificate dovute all'acquisizione di tutto il tragitto dal trasduttore al fondo, corrispondente alla colonna d'acqua.

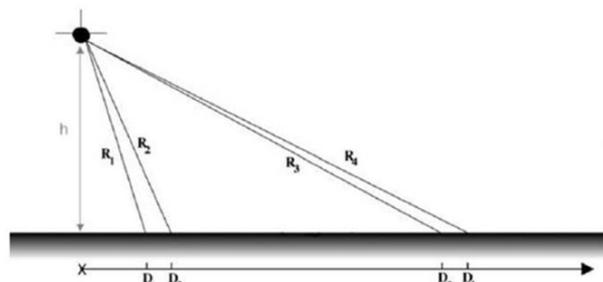


Figure 25 - Due coppie di target alla medesima distanza tra loro risulteranno più vicini se tra loro (D3-D4) rispetto a (D1-D2) perché i relativi slant range R3 e R4 sono più lunghi di R1 e R2. Questo effetto è chiamato "distorsione dello slant range" (S. Innangi,2003).

I due target D1 e D2 della figura 25 si trovano alla stessa distanza dei due target D3 e D4, solo che questi ultimi si trovano nelle parti più esterne all'insonificazione e quindi i due slant range R3 e R4 causeranno una distorsione nell'immagine facendo sembrare i due punti più vicini tra loro.

Nel caso di un fondo piatto, la correzione della distanza al suolo è equivalente a:

$$D_i = \sqrt{\left(\frac{cT_i}{2}\right)^2 - h^2}$$

dove $R_i = cT_i/2$ è lo slant range del pixel i al tempo T_i , c è la velocità del suono locale e h è l'altezza del trasduttore al fondo (Fig. 25).

Con la correzione dello slant range gli oggetti vengono riportati nella giusta posizione ed in pratica l'operazione serve ad eliminare la colonna d'acqua, infatti viene anche detto che l'immagine è "ricucita" (Fig. 26).

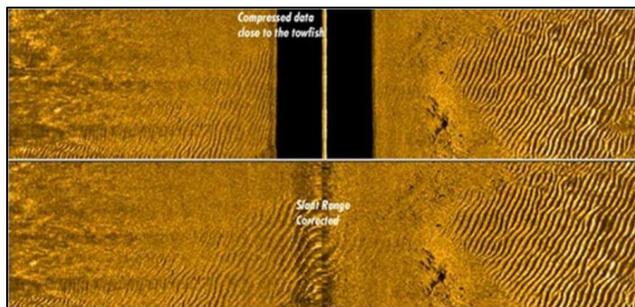


Figure 26 - Immagine side prima e dopo la correzione dello slant range.

Per quanto riguarda invece la correzione radiometrica, una delle più importanti è quella del beam angle e grazing angle applicata. Tale correzione è fondamentale per diminuire sul backscatter l'influenza dell'angolo di incidenza dell'onda acustica. Il risultato finale dell'applicazione di tale correzione è che l'immagine acustica è normalizzata, ossia il segnale di backscatter è omogeneo dal nadir all'esterno del fascio.

Una volta terminate tutte le correzioni, ogni linea è georeferenziata e può essere esportata in un file immagine. Nella fase di processing è stato necessario intervenire, linea per linea, per garantire un'attendibile qualità del dato. Solo a questo punto è stato possibile unire tutte le linee e creare un unico mosaico acustico a 20 cm di risoluzione.

RISULTATI

G. Restituzione DTM multibeam

Uno dei principali vantaggi dell'elaborazione dati di multibeam consiste nella possibilità di generare un modello digitale del terreno DTM (Digital Terrain Model) della topografia reale del fondale marino (Fig. 27) con una risoluzione che dipende sia dalle caratteristiche dell'ecoscandaglio che dall'altezza della colonna d'acqua. Contrariamente al rilievo terrestre, la computazione del DTM marino normalmente richiede tempi più lunghi sia per quanto

concerne l'acquisizione sia per la fase di processing successivo. Date le caratteristiche di settaggio dell'acquisizione e dalla profondità non troppo eccessiva della colonna d'acqua è stato possibile restituire il grid di San Giovanni di Sinis con una risoluzione spaziale orizzontale di 0.50 m.

Dall'immagine è possibile riconoscere alcune forme di fondo come i ripples, la presenza della matte di Posidonia oceanica ed alcune strutture rocciose. La baia è un bacino che raggiunge una profondità massima di circa 25 m nel settore centrale, e risulta limitata a occidente da una soglia morfologica posta intorno ai 17 m di profondità, probabilmente impostata su un lineamento di natura strutturale, orientata NW-SE. A sud la baia è limitata da una seconda soglia costituita dal prolungamento a mare di Capo San Marco, mentre tra le due soglie è presente un canale che collega il bacino interno alle aree più profonde verso SW.

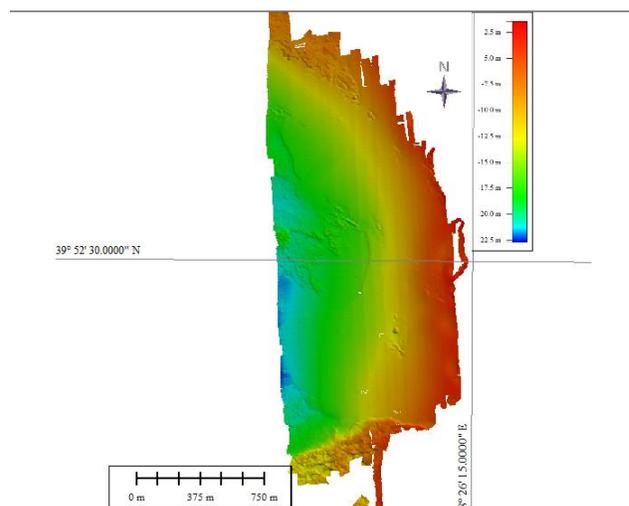


Figure 27 - Restituzione DTM multibeam risoluzione 0.50 m località San Giovanni in Sinis.

Nelle figure 28-31 sono stati riportati due profili trasversali della spiaggia di San Giovanni in Sinis ricavati dal grid di batimetria multibeam elaborato. Questi profili evidenziano la presenza della soglia esterna delimitata da un pendio acclive, e il raccordo con la linea di riva caratterizzato da un pendio più dolce. Il profilo trasversale alla spiaggia di San Giovanni e all'istmo evidenzia una netta rottura di pendio intorno ai 3-4 m di profondità con una drastica riduzione della pendenza della spiaggia sommersa verso terra. Tale rottura di pendio corrisponde ai settori di (sub) affioramento delle rocce evidenziate dalla batimetria del fondale.

Risulta evidente come nella spiaggia studiata siano notevoli gli scambi di sedimento, anche per le condizioni anemometriche e ondamiche. Lungo tutta l'estensione della spiaggia sommersa, studiando il profilo, si evidenzia un sistema a due barre: la prima più vicina alla battigia, la seconda risulta invece posizionata ad una maggior distanza.

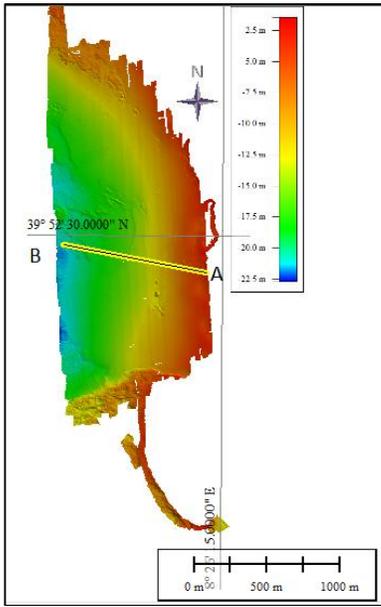


Figure 28 - Traccia della sezione del profilo trasversale delle spiagge di San Giovanni in Sinis su DTM multibeam.

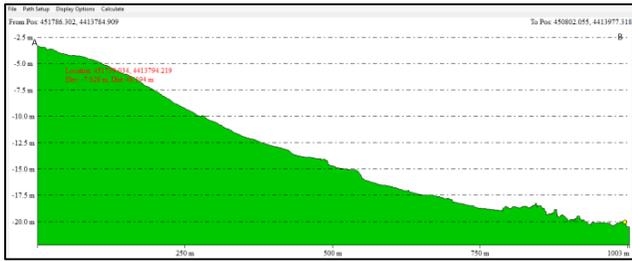


Figure 29 - Profilo trasversale della spiaggia di San Giovanni in Sinis estratto da DTM multibeam.

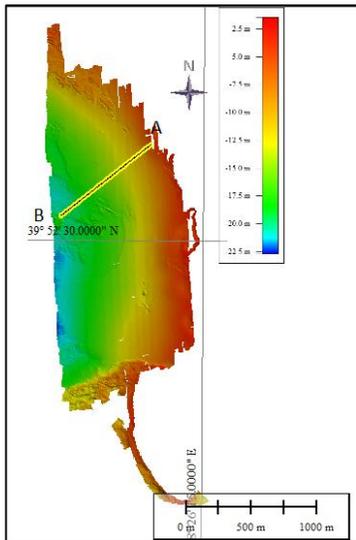


Figure 30 - Traccia della sezione del profilo trasversale delle spiagge di San Giovanni in Sinis su DTM multibeam.

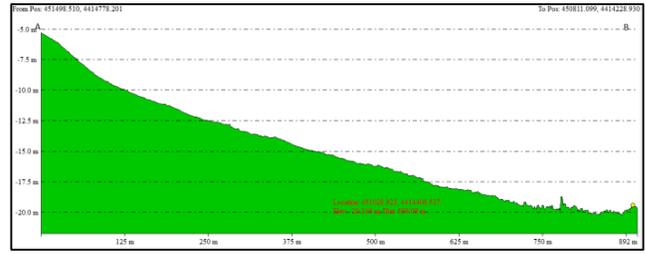


Figure 31 - Profilo trasversale della spiaggia di San Giovanni in Sinis estratto da DTM multibeam.

H. Restituzione mosaico backscatter "sidescan like"

Il mosaico del backscatter ottenuto (Fig. 32- 33) con questo tipo di processing ha restituito un buon risultato e ha consentito un'interpretazione di alto dettaglio delle caratteristiche morfo-composizionali del Fondale di San Giovanni. C'è però da sottolineare che il processing è stato molto lungo, soprattutto perché si sono dovuti eliminare, linea per linea, tutti i dati nulli presenti all'esterno di ognuna di esse. La difficoltà più elevata per l'interpretazione si è avuta nelle aree più profonde, dove la risoluzione del mosaico diminuisce e, di conseguenza, anche il dettaglio delle facies acustiche. Per questo si è voluta concentrare l'attenzione dove il dato era trattabile, tale da poter mettere in evidenza le forme di fondo non evidenti sul DTM, con conseguente riconoscimento della granulometria del fondale. Non essendo state effettuate delle campionature per la taratura del segnale acustico, l'interpretazione del mosaico è solo a carico dell'esperienza dell'operatore e dei relativi riferimenti bibliografici. Per quanto concerne l'interpretazione delle forme di fondo, dall'analisi del mosaico, sono state rilevate ripples e mega-ripples (Fig. 34) essenzialmente in sviluppo direzionale NNW-SSE (Fig.35), rinvenute sino alla profondità di 20 m circa.

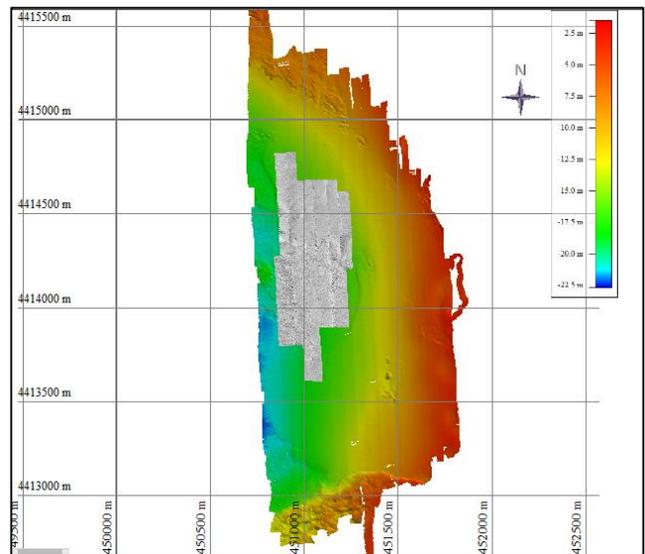


Figure 32 - Mosaico backscatter contestualizzato su DTM multibeam.

CONCLUSIONI

RINGRAZIAMENTI

Vogliamo ringraziare il Dr Simone Simeone per la sua disponibilità.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Andreucci S., Pascucci V., Andrew S., Murray , Lars B. Clemmensen (2009). Late Pleistocene coastal evolution of San Giovanni di Sinis, west Sardinia (Western Mediterranean). *Sedimentary Geology*. 04/2009; 216(3-4).
- [2] Andreucci, S., Pascucci, V., Clemmensen, L.B. (2006). Upper Pleistocene coastal deposits of West Sardinia: a record of sea-level and climate change. *GeoActa* 5, 79–96.
- [3] Andreucci S, Clemmensen Lars B., Murray A. S., Pascucci V. (2009). Middle to late Pleistocene coastal deposits of Alghero, northwest Sardinia (Italy): Chronology and evolution
- [4] Atzeni A. (2003) Effetti idrodinamici sulle spiagge della costa occidentale della Sardegna, in “Studi Costieri”, n°.7, 2003, pp. 61-8
- [5] Balzano A., De Falco G., Simeone S., Sulis A., Antognarelli F., Massaro G., Satta A., Cugusi G., Piras M., Ventroni M. (2013). Linea B - Morfodinamica della Spiaggia di S. Giovanni del Sinis (Reti per il monitoraggio delle spiagge- RESMAR)
- [6] Carboni A., Lecca L. (1985). Osservazioni sul pleistocene medio-superiore della penisola del Sinis (Sardegna occidentale). *Bollettino Societa Geologica Italiana* 104, 459–477.
- [7] Carboni S, Lecca L., Hillaire-Marcel C., Ghaleb B. (2014). MIS 5e at San Giovanni di Sinis (Sardinia, Italy): Stratigraphy, U/Th dating and “eustatic” inferences. *Quaternary International Volumes* 328–329, 10 April 2014, Pages 21–30
- [8] Carboni S., Tilocca G., Lecca L. (2013). Analisi stratigrafico-morfologica e censimento dei processi franosi in atto sulle coste alte nel settore costiero compreso tra Capo San Marco e Capo Marrargiu (Sardegna centro-occidentale). *Regione Sarda*
- [9] Carmignani L., Decandia F.A., Fantozzi P.L., Lazzarotto A., Liotta D., Oggiano G., 1995. Relationship between the tertiary structural evolution of the Sardinia–Corsica–Provençal Domain and Northern Apennines. *Terra Nova* 7, 128–137.
- [10] Casula G., Cerchi A., Montadert L., Murru M., Sarria E., 2001. The Cenozoic graben system of Sardinia (Italy): geodynamic evolution from new seismic and field data. *Marine and Petroleum Geology* 18, 863–888.
- [11] Cauli A, 2010 Caratterizzazione geotecnica e geomorfologica della costa rocciosa antistante le spiagge ricomprese nella provincia di Oristano ai fini della valutazione della pericolosità per gli utenti delle spiagge (Rapporto Tecnico).
- [12] Cherchi A., Montadert, L., 1982. The Oligo-Miocene rift of Sardinia and the early history of the West Mediterranean Basin. *Nature* 298, 736–739.
- [13] De Falco G., Tonielli R., Di Martino G., Innangi S., Simeone S., Parnum I. M., 2010 Relationships between multibeam backscatter, sediment grain size and Posidonia

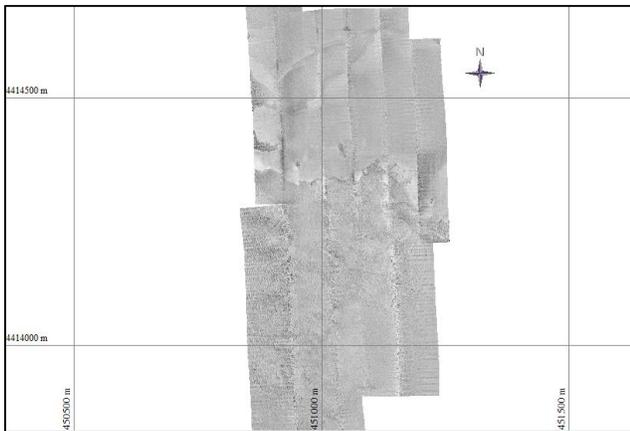


Figure 33 - Mosaico backscatter ottenuto da acquisizione multibeam (risoluzione 0.20 cm).

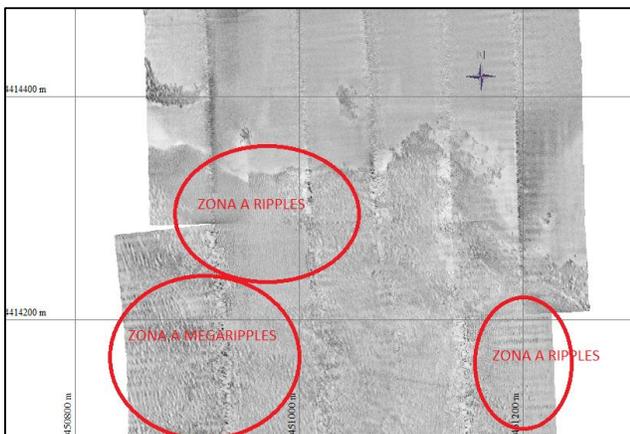


Figure 34 - Suddivisione zone a ripples e megaripples viste da mosaico backscatter opzione sidescan.

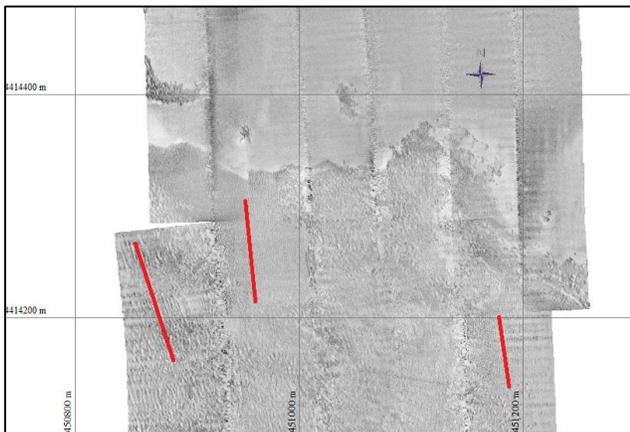


Figure 35 - Forme di fondo viste da backscatter con sviluppo e orientamento preferenziale NNW-SSE.

- oceanica seagrass distribution. *Continental Shelf Research*, vol. 30; p. 1941-1950
- [14] De Falco G., E. Molinaro, M. Barolia, S. Bellacicco 2003 Grain size and compositional trends of sediments from *Posidonia oceanica* meadows to beach shore, Sardinia, western Mediterranean. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 58 (2) 299-309
- [15] De Falco, G., Ferrari, S., Cancemi, G., & Baroli, M. (2000). Relationship between sediment distribution and *Posidonia oceanica* seagrass. *Geo-Marine Letters* 20(1), 50–57.
- [16] Doglioni C., Fernandez, M., Gueguen, E., Sa`bat, F., (1999). On the interference between early Apennines–Maghrebides back arc extension and Alps–Betics orogen in the Neogene Geodynamics of the Western Mediterranean. *Bollettino Società Geologica Italiana* 118, 75–89
- [17] Federici P., Ginesu S., Oggiano G., (1987). Evoluzione della Piana costiera Turritana. *Geografia Fisica e Dinamiche Quaternarie* 10, 103–121.
- [18] Ferranti L., Antonioli F., Mauz B., Amorosi A., Dai Pra G., Mastronuzzi G., Monaco C., Orrù P., Pappalardo M., Radtke U., Renda P., Romano P., Sansò P., Verrubbi V., (2006). Markers of the last interglacial sea-level high stand along the coast of Italy: tectonic implications. *Quaternary International* 146, 30–54.
- [19] Innangi S. (2014) - Analisi del segnale di backscatter da Ecoscandaglio MultiFascio (EMF) in ambiente marino: Applicazioni per lo studio dei fondali e delle risorse ittiche pelagiche in 3D (pp. 6-39). Tesi di Dottorato Univ Cà Foscari Venezia.
- [20] Innangi S, Barra .M., Di Martino G., Parnum I.M., Tonielli R., Mazzola S, (2015) Reson SeaBat 8125 backscatter data as a tool for seabed characterization (Central Mediterranean, Southern Italy): Results from different processing approaches. *Applied Acoustics*, Volume 87, January 2015, Pages 109-122
- [21] Kindler P., Davaud E., Strasser A., (1997). Tyrrhenian coastal deposits from Sardinia (Italy): a petrographic record of high sea levels and shifting climate belts during the last interglacial (isotopic substage 5 e). *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 133, 1–25.
- [22] Masselink G, Hughes M. G., (2003), *Introduction to coastal processes and geomorphology*, Hodder Arnold, London.
- [23] Oppes S., (1973). La geologia dell'entroterra del Golfo di Alghero (Sardegna). *Bollettino Società Sarda di Scienze Naturali* 12, 103–111.
- [24] Ozer A., Paskoff R., Sanlaville P., Ulzega A., (1980). Essai de corrélation du Pleistocene supérieur de la Sardaigne et de la Tunisie. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences Paris* 291 (D), 801–804.
- [25] Pascucci V., Sechi D., Andreucci S., (2014) Middle Pleistocene to Holocene coastal evolution of NW Sardinia (Mediterranean Sea, Italy)
- [26] Passaro S. (2005) Integrazione di dati magnetici e morfobatimetrici in aree marine vulcaniche e non vulcaniche (pp. 20-49).
- [27] Pecorini G., (1954). Le dune fossili della Nurra di Alghero. *Rend. Acc. Lincei* 16, 735–741.
- [28] Pecorini G., (1963). Contributo alla stratigrafia post-miocenica della Nurra di Alghero. *Rendiconti Facoltà Scienze. Università Cagliari*, 33; pp. 11.
- [29] Ricci Lucchi, (1980). *Sedimentologia* (pp 9-70). Clueb, Bologna.
- [30] Silvester R., (1997). *Coastal Stabilization*. World Scientific, Singapore.
- [31] Tonielli R. 2013 - Rapporto tecnico di acquisizioni su aree campione di metodologie con strumentazioni diverse per il calcolo delle maree locali. Rapporto tecnico Progetto RITMARE.

Studio per la valutazione del rischio legato alla stabilità di un tratto della falesia di Miliscola (litorale flegreo – Napoli).

Marco Sacchi
CNR - IAMC
Napoli - Italy
marco.sacchi@iamc.cnr.it

Danilo Campolo
CNR - IAMC
Napoli – Italy
danilocampolo@hotmail.it

Andrea Sgrosso
CNR - IAMC
Napoli - Italy
andrea.sgrosso@alice.it

Sommario — Il lavoro di ricerca, effettuato durante lo stage del corso di formazione “tecnologie informatiche per la sicurezza marittima”, riguarda la valutazione del rischio relativa ad alcune falesie costiere dell'area flegrea, sotto il tutoraggio del ricercatore Marco Sacchi, e nell'ambito di un più ampio progetto di ricerca, già in corso di svolgimento, afferente al PON MONICA (MONitoraggio Innovativo per le Coste e l'Ambiente marino). Questo lavoro ha permesso di acquisire nuove conoscenze nel campo dei fenomeni gravitativi, nell'ambito del risk assessment ed in particolare sullo studio della pericolosità nelle falesie costiere.

E' stato eseguito il rilevamento geologico e geomorfologico, che ha prodotto nuovi dati sulla stratigrafia e sull'assetto strutturale della falesia di Miliscola, nonché analisi strutturali di dettaglio, che hanno contribuito a migliorare la conoscenza della pericolosità nella falesia in studio, suddivisa in tre settori ad omogenea deformazione strutturale, e dalle diverse caratteristiche di possibile rischio.

Keywords — *falesie; frane; risk assessment; erosione costiera; impatto antropico; Campi Flegrei;*

INTRODUZIONE

Nell'ambito del Corso di Formazione Oceanografia operativa e Tecnologie Informatiche per la sicurezza Marittima (PON OTTIMA, Obiettivo 2: corso di “tecnologie informatiche per la sicurezza marittima” anno 2013-2014), è stato svolto un tirocinio della durata di circa tre mesi e mezzo, tra settembre e dicembre 2013; l'argomento di studio è stata la valutazione del rischio relativa ad alcune falesie costiere dell'area flegrea, sotto il tutoraggio del ricercatore Marco Sacchi, nell'ambito di un più ampio progetto di ricerca già in corso di svolgimento ed afferente al PON MONICA (MONitoraggio Innovativo per le Coste e l'Ambiente marino).

La valutazione dei rischi (hazards) è un campo di ricerca sempre più diffuso e che sta diventando indispensabile, nelle moderne società; essa è legata essenzialmente alle attività antropiche ed alla loro interazione con l'ambiente naturale e le proprie dinamiche, compresa la sua continua evoluzione.

Dopo le opportune valutazioni, è stato stabilito che sarebbe stato analizzato in dettaglio, un tratto della falesia di Miliscola, con la collaborazione dei ricercatori Fabio Matano che coordinava i lavori con alcune ditte (alle quali erano stati commissionati: il rilievo geotecnico in situ; il rilievo laser scanner e la realizzazione di ortofoto) e Danilo Campolo (tirocinante del PON MONICA) che aveva già iniziato a studiare questa falesia. (Fig. 1).

I. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

I Campi Flegrei rappresentano nel loro insieme una complessa area policroaterica (De Pippo et alii, 2008), tuttora attiva ma in stato di quiescenza, posta al margine sud-occidentale del Graben della Piana Campana; costituiscono il margine settentrionale emerso di un'ampia caldera individuata ~39 ka BP in seguito all'eruzione dell'*Ignimbrite Campana* ed al



Fig 1 – Area di studio, carta geologica in scala 1:10.000 (Lirer et alii, 2011)

conseguente ribassamento del substrato pre-quadernario (Barberi et alii, 1978; Di Girolamo et alii, 1984; Beneduce & Schiattarella, 1997; De Vivo et alii, 2001), mentre il margine meridionale sommerso è costituito dal Golfo di Pozzuoli. L'ignimbrite è una coltre piroclastica a composizione trachitica-trachifonolitica estesa per oltre 30000 km², associata ad una caldera di collasso (Rosi & Sbrana, 1987) all'interno della quale si è sviluppata un'attività di minore entità perdurata fino al 1538 d.C. con l'eruzione del Monte Nuovo. Il distretto vulcanico flegreo comprende anche le isole

d'Ischia, Procida e Vivara ed i condotti vulcanici sottomarini della porzione nord-occidentale dei golfi di Napoli e Pozzuoli. L'attività dei Campi Flegrei, tuttora in corso con manifestazioni termali e fumaroliche evidenti soprattutto nel cratere del vulcano Solfatara ed in ambiente sottomarino, probabilmente è iniziata ~2000 ka BP con le effusioni laviche del vulcano di Parete, i cui prodotti oggi sono mascherati dalla coltre di sedimenti fluviali, lacustri e marini recenti della piana costiera. (Ortolani & Aprile, 1985; Rosi & Sbrana, 1987).

A partire da ~200 ka BP (De Vivo *et alii*, 2001) si sono manifestate una serie di eruzioni a prevalente carattere esplosivo che hanno originato numerosi centri eruttivi, spesso intersecantisi, allineati lungo fratture a carattere regionale, sia ad andamento tirrenico (NO-SE) che antiappenninico (E-O), connesse alle ultime fasi tettoniche distensive quaternarie.

L'attività flegrea è stata divisa in più fasi in base all'età radiometrica delle formazioni vulcaniche (Di Girolamo *et alii*, 1984; De Vivo *et alii*, 2001). La sequenza eruttiva dei Campi Flegrei (Rosi & Sbrana, 1987; Orsi *et alii*, 2002) è suddivisa in *attività pre-caldera* (60 - 39 ka BP) e *attività post-caldera* (39 ka BP- 1538 d.C.), quest'ultima è a sua volta, separata in quattro fasi:

- A - vulcanismo antico sottomarino (39 - 15 ka BP)
- B - primo vulcanismo subaereo (15 - 8 ka BP)
- C - vulcanismo recente subaereo (4.8 - 3.8 ka BP)
- D - storica (1538 d.C.)

La falesia oggetto di studio (falesia di Marina di Vita Fumo-Miliscola) è situata a W-SW di Napoli, nel promontorio di Monte di Procida. Il promontorio rappresenta il settore occidentale dei Campi Flegrei.

Qui, l'intera falesia, classificabile come "inattiva" in quanto protetta al piede dall'erosione marina, da una scogliera radente, ha un andamento subverticale ed è formata da depositi piroclastici quaternari. Il tratto di falesia in esame (280 m di sviluppo in pianta x 100 m di altezza massima), è costituito quasi interamente dalla Formazione di Monte Grillo (spessore massimo 97 m), solo una piccola porzione (spessore massimo 3 m), presente al top della successione, è invece costituita dalla Formazione di Fiumicello.

La Formazione di Monte Grillo, datata intorno ai 70 ka (I periodo Flegreo), rappresenta il relitto di un *ash ring* a cui ci si riferisce spesso in letteratura con il nome di "Vulcano di Miliscola". È rappresentata da un deposito piroclastico (spessore totale 120 m) notevolmente eterogeneo; la successione dal basso verso l'alto (Lirer 2011; modificata) è costituita da:

- alternanza di livelli cineritici, con orizzonti scoriacei e frammenti balistici litici grossolani, immersi in una matrice sabbioso-cineritica (i frammenti litici, con diametro di 30-40 cm, durante l'evento eruttivo hanno causato evidenti impronte da impatto, nei sottostanti sedimenti piroclastici più fini);
- la parte centrale della formazione, nella porzione occidentale del tratto di falesia e per un intervallo di circa

20 m, assume una colorazione rossastra, contiene clasti pomicei e scoriacei grossolani, a luoghi saldati, subarrotondati, alternati ad orizzonti cineritico-sabbiosi; essa è chiusa a tetto da un orizzonte breccioide contenente litici lavici e frammenti ossidianacei di dimensioni decimetriche;

- la parte centrale della formazione, nella porzione orientale del tratto di falesia, risulta incoerente e caratterizzata da lenti di pomici, da centimetriche a decimetriche, immerse in una matrice sabbiosa, che passa lateralmente e verso l'alto ad una facies data da alternanza di livelli cineritici, con orizzonti scoriacei, immersi in una matrice sabbioso-cineritica di colore giallastro, in passato intensamente interessata da attività fumarolica, le cui tracce oggi sono rappresentate da incrostazioni di zolfo; risulta inoltre litificata (probabilmente da processi di zeolitizzazione) e intensamente fratturata;
- la parte alta della formazione, non interessata da trasformazioni fumaroliche, è rappresentata da un'alternanza di livelli cineritici (grigi) con livelli pomicei (bianchi) e rari livelli scoriacei (grigio scuro), questi ultimi ricchi in frammenti litici grossolani.
- La Formazione di Fiumicello, datata intorno ai 40 ka (I periodo Flegreo), nel settore di Monte di Procida costituisce la facies distale di un'eruzione avvenuta nell'odierna Isola di Procida; essa è costituita da un deposito piroclastico da caduta ben stratificato, caratterizzato da un'alternanza di strati di spessori variabili (da pochi centimetri a circa 1 m) costituiti da orizzonti cineritici massivi ricchi di lapilli accrezionari, alternanti a livelli di scorie nere gradati normalmente (dimensione massima 2 cm).

II. DESCRIZIONE MORFOLOGICA STRATIGRAFICA E STRUTTURALE

Ai fini del presente studio le Formazioni geologiche costituenti la falesia sono state suddivise in Unità litologiche separate (Fig. 2): alla Formazione di Fiumicello corrisponde l'Unità 8, mentre la Formazione di Monte Grillo è stata suddivisa in sette Unità, dalla 1 alla 7. Visto la grande estensione laterale e l'eterogeneità geomorfologica e litologica di questa falesia, si è deciso di suddividerla in 6 settori distinti aventi caratteristiche il più possibile omogenee (Fig. 3); infatti le stesse Unità presentano spessori molto diversi da un settore all'altro, essenzialmente per effetto della paleo-morfologia antecedente alla loro deposizione che ne è stata, quindi, influenzata.

Vengono di seguito illustrati i dati raccolti ed elaborati relativi a ciascun settore.



Fig.2 - Suddivisione dei depositi in otto Unità litologiche

A. Settore 1

La direzione del versante è N 110°, con un'altezza complessiva di 95 m, partendo dal basso, si distinguono 5 elementi morfologici con pendenza diversa.

Il primo è caratterizzato da una pendenza di 90° ed n'altezza di circa 5m, composto da un'alternanza con spessori decimetrici di livelli cineritici, livelli scoriacei e livelli sabbioso-cineritici con immersi frammenti litici grossolani (fino a 40 cm) che mostrano strutture da impatto, appartenenti all'Unità 1 della Formazione di Monte Grillo; la fatturazione è scarsa ma si riconoscono alcune piccole faglie.

Il secondo elemento ha una pendenza tra gli 80° ed i 90° ed è costituito da 15 m appartenenti all'Unità 2 della Formazione di Monte Grillo, costituita da alternanze decimetriche di livelli cineritici e livelli scoriacei con litici immersi in matrice sabbioso-cineritica, dove si riscontra alveolizzazione da weathering nella parte bassa. Si riconoscono alcune faglie con dislocazione metrica; la famiglia di joints parallela al versante risulta molto persistente e regolare; nella parte bassa una bancata di spessore metrico è caratterizzata da fratturazione prismatica dovuta all'intersezione di diverse famiglie di discontinuità. Superiormente affiora l'Unità 3 della Formazione di Monte Grillo, caratterizzata in basso da alternanze decimetriche di livelli cineritici e scoriacei con variazioni cromatiche dal grigio al beige arrossato fino al nero; nella parte alta domina una certa uniformità tessiturale con alcuni livelli di clasti grossolani in matrice sabbioso cineritica ed alternanze cromatiche rosso-nero; anche in questa terza Unità si riconoscono strutture da weathering alveolare. Si riscontra una fatturazione con spaziatura metrica nella parte inferiore più sottile.

La parte più alta dell'Unità 3 è compresa nel terzo elemento morfologico essendo caratterizzata da una pendenza di circa 10°.

Il quarto elemento morfologico è contraddistinto da una pendenza di circa 60° ed uno spessore di 5 m; rappresenta l'Unità 4 della Formazione di Monte Grillo ed è costituito da orizzonti pomicei immersi in matrice sabbioso-cineritica con stratificazione quasi assente. Questo deposito presenta spessori differenti nei vari settori per l'effetto di paleo morfologie; la fatturazione è quasi del tutto assente o non riconoscibile.

Il quinto elemento morfologico ha una pendenza di circa 85° ed è costituito principalmente da terreni appartenenti all'Unità 7 della Formazione di Monte Grillo per uno spessore di circa 44 m, caratterizzato da alternanze centimetriche di livelli cineritici grigi, livelli pomicei bianchi e rari livelli scoriacei grigio scuro con frammenti litici grossolani; è presente alveolizzazione da weathering. Si riscontrano fratture ortogonali al versante con spaziatura metrica ma persistenti per tutto lo spessore dell'Unità ed rilevanti fratture parallele al versante.

Al top del quinto elemento morfologico affiora un metro di spessore costituito da alternanze centimetriche di cineriti



Fig.3 - Suddivisione della falesia in studio in sei settori distinti.

grigio scure e livelli pomicei bianchi, appartenenti alla Formazione di Fiumicello (Unità 8), che sul pianoro sommitale risultano del tutto incoerenti.

B. Settore 2

Il secondo settore è caratterizzato da un versante con direzione N 110°, ed altezza totale di circa 98 m; anche in questo caso sono stati individuati dal basso verso l'alto, 5 elementi morfologici.

Il primo elemento è costituito da circa 4 m di falda detritica (attiva) con una pendenza di circa 40°.

Il secondo elemento ha una pendenza tra 60° ed 80°, in parte è coperto da vegetazione, ed è costituito, nella parte inferiore da 8 m di livelli cineritici alternati a livelli di scorie immersi in matrice sabbioso-cineritica, appartenenti all'Unità 2 della Formazione di Monte Grillo; si riscontra alveolizzazione da weathering. Non si riconoscono discontinuità significative. Superiormente affiorano circa 30 m di livelli cineritici alternati a livelli di scorie immersi in matrice sabbioso-cineritica appartenenti all'Unità 3 della Formazione di Monte Grillo; si osservano variazioni cromatiche dal beige al rossastro, al grigio arrossato, al nero con uniformità tessiturale e granulometrica e stratificazione decimetrica. Nello strato grigio è presente weathering alveolare. Non si osservano discontinuità di rilievo.

Il terzo elemento morfologico è caratterizzato da un'inclinazione del versante di circa 90° ed ha uno spessore intorno ai 20 m; è costituito da orizzonti pomicei di dimensioni granulometriche delle ghiaie immersi in matrice sabbioso-cineritica, appartenenti all'Unità 4 della Formazione di Monte Grillo; mostra una leggera evidenza di stratificazione con spessore metrico nella parte bassa e massivo in quella alta. Non presenta alveolizzazione ma sono molto evidenti e di grosse dimensioni alcuni solchi da erosione idrica. La fratturazione è quasi assente.

Il quarto elemento presenta una morfologia molto irregolare con pendenza comprese tra i 60° ed i 90° ed ha uno spessore di circa 35 m. È costituito da strati centimetrici in cui affiorano alternanze di livelli cineritici grigi, livelli pomicei bianchi e, rari livelli scoriacei grigio scuro con presenza di litici grossolani, appartenenti all'Unità 7 della Formazione di Monte Grillo. Sono evidenti grossi solchi da erosione idrica lineare, smussati da fenomeni di aloclastismo ed erosione eolica; inoltre è presente alveolizzazione da weathering. Si riscontrano fratture con spaziatura metrica perpendicolari al versante e persistenti per tutto lo spessore dell'Unità oltre che rilevanti fratture parallele al versante.

L'ultimo elemento morfologico presenta una pendenza di circa 85°, ha uno spessore intorno ai 2 m ed è costituito da strati centimetrici di livelli cineritici grigio scuri alternati a livelli pomicei bianchi, appartenenti all'Unità 8 (Formazione di Fiumicello). Alla base il livello bianco funge da orizzonte guida per individuare il passaggio alla sottostante Formazione di Monte Grillo; mentre nella parte superiore il deposito è completamente incoerente. Non si riconoscono deformazioni.

C. Settore 3

La direzione del versante è N 110°, con un'altezza complessiva di 73 m, partendo dal basso, si distinguono 4 elementi morfologici con pendenza diversa.

Il primo elemento è costituito da una potente falda detritica con una pendenza media di 35° ed uno spessore di 23 m; la falda è intensamente vegetata perché principalmente dovuta a intensi fenomeni gravitativi del passato, ma presenta diversi blocchi a spigoli vivi dovuti a crolli isolati e recenti.

Il secondo elemento ha una pendenza di 80° ed uno spessore di 30 m; è costituito da un'alternanza di livelli cineritici beige e livelli scoriacei ben cementati grigio scuri, appartenenti all'Unità 6 della Formazione di Monte Grillo, che mostrano una litificazione probabilmente dovuta a fenomeni di zeolitizzazione. Nella parte bassa la stratificazione è celata da patine d'alterazione, mentre in quella alta mostra una spaziatura sub-metrica. L'Unità risulta intensamente fratturata a causa di almeno tre sistemi di fratture verticali con spaziatura decimetrica, che determinano la classica fatturazione prismatica.

Il terzo elemento morfologico è costituito da depositi della stessa Unità sottostante ma con pendenza intorno ai 10°, probabilmente dovuta ad un'assenza di litificazione.

Il quarto elemento ha una pendenza di 85° ed uno spessore di 20 m ed è costituito da alternanze di livelli cineritici grigi, livelli pomicei bianchi e rari livelli scoriacei grigio scuri ricchi in frammenti litici grossolani, appartenenti all'Unità 7 della Formazione di Monte Grillo. Si osservano solchi da erosione idrica smussati da fenomeni di aloclastismo ed erosione eolica. Sono anche presenti rare fratture sub verticali con spaziatura metrica.

D. Settore 4

La direzione del versante è N 90°, con un'altezza complessiva di 50 m, partendo dal basso, si distinguono 3 elementi morfologici con pendenza diversa.

Il primo elemento è rappresentato da una falda detritica, intensamente vegetata, ma con la presenza di molti blocchi caduti di recente, con spessore di 15 m e pendenza di 35°; in gran parte, la falda, è caratterizzata da un tipico deposito da rock slide.

Il secondo elemento ha pendenza compresa tra gli 80° ed i 90° ed uno spessore di 30 m; è costituito da alternanze di livelli cineritici beige e livelli scoriacei grigio scuri ben cementati, appartenenti all'Unità 6 della Formazione di Monte Grillo che mostrano una discreta litificazione probabilmente dovuta a fenomeni di zeolitizzazione. Nella parte bassa la stratificazione risulta parzialmente celata da patine d'alterazione, mentre nella parte alta risulta più evidente con spaziatura sub-metrica. L'Unità risulta intensamente fratturata a causa di almeno tre famiglie di fratture verticali con spaziatura decimetrica che determinano la classica fatturazione prismatica e la presenza di numerosi blocchi instabili. In questa Unità è evidente la forma concava della nicchia di distacco generata dal fenomeno di rock slide i cui resti si osservano nella falda detritica sottostante.

Il terzo elemento morfologico ha pendenza di 85° e spessore di 5 m; risulta costituito da strati centimetrici in cui affiorano

alternanze di livelli cineritici grigi, livelli pomicei bianchi e, rari livelli scoriacei grigio scuro con la presenza di litici grossolani, appartenenti all'Unità 7 della Formazione di Monte Grillo. Si osservano solchi da erosione idrica smussati da fenomeni di aloclastismo ed erosione eolica. Sono presenti rare fratture sub verticali con spaziatura metrica che sembrano proseguire nell'Unità sottostante.

E. Settore 5

La direzione del versante è N 85°, con un'altezza complessiva di 36 m, partendo dal basso, si distinguono 3 elementi morfologici con acclività diversa.

Il primo elemento è costituito da circa 1 m di falda detritica con pendenza di 30°.

Il secondo elemento ha una pendenza sui 60° mentre il terzo di circa 80°/90°; entrambi sono costituiti da depositi appartenenti all'Unità 6 della Formazione di Monte Grillo. Affiora un'alternanza di livelli cineritici beige e livelli scoriacei grigio scuri, ben cementati; nella parte alta si alternano strati di lapilli neri e cineriti chiari. La stratificazione con spaziatura sub-metrica è parzialmente celata da patine di alterazione nella parte inferiore, mentre risulta maggiormente evidente in quella superiore. Questi depositi sono litificati (probabilmente a causa di fenomeni di zeolitizzazione) ed intensamente fratturati; si osservano almeno tre famiglie di fratture con spaziatura decimetrica, che determinano la classica fatturazione prismatica e la presenza di vari blocchi instabili. Molto evidenti sono alcuni liscioni di faglia sub-verticali, paralleli al versante della falesia e con andamento del piano concavo-convesso; questi liscioni, caratterizzati anche da elementi tipo megastrie, sembrerebbero legati a meccanismi di trascorrenza.

F. Settore 6

La direzione del pendio è N 85°, con un'altezza complessiva di 27 m, partendo dal basso, si distinguono 3 elementi morfologici con pendenza differente.

Alla base vi sono depositi di origine antropica, a protezione del piede della falesia.

Il secondo elemento è costituito da depositi appartenenti all'Unità 5 della Formazione di Monte Grillo per uno spessore di 20 m e con pendenza compresa tra 60° e 80°; il deposito è caratterizzato dall'alternanza decimetrica, di livelli ghiaioso-ciottolosi grigi e ghiaioso-sabbiosi grigio chiari, immersi in matrice sabbioso-cineritica. In alcuni tratti si presenta fortemente alveolizzato ed escavato da erosione eolica. Si riconoscono solo un paio di grosse discontinuità parallele al versante e ad alto angolo, riconducibili a quelle che nel settore precedente erano state individuate come faglie trascorrenti.

Al di sopra affiorano 5 m dell'Unità 6 della Formazione di Monte Grillo con una pendenza di circa 85°, costituiti da un'alternanza di livelli cineritici beige e livelli scoriacei grigio scuri, ben cementati (probabilmente litificati da processi di zeolitizzazione) e con stratificazione sub-metrica. Infine è intensamente fratturata con spaziatura decimetrica; si riscontrano pure superfici fresche dovute a crolli recenti.



Fig. 4 – Panoramica del tratto in studio della falesia di Miliscola, con l'individuazione dei tre settori nei quali sono state realizzate le stazioni di misura.

III. DATI STRUTTURALI

Lo studio strutturale, invece, ha portato all'individuazione di tre zone con caratteristiche di deformazione omogenea, dove sono state effettuate stazioni di misura (A, B, C) per la successiva elaborazione statistica dei dati (Fig. 4).

Si è proceduto raccogliendo le misure necessarie per eseguire l'analisi strutturale, ovvero determinando immersione e inclinazione di ogni singola mesostruttura riconosciuta joints (J), faults (F) e bedding (B).

Nel primo settore a sinistra (vedi stazione A), quello caratterizzato da quell'evidente "panettone" rosso, nella parte bassa del versante, si riconoscono tre faglie con dislocazione di qualche decina di centimetri ed estensione di circa 20/30 metri (Fig. 5), e due fratture, anch'esse dell'ordine della decina di metri; sono stati, inoltre individuati tre sistemi di fratturazione di cui uno parallelo al versante e gli altri due che lo intersecano, i quali, avendo una spaziatura al di sotto del metro, producono innumerevoli blocchi di piccole e medie dimensioni (da qualche dm fino ad oltre un metro cubo) con tendenza ad un rapido distacco.

Il settore centrale (stazione B) è caratterizzato da grosse fratture che dissecano il versante per tutta la sua interezza, con



Fig. 5 – Faglia con rigetto decimetrico.



Fig. 6 – Settore centrale, sono evidenti sia la forma concava del versante, sia i sistemi di fratturazione che ne caratterizzano la parte alta, pur attraversandolo per intero.

una spaziatura decametrica, delle quali solo due si intersecano formando un possibile cuneo di estrusione e, dove si vede che ci sono già stati fenomeni di distacco di grossi blocchi (diversi metri cubi di volume); in apparenza questo settore è stabile, tuttavia la forma concava del versante e l'abbondante falda detritica presente al piede, lasciano pensare che sia stato modellato da un rilevante scivolamento rotazionale (Fig. 6). Nel terzo settore (stazione C) si riscontra lo stesso tipo di fratturazione in blocchi dovuti all'incrocio di tre sistemi di fratturazione (Jointing), come nel primo settore ma in maniera più spinta; anche qui possiamo osservare la forma concava del versante (che in alto è addirittura strapiombante) ed un abbondante deposito al piede che lasciano supporre che recentemente sia avvenuto un cospicuo evento gravitativo da scivolamento rotazionale (Fig. 7).

Altro elemento strutturale riconosciuto, in questo tratto di falesia, è la presenza di due liscioni di faglia, che per forma e giacitura sembrano riconducibili a fenomeni di trascorrenza (Fig. 8).

Le elaborazioni statistiche dei dati strutturali, eseguite tramite apposito software (Stereonet8), vengono riassunte negli



Fig. 7 – Si notano, la forma concava, con le pareti strapiombanti in alto, tipica dello scivolamento rotazionale, ed anche gli innumerevoli blocchi sospesi nella parte alta del versante.



Fig. 8 –Liscione di faglia, sub verticale e con andamento del piano concavo-convesso che determina forma simili a delle megastrie, tipico di strutture a carattere trascorrente.

schemi delle figure seguenti (Fig. 9), dove, per ogni stazione effettuata, vengono plottate (con diagramma polare, proiezione equiareale di Schimidt emisfero inferiore), le ciclografiche delle faglie e delle fratture (Joints) misurate; altrettanto, vengono plottate, le ciclografiche che rappresentano le famiglie dei lineamenti riconosciute attraverso metodi statistici, nelle tre stazioni microstrutturali A, B e C (Fig. 10).

Recentemente, sono stati consegnati i rilievi, eseguiti dalla ditta esterna (STAGE SRL), con la strumentazione laser scanner, con i quali, sono stati prodotti, un DTM con prospettiva orizzontale della falesia di Miliscola (Fig. 11), e sono state calcolate le orientazioni dei principali sistemi di fratture, individuati dai programmi di riconoscimento automatico delle superfici, scansite dal laser (Fig. 12).

IV. DISCUSSIONE DEI DATI

Il rilievo di campagna e l'analisi dei dati strutturali hanno permesso di evidenziare i seguenti punti salienti.

La porzione di Falesia di Marina di Vita Fumo-Miliscola oggetto dei rilevamenti, benché si sia impostata esclusivamente su due Formazioni geologiche (Fm. di Fiumicello e Fm. di Monte Grillo) risulta caratterizzata da un'elevata eterogeneità delle litologie affioranti.

Le condizioni generali di propensione al dissesto della falesia sono da considerarsi piuttosto elevate, ed in particolare:

Le Unità 2 e 3 presenti nelle porzioni medio-basse del Settore 1 sono interessate da numerosi piani di discontinuità con spaziatura da decimetrica a metrica, che sono stati raggruppati in 4 set distinti di famiglie. Queste condizioni strutturali unite a quelle geomorfologiche (pendenze e forme della scarpata da verticali ad aggettanti) rendono quest'area suscettibile a fenomeni di crollo.

L'Unità 6 presente nelle porzioni medio basse dei Settori 3, 4, 5 e 6 risulta fortemente interessata da numerosissimi piani di discontinuità con spaziatura da decimetrica a metrica, che sono stati raggruppati in 3 set differenti di discontinuità. Si riconoscono superfici fresche a causa di ripetuti crolli in alcuni tratti e una falda di detrito intensamente vegetata ma

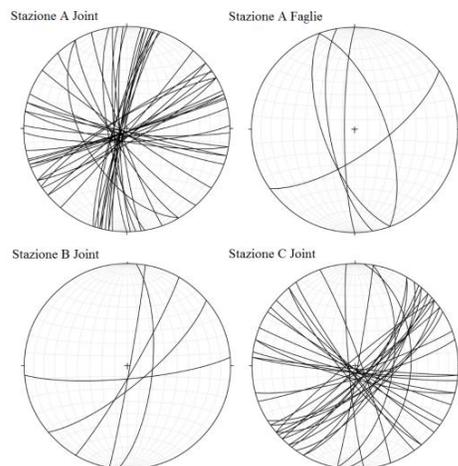


Fig. 9 – Proiezione equiareale di Schmidt, emisfero inferiore, delle ciclografiche delle faglie e delle fratture, misurate nelle stazioni strutturali A, B e C.

con presenza di blocchi (metrici) a spigoli viviv recentemente crollati, sintomo di attività della scarpata.

In questa Unità le condizioni strutturali, caratterizzate da un'anomala concentrazione di piani di discontinuità, rispetto alle condizioni generali della falesia, unite alle caratteristiche geomorfologiche (pendenze e morfologie della scarpata da verticali ad aggettanti) rendono quest'area altamente suscettibile a fenomeni di crollo. L'intersezione tra le varie famiglie di discontinuità provoca, soprattutto nelle porzioni medio-alte, dell'Unità 6 l'isolamento di numerosi blocchi di roccia (da decimetrici a metrici) cinematicamente instabili, alcuni di essi caratterizzati addirittura da parziale o totale assenza di sostegno. L'evidenza dell'avvenimento di uno scorrimento traslazionale ad alto alto angolo (*rock slide*) e a rapida evoluzione impostatosi in questa Unità, nel Settore 4 purtroppo ci fa notare come non possono escludersi fenomeni franosi ciclopici a rapida evoluzione predisposti dall'azione di discontinuità più persistenti e/o con caratteristiche geomeccaniche più scadenti rispetto alla media del set di discontinuità a cui appartengono.

L'Unità 7, presente nelle porzioni alte dei Settori 1, 2, 3 e 4, è caratterizzata da 2 set di discontinuità. Questa Unità non è interessata da discontinuità con la stessa intensità dell'Unità 6 descritta in precedenza, ma le 2 famiglie di discontinuità

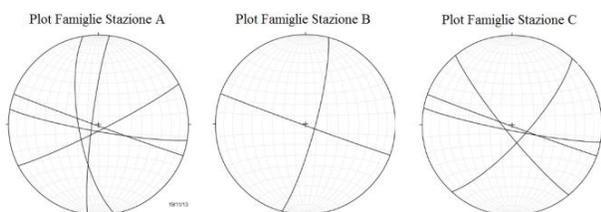


Fig. 10 – Proiezione equiareale di Schmidt, emisfero inferiore, delle ciclografiche delle famiglie, di faglie e di fratture, riconosciute con analisi statistiche e misurate nelle stazioni strutturali A, B e C.

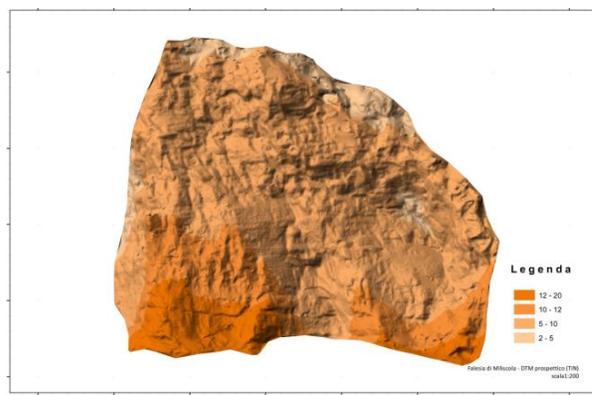


Fig. 11 – Falesia di Miliscola: DTM prodotto dall'analisi della nuvola di punti scansioni dal laser scanner; le differenti tonalità di colore indicano la distanza in metri, da un piano di riferimento, teoricamente posizionato, alle spalle della falesia stessa.

tettoniche osservate sembrano aver controllato profondamente la morfologia della parte superiore dell'attuale falesia, in particolare il set di discontinuità che ha uno sviluppo parallelo alla scarpata stessa.

Attualmente sono in corso di studio le possibili correlazioni tra i dati raccolti manualmente e quelli misurati tramite telerilevamento (laser scanner), tenendo conto del fatto che, i dati relativi all'interpretazione delle nuvole di punti, prodotte dal laser, si riferiscono a tutto il tratto di falesia in esame; mentre, quelli rilevati sul terreno, sono stati suddivisi nelle tre stazioni di misura riconosciute come aree con caratteristiche di deformazione omogenee.

V. CONCLUSIONI

Da quanto esposto finora, si evince che il lavoro di ricerca, effettuato durante lo stage del corso di formazione "tecnologie informatiche per la sicurezza marittima", ha contribuito all'acquisizione di nuove conoscenze nel campo dei fenomeni gravitativi, nell'ambito del risk assessment ed in particolare sullo studio della pericolosità nelle falesie costiere.

Sono stati inoltre prodotti nuovi dati sulla stratigrafia e sull'assetto lito-strutturale della falesia di Miliscola, che saranno presto confrontati con quelli ricavati dalle acquisizioni mediante laser scanner.

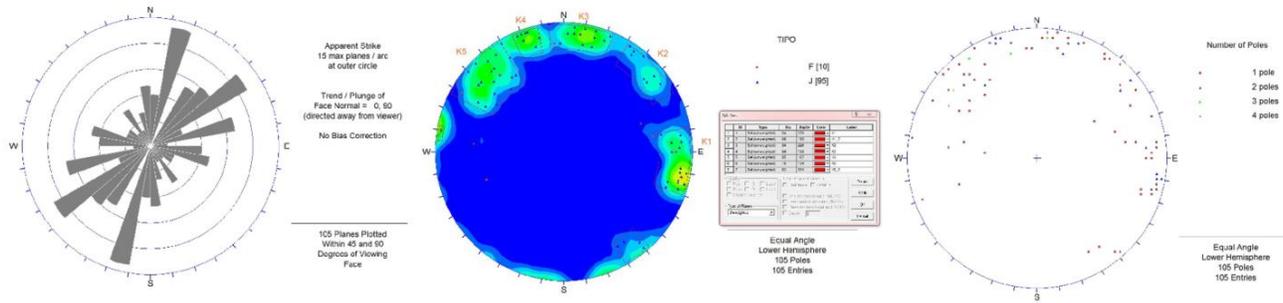


Fig. 12 - Proiezioni, di faglie e di fratture, riconosciute tramite l'analisi dei dati del laser scanner: diagramma a rosa delle direzioni apparenti dei piani riconosciuti; contour dei poli degli assi dei piani individuati; proiezione dei poli degli assi dei piani, indicanti l'immersione degli stessi (plunge).

Le analisi strutturali ed il rilevamento geologico e geomorfologico, hanno consentito una migliore comprensione della pericolosità nella falesia in oggetto, suddivisa in tre settori ad omogenea deformazione strutturale, e dalle diverse caratteristiche di possibili rischi; il primo settore (stazione A), è caratterizzato, nella parte bassa del versante (circa 30 m di dislivello) dalla possibilità di caduta di blocchi di dimensioni variabili da pochi decimetri a circa un metro cubo ed è distante una decina di metri dal sentiero che passa alla base della falesia (ciò riduce leggermente il rischio d'incidenti). Nella parte alta del versante di questo settore, così come nel settore centrale (stazione 2), si riconoscono solo alcune grandi fratture con una spaziatura decametrica che potrebbero, in taluni casi, causare il distacco di blocchi di roccia di vari metri cubi; al momento, sono riconoscibili solo alcune zone di possibile distacco, nella parte alta del versante compresa tra il settore centrale e quello orientale. Comunque il pericolo di crolli in tutta la parte alta del versante è leggermente attenuato dall'estensione della falda detritica, formata da crolli avvenuti nel passato, che, a meno di crolli di notevoli dimensioni, ripara la zona sottostante. L'ultimo settore (stazione 3), il più fratturato della falesia, è quello che presenta le situazioni di rischio più elevato (Fig. 13); infatti, qui si manifestano le condizioni predisponenti a frequenti crolli di volumi variabili da pochi decimetri a molti metri cubi; è presente una parete strapiombante con un dislivello di circa 60 m; il sentiero tracciato a breve distanza dalla base della parete ed una falda

detritica poco estesa e molto acclive con numerosi blocchi caduti di recente, alcuni dei quali hanno raggiunto il sentiero; sono presenti anche porzioni di parete che evidenziano la possibilità di fenomeni di distacco di porzioni ancora maggiori.

Rimane da valutare, l'opportunità di eseguire i rilievi geotecnici, su questa falesia, per la pericolosità delle operazioni connesse (la movimentazione su corde, potrebbe causare la caduta di blocchi instabili); infatti, è stato piuttosto rischioso anche il solo rilevamento strutturale ai piedi della falesia, a causa della difficoltà di raggiungere la base della parete inerpicandosi sulla scoscesa coltre detritica, e date le pessime caratteristiche lito-strutturali summenzionate.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' – TESSA.

Desidero ringraziare il mio tutor Marco Sacchi ed il mio amico e collega Fabio Matano che mi hanno supportato nel reperimento dei materiali sui quali impostare il mio lavoro, ed il mio collega Danilo Campolo con il quale ho potuto condividere una piacevole collaborazione professionale.

Un ringraziamento speciale al mio amico Carlo Donadio.



Fig. 13 - Miliscola settore orientale, in cui si notano la parete a strapiombo, l'intensa fratturazione, e la grande quantità di blocchi instabili.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Barberi F., Innocenti F., Lirer L., Munno R., Pescatore T. & Santacroce R. (1978) - The Campanian Ignimbrite: a major prehistoric eruption in the neapolitan area. *Bull. Volc.*, 41(1), 10-31.
- [2] Bieniawski Z.T. (1989). *Engineering rock mass classification*, J. Wiley & Sons, New York.
- [3] de Luca Tuppiti Schinosa F. (2013). *La valutazione della stabilità di versanti in roccia: aspetti metodologici ed applicazioni su aree campione del territorio campano*. Ph.D. XX ciclo. Università Degli Studi di Napoli "Federico II".
- [4] De Pippo T., Guida D., Donadio C., Terlizzi F., Papa B., Esposito M. e Amato G. (2008). *Studio di fattibilità su erosione costiera e rischio da inondazione costiera*. ARPAC, CONISMA, pubbl. CDROM.
- [5] De Vivo B., Rolandi G., Gans P.B., Calvert A., Bohron W.A., Spera F.J., & Belkin H.E. (2001) - *New constraints on the pyroclastic eruptive*

- history of the Campanian volcanic Plain (Italy). *Mineral. Petrol.* Springer-Verlag eds. 73:47-65, 2001.
- [6] Di Girolamo P., Ghiara M.R., Lirer L., Munno R., Rolandi G. & Stanzione D. (1984) – Vulcanologia e petrologia dei Campi Flegrei. *Boll. Soc. Geol. It.*, 103, 349-413.
- [7] Fedele L. *et alii* (2012) - Carta Geologica d'Italia alla scala 1:10.000, Fogli 465 e 464 ISOLA DI PROCIDA. (Regione Campania)
- [8] ISRM (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr.*, 15, pp. 319 – 368.
- [9] Kuskay T. (2008). The coast: hazardous interactions within the coastal environment. Ph.D. Thesis. Facts On File, Inc., Infobase Publishing.
- [10] Lirer L., Petrosino P., Alberico L., Armiero V. (2011). Carta Geologica di Procida, Vivara e Monte di Procida. Scala 1:10.000. Dip. Scien. Della Terra, CIRAAM, Università Federico II, Napoli.
- [11] Orsi G., Cuna L., De Astis G., De Vita S., Di Vito M.A., Isaia R., Nave R., Pappalardo L., Piochi M., Postiglione C. & Sansivero F. (2002) – I vulcani napoletani: pericolosità e rischio. Osservatorio Vesuviano, Napoli, 45 pp.
- [12] Ortolani F. & Aprile F. (1985) – Principali caratteristiche stratigrafiche e strutturali dei depositi superficiali della Piana Campana. *Boll. Soc. Geol.*, 104(2), 195-206.
- [13] Rosi M. & Sbrana A. (1987) – Phlegrean Fields. C.N.R., Quad. de «La Ricerca Scientifica», Prog. Finalizzato Geodinamica, Monografie finali, 144, 9, 175 pp.
- [14] Smith Keith, (2004). *Environmental Hazards Assessing Risk and Reducing Disaster.* Taylor & Francis.
- [15] Somma R., Caputo T., Esposito G., Marino E., Matano F., Carlino S., Iuliano S., Sacchi M., Troise C., De Natale G. (2013): Application of laser scanning and opto-electronic devices for monitoring cliff instability in the Campi Flegrei coastal area: the Coroglio case study (Napoli, Italy). American Geophysical Union Fall Meeting 2013, San Francisco, California, 9-13 dicembre 2013.
- [16] Varnes D.J. (1978). Slope Movement Types and Processes. In “Special Report 176:
- [17] Landslides Analysis and Control” (R.L. Schuster and R.J. Krizek Eds). TRB Transp.
- [18] Varnes D.J. & IAEG Commission on Landslides (1984). *Landslides Hazard Zonation a review of principles and practice.* UNESCO, Paris, 63 pp.

Evoluzione della linea di costa nell'area flegrea e sue implicazioni

Marco Sacchi
CNR - IAMC
Napoli - Italy
marco.sacchi@iamc.cnr.it

Andrea Sgrosso
CNR - IAMC
Napoli - Italy
andrea.sgrosso@alice.it

Sommario—Nell'ambito del Corso di Formazione Oceanografia operativa e Tecnologie Informatiche per la sicurezza Marittima (PON OTTIMA, Obiettivo 1: corso di “Oceanografia operativa e tecnologie informatiche per la sicurezza marittima” anno 2014-2015), è stato svolto un tirocinio della durata di circa tre mesi e mezzo, tra settembre e dicembre 2014, per un totale di 420 ore ufficiali retribuite di cui 100 ore con affiancamento diretto del tutor.

Volendo mantenere una continuità con il tirocinio effettuato l'anno precedente (al termine del corso dell'Obiettivo 2), e poichè il tutoraggio era affidato nuovamente al ricercatore Marco Sacchi, si è deciso di lavorare nuovamente nell'ambito di un più ampio progetto di ricerca già in corso di svolgimento ed afferente al PON MONICA; in questo modo potevano essere valorizzate sia le mie competenze pregresse che il lavoro già svolto lo scorso anno.

Continuando a lavorare, quindi sui problemi relativi all'interazione terra-mare, si è deciso di occuparsi oltre che della sicurezza delle falesie, anche dell'evoluzione delle spiagge dell'area flegrea, valutando le variazioni morfologiche e facendo un primo bilancio delle aree coinvolte negli ultimi 20 anni circa. A tal fine è stato svolto un lavoro di digitalizzazione in ambiente GIS delle linee di costa riferite ad annate particolari in cui erano disponibili le ortofoto delle aree oggetto di studio; successivamente sono stati calcolati i bilanci sia grafici che numerici per valutare i cambiamenti intercorsi ed infine, sono state dedotte valutazioni generali di ordine climatologico.

Keywords — *geomorfologia; dinamica litorale; erosione costiera; impatto antropico; Campi Flegrei;*

INTRODUZIONE

Nell'ambito del Corso di Formazione Oceanografia operativa e Tecnologie Informatiche per la sicurezza Marittima (PON

OTTIMA, Obiettivo 1: corso di “Oceanografia operativa e tecnologie informatiche per la sicurezza marittima” anno 2014-2015), è stato svolto un tirocinio della durata di circa tre mesi e mezzo, tra settembre e dicembre 2014, per un totale di 420 ore ufficiali retribuite di cui 100 ore con affiancamento diretto del tutor.

Volendo mantenere una continuità con il lavoro intrapreso lo scorso anno, ed affrontare un argomento che fosse maggiormente vicino ai temi dell'oceanografia classica, pur rimanendo nello stesso gruppo di ricerca, con il tutor Marco Sacchi è stato stabilito che, avrei effettuato il mio tirocinio sull'evoluzione delle spiagge dell'area flegrea. Questa scelta, infatti, mi avrebbe permesso di continuare a lavorare sia nel campo del “risk assessment and management”, sia nelle stesse aree dello scorso anno, nonché di studiare, un ambiente, le spiagge, che, pur essendo un ambiente di transizione fra terraferma e mare, come pure le falesie, è molto più rapidamente influenzato da un insieme di processi, strettamente marini, come le correnti ed il moto ondoso.

In questo lavoro sono esaminate tutte le spiagge dell'area flegrea, partendo dal porto di Napoli fino a Torregaveta, (Fig. 1) considerando le loro variazioni negli ultimi venti anni circa; a tale scopo, sono state ricostruite e digitalizzate le linee di costa relative ad alcuni anni passati, ricavandole dall'osservazione di ortofoto dell'area in studio. E' stata quindi svolta una serie di analisi in ambiente GIS per valutare i cambiamenti intervenuti in questo lasso di tempo e per tentare di quantificarli anche se in maniera speditiva, visto che altrimenti sarebbero state necessarie ulteriori analisi e misure da eseguire sul campo, con la necessità di avere a disposizione tempi e mezzi molto maggiori.



Fig.1 – Area di studio

Dall'analisi delle ortofotografie si è anche osservata una serie di cambiamenti occorsi non solo alla morfologia dei litorali ma anche alle strutture di origine antropica; questi cambiamenti sono a volte molto importanti, in quanto, loro stessi, possono influenzare fortemente la circolazione delle correnti marine e dei sedimenti trasportati lungo riva e, conseguentemente, l'evoluzione dei litorali.

I. PREMESSA

Lo stato delle nostre coste, o perlomeno della gran parte di esse, è da ritenersi precario; infatti, il mancato apporto al mare di sedimenti da parte dei corsi d'acqua (depauperati e spesso cementificati); l'urbanizzazione spinta della zona costiera, che ha trasformato e distrutto ambienti naturali come le spiagge e le dune, le quali fungevano da protezione alla costa stessa; la costruzione di posticce strutture difensive (barriere frangiflutti) che spesso hanno solo delocalizzato il problema dell'erosione costiera, ma, a volte, lo hanno notevolmente peggiorato, causano ogni anno l'arretramento della maggior parte delle coste italiane ed i conseguenti danni a strutture, infrastrutture ed attività antropiche (le strade e le ferrovie costruite sulla costa vengono interrotte, le spiagge erose devono essere ripascite o protette da barriere artificiali, ecc.). Laddove non ci sono spiagge, ma coste alte, l'arretramento, anche se in maniera più lenta, è pur sempre presente; questo fenomeno, che è la normale evoluzione di una falesia, può avvenire molto lentamente e gradualmente, a causa del moto ondoso e con il lento deterioramento climatico delle rocce affioranti (weathering), oppure con rapidi e bruschi fenomeni gravitativi. L'evoluzione di una falesia è, quindi, determinata essenzialmente dalle sue caratteristiche intrinseche e cioè: la litologia delle rocce che la costituiscono e la quantità di elementi di discontinuità nell'ammasso roccioso (fratture, faglie, giunti di stratificazione, livelli incoerenti ecc.). Nella valutazione dei rischi, attribuibili ai fenomeni di tipo gravitativo, che possono avvenire lungo una falesia, si deve tener conto di problematiche diverse, rispetto ad un normale versante in roccia; infatti non solo, l'evoluzione della falesia (se ancora attiva) è condizionata ed accelerata dal moto ondoso, ma i rischi connessi ai fenomeni gravitativi, sono amplificati dalla vicinanza stessa del mare. Le località marittime, sono frequentemente oggetto di attività antropiche

quali la pesca ed il turismo che possono essere seriamente danneggiate da eventi franosi (basti pensare a territori come le Cinque Terre in Liguria o la Penisola Sorrentina in Campania, che sono costituiti da coste alte rocciose, in cui ogni anno le frane interrompono strade ed arrecano enormi danni). Altresì grave, è il rischio che, un evento franoso che coinvolga rilevanti masse di terreno, possa generare onde anomale (*tsunami*) pericolose per la navigazione e per le circostanti aree costiere antropizzate (come ad esempio accadde nel 2002 nelle isole Eolie per una frana di un versante dell'Isola di Stromboli).

L'importanza e la bellezza delle coste campane obbliga, quindi, a studiare con estrema attenzione sia gli aspetti geologici e geomorfologici del paesaggio, sia i processi evolutivi in atto, ma anche a progettare ed attuare interventi conservativi, e di mitigazione del rischio, al fine di controllare i delicati contesti ambientali in esame. Essendo, le aree costiere campane, caratterizzate da dinamiche morfoevolutive spesso accelerate, risultano estremamente sensibili alle trasformazioni naturali ed a quelle indotte dall'attività antropica. Sempre più frequentemente l'erosione marina colpisce le spiagge e le falesie, aumentando la pericolosità, provocando danni all'ambiente ed ai manufatti presenti lungo le coste e negli habitat marino-costieri, dove si spesso si concentrano la maggior parte delle attività umane: insediative, turistico-balneari, portuali, ricreative, agricole, estrattive, industriali e talora militari, che, per altro, rappresentano delle importanti risorse economiche.

II. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

I Campi Flegrei rappresentano nel loro insieme una complessa area policraterica (De Pippo et alii, 2008) di 100 km² circa (Fig. 2) caratterizzata da una serie di apparati monogenici piroclastici (*tuff cone*, *tuff ring*, *ash cone*, *cinder cone*), e subordinatamente da duomi lavici a cui ricondurre le poche vulcaniti laviche effusive affioranti, tuttora attiva ma in stato di quiescenza (*unrest*), posta al margine sud-occidentale del *Graben* della Piana Campana, tra il Monte Massico (NW) ed il F. Sebeto (SE). Pertanto, i Campi Flegrei costituiscono il margine settentrionale emerso di un'ampia caldera individuata ~39 ka BP in seguito all'eruzione dell'*Ignimbrite Campana* ed al conseguente ribassamento del substrato pre-quaternario (BARBERI et alii, 1978; DI GIROLAMO et alii, 1984; BENEDEUCE & SCHIATTARELLA, 1997; DE VIVO et alii, 2001), mentre il margine meridionale sommerso è costituito dal Golfo di Pozzuoli. L'*ignimbrite* è una coltre piroclastica a composizione trachitica-trachifonolitica estesa per oltre 30000 km², associata ad una caldera di collasso (ROSI & SBRANA, 1987) all'interno della quale si è sviluppata un'attività di minore entità perdurata fino al 1538 d.C. con l'eruzione del Monte Nuovo. Il distretto vulcanico flegreo comprende anche le isole d'Ischia, Procida e Vivara ed i condotti vulcanici sottomarini della porzione nord-occidentale dei golfi di Napoli e Pozzuoli. Secondo alcuni Autori, invece, l'Isola d'Ischia è da ritenere un sistema

vulcanico indipendente da quelli dei Campi Flegrei

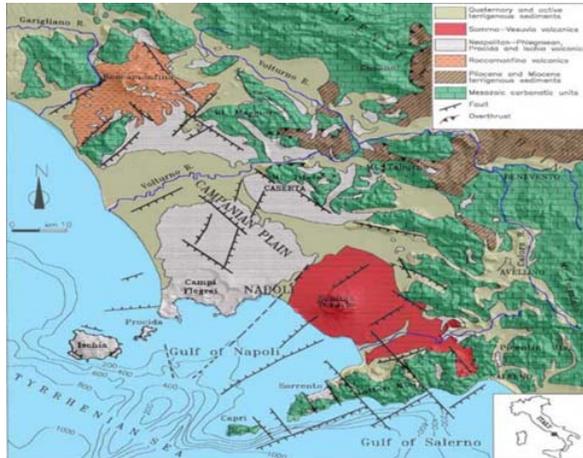


Fig. 2 - Carta geologico-strutturale della Piana Campana (Orsi *et al.*, 1996).

(VEZZOLI, 1988; CIONI *et alii*, 1994).

L'attività dei Campi Flegrei (Fig. 3), tuttora in corso con manifestazioni termali e fumaroliche evidenti soprattutto nel cratere del vulcano Solfatara ed in ambiente sottomarino, probabilmente è iniziata ~2000 ka BP con le effusioni laviche del vulcano di Parete, i cui prodotti oggi sono mascherati dalla coltre di sedimenti fluviali, lacustri e marini recenti della piana costiera. (ORTOLANI & APRILE, 1985; ROSI & SBRANA, 1987).

A partire da ~200 ka BP (DE VIVO *et alii*, 2001) si sono manifestate una serie di eruzioni a prevalente carattere esplosivo che hanno originato numerosi centri eruttivi, spesso intersecantisi, allineati lungo fratture a carattere regionale, sia ad andamento tirrenico (NO-SE) che antiappenninico (E-O), connesse alle ultime fasi tettoniche distensive quaternarie.

L'attività flegrea è stata suddivisa in più fasi in base all'età radiometrica delle formazioni vulcaniche (DI GIROLAMO *et alii*, 1984; DE VIVO *et alii*, 2001). Vari prodotti ignimbricitici presenti nell'area flegrea sono stati recentemente datati nell'intervallo 200÷18 ka BP. Le eruzioni che si sono succedute, quasi tutte a carattere esplosivo (pliniane e subpliniane) e perlopiù freatomagmatiche, hanno visto una quantità di volumi di prodotti eruttati decrescenti nel tempo, passando dai 150 km³ (CIVETTA *et alii*, 1997) dell'Ignimbrite Campana a circa 0.03 km³ per il Monte Nuovo (ROSI & SBRANA, 1987).

Il volume della camera magmatica al momento dell'eruzione dell'Ignimbrite Campana è stimato intorno ai 240 km³ (ARMIENTI *et alii*, 1983). La sequenza eruttiva dei Campi Flegrei (ROSI & SBRANA, 1987; Orsi *et alii*, 2002) è suddivisa in *attività pre-caldera* (60 - 39 ka BP) e *post-caldera* (39 ka BP- 1538 d.C.), quest'ultima è divisa in quattro fasi:

- A - vulcanismo antico sottomarino (39 - 15 ka BP)

- B - primo vulcanismo subaereo (15 - 8 ka BP)

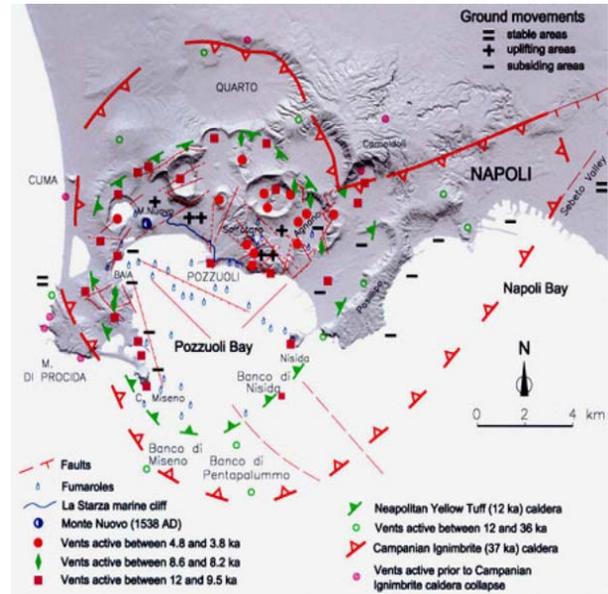


Fig. 3 - Carta strutturale dei Campi Flegrei (ORSI *et al.*, 2003).

- C - vulcanismo recente subaereo (4.8 - 3.8 ka BP)
- D - storica (1538 d.C.)

Le rocce più antiche dell'Ignimbrite Campana sono esposte solo lungo le scarpate che bordano i Campi Flegrei ed hanno composizione essenzialmente alcalitrichitica. Esse comprendono i duomi lavici di Monte di Procida e di Cuma e i depositi piroclastici affioranti a Nord di Quarto e alla base della collina dei Camaldoli. Durante questa fase si sarebbero avute non meno di 11 eruzioni esplosive, 3 eruzioni effusive e riconosciuti i resti di 8 edifici vulcanici (ORSI *et alii*, 2002).

Fase A - Con l'eruzione dell'Ignimbrite Campana (IC) all'interno della depressione calderica flegrea si è avuta sedimentazione marina e l'individuazione di piccoli apparati eruttivi frutto di eruzioni esplosive a carattere generalmente idromagmatico.

Fase B - La seconda eruzione per importanza nell'area flegrea è quella del Tufo Giallo Napoletano (TGN) (15 ka BP; DEINO *et alii.*, 2004), durante la quale furono espulsi 40 km³ circa di piroclastiti a composizione da alcalitrichitica a latitica distribuiti su un'area di circa 1000 km² a cui fece seguito la formazione di una nuova caldera di collasso sineruttivo. Questo deposito, che presenta una facies incoerente (Pozzolana AUCT.) e una litoide, costituisce l'ossatura della città di Napoli e si rinvia nell'area flegrea e nella Piana Campana fino ai rilievi dell'Appennino. L'attività post-TGN della fase B si è concentrata prevalentemente nella parte occidentale dei Campi Flegrei.

Fase C - Questa fase, all'incirca 4.8 ka BP, è stata preceduta da un sollevamento tettonico, in seguito al quale si è prodotto il

terrazzo marino de La Starza (CINQUE *et alii.*, 1985; ROSI & SBRANA, 1987). Le eruzioni che si sono susseguite in corrispondenza di questa area deformata hanno generato nella zona orientale flegrea gli edifici di Astroni, Senga, Solfatara e parte della conca di Agnano, mentre nella zona occidentale hanno prodotto gli edifici di Archiaverno ed Averno.

Fase D - L'ultima fase è caratterizzata dalla genesi del Monte Nuovo, preceduta da un marcato sollevamento pre-eruttivo pari a circa 7 m in sei mesi.

In sintesi una o probabilmente più eruzioni piroclastiche intense, avvenute circa 39 ka BP lungo un sistema di fratture a Nord dell'area flegrea, generarono la formazione dell'*Ignimbrite Campana*. Tra circa 30 e 18 ka BP (*Ignimbrite incoerente di Giugliano*) vi fu un periodo di stasi nell'attività vulcanica, ripresa in seguito con le eruzioni piroclastiche precidane e flegree. Fra queste ultime, un'intensa eruzione esplosiva circa 15 ka BP generò la formazione del *Tufo Giallo Napoletano* (LIRER & MUNNO, 1975; DEINO *et alii.*, 2004). che costituisce l'ossatura delle città di Napoli e Pozzuoli. In seguito altre eruzioni si sono manifestate all'interno ed ai margini della caldera collassata, fino all'eruzione di M. Nuovo del 1538 che conclude il ciclo di attività vulcanica. A quest'ultima, inoltre, è legato il fenomeno del bradisismo (PARASCANDOLA, 1947; SCHERILLO, 1973), lenta e pseudo-elastica deformazione verticale del suolo, con fuoco nel centro storico di Pozzuoli e nelle aree limitrofe, tra Quarto, Cuma e Napoli (LUONGO *et alii.*, 1988), le cui recenti crisi si sono verificate negli intervalli 1970-1972 e 1982-84 con un sollevamento complessivo di 2.70 m circa nella zona di Rione Terra a Pozzuoli (DVORAK & MASTROLORENZO, 1991). BENEDEUCE *et alii.*, (2008) riportano una sintesi delle principali sequenze eruttive dei Campi Flegrei avvenute fra 39 ka BP (*Ignimbrite Campana*) ed il 1538 (Monte Nuovo) desunte dalla letteratura (ROSI & SBRANA, 1987; ORSI *et alii.*, 2002), suddivise in quattro fasi con le relative età, la descrizione delle caratteristiche eruttive e la classificazione del tipo di edificio vulcanico secondo HEIKEN (1971).

III. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

La Campania presenta uno sviluppo costiero di circa 409 km, di cui 59 km (pari al 14%) rappresentano l'estensione delle coste insulari di Ischia, Capri, Procida, Vivara, Nisida (Golfo di Napoli) e Li Galli (Golfo di Salerno). Le coste campane sono costituite per il 60% da falesie rocciose acclivi, per il 40% invece da litorali sabbiosi sottesi alle piane alluvionali dei principali corsi d'acqua (Garigliano, Volturno, Sarno, Sele, Irno, Lambro, Mingardo, Bussento) ed in minor grado da spiagge sabbioso-ciottolose di fondo baia o a tasca (pocket beaches) confinate tra promontori e di limitata estensione. Circa 45 km di litorale risultano in erosione e solo in alcuni tratti delle isole di Ischia e Procida, del litorale flegreo-vesuviano e salernitano, della Penisola Sorrentina e del Cilento sono state realizzate opere di difesa. Tra l'altro, in molte di queste aree costiere sono presenti numerosi beni antropici e naturali d'interesse nazionale e talora mondiale,

oltre che beni archeologici sia emersi sia sommersi, per lo più d'epoca greco-romana e medievale. Nell'area flegrea ed in particolare sul Golfo di Pozzuoli oltre un secolo di osservazioni e descrizioni effettuate sui depositi continentali e marini, sulle faune fossili rinvenute, documentano l'evoluzione olocenica della fascia costiera, e dei siti archeologici emersi e sommersi.

Tra i primi lavori di una certa rilevanza si cita quello di RODRIQUEZ (1964) che riporta alcuni elenchi di specie fossili provenienti dai depositi di spiaggia de La Starza, riferibili ad individui tuttora viventi nel Golfo di Napoli. La genesi del terrazzo de La Starza fu spiegata come una sosta nel generale moto di emersione dal mare del vulcano del Gauro, avvenuta in due tempi.

L'area de La Starza si estende da Gerolomini (Pozzuoli) fino alle pendici orientali di M. Nuovo ed è caratterizzata da un'ampia superficie terrazzata bordata verso mare da una ripida scarpata, alta da 25 a 40 m, che rappresenta una falesia costiera inattiva sottratta all'azione del moto ondoso per la presenza al piede di una fascia di depositi di spiaggia e detritici. Gran parte della scarpata è formata da una successione in cui si alternano episodi di sedimentazione marina e subaerea con giacitura suborizzontale.

La superficie sommitale non è uniformemente spianata, ma si presenta alquanto articolata, probabilmente in relazione a moti tettonici che hanno smembrato e dislocato a varie quote l'originario fondo marino. Tali dislocazioni tettoniche sono riconoscibili in vari luoghi e sono responsabili della genesi di due ordini di superfici spianate, rispettivamente a circa +40 e +60 m, che costituiscono nell'insieme il terrazzo marino de La Starza. Tra le due superfici terrazzate, disposte parallelamente alla costa, è presente una scarpata che espone in affioramento i sedimenti marini più antichi. Tale scarpata, seppure addolcita dalla sovrapposizione di piroclastiti subaeree recenti, è ancora riconoscibile in quanto mostra un'altezza variabile da +10 ai +20 m, un andamento mediamente rettilineo ed un'orientazione circa parallela alle altre dislocazioni tettoniche presenti in zona. Si ritiene che la scarpata sia una paleofalesia marina che ha deposto a valle la serie più recente de La Starza. La superficie spianata a +60 m è più ampia e meno acclive di quella posta a +40 m. Questi lembi terrazzati verso Est sono ammantati dai prodotti lavici di Monte Olibano e piroclastici del vulcano Solfatara. Ad Ovest di Arco Felice le evidenze morfologiche dei due terrazzi non sono più riconoscibili a causa sia di sprofondamenti vulcano-tettonici, sia di ricoprimenti di piroclastiti delle eruzioni di Averno e M. Nuovo. Un lembo di superficie subpianeggiante è rilevabile intorno ai 30 m, tra l'edificio vulcanico del Gauro e quello di M. Nuovo, a Nordovest di Pozzuoli. Esso è ricordato al debole declivio della piana di Toiano, una conca endoreica di sprofondamento vulcano-tettonico. La scarpata rettilinea che tronca a Sud il vulcano del Gauro e limita a Nord l'estensione del terrazzo de La Starza è interpretata come una paleofalesia a controllo strutturale.

Infine, raffigurazioni cartografiche storiche della zona del L. Lucrino evidenziano che un lembo del terrazzo de La Starza si estendeva anche nell'area in cui oggi è ubicato M. Nuovo,

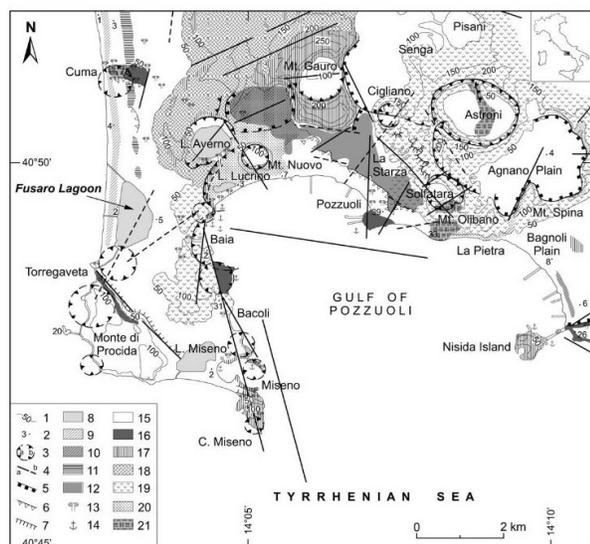


Fig. 4 - Carta geomorfologica del Golfo di Pozzuoli (De Pippo et alii; 2007)

generato da un'eruzione piroclastica avvenuta nel 1538. Attraverso l'analisi integrata dei dati paleoambientali, è stata ricostruita la probabile dinamica evolutiva della linea di costa del Golfo di Pozzuoli negli ultimi 13 ka, suddividendola in tre fasi: la prima fra 15 e 10 ka BP, con la messa in posto del Tufo Giallo Napoletano e la successiva formazione della caldera a seguito di collassi vulcano-tettonici; la seconda tra 10 e 5 ka BP, con i prevalenti sollevamenti del suolo puteolano e le eruzioni dei vulcani monogenici flegrei; l'ultima, infine, tra 5 ka BP ed il presente, caratterizzata dalle eruzioni piroclastiche di Agnano-M. Spina, M. Sant'Angelo, Astroni, M. Santa Teresa ed i prevalenti abbassamenti del suolo in età recente e storica.

In particolare, i principali risultati delle ricerche mettono in luce che la successione del terrazzo marino de La Starza risulta più complessa ed articolata di quanto finora riconosciuto. Il terrazzo ha un'età compresa tra 11 e 5 ka BP ed è stato caratterizzato da episodi marini e subaerei suddivisi in almeno quattro cicli trasgressivo-regressivi (Fig. 4).

Inoltre, il bacino di sedimentazione de La Starza, le variazioni morfologiche che questo ha subito ed il tipo di sedimentazione che lo ha caratterizzato sono il risultato di eventi vulcano-tettonici e vulcano-sedimentari. L'entità della sommersione della costa puteolana per cause bradisismiche in epoca storica è stata di almeno 17 m, ma non è escluso che questo tipo di movimenti verticali del suolo, di natura vulcanica, possa aver influito sulla sedimentazione del terrazzo de La Starza, interagendo profondamente con l'attività vulcanica flegrea nel periodo recente.

Negli intervalli di tempo compresi tra il 1970-72 ed il 1982-84 gli abitanti dell'area flegrea, e di Pozzuoli in particolare, sono stati testimoni e vittime di un fenomeno di sollevamento del suolo che, in pochi mesi, ha portato quest'ultimo ad un livello, complessivamente, di circa 3.5 m più alto. Questo fenomeno è

noto con il nome di bradisismo (letteralmente movimento lento del suolo, in contrapposizione con il movimento veloce che si realizza nel corso di un terremoto). Il luogo, più di ogni altro, testimonianza nei secoli del bradisismo flegreo è il macellum (mercato di epoca romana meglio conosciuto con il nome di Tempio di Serapide) situato in prossimità del Porto di Pozzuoli. Le rovine di tale costruzione (che risale alla fine del I sec.d.C) sono state di grande utilità per la ricostruzione dell'andamento del bradisismo grazie ai fori prodotti dai litodomi (i cosiddetti datteri di mare, *Lithodomus lithophagus* (Linnaeus, 1758), ovvero molluschi marini che vivono in ambiente costiero al limite tra l'alta e la bassa marea) sulle colonne che, a partire dal IV sec. d.C. in poi, testimoniano le variazioni del suolo rispetto al livello marino (Figg. 5 e 6).

Osservare queste vestigia del passato sulle quali sono registrate le variazioni relative del livello del mare di tale frequenza ed entità, ci consente di comprendere meglio chiarezza quali possono essere i risvolti sulle attività antropiche di ogni cambiamento che interviene all'interfaccia terra-mare, siano essi dovuti a cambiamenti climatici oppure all'influenza delle attività umane.

IV. METODOLOGIE DI STUDIO

Lo studio della valutazione del rischio (risk assessment), vanta una estesa bibliografia che comprende innumerevoli pubblicazioni su aspetti specifici e questioni locali, oppure interi volumi divulgativi, per quanto concerne le varie problematiche generali. Per quanto riguarda questo lavoro sui litorali flegrei, ad esempio, sono stati presi in considerazione, sia pubblicazioni che trattano in genere del rischio costiero (ad esempio Kusky, 2008) sia, lavori su argomenti più specifici o locali, come ad esempio le *pocket beaches* o la geologia dei Campi flegrei (De Pippo et alii, 2008; Simone et alii, 2012); tuttavia, i primi elementi bibliografici, di riferimento sono state le varie cartografie geologiche e geomorfologiche disponibili, che descrivono l'area d'interesse a varie scale, ma soprattutto quelle a piccola scala (Lirer et alii, 2011; Fedele et alii, 2012).

Lo studio bibliografico e quello della cartografia sono stati il



Fig.5 - Tempio di Serapide (macellum), quasi del tutto emerso; foto su gentile concessione di Carlo Donadio.



Fig. 6 - Tempio di Serapide (macellum) quasi completamente sommerso.

presupposto per definire un areale omogeneo sul quale concentrare l'attenzione; infatti si è scelto di lavorare sul litorale compreso fra Torregaveta ed il porto di Napoli, in quanto, pur essendo questo tratto di costa, composto da innumerevoli unità fisiografiche differenti, in pratica si ha un susseguirsi di segmenti composti da falesie rocciose alternate a *pocket beaches*. Nessuna di queste spiagge, anche se qualcuna è molto estesa, come quella di Miseno, presenta sbocchi di corsi d'acqua significativi, e possono, quindi essere considerate, come influenzate soprattutto da dinamiche meteorologiche.

Una volta stabilita l'area di studio, c'era da considerare che l'evoluzione della linea di riva, avviene in tempi molto più rapidi lungo le spiagge anziché laddove sono presenti falesie rocciose. Infatti le coste alte, per essere modellate, devono prima subire dei crolli (fenomeni franosi) ed in seguito, l'azione del mare frantuma e ridistribuisce questi detriti; com'è risaputo da tempo e documentato in molti studi di settore sulla stabilità delle falesie e dei versanti in roccia, la velocità di evoluzione ed arretramento del versante è legata a numerosi fattori predisponenti, tra cui i principali sono: la litologia e la giacitura; la successione stratigrafica (in particolar modo le variazioni litologiche alla base ed alla sommità); il grado di fratturazione e le altre deformazioni di origine tettonica; la pendenza. Mentre le cause che determinano l'innescarsi dei crolli sono essenzialmente legate agli agenti esogeni come il vento la pioggia o, nel caso delle falesie costiere, il moto ondoso; questi, atmosferici agiscono lentamente nel corso degli anni,

provocando lenti cambiamenti che risultano visibili o quantificabili nel corso delle decine o addirittura centinaia di anni. A volte invece a causa di fenomeni meteorologici molto intensi o endogeni, come i terremoti, o altresì a causa del sovraccarico dovuto all'accumulo di sollecitazioni prolungate nel tempo, vengono innescati processi franosi di grosse dimensioni che causano un'evoluzione brusca dei versanti con cambiamenti morfologici anche importanti e molto vistosi. Nel caso delle falesie costiere, l'azione del moto ondoso tende a ridistribuire i materiali depositi durante la frana; quantificare la velocità con cui sono asportati questi sedimenti, in relazione sia alla massa totale che alle dimensioni dei singoli blocchi, e possibilmente determinare il verso di trasporto, può aiutare a capire sia l'entità dell'energia idrodinamica in quel tratto di costa, media e massima, sia le direzioni delle correnti marine dominanti.

Per quanto riguarda l'evoluzione dei litorali sabbiosi, invece, i tempi per registrare cambiamenti apprezzabili, sono molto più brevi; infatti, possono bastare le poche ore di una mareggiata per mutare profondamente la morfologia di una spiaggia.

La differenza nella velocità con cui si possono apprezzare le variazioni morfologiche nei litorali sabbiosi e lungo le falesie ha condizionato, quindi le scelte su cui è basato questo studio. Infatti, poiché le linee di costa qui ricostruite, sono state ricavate da ortofoto presenti sul portale cartografico nazionale, e le prime disponibili risalgono agli anni 1988/89, mentre i principali movimenti franosi che si volevano individuare dalle foto erano antecedenti, ci si è dovuti limitare nelle osservazioni (solo in un caso, si è riconosciuto il cumulo di una frana, modificato dal mare, tuttavia non si è potuta ricostruire la morfologia della costa prima dell'evento; a tal fine, si sarebbe potuta cercare altra documentazione, ma la ricerca, l'elaborazione e la georeferenziazione del materiale, avrebbero comportato tempi eccessivamente lunghi e non comparabili con le finalità didattiche di questo studio).

Questo studio, effettuato adoperando un software GIS freeware (QGIS, versione 2.6), ha preso in considerazione soprattutto le spiagge comprese nell'area in esame e fa riferimento a tre linee di costa relative agli anni 1988, 2005 e 2012, in quanto, fra tutti gli anni di ortofoto disponibili sul portale cartografico nazionale, le suddette sono meglio ortorettificate e georeferenziate, mentre per gli altri (ad esempio il 2000) le deformazioni sono tali da non permettere comparazioni con gli altri dati acquisiti.

Dopo la fase preliminare di osservazione del materiale disponibile e la scelta delle ortofoto considerate più idonee (anno 1988 ortofoto in bianco e nero; 2005 e 2012 ortofoto a colori), si è passati alla digitalizzazione delle linee di riva relative a tutte le spiagge comprese nell'area in esame per i due anni, estremi del periodo di riferimento (1988 e 2012) allo scopo di valutare in prima analisi i cambiamenti intervenuti nella geometria delle spiagge.

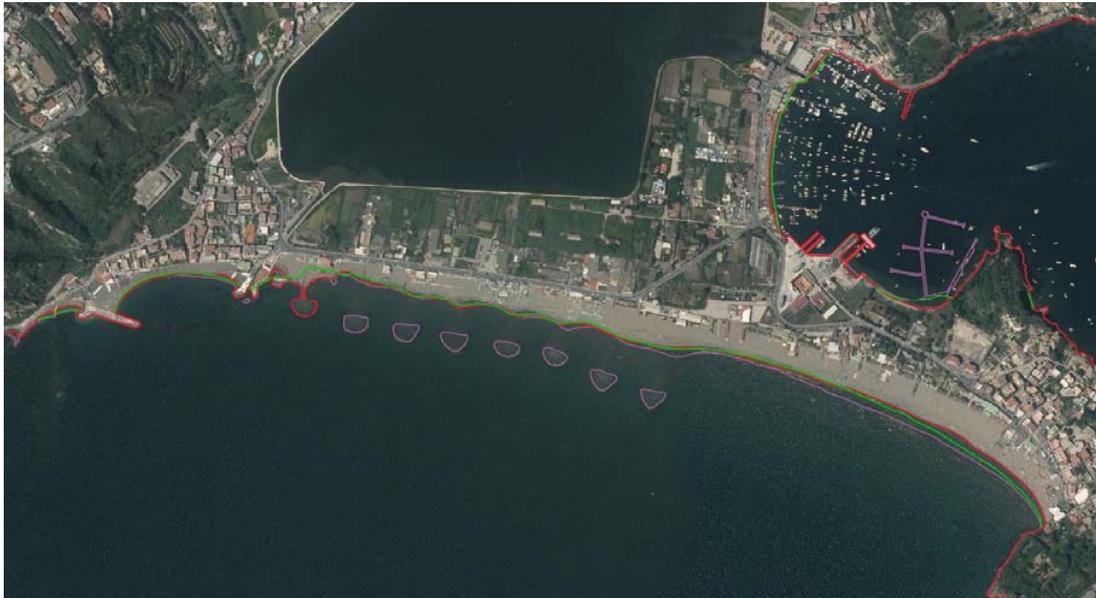


Fig. 7 - Le diverse linee di riva ricostruite sulle spiagge di Miseno e porto di Miseno; in verde 1988, in lilla 2005 ed in rosso 2012.

Successivamente è stata scaricata la linea di riva disponibile sul portale cartografico nazionale relativa all'anno 2005 ed è stata modificata sovrapponendola all'ortofoto relativa allo stesso anno per renderla più precisa. Anche per l'anno 2012, vista la discreta qualità dell'ortofoto, è stata ricostruita l'intera linea di riva per tutto il tratto di costa in studio; questo lavoro è stato realizzato eseguendo una copia della linea modificata relativa al 2005, sovrapponendola all'ortofoto del 2012 e correggendola di conseguenza per farla corrispondere a quanto osservato sull'ortofoto. Il lavoro per ottenere due linee di riva complete e precise per gli anni 2005 e 2012 (non è stato eseguito per il 1988 in quanto la qualità della foto non era comparabile), aveva lo scopo di evidenziare eventuali cambiamenti, non solo nelle geometrie delle spiagge, ma anche lungo le falesie e soprattutto per quanto riguarda le opere antropiche; infatti, le opere antropiche non solo a volte modificano direttamente la linea di costa, ma, quasi sempre, causano importanti ed a volte gravi, modifiche dell'idrodinamica costiera e della circolazione dei sedimenti lungo riva.

Partendo dal presupposto che questo lavoro, eseguito nell'ambito del tirocinio del corso di formazione, ha una valenza specialmente metodologica, poiché per occuparsi in maniera quantitativa delle problematiche relative alle variazioni delle linee di riva sono richieste risorse maggiori, tempi più lunghi (per le osservazioni e la raccolta dei dati) ed acquisizioni di dati anche sul campo, si è deciso, comunque di effettuare un approccio, semi-quantitativo, per valutare le variazioni occorse alle spiagge nel periodo stabilito.

A tal fine è stato digitalizzato un areale corrispondente ad ogni spiaggia presente lungo la costa esaminata, a partire dall'ortofoto del 2012 (di qualità migliore); successivamente, è stato riprodotto lo stesso areale per gli altri due anni in studio

e ne è stata modificata solo la geometria esterna, cioè relativa alla linea di riva, in modo da poter rendere confrontabili le varie superfici, di cui, inoltre, è stata calcolata l'area tramite un'analisi GIS.

A questo punto, sono state eseguite due tipi di analisi quantitative: una algebrica, l'altra geometrica. La prima analisi a partire da una tabella in cui erano quantificate in metri quadrati tutte le estensioni di ciascuna spiaggia per ogni anno di riferimento, calcolava il totale dell'estensione delle spiagge per ogni anno per poi, computare un bilancio complessivo e quantificarne le variazioni tramite l'uso di grafici; lo stesso confronto è stato poi fatto anche per tre delle spiagge più estese dell'area di studio (la spiaggia di Miseno-Miliscola e due spiagge della zona dell'arenile di Bagnoli).

L'altro tipo di analisi, più prettamente geometrica, ha permesso di determinare (tramite funzioni di geoprocessing del software GIS) gli areali che rappresentavano le zone in accrezione ed in arretramento per ogni spiaggia ed intervallo temporale tra gli anni di riferimento; in pratica è stata effettuata una differenza tra le aree per ogni intervallo individuato, prima spostandosi avanti nel tempo (ad esempio dal 2005 al 2012) e successivamente a ritroso (ad esempio dal 2012 al 1988); le aree, così individuate, rappresentano la geometria e l'estensione delle porzioni di spiagge in arretramento ed in pro gradazione, e graficamente individuate (separatamente per ogni intervallo preso in esame), rispettivamente con, il colore verde per le aree in avanzamento, ed il colore rosso, per quelle in arretramento.

V. OSSERVAZIONI

Analizzando le ortofotografie dell'area compresa tra Torre Gaveta ed il porto di Napoli (Fig. 1), per i vari anni in cui



Fig. 8 - Le spiagge di Miseno e porto di Miseno; in verde le aree in progradazione ed in rosso quelle in arretramento nel periodo tra il 1988 ed il 2005.

erano disponibili i voli sul portale cartografico nazionale, si è potuto subito osservare, che si erano verificati continui cambiamenti nelle geometrie delle spiagge. Un esempio di tali cambiamenti è visibile nella figura dove appare la spiaggia da Miliscola a Miseno e le spiagge all'interno del porto di Miseno (Fig. 7); in figura sono evidenziate con colori diversi le linee di riva relative ai differenti anni ricostruiti (in verde il 1988; in lilla il 2005 ed in rosso il 2012). Si osserva che i cambiamenti interscorsi lungo le spiagge non sono simmetrici, inoltre, si nota che, in alcuni tratti di costa, dal 1988 al 2005 c'è una tendenza alla progradazione; dal 2005 al 2012, invece, si può riconoscere una generale tendenza alla recessione, fatto salvo per la zona di Miliscola, dove forse, a causa di alcuni piccoli interventi antropici, si riscontra una leggera progradazione con un piccolo effetto di rotazione antioraria sull'intera linea della spiaggia di Miseno.

Oltre ai già summenzionati cambiamenti di origine antropica nella zona di Miliscola, sono ben evidenti, importanti cambiamenti intervenuti all'interno dell'area del porto di Miseno; infatti, tra il 2005 ed il 2012, sono stati rimossi diversi pontili d'ormeggio e si riscontra un notevole arretramento delle spiagge a tergo di queste strutture.

Per quantificare meglio le superfici coinvolte da queste variazioni, nella figura seguente (Fig. 8) sono colorate le aree in progradazione (in verde) e le aree in arretramento (in rosso) del periodo compreso tra il 1988 ed il 2005.

Altresì, nella figura successiva (Fig. 9), viene mostrata l'evoluzione della stessa area negli anni dal 2005 al 2012 (in verde la progradazione ed in rosso l'arretramento). Come appare evidente, in questo periodo, sebbene sia molto più breve dell'intervallo precedente, nella quasi totalità delle spiagge si riscontra un forte arretramento.

In un'altra figura (Fig. 10), è illustrata, invece, l'evoluzione quantificata globalmente nel periodo intercorso dal 1988 fino al 2012; in questo caso, le modificazioni (apparenti) che si riscontrano negli areali, sono minori di quelle effettivamente occorse (nonostante il periodo di osservazione più lungo), in quanto, generalmente si è avuta prima una progradazione ed in seguito l'arretramento.



Fig. 10 - Le spiagge di Miseno e porto di Miseno; in verde le aree in progradazione ed in rosso quelle in arretramento nel periodo tra il 1988 ed il 2012.



Fig. 9 - Le spiagge di Miseno e porto di Miseno; in verde le aree in progradazione ed in rosso quelle in arretramento nel periodo tra il 2005 ed il 2012.

In questa figura, inoltre, si nota quanto anticipato dalla descrizione della figura 7, dove dalla geometria delle variazioni delle linee di riva tra il 1988 ed il 2012, si riscontrava una rotazione antioraria della riva con progradazione ad Ovest ed arretramento ad Est.

Nella zona dell'arenile di Bagnoli, l'evoluzione degli areali di



Fig. 11 - Le spiagge dell'arenile di Bagnoli; in verde le aree in progradazione ed in rosso quelle in arretramento nel periodo tra il 1988 ed il 2005.

spiaggia che intercorre tra il 1988 ed il 2005, viene mostrata nella successiva figura (Fig. 11); in questa si osserva un generale arretramento di tutte le spiagge, ad esclusione di un breve tratto, dove si riscontra una certa progradazione ad opera di interventi antropici.



Fig. 12 - Le spiagge dell'arenile di Bagnoli; in verde le aree in progradazione ed in rosso quelle in arretramento nel periodo tra il 2005 ed il 2012.

I cambiamenti intercorsi sullo stesso tratto di costa tra il 2005 ed il 2012, sono illustrati nella figura successiva (Fig. 12); in questo intervallo di tempo si osservano specialmente effetti di progradazione dovuti agli ampliamenti delle opere di difesa costiera.

Considerando, invece, il periodo complessivo tra il 1988 ed il 2012, nella figura 13, si osserva il generale arretramento delle spiagge ad esclusione della zona in cui si riscontrano gli effetti dell'ampliamento delle opere di difesa costiera.

L'evoluzione dell'estensione delle spiagge nell'area di Coroglio, intercorsa tra il 1988 ed il 2005, viene illustrata nella figura 14. In quest'immagine si osserva un leggero arretramento della piccola spiaggia nella parte più settentrionale dell'area; invece, la spiaggia prospiciente i pontili, mostra una rotazione antioraria con progradazione a Nord ed arretramento a Sud, quella a Sud della struttura di collegamento con l'Isola di Nisida, infine, mostra una rotazione di segno opposto, con arretramento nel settore Nord e progradazione a Sud; nel complesso si registra un comportamento simmetrico e speculare rispetto alla struttura che collega l'Isola di Nisida con la terraferma.

Nella stessa area, tra il 2005 ed il 2012, si riscontrano (Fig. 15) delle variazioni con le stesse tendenze del periodo precedente,



Fig. 13 - Le spiagge dell'arenile di Bagnoli; in verde le aree in progradazione ed in rosso quelle in arretramento nel periodo tra il 1988 ed il 2012.

eccetto che per la spiaggia più a Sud dove la tendenza è interamente recessiva.



Fig. 14 - Le spiagge nell'area di Coroglio; in verde le aree in progradazione ed in rosso quelle in arretramento nel periodo tra il 1988 ed il 2005.

Considerando il periodo complessivo dal 1988 al 2012, invece, si osservano (Fig. 16) all'incirca gli stessi cambiamenti e le stesse tendenze occorse dal 1988 al 2005, solo di entità leggermente diversa (in qualche caso aumentata, altre volte diminuita, a seconda che gli effetti degli anni precedenti si sommassano o si sottraevano).

Arrivando al margine meridionale della spiaggia di Coroglio, è stata ricostruita la variazione della linea di riva, al piede della falesia, intercorsa tra gli anni 1988, 2005 e 2012 a causa dell'arretramento prodotto dall'azione erosiva del mare sul cumulo di detriti derivati da un grosso evento franoso occorso nel 1987 (Fig. 17).

Nella figura, si osserva un forte arretramento nel primo periodo tra il 1988 ed il 2005, dovuto all'erosione al piede del cumulo di frana; tale arretramento continua fino al 2012 ed è ancora in atto come verificabile da immagini più recenti (da Google Earth; Fig. 18).

In ultimo è stato calcolato il bilancio per quantificare le variazioni effettive in metri quadrati (comutate tramite il software GIS) delle aree di spiaggia, ricavando il totale delle superfici delle spiagge censite per ogni anno dell'analisi; i totali ricavati sono stati confrontati mediante un grafico a



Fig. 15 - Le spiagge nell'area di Coroglio; in verde le aree in progradazione ed in rosso quelle in arretramento nel periodo tra il 2005 ed il 2012.

barre (Fig. 19).



Fig. 16 - Le spiagge nell'area di Coroglio; in verde le aree in progradazione ed in rosso quelle in arretramento nel periodo tra il 1988 ed il 2012.

Dall'altezza relativa delle barre si nota immediatamente come nel periodo intercorrente il 1988 ed il 2005, vi sia stato un grande aumento delle superfici delle spiagge (e di conseguenza una progradazione), mentre nel successivo periodo, fino al 2012, vi sia stata una brusca diminuzione delle stesse (e quindi un generale arretramento); comunque nel complesso, tra il 1988 ed il 2012, non considerando le tendenze evolutive, si riscontra un lieve aumento della superficie totale delle spiagge.

La stessa operazione di confronto è stata eseguita, paragonando le superfici delle tre principali aree di spiaggia descritte in precedenza: Miliscola-Miseno, arenile di Bagnoli e spiaggia di Coroglio (Fig. 20).

In quest'ultimo grafico si riscontra come, per le spiagge dell'arenile e di Coroglio, nei tre anni considerati le variazioni di superficie siano minime; invece, per la spiaggia di Miseno (la più estesa), le variazioni rispecchiano l'andamento generale con un forte aumento della superficie di spiaggia tra il 1988 ed il 2005, ed una forte diminuzione tra il 2005 ed il 2012 con una minima perdita sul totale iniziale.

VI. DISCUSSIONE DEI DATI E CONCLUSIONI



Fig. 17 - Falesia di Coroglio, variazioni della linea di riva registrate negli anni: 1988, in verde; 2005 in lilla e 2012 di colore rosso.

Lo studio sull'evoluzione della linea di costa dell'area flegrea, fin qui esposto, ha avuto un carattere essenzialmente didattico, e certamente non esaustivo, la cui finalità principale è stata



Fig. 18 - Falesia di Coroglio, ulteriore arretramento a causa dell'erosione marittima anno, 2015.

quella di impadronirsi di nuovi strumenti per la raccolta e l'analisi dei dati territoriali (in questo caso tramite l'uso di programmi GIS), nell'ambito di tematiche strettamente legate all'ambiente costiero; quest'ambiente, che rappresenta l'interfaccia fra la terra ed il mare, ed è quasi sempre densamente abitato e sottoposto a stress di genesi antropica; inoltre, è particolarmente sensibile in quanto subisce l'influenza da parte di entrambi i domini naturali ed è come una bilancia che deve mantenere sempre un delicato equilibrio adeguando le sue risposte a delle forze in continuo mutamento. Questo equilibrio, da sempre viene mantenuto dalla linea di costa che si adegua alle sollecitazioni che riceve, essenzialmente tramite fenomeni di progradazione o di arretramento. Le cause di questa evoluzione della morfologia delle coste sono tante, ma innanzitutto il ruolo principale è svolto dal clima che influenza sia il dominio marino (ad esempio cambiando la direzione dei venti dominanti o l'intensità dell'onda media), sia quello continentale (magari a causa di un aumento di eventi piovosi a carattere temporalesco che causano grande trasporto di sedimenti verso il mare); in questo delicato equilibrio, il nostro interesse è duplice: per

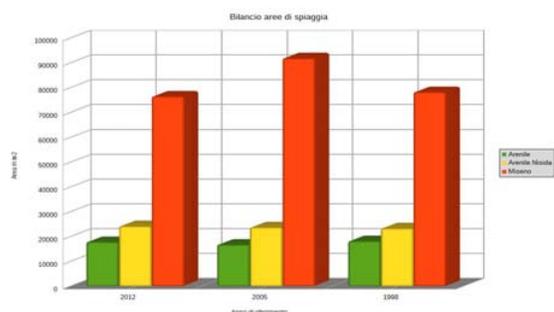


Fig. 20 - Grafico a barre che mostra il totale in m² delle aree delle tre principali spiagge censite per ogni anno di riferimento.

prima cosa la diffusa presenza umana e di attività antropiche lungo le coste diventa una fonte di rischio a causa di ogni

piccola variazione che interviene (ad esempio l'erosione della costa può causare problemi alla sicurezza ed alla stabilità di manufatti); in seconda analisi, è l'uomo stesso che con le sue attività, influenza le dinamiche delle coste (ad esempio costruendo strutture di difesa costiera che però possono alterare la deriva dei sedimenti lungo la riva).

Su questi presupposti è evidente quanto sia utile, anzi necessario, studiare tutti i processi che influenzano gli equilibri della linea di costa e per comprenderne anche le tendenze evolutive e le reali motivazioni che le determinano; infatti, se si osservano i dati risultanti da questo studio, si possono fare numerose considerazioni e porre diversi quesiti. In primo luogo, si osserva, che nella maggior parte dei casi, si registrano variazioni della linea di riva che non sono parallele alla fisiografia della linea stessa, ma sono rappresentate da

| Anno di riferimento | 2012 | 2005 | 1998 |
|---|--------|---------------|------------------|
| Totale aree spiagge per anno m2 | 258418 | 276588 | 264841 |
| Periodo | | 1988/2005 | 2005/2012 |
| Progradazione/Arretramento totale periodo m2 | | 18173 | -11747 |
| Progradazione/Arretramento tasso annuo m2 | | 1069 | -1678,1428571429 |
| Spiaggia Miseno area m ² | 76618 | 91983 | 78365 |
| Progradazione/Arretramento totale periodo m2 Miseno | | 15365 | -13618 |
| Progradazione/Arretramento tasso annuo m2 Miseno | | 903,835294118 | -1945,4285714286 |

Fig. 21 - Tabella con il computo delle aree delle spiagge in m² nei vari anni di riferimento e con i tassi di pro gradazione ed arretramento totali e come media annuale.

rotazioni con fulcro in genere nella parte mediana, e che pertanto, determinano erosione e progradazione allo stesso tempo lungo tratti diversi della stessa spiaggia, di solito un arretramento nelle aree settentrionali ed un avanzamento in quelle meridionali. Questo meccanismo rende impossibile quantificare le modifiche intercorse dalla semplice osservazione della variazione delle geometrie; tuttavia, lo studio di tali geometrie può aiutare a comprendere fenomeni e cambiamenti nella dinamica costiera per esempio valutando se sono intervenute variazioni nel regime delle correnti marine o sono connesse ad opere antropiche che hanno determinato un'alterazione delle celle secondarie di circolazione litoranea. Nella maggior parte dei casi osservati sui litorali in studio, la rotazione sembra essere condizionata dalla presenza di strutture antropiche (barriere artificiali, porti).

Un'analisi quantitativa efficace dell'evoluzione di un litorale, dovrebbe essere svolta mediante misurazioni multidisciplinari delle caratteristiche morfologiche della spiaggia sia emersa che sommersa, delle correnti e dell'ondazione a mare, infine, del trasporto dei sedimenti lungo riva; tutte queste misure andrebbero ripetute periodicamente per quantificare i reali cambiamenti e le tendenze evolutive, ma soprattutto per

valutare i volumi effettivi di sedimenti che entrano o escono dall'unità fisiografica in esame.

Poichè questo lavoro richiedeva tempi e risorse in abbondanza e non era compatibile con il tirocinio che avrei dovuto svolgere, si è optato per un approccio comunque quantitativo, anche se non del tutto esaustivo come quello descritto in precedenza; a tal fine, sono stati definiti e georeferenziati degli areali per ogni spiaggia individuata nell'area di studio, per ognuno dei tre anni in cui si è fatta l'analisi, e ne è stata calcolata la superficie in metri quadrati. Utilizzando gli strumenti di geoprocessing del software GIS sono state calcolate le differenze tra le aree delle spiagge nei diversi anni per ricavare graficamente la forma e l'estensione delle superfici di progradazione e di arretramento, rispettivamente per ogni intervallo di tempo considerato.

Nella maggior parte dei casi osservati, generalmente risulta che nel periodo tra il 1988 ed il 2005, le spiagge hanno avuto una discreta pro gradazione, mentre nel periodo tra il 2005 ed il 2012, si è verificato un arretramento quasi uguale o maggiore alla corrispondente progradazione del periodo antecedente. Si nota inoltre, che dal 1988 al 2005 intercorrono ben 17 anni, mentre dal 2005 al 2012 solo 7; quindi, il tasso di erosione annua dell'ultimo periodo è assolutamente superiore a quello di progradazione del periodo precedente ed è quantificabile quasi pari al doppio.

Osservando i cambiamenti intercorsi nell'intero periodo tra il 1988 ed il 2012, si evince che si è manifestata solo una piccola progradazione o più spesso un modesto arretramento quale risultato della somma algebrica delle singole variazioni.

Allo scopo di effettuare un bilancio complessivo delle variazioni delle superfici delle spiagge, sono state sommate le aree di tutte le spiagge per ogni anno di osservazione (Fig. 21) e sono confrontati i risultati in un grafico a barre; in questo appare evidente la forte progradazione avvenuta dal 1988 al 2005 ed il marcato arretramento successivo che ha portato la superficie totale di spiaggia del 2012 ad essere comunque leggermente al di sopra di quella del 1988 (Fig. 19).

Il tasso di progradazione annuo calcolato tra il 1988 ed il 2005, risulta di circa 1069 m²/y; mentre, il tasso annuo di arretramento tra il 2005 ed il 2012, risulta essere di circa 1678 m²/y.

Plottando in un grafico simile le aree delle tre spiagge principali (Misenò, arenile di Bagnoli e Coroglio), si riconosce un andamento simile a quello del grafico che considera la totalità delle spiagge, tranne che per la spiaggia di Miseno dove l'area calcolata per l'anno 2012 risulta essere inferiore a quella iniziale del 1988 (Fig. 20); questo implica che negli ultimi 7 anni, in questa spiaggia il tasso di erosione risulta addirittura superiore al già alto tasso medio (circa 1945 m²/y) e più del doppio rispetto ad un tasso di progradazione annuo di circa 903 m²/y calcolato per questa spiaggia, per il periodo dal 1988 al 2005.

Ulteriori considerazioni devono essere fatte su questi dati; infatti, il significato reale di queste variazioni della linea di riva deve essere valutato tenendo conto di diversi fattori: per prima cosa i voli da cui sono state ricavate le ortofoto, non è detto che siano stati eseguiti negli stessi periodi dell'anno

(quindi si deve verificare se le spiagge durante il volo avessero un profilo invernale o meno); in secondo luogo, non è detto che le condizioni meteo-marine (anzi spesso è il contrario) siano simili (una mareggiata può portare un considerevole arretramento della spiaggia in poche ore); in ultima analisi, poiché le linee di riva sono state ricavate a distanza di molti anni (un intervallo di 17 anni ed uno di 7 anni), non è detto che in questi intervalli la tendenza a progredire o ad arretrare delle spiagge sia stata sempre la stessa anzi è probabile che ci siano state diverse oscillazioni in un senso e nell'altro con dinamiche molto più veloci.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' – TESSA.

Desidero ringraziare il mio tutor Marco Sacchi che, tra le altre cose, con grande pazienza e disponibilità ha dovuto sopportare tutte le antipatiche formalità che comporta un tirocinio del genere e che ad ogni buon ricercatore sono fonte di tante orticarie; il mio amico e collega Fabio Matano che mi ha supportato anche nella scelta dei materiali sui quali impostare il mio lavoro, ed anche il mio caro amico Sabato Iuliano che con grande disponibilità mi ha fornito grande supporto tecnico e scientifico.

Un ringraziamento particolare al mio amico Carlo Donadio per la sua immancabile disponibilità ed il suo prezioso aiuto.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Armienti P., Barberi F., Bizouard H., Clocchiatti R., Innocenti F., Metrich M., Rosi M. & Sbrana A. (1983) – The Phlegrean Fields: magma evolution within a shallow chamber. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 17, 289-311.
- [2] Barberi F., Innocenti F., Lirer L., Munno R., Pescatore T. & Santacroce R. (1978) - The Campanian Ignimbrite: a major prehistoric eruption in the neapolitan area. *Bull. Volc.*, 41(1), 10-31.
- [3] Bitelli G., Dubbini M., Zanutta A. (2004). Terrestrial Laser Scanning and Digital Photogrammetry Techniques to Monitoring Landslide Bodies, in Altan (ed.) *Proceedings of XX ISPRS Congress*, 12-13 July 2004, Istanbul, Turkey, IAPRS vol. XXXXV, part B5, pp. 246-251.
- [4] Broili L. (1973). In situ tests for the study of rockfall. *Geologia Applicata e Idrogeologia* 8 (1), pp. 105-111.
- [5] Barton, N.R., Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech.* 10 (1-2), pp. 1-54.
- [6] Beneduce P. & Schiattarella M. (1997) – Relazioni tra tettonica regionale e quaternaria e deformazione vulcanogenica nelle aree dei Campi Flegrei, Isola di Ustica e Monte Vulture (Italia meridionale). *Il Quaternario*, 10, 583-588.
- [7] Bieniawski, Z.T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs* 15, pp. 335-344.
- [8] Bieniawski, Z.T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. *In Exploration for rock*.
- [9] Bieniawski, Z.T. (1979). The geomechanics classification in rock engineering applications. *Proc. 4th. Congr. Int. Soc. Rock Mech., Montreux* 2, pp. 41-48.
- [10] Bieniawski Z.T. (1989). *Engineering rock mass classification*, J. Wiley & Sons, New York.
- [11] Cinque A., Rolandi G. & Zamparelli V. (1985) - L'estensione dei depositi marini olocenici nei Campi Flegrei in relazione alla vulcanotettonica. *Boll. Soc. Geol. It.*, 104, 327-348.
- [12] CINQUE A., AUCELLI P.P.C., BRANCACCIO L., MELE R., MILIA A., ROBUSTELLI G., ROMANO P., RUSSO F., RUSSO M., SANTANGELO N. & SGAMBATI D. (1997) - Volcanism, tectonics and recent geomorphological change in the Bay of Napoli. *Guide for the excursion. 4th Int. Conf. on Geomorph.*, 1997, Genova (Italy), Geogr. Fis. Din. Quat., 2, suppl. III, 123-141.
- [13] Cioni R., Civetta L., D'antonio M., De Vita S., Fisher R.V., Marianelli P., Marinoni L., Orsi G., Ort M., Pappalardo L., Piochi M., Rosi M., Santacroce R. & Sbrana A. (1994) – Volcanoes of the neapolitan area: Vesuvius, Ischia, Campi Flegrei. 16th Gen. Meet., 1994, Sept. 10-14, Pisa (Italy), *Int. Miner. Ass., Guide-book*, 128 pp.
- [14] Civetta L., Del Gaudio C., De Vita S., Di Vito M.A., Orsi G., Petrazzuoli S.M., Ricciardi G. & Ricco C. (1997). Short term deformational processes in the Campi Flegrei caldera. *Gr. Naz. Geof. Terra Solida*, 14° Conv.
- [15] COCCO E., CASTALDO G., DE MAGISTRIS M.A., DE PIPPO T. & D'IORIO G. (1980) - Dinamica ed evoluzione del litorale campano-laziale. Settore a sud del F. Volturno. *Prog. Fin. «Conservazione del suolo», Sottoprog. «Dinamica dei Litorali», C.N.R., Roma*, 160, 58-9/58-11. Cruden D.M. & Varnes D.J. (1996). *Landslides Types and Processes*. In: Turner A.K. & Schuster R.L. (Eds.) *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247. National Academy Press, WA, 36-75.
- [16] CORRADO G. & PALUMBO A. (1968) - Osservazioni sul bradisismo flegreo. *Boll. Soc. Natur. in Napoli*, 78, 11-16.
- [17] DE BONITATIS A., LATMIRAL G., LATMIRAL G., MIRABILE L., PALUMBO A., SARPI E. & SCALERA A. (1971) - Rilievi sismici per riflessione: strutturali, ecografici (fumarole) e batimetrici, nel golfo di Pozzuoli. *Boll. Soc. Natur. in Napoli*, 79, 97-113.
- [18] de Luca Tuppiti Schinosa F. (2013). La valutazione della stabilità di versanti in roccia: aspetti metodologici ed applicazioni su aree campione del territorio campano. Ph.D. XX ciclo. Università Degli Studi di Napoli "Federico II".
- [19] DE PIPPO T., DI CARA A., GUIDA M., PESCATORE T. & RENDA P. (1984) - Contributi allo studio del Golfo di Pozzuoli: lineamenti di geomorfologia. *Mem. Soc. Geol. It.*, 27, 151-159.
- [20] DE PIPPO T., DONADIO C. & PENNETTA M. (2000) - Caratteri morfologici del Canyon di Cuma (Campania - Italia). *Atti II Conv. Int. delle Scienze del Mare, CoNISMA*, 184-185.
- [21] DE PIPPO T., DONADIO C., GROTTOLA D. & PENNETTA M. (2004) *Geomorphological evolution and environmental reclamation of Fusaro lagoon (Campania Province, southern Italy)*. *Environment International*, 30, 199-208.
- [22] De Pippo T., Guida D., Donadio C., Terlizzi F., Papa B., Esposito M. e Amato G. (2008). Studio di fattibilità su erosione costiera e rischio da inondazione costiera. ARPAC, CONISMA, pubbl. CDROM.
- [23] De Vivo B., Rolandi G., Gans P.B., Calvert A., Bohrsen W.A., Spera F.J., & Belkin H.E. (2001) - New constraints on the pyroclastic eruptive history of the Campanian volcanic Plain (Italy). *Mineral. Petrol. Springer-Verlag eds.* 73:47-65, 2001.
- [24] Deino A.L., Orsi G., Piochi M., & De Vita S. (2004) - The age of Neapolitan Yellow Tuff caldera-forming eruption (Campi Flegrei caldera – Italy) assessed by ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating method. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 133, 157-170.
- [25] Di Girolamo P., Ghiara M.R., Lirer L., Munno R., Rolandi G. & Stanzione D. (1984) – Vulcanologia e petrologia dei Campi Flegrei. *Boll. Soc. Geol. It.*, 103, 349-413.
- [26] Dvorak J.J. & Mastrolorenzo G. (1991) – History of vertical movement in Pozzuoli Bay, southern Italy: the result of regional extension related to evolution of the Tyrrhenian Sea and of local volcanic activity. *Geol. Soc. Am. Pap.*, 263, 47 pp.
- [27] Esposito G., Iuliano S., Marino E., Matano F., Pignalosa A., Sacchi M., Sarnacchiaro G. (2013): Rilievi con tecnica laser-scanning nell'area flegrea per il monitoraggio dei costoni tufacei e dei fondali adiacenti. *Riassunti del Congresso AIQUA 2013 - Miscellanea INGV*, 19, 2013.

- [28] Fedele L. *et alii* (2012) - Carta Geologica d'Italia alla scala 1:10.000, Fogli 465 e 464 ISOLA DI PROCIDA. (Regione Campania)
- [29] Frolidi (2000). Digital terrain model to assess geostructural features in near-vertical rock cliffs. *Bull Eng Geol Env* (2000) 59 : 201–206.
- [30] GUNTHER R.T. (1903b) - Contribution to the study of earth-movements in the Bay of Naples. *The Geographical Journal*, Loescher E. and Co., Oxford, Parker and Son, Rome, 1-62.
- [31] Heiken G. (1971) – Tuff rings: examples from the Forth Rock-Christmas lake valley basin, South Central Oregon. *J. Geoph. Res.*, 76, 5415-5626.
- [32] ISRM (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr.*, 15, pp. 319 – 368.
- [33] Kusky T. (2008). The coast: hazardous interactions within the coastal environment. Ph.D. Thesis. Facts On File, Inc., Infobase Publishing.
- [34] Lirer L. & Munno R. (1975) – Il Tufo Giallo Napoletano. *Period. di Miner.*, 44, 103-118.
- [35] Lirer L., Petrosino P., Alberico L., Armiero V. (2011). Carta Geologica di Procida, Vivara e Monte di Procida. Scala 1:10.000. Dip. Scien. Della Terra, CIRAM, Università Federico II, Napoli.
- [36] Luongo G., Bigi G. & Obrizzo F. (1988) - Campi Flegrei: bradisismic crisis 1982-1984. Osservatorio Vesuviano, Napoli.
- [37] Orsi G., Cuna L., De Astis G., De Vita S., Di Vito M.A., Isaia R., Nave R., Pappalardo L., Piochi M., Postiglione C. & Sansivero F. (2002) – I vulcani napoletani: pericolosità e rischio. Osservatorio Vesuviano, Napoli, 45 pp.
- [38] Ortolani F. & Aprile F. (1985) – Principali caratteristiche stratigrafiche e strutturali dei depositi superficiali della Piana Campana. *Boll. Soc. Geol.*, 104(2), 195-206.
- [39] PALUMBO A. (1985) - Influence of external tidal and meteorological forces on the bradyseismic phenomenon in the Phlegrean Fields. *Il Nuovo Cimento*, 5 (C), 538-551.
- [40] Parascandola A. (1947) - I fenomeni bradisismici del Serapeo di Pozzuoli. *Boll. Soc. Natur. in Napoli*, 56, 115 p.
- [41] PENNETTA M., PESCATORE T.S. & VECCHIONE C. (1984) - Contributi allo studio del Golfo di Pozzuoli: caratteristiche tessiturali dei sedimenti superficiali. *Mem. Soc. Geol. It.*, 27, 161-169.
- [42] Rosi M. & Sbrana A. (1987) – Phlegrean Fields. C.N.R., Quad. de «La Ricerca Scientifica», Prog. Finalizzato Geodinamica, Monografie finali, 144, 9, 175 pp.
- [43] Scherillo A. (1973) - Vulcanismo e bradisismo nei Campi Flegrei. *Atti Convegni dei Lincei, Acc. Naz. Lincei*, 33, 283-328.
- [44] Simone *et alii* (2012) - Le pocket beach. Dinamica e gestione delle piccole spiagge. FrancoAngeli edizioni, 176.
- [45] Smith Keith, (2004). *Environmental Hazards Assessing Risk and Reducing Disaster*. Taylor & Francis.
- [46] Somma R., Caputo T., Esposito G., Marino E., Matano F., Carlino S., Iuliano S., Sacchi M., Troise C., De Natale G. (2013): Application of laser scanning and opto-electronic devices for monitoring cliff instability in the Campi Flegrei coastal area: the Coroglio case study (Napoli, Italy). American Geophysical Union Fall Meeting 2013, San Francisco, California, 9-13 dicembre 2013.
- [47] Teza G., Galgaro A., Genevois R., Rocca M., Squarzoni C. (2004). Integrazione di dati da laser scanner e metodi tradizionali per la misura delle deformazioni della frana di Perarolo di Cadore (BL).
- [48] Varnes D.J. (1978). Slope Movement Types and Processes. In “Special Report 176:
- [49] Landslides Analysis and Control” (R.L. Schuster and R.J. Krizek Eds). TRB Transp.
- [50] Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 11-33.
- [51] Varnes D.J. & IAEG Commission on Landslides (1984). Landslides Hazard Zonation a review of principles and practice. UNESCO, Paris, 63 pp.
- [52] Vezzoli L. (1988) – (Ed.) Island of Ischia. C.N.R., Quad. de «La Ricerca Scientifica», Prog. Finalizzato Geodinamica, Monografie finali, 114, 10, 122 pp.

Biologia



Applicazione di tecniche istologiche e di analisi d'immagine per lo studio dell'ecologia riproduttiva di Acciuga europea (Engraulis encrasicolus)

Cira Buonocore

IAMC – Istituto per l'Ambiente Marino Costiero, CNR,
Mazara del Vallo (Tp), Italia
cira.buonocore@gmail.com

Gualtiero Basilone

IAMC – Istituto per l'Ambiente Marino Costiero, CNR,
Mazara del Vallo (Tp), Italia
gualtiero.basilone@iamc.cnr.it

Sommario — L'attività di ricerca svolta è consistita nell'analisi di campioni e raccolta dei dati per la stima della biomassa deponente di specie ittiche di piccoli pelagici. Il lavoro qui illustrato è stato eseguito nell'ambito del progetto di Formazione: “Oceanografia operativa e Tecnologie Informatiche per la sicurezza Marittima”, obiettivo 2: corso di “Tecnologie Informatiche per la sicurezza marittima (anno 2013-2014).

I campioni oggetto di analisi sono stati prelevati mediante catture sperimentali attraverso campagne oceanografiche mirate alla pesca di specie ittiche pelagiche di interesse sia ecologico che commerciale. Nei laboratori dell'IAMC-CNR dell'U.O.S. di Capo Granitola (frazione di Campobello di Mazara, TP) si è provveduto alla preparazione di sezioni istologiche di porzioni di tessuto gonadico (nel caso specifico di Acciuga europea, *Engraulis encrasicolus*) e, successivamente, all'interpretazione delle sezioni istologiche per la determinazione dello stadio di maturità sessuale e il riconoscimento di particolari strutture che indicano l'avvenuta deposizione (follicoli post-ovulatori, POF). E' stato applicato il metodo *whole mount*, una tecnica di analisi di immagine che risulta più economica e di più facile applicazione delle consuete analisi istologiche, nonché più accurata e utile per la determinazione della fecondità delle specie ittiche.

Keywords— *Engraulis encrasicolus*; *whole mount*; *POF* (follicoli post ovulatori); canale di Sicilia.

INTRODUZIONE

L'ecologia riproduttiva, attraverso lo studio di particolari parametri quali la fecondità ed il potenziale riproduttivo, fornisce informazioni rilevanti per un'intera popolazione ittica e per lo *stock assessment* della stessa, ovvero tutte quelle tecniche di stima atte a monitorare e gestire gli stock che sono oggetto di pesca commerciale. Tale studio è stato possibile attraverso l'applicazione di metodi ittioplanctonici per la stima

della biomassa quali il metodo di produzione giornaliera delle uova (DEPM).

Il potenziale riproduttivo rappresenta la variabilità annuale della capacità di una popolazione di produrre, in un dato anno, uova e larve che siano in grado di sopravvivere sino al reclutamento [1].

Conoscere a fondo l'ecologia riproduttiva di una specie così da poter identificare le cause e le conseguenze delle variazioni del potenziale riproduttivo di uno stock significa migliorarne la valutazione (*stock assessment*) e possedere gli strumenti per un approccio integrato alla gestione delle risorse.

Gli studi sull'interazione bio-ecologica fra le attività di pesca e gli ecosistemi marini risultano quindi importanti per una gestione sostenibile della pesca stessa e delle risorse biologiche marine.

La disponibilità di stime affidabili della biomassa riproduttiva consente di monitorare la dinamica dello stock di popolazioni caratterizzate da rapide fluttuazioni dei parametri vitali, come quelle dei pesci pelagici a riproduzione multipla [2].

A causa del sovrasfruttamento, numerose risorse ittiche europee si trovano al di sotto dei limiti di sicurezza necessari ad assicurare il mantenimento di quei livelli di biomassa che assicurano la sopravvivenza delle popolazioni.

Come tutte le specie di piccoli pelagici, gli stock di acciuga europea (*Engraulis encrasicolus*) sono soggetti a fluttuazioni nei livelli di biomassa dovuti sia alla variabilità dell'ambiente in cui vivono, principalmente, sia al tasso di prelievo (attraverso la pesca) a cui sono sottoposti [3] [4] [5].

Inoltre la fecondità degli adulti risulta influenzata dalle variazioni dei parametri ambientali quali la temperatura e la disponibilità di cibo [3] [4] [5].

La pesca delle acciughe, in particolare, rappresenta la principale risorsa di pesca, che costituisce quasi il 30 % della produzione totale di pesce del Mediterraneo [6].

Inoltre l'acciuga rappresenta la seconda specie in ordine di fatturato dopo il pesce spada (*Xiphias gladius*) [7] e quindi ha un ruolo notevole dal punto di vista economico.

I. L'ACCIUGA EUROPEA: BIOLOGIA RIPRODUTTIVA

Specie del genere *Engraulis* sono i rappresentanti tipici delle comunità ittiche pelagiche in tutti gli oceani. Sono caratterizzate da una strategia riproduttiva simile ad altri pesci pelagici.

Le acciughe sono una specie ovipara a fecondazione esterna e iteropara, cioè in grado di deporre più volte durante il loro ciclo vitale, con stagioni riproduttive prolungate ed elevato numero di deposizioni all'anno [8] [9] [10] [11].

Come la maggior parte dei pesci, le acciughe sono riproduttori ciclici e l'ovario cambia radicalmente di aspetto e dimensioni nelle distinte fasi del ciclo riproduttivo.

A. La fecondità

La fecondità rappresenta il numero di uova che verranno deposte durante una stagione riproduttiva. È un parametro importante per la stima della biomassa riproduttrice.

La fecondità si utilizza anche per stime di sopravvivenza, per determinare il numero di individui necessari per mantenere uno stock a livello sostenibile e come criterio per identificare stock unitari.

È necessario distinguere fra diversi tipi di fecondità:

La fecondità potenziale, il numero di uova che sono pronte per svilupparsi ed essere deposte in una determinata stagione riproduttiva.

La fecondità reale, il numero di uova che vengono veramente deposte in una determinata stagione riproduttiva, poiché una parte di quelle uova che costituiscono la fecondità potenziale non arrivano a maturazione e rimangono nell'ovario per essere riassorbite in un secondo tempo, quindi la fecondità reale è uguale o inferiore alla fecondità potenziale.

La fecondità parziale, il numero di uova che vengono prodotte per ogni gruppo, nel caso di specie che, come le alici, liberano le uova in gruppi successivi (*batches*). Così la somma delle fecondità parziali rappresenta la fecondità reale.

In specie a fecondità indeterminata (come l'acciuga europea) si associa uno sviluppo asincrono dell'ovario, per cui la fecondità reale dipenderà dalla fecondità parziale e dal numero di deposizioni durante la stagione riproduttiva, ovvero dalla frequenza di deposizione [12]. In queste specie, la fecondità annuale dovrebbe essere stimata dal numero di ovociti rilasciato per deposizione (*batches fecundity*), la percentuale di femmine che depongono al giorno (*spawning frequency*) e la durata della stagione riproduttiva [12].

La fecondità degli individui adulti risulta condizionata dalla temperatura dell'acqua al momento della maturazione delle gonadi e della deposizione [13] [14]. Ciò significa che i fenomeni oceanografici possono determinare il successo o il fallimento del reclutamento, dal momento che da essi dipendono il numero di uova deposte e fecondato e le

condizioni per lo sviluppo delle larve. La circolazione delle acque determina, infatti, la produzione e la veicolazione di plancton che rappresenta il cibo per le larve, ma condizionano anche il trasporto delle larve stesse verso i luoghi di accrescimento.

Nella stima della fecondità reale in particolare nelle specie a fecondità determinata, ed in misura minore per le specie a fecondità indeterminata, si deve inoltre considerare il fenomeno dell'*atresia*, un processo apoptotico di riassorbimento degli ovociti all'interno dell'ovario. Esso è utile in minima parte, dal momento che per specie a fecondità indeterminata come l'acciuga i fenomeni apoptotici tendono ad avere una frequenza piuttosto bassa durante il picco della stagione riproduttiva.

Nonostante questo, è importante riconoscerla per diversi motivi: gli stadi più vecchi di follicoli post-ovulatori possono essere confusi con gli stadi più avanzati atresici (β e γ); viene riscontrata alla fine della stagione riproduttiva quindi per questo è un elemento chiave per distinguere gli individui; può indicare una riduzione del potenziale riproduttivo quando si manifesta negli ovociti maturi [15] [16] e se si presenta in dosi massicce può indicare che si è alla fine del periodo riproduttivo o che forti condizioni di stress hanno indotto gli individui (anche di un'intera popolazione) ad interrompere il processo riproduttivo, con conseguente riduzione del potenziale riproduttivo dello stock.

Generalmente il metodo più utilizzato per la stima della fecondità è il "metodo degli ovociti idratati" [17]. Tuttavia l'applicazione di tale metodo risulta il più delle volte affetta da limitazioni legate alla scarsità di femmine idratate che vengono catturate, sia per la breve durata di questa particolare fase riproduttiva, sia per via del comportamento segregativo tipico delle femmine che stanno per deporre [18] [19] [20].

Da qui la necessità di applicare metodi di analisi che permettano di stimare la fecondità a partire da ovociti maturi ma non idratati, molto più facili da campionare e anche in numero maggiore, permettendo di ottenere stime più accurate. Tra questi, il metodo *whole mount* rappresenta un metodo di conteggio semi-automatico delle particelle, che consiste nel conteggio del numero di uova (particelle) in una porzione di peso noto di tessuto ovarico [21].

Entrambi i metodi vengono applicati sempre in seguito ad una analisi istologica dei tessuti ovarici, che permette un'accurata identificazione dello stadio di maturità della gonade e dei follicoli post-ovulatori (POF).

B. Metodi di stima della biomassa: il metodo della produzione giornaliera di uova (DEPM)

I metodi diretti per la stima della biomassa degli stock ittici sono quelli più affidabili e precisi poiché non risentono, per esempio, delle stime sul pescato (taglie preferenziali di cattura da parte dei pescatori, etc.), ma sono basati su osservazione diretta dello stock e su un piano di campionamento accurato e mirato al monitoraggio delle specie target.

Parametri quali la fecondità (in tutte le sue varianti) e il potenziale riproduttivo possono essere stimati

dall'applicazione del metodo di produzione giornaliera delle uova (*Daily Egg Production Method*, DEPM) [22], che affianca alle stime di biomassa deponente la possibilità di monitorare una serie di parametri riproduttivi basilari per gli studi sull'ecologia riproduttiva di specie a fecondità indeterminata.

Il DEPM, o metodo della produzione giornaliera di uova, è stato sviluppato alla fine degli anni '70 dal *Coastal Division of the Southwest Fisheries Center*, La Jolla, CA, USA [22] per la stima della biomassa riproduttiva di popolazioni ittiche pelagiche a riproduzione multipla. In ambiente mediterraneo il DEPM è stato applicato alle popolazioni di acciuga (*Engraulis encrasicolus*) e sardina (*Sardina pilchardus*) dei mari spagnoli, italiani e greci [23].

Il metodo si basa sulla stima di cinque parametri demografici e le sue modalità di applicazione sono ampiamente descritti in [24]. In accordo con le modifiche apportate da [25] all'equazione descritta in un lavoro precedente [22], la stima della biomassa deponente, attraverso l'applicazione del DEPM, è calcolata come:

$$B = k \frac{P \cdot A \cdot W}{R \cdot F \cdot S} \quad (1)$$

Dove B è la biomassa deponente in tonnellate metriche, k è il fattore di conversione da grammi a tonnellate metriche, P è la cosiddetta produzione giornaliera di uova (PGU, numero di uova prodotte giornalmente per unità di superficie), A è l'area complessivamente campionata, W è il peso medio delle femmine mature (in grammi), R è la frazione della popolazione costituita da femmine mature (in termini di peso), F è la fecondità del lotto (numero medio di uova deposto per femmina matura in un singolo evento di deposizione) ed infine S rappresenta la frazione di femmine mature che si riproducono in un giorno (che costituisce una misura della frequenza di deposizione) [22].

Inizialmente utilizzato per le popolazioni di Acciuga del Nord (*Engraulis mordax*), negli anni 80 l'applicazione del DEPM si è estesa rapidamente alle principali popolazioni di acciughe in tutto il mondo e dal 1998 viene utilizzato con successo per le alici del Canale di Sicilia [26] [27].

Il maggior vantaggio del metodo di produzione delle uova è dato dal fatto che la biomassa dei riproduttori può essere stimata da dati ottenuti in maniera del tutto indipendente dalla pesca. Nonostante la robustezza del metodo, non possono essere sottovalutati i problemi da cui le stime di biomassa possono risultare influenzate. Tali problemi sono legati soprattutto alla variabilità dei parametri necessari alla determinazione della biomassa, mentre la variabilità può essere associata sia ad errori derivati dal campionamento, sia ad errori derivanti dalle stime delle singole misure. L'accuratezza del metodo è strettamente dipendente anche dalla capacità di investigare l'intera area di deposizione durante il campionamento. Nelle specie delle zone temperate, che hanno uova a dispersione pelagica, l'area di *spawning* ha

un'ampiezza elevata, aumentando lo sforzo di campionamento e la difficoltà di una copertura completa dell'areale.

La misura della frazione deponente si ottiene dall'applicazione del metodo dei follicoli post-ovulatori (POF), che può risultare affetto da errori relativi al campionamento, al riconoscimento e alla datazione degli stessi POF e alla stima vera e propria.

Attraverso i *metodi stereometrici* (metodi d'analisi d'immagine, grazie a software specifici), è possibile datare i POF ed effettuare delle stime sulla formazione di fenomeni atresici (apoptosi follicolare) ma, più in generale, calcolare parametri quali la fecondità ed il potenziale riproduttivo. L'applicazione di tali metodi è utile poiché tra un periodo riproduttivo e l'altro (come succede ad esempio nell'acciuga), il diametro degli ovociti tende ad aumentare all'avvicinarsi di una nuova deposizione, mentre quello dei follicoli post-ovulatori, al contrario, decresce.

II. MATERIALI E METODI

Campioni di adulti di acciuga (*Engraulis encrasicolus*) sono stati raccolti durante echosurvey, organizzati dall'IAMC-CNR UOS di Capo Granitola e mirati al monitoraggio delle popolazioni di piccoli pelagici nel Canale di Sicilia. Gli esemplari sono stati misurati (lunghezza totale) e ne sono stati rilevati il peso totale e somatico. Da ciascuna femmina adulta sono state estratte le gonadi e fissate in formalina tamponata al 4% per le successive analisi di laboratorio.

A. Analisi istologica

L'analisi microscopica ha previsto la preparazione di sezioni istologiche a partire dagli ovari prelevati dagli esemplari adulti e fissati in formalina per la successiva osservazione al microscopio. Mediante tale analisi è stato possibile avere un'informazione molto più precisa sullo stadio di sviluppo degli ovociti della gonade rispetto all'analisi macroscopica, la quale, nonostante sia una metodica semplice, economica e rapida, non fornisce una precisione accurata poiché dipende in gran parte dalla soggettività dell'operatore. Inoltre, nel caso dell'acciuga europea, essendo un depositare multiplo, vi è una continua transizione tra lo stadio III e lo stadio V e macroscopicamente i due stadi possono essere facilmente confusi [28] [29].

Altre osservazioni hanno dimostrato una ulteriore difficoltà nel distinguere le fasi I e VI, caratterizzate da ovari di dimensioni ridotte con ovociti non visibili ad occhio nudo [30] [31] [32].

Per questo motivo, i risultati ottenuti dall'analisi macroscopica devono essere comparati con quelli ottenuti mediante l'analisi microscopica e, qualora sia necessario, soggetti a correzione.

Se il campionamento si realizza durante il periodo di deposizione, un'analisi macroscopica della gonade può essere sufficiente per determinare se un individuo è maturo o meno, dal momento che in quel particolare periodo quasi tutti gli individui risultano maturi e attivi nella riproduzione; tuttavia, in alcuni casi, è possibile confondere un ovario in post-deposizione/riposo con uno immaturo.

Sia in questi casi che nel caso in cui il campionamento venga eseguito in un periodo dell'anno che non coincide con il picco riproduttivo, la determinazione della maturità di un individuo si deve verificare preferibilmente con tecniche istologiche. Inoltre l'analisi istologica permette l'individuazione di eventuali follicoli atresici e/o post-ovulatori all'interno dell'ovario osservato. Le tecniche istologiche cui si è fatto ricorso sono quelle reperibili sui più comuni testi di istologia [33] [34].

La preparazione delle sezioni sottili è avvenuta presso i laboratori dell'Istituto per l'Ambiente Marino Costiero del Consiglio Nazionale delle Ricerche (IAMC-CNR) di Capo Granitola.

Per un'attenta valutazione dello stadio di maturità sessuale raggiunto da ciascun esemplare esistono due tipi di osservazioni del campione: macroscopica o microscopica.

La classificazione macroscopica si effettua assegnando agli individui caratteristiche che si possono differenziare a occhio nudo (Tabella I). Il metodo macroscopico è il più semplice, economico e rapido, però può essere soggettivo e la sua precisione è sempre incerta: la maturazione è un processo continuo e la sua divisione in stadi discreti di sviluppo è difficile, soprattutto negli stadi di transizione.

La classificazione microscopica fornisce un'informazione molto più precisa sullo stato di sviluppo degli ovociti (Tabella II). I principali parametri osservati sono la presenza di ovociti immaturi e/o vitellati, la presenza di follicoli post-ovulatori e di atresia.

L'identificazione dei sei stadi di maturità sessuale è stata basata sulle caratteristiche della fase più avanzata di maturazione mostrata dagli ovociti, indipendentemente dalla sua frequenza, dal momento che la presenza anche di un solo ovocita in uno stadio di sviluppo più avanzato indica che quell'esemplare è entrato in una fase più avanzata di maturazione [35].

| Stadio | Attività | Nome | Femmine |
|--------|----------|---------------------------|--|
| 1 | Inattivo | Immaturo (o a riposo) | Ovari invisibili o molto piccoli, filiformi, trasparenti o lievemente colorati (se a riposo). |
| 2 | | In maturazione | Gli ovari occupano da $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{3}$ della cavità addominale; di colore rosato o giallastro. Non ci sono ovociti visibili. |
| 3 | Attivo | Deposizione imminente | Gli ovari occupano dal $\frac{1}{4}$ a quasi tutta la cavità addominale; opachi di colore giallo o arancio. Sono visibili ovociti opachi. |
| 4 | | Deposizione | Ovari grandi che occupano per intero la cavità addominale. Dall'aspetto gelatinoso, parzialmente o totalmente traslucidi. Sono visibili ovociti ialini. |
| 5 | | Post-deposizione parziale | Ovari grandi da $\frac{1}{2}$ a $\frac{3}{4}$ della cavità addominale, non turgidi e con zone emorragiche, che conferiscono colorazione rosso scuro. |
| 6 | Inattivo | Esaurito | Ovari rossastri e raggrinziti e flaccidi, di dimensioni inferiori a $\frac{2}{3}$ della cavità addominale. Può essere ancora visibile qualche piccolo ovocita opaco. |

Tabella I – Caratteristiche macroscopiche delle gonadi nei 6 stadi di sviluppo [36]

| Maturità | Attività | Stadio | Stadio degli ovociti più maturi |
|----------|----------|--|-----------------------------------|
| Immaturo | Inattivo | 1 | Ovociti primari |
| | | 2 | Alveoli corticali |
| | 3 | Vitellogenici (primari, secondari, terziari) | |
| Maturo | Attivo | 4 | Iidratati |
| | | 5 | Vitellogenesi primaria Ovociti |
| | 6 | primari o con alveoli corticali | |

Tabella II – Caratteristiche microscopiche delle gonadi nei 6 stadi di sviluppo [36]

B. Classificazione dei follicoli post-ovulatori

I POF sono stati identificati secondo la seguente classificazione [28] [9] in base al grado di riassorbimento e alle caratteristiche morfologiche:

POF 0. Sono follicoli post-ovulatori di età compresa tra 0 e 4 ore dalla deposizione. Presentano un ampio lume interno di forma irregolare con svariate pieghe. Le cellule della granulosa, colonnari o cubiche, sono disposte ordinatamente lungo il bordo del lume con evidenti nuclei. Il sottile strato esterno (teca) s'ispessisce e diventa più evidente aderendo strettamente al livello della granulosa. Esso contiene capillari sanguigni (Fig. 1a).

POF 1. Sono follicoli post-ovulatori da 5 a 15 ore dopo la deposizione. Il follicolo appare rimpicciolito e ha una forma meno irregolare. Il lume, molto ridotto, può contenere del materiale granulare. Le cellule della granulosa non sono perfettamente allineate e il nucleo può apparire picnotico. Appaiono vacuoli e lo strato esterno (teca) diventa meno evidente (Fig. 1b).

POF 2. Sono follicoli post-ovulatori di età superiore alle 15 ore dalla deposizione. Il follicolo continua a degenerare fino a ridursi circa la metà o anche un quarto delle dimensioni dei follicoli dello stadio precedente. Il lume è molto ridotto o assente, non sono presenti granuli eosinofili. Le cellule della granulosa sono assenti e vi sono pochi vacuoli o nuclei picnotici. La parete esterna è presente ma poco visibile (Fig. 1c).

La frazione deponente, ovvero la percentuale di femmine mature che appartengono ad una riconoscibile classe giornaliera di deposizione [9] può essere stimata usando le femmine classificate come "POF 0".

Tuttavia, si è visto che i POF 0, essendo sovracampionati rispetto agli altri stadi, possono portare ad una stima errata [28]; così, spesso, la proporzione di femmine deponenti per giorno viene determinata sulla base del numero medio di

femmine mature, i cui follicoli post-ovulatori sono classificati come POF 1 e POF 2.

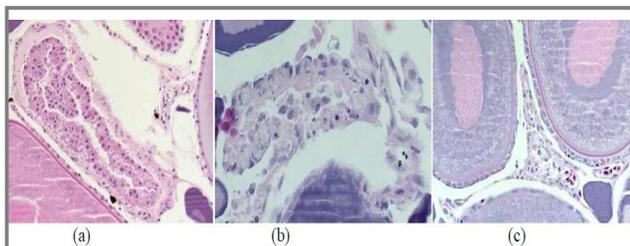


Figura 1: Sezioni istologiche raffiguranti POF nei diversi stadi: POF 0 (a); POF 1 (b); POF 2 (c)

C. Metodo degli ovociti idratati

La fecondità del lotto è stimata in base al numero di uova per ogni lotto deponente. Il numero di uova in un ovario si ottiene dall'applicazione del metodo gravimetrico [37] [17].

Il metodo gravimetrico consiste nel pesare l'ovario e contare, con l'ausilio di un binoculare (10x), il numero di uova in tre sub-campioni dell'ovario di peso conosciuto. Il numero medio di uova contenuto nei sub-campioni si moltiplica per il peso totale dell'ovario.

Gli ovociti idratati sono stati contati da 3 sub-campioni di 30-40mg di tessuto ovarico delle femmine idratate. Le tre porzioni sono state prelevate una al centro e le altre ai lati dell'ovario di un solo lobo ovarico.

Risultati precedenti hanno evidenziato che non ci sono differenze significative fra ovario destro e ovario sinistro in termini di numero di uova idratate per grammo di ovario [38], né fra le tre diverse porzioni di ovario delle acciughe dello Stretto di Sicilia [26].

Ciascun sub-campione è stato sistemato su un vetrino e sono state aggiunte 3-4 gocce di glicerina (glicerolo 33%), quindi è stato chiuso con un coprioggetto in modo che gli ovociti potessero fluttuare nel liquido, facilitando l'operazione di osservazione. Il conteggio è stato condotto al binoculare usando ingrandimenti a 10x e con l'ausilio di un supporto grigliato sovrapposto al vetrino, per rendere più agevole l'operazione (Fig. 2). Per una maggiore accuratezza, il conteggio degli ovociti idratati è stato effettuato almeno due volte per ogni vetrino.

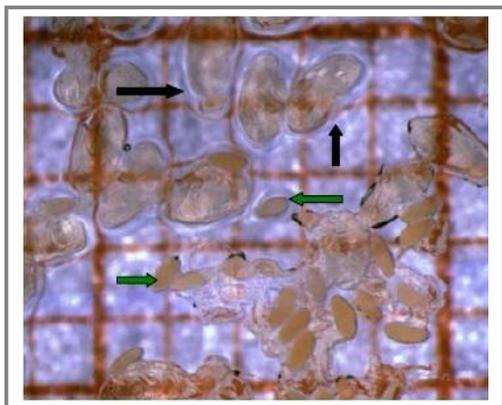


Fig. 2: Un vetrino per il conteggio degli oociti. Le frecce nere indicano gli ovociti idratati utili per questo scopo, quelle verdi quelli da non considerare.

D. Metodo del "Whole Mount"

Per ovviare alle difficoltà e ai limiti imposti dal metodo degli ovociti idratati, è stato applicato un metodo di analisi che permette di stimare la fecondità a partire da ovociti maturi ma non idratati, in modo da rendere le stime più accurate.

Per un'accuratezza maggiore possibile si inizia con l'identificare il peso ideale del subcampione da analizzare, in relazione al valore di indice gonadosomatico dell'esemplare. L'indice gonadosomatico (GSI) è determinato dal rapporto in % tra peso dell'ovario e peso totale del pesce:

$$GSI = (GW/SW) * 100 \quad (2)$$

Dove GW è il peso della gonade e SW il peso somatico dell'individuo.

Le gonadi sono state quindi inizialmente pesate e i successivi subcampioni ricavati sono stati analizzati allo stereomicroscopio. Ogni subcampione è stato infine fotografato (ad ingrandimenti di 0.8 x o 1x), utilizzando una fotocamera collegata allo stereomicroscopio e ad un computer, con l'ausilio del software Axio Vision per l'acquisizione delle immagini. Le immagini sono state analizzate mediante il software Image J (Image Processing and Analysis in Java; <http://rsb.info.nih.gov/ij/>). Ogni immagine è stata utilizzata per stimare la fecondità del lotto deponente, cioè il numero di ovociti pronti per essere deposti. Il software fornisce informazioni sul numero, l'area e il diametro degli ovociti target per la stima della maturità, vitellogenicici o idratati. Per essere analizzata, la foto viene prima convertita in immagine a 8-bit, in seguito vengono applicate opportune correzioni per il contrasto e la luminosità (Fig. 3).

Il software Image J è in grado di riconoscere le singole cellule; inoltre consente di applicare una correzione per separare due o più particelle a contatto e che quindi potrebbero apparire come un unico oggetto. Infine viene effettuata l'analisi vera e propria delle particelle, che fornisce tutti i dati riguardanti il numero e la dimensione delle uova. Per una maggiore accuratezza possibile, tale analisi è stata effettuata introducendo un fattore di correzione per la forma ellittica dell'ovocita acciuga, impostando il valore circolarità 0.3-1.0.

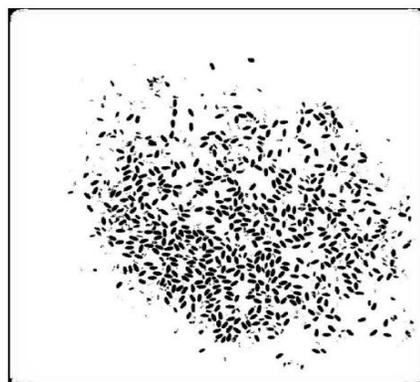


Fig. 3: Immagine del subcampione da analizzare per il conteggio degli ovociti, dopo la conversione a 8 bit e le correzioni del contrasto e della luminosità.

I risultati ottenuti da Image J sono stati poi plottati usando il software FISAT II (FAO-ICLARM Fish Stock Assessment Tools; <http://www.fao.org/fishery/topic/16072/en>) e una distribuzione modale delle frequenze di taglia (Bhattacharya's method) [39] è stata effettuata al fine di stimare il numero di cellule, che rappresentano la *batch fecundity* del subcampione.

III. RISULTATI

Risultati per il metodo degli ovociti idratati

La fecondità del lotto, mediante il metodo degli ovociti idratati, viene calcolata effettuando una regressione lineare del numero di uova nel lotto ed il peso fresco totale delle femmine con ovari idratati (Fig. 4).

Per evitare di incorrere in possibili errori dovuti all'aumento di peso legato al fenomeno dell'idratazione, che si verifica precedentemente all'ovulazione, prima di procedere con la stima del parametro F è necessario correggere il peso mediante una regressione lineare del peso totale e del peso senza gonadi delle femmine mature non idratate.

Di seguito, nella Tabella III, vengono riportati i dati ottenuti dal conteggio degli ovociti per ogni femmina matura idratata campionata durante la campagna Ancheva 2013; dai pesi presenti in tabella viene infatti ricavato il peso corretto che verrà poi utilizzato per calcolare la fecondità del lotto.

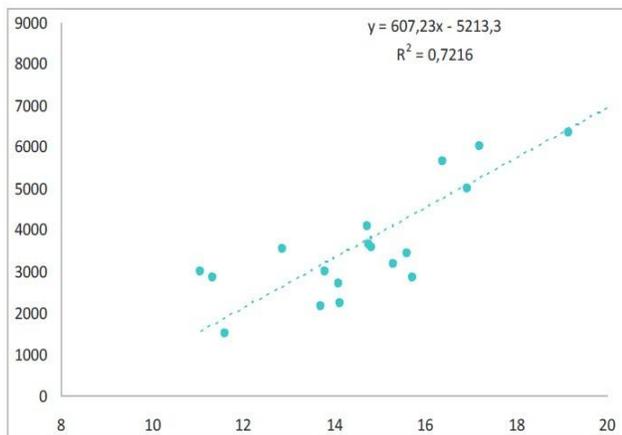


Fig. 4: Regressione lineare del numero di uova nel lotto ed il peso fresco totale delle femmine con ovari idratati per il calcolo della *batch fecundity*

Dai calcoli effettuati per quanto riguarda l'anno 2013 relativi al Canale di Sicilia, la *batch fecundity* (fecondità del lotto, F) risulta pari a 4961 uova per lotto deponente.

Il valore ottenuto in questo lavoro per la stima della fecondità del lotto di acciuga europea, appare quindi in linea con i

risultati forniti da [40] per l'acciuga in tutto il Mediterraneo (Tabella IV).

| PesoFrescoTotale | PesoSenzaUova | PesoUovaFissato | PesoUovaFresco | peso (g) | n° ovociti | No. Tot ovociti |
|------------------|---------------|-----------------|----------------|----------|------------|-----------------|
| 14,78 | 13,51 | 1,15 | 1,13 | 0,043 | 139 | 3650,851163 |
| 13,8 | 12,79 | 0,99 | 0,97 | 0,043 | 132 | 2990,874419 |
| 17,53 | 16,94 | 0,59 | 0,60 | | | |
| 16,94 | 17,34 | 1,59 | 1,55 | 0,04 | 129 | 4985,2695 |
| 17,7 | 16,65 | 0,95 | 0,94 | | | |
| 15,31 | 14,23 | 0,95 | 0,94 | 0,043 | 145 | 3177,65814 |
| 15,5 | 15,06 | 0,45 | 0,48 | | | |
| 18,19 | 17,36 | 0,91 | 0,91 | | | |
| 15,62 | 14,2 | 1,02 | 1,00 | 0,038 | 130 | 3436,036842 |
| 13,71 | 12,83 | 0,85 | 0,84 | 0,043 | 110 | 2155,744186 |
| 14,75 | 13,29 | 1,30 | 1,27 | 0,04 | 129 | 4090,977 |
| 17,13 | 16,33 | 0,54 | 0,55 | | | |
| 18,3 | 17,27 | 0,79 | 0,79 | | | |
| 19,16 | 16,92 | 2,25 | 2,16 | 0,042 | 123 | 6321,907143 |
| 18,54 | 17,7 | 0,71 | 0,71 | | | |
| 15,7 | 15,13 | 0,39 | 0,42 | | | |
| 15,74 | 14,6 | 1,02 | 1,01 | 0,042 | 118 | 2832,393333 |
| 20,07 | 17,42 | 2,63 | 2,52 | 0,04 | 134 | 8447,159 |
| 14,84 | 13,21 | 1,51 | 1,47 | 0,042 | 102 | 3569,222857 |
| 14,14 | 12,93 | 1,19 | 1,16 | 0,041 | 78 | 2212,993171 |
| 11,08 | 13,66 | 1,22 | 1,20 | 0,038 | 95 | 2995,05 |
| 14,12 | 12,81 | 1,17 | 1,15 | 0,041 | 96 | 2695,07122 |
| 11,6 | 10,89 | 0,77 | 0,77 | 0,041 | 80 | 1510,4 |
| 16,39 | 14,32 | 1,92 | 1,85 | 0,043 | 131 | 5645,795349 |
| 17,21 | 15,03 | 2,13 | 2,05 | 0,039 | 114 | 6002,304615 |
| 12,87 | 11,34 | 1,31 | 1,28 | 0,041 | 113 | 3532,435122 |
| 11,34 | 10,13 | 0,95 | 0,94 | 0,042 | 126 | 2827,02 |

Tabella III - Conteggio numero di ovociti (totale e del sub campione) per ogni femmina matura idratata.

| R | W | F | S | RF | DSF |
|-------------|-------------|--------------|-------------|---------|-------|
| 0.54 (0.09) | 14.3 (0.04) | 8006 (0.02) | 0.36 (0.10) | 562 | 109 |
| 0.64 (0.05) | 14.3 (0.07) | 4958 (0.11) | 0.31 (0.13) | 347 | 69 |
| 0.59 (0.19) | 22.9 (0.06) | 7039 (0.02) | 0.21 (0.20) | 307 | 38 |
| 0.63 (0.05) | 14.2 (0.07) | 4894 (0.10) | 0.32 (0.11) | 345 | 70 |
| 0.59 (0.12) | 15.2 (0.07) | 4835 (0.16) | 0.14 (0.12) | 319 | 26 |
| 0.55 (0.10) | 14.1 (0.08) | 5871 (0.11) | 0.17 (0.10) | 417 | 39 |
| 0.62 (0.08) | 18.9 (0.04) | 8379 (0.06) | 0.20 (0.28) | 443 | 55 |
| 0.55 (0.05) | 18.6 (0.03) | 11866 (0.03) | 0.16 (0.08) | 639 | 57 |
| 0.53 (0.07) | 15.6 (0.05) | 9428 (0.08) | 0.06 (0.26) | 604 | 19 |
| 0.47 (0.09) | 15.8 (0.03) | 4725 (0.06) | 0.13 (0.21) | 300 | 18 |
| 0.51 (0.05) | 24.9 (0.03) | 12451 (0.05) | 0.29 (0.21) | 500 | 74 |
| 0.60 (0.05) | 20.9 (0.03) | 10474 (0.04) | 0.26 (0.20) | 502 | 78 |
| 0.51 (0.08) | 25.6 (0.03) | 7781 (0.06) | 0.15 (0.11) | 303 | 23 |
| 0.61 (0.03) | 22.7 (0.03) | 5128 (0.10) | 0.13 (0.23) | 226 | 18 |
| 0.54 (0.06) | 33.8 (0.03) | 15904 (0.06) | 0.32 (0.18) | 470 | 81 |
| 0.52 (0.05) | 29.2 (0.01) | 15783 (0.05) | 0.29 (0.07) | 540 | 81 |
| 0.54 (0.07) | 29.7 (0.01) | 12977 (0.04) | 0.26 (0.1) | 438 | 62 |
| 0.51 (0.12) | 23.7 (0.06) | 15307 (0.07) | 0.17 (0.23) | 446 | 55 |
| 0.53 (0.04) | 19.7 (0.06) | 7039 (0.05) | 0.28 (0.04) | 357 | 52 |
| 0.58 (0.11) | 17.1 (0.02) | 8993 (0.03) | 0.30 (0.06) | 525 | 90 |
| 0.59 (0.05) | 22.6 (0.04) | 11761 (0.05) | 0.23 (0.12) | 520 | 68 |
| 0.56 (0.03) | 17.9 (0.03) | 9246 (0.13) | 0.25 (0.3) | 517 | 72 |
| 0.53-0.56 | 16.8-28.2 | 7200-15000 | 0.21-0.23 | 430-530 | 53-68 |

Tabella IV. - Stime dei parametri di adulti di Acciuga europea tramite applicazione del metodo DEPM. R rappresenta la sex ratio, W è il peso medio delle femmine mature (g), F è la fecondità del lotto, S la frazione deponente, RF la fecondità relativa (RFZF/W, eggs g⁻¹), e DSF è la fecondità specifica giornaliera. CVs in parentesi. [40].

Risultati per il metodo del whole mount

L'analisi effettuata da Immagine J ha permesso di individuare gli ovociti maturi nel subcampione (Fig. 5), isolandoli dagli

altri elementi nell'ovaio (tessuto connettivo, ovociti immaturi, ecc.).

Il software produce dati di taglia (area, diametro maggiore e minore, ecc.) di ogni uovo riconosciuto come risultato dell'analisi della foto del campione.

Plottando poi in FiSAT i dati ottenuti da Image J, si ottiene una distribuzione di frequenza del diametro medio degli ovociti, all'interno della quale è possibile identificare la popolazione di ovociti maturi: generalmente una classe piuttosto abbondante e di medie dimensioni, che rappresentano la vera e propria fecondità (figg. 6 A, B).

Una buona accuratezza nella stima della fecondità si ottiene quando gli ovociti all'interno del subcampione sono un numero compreso tra 200 e 300. Per mezzo di questo esperimento abbiamo individuato, a partire dal GSI del campione, il peso ottimale del subcampione che ci permetta di ottenere il numero di ovociti più appropriato per l'analisi.

Una buona accuratezza nella stima della fecondità si ottiene quando gli ovociti all'interno del subcampione sono un numero compreso tra 200 e 300. Per mezzo di questo esperimento abbiamo individuato, a partire dal GSI del campione, il peso ottimale del subcampione che ci permetta di ottenere il numero di ovociti più appropriato per l'analisi.

I risultati dimostrano che, per quanto riguarda le acciughe, per ottenere il numero ideale di ovociti per il conteggio, il peso del subcampione non dipende dal valore di GSI dell'individuo.

In particolare il numero ideale di ovociti si ottiene da subcampioni di peso compreso tra 0.030 e 0.040 gr (Tabella V).

Inoltre, per ottenere risultati più precisi, data anche la peculiare forma (ellittica) degli ovociti di acciuga, per la distribuzione di frequenza delle classi di taglia si è deciso di utilizzare l'area dell'ovocita invece del diametro.

Nel caso di un oggetto di forma ellittica, infatti, il diametro potrebbe variare in relazione al punto di taglio, che potrebbe essere ortogonale o parallelo all'asse maggiore.

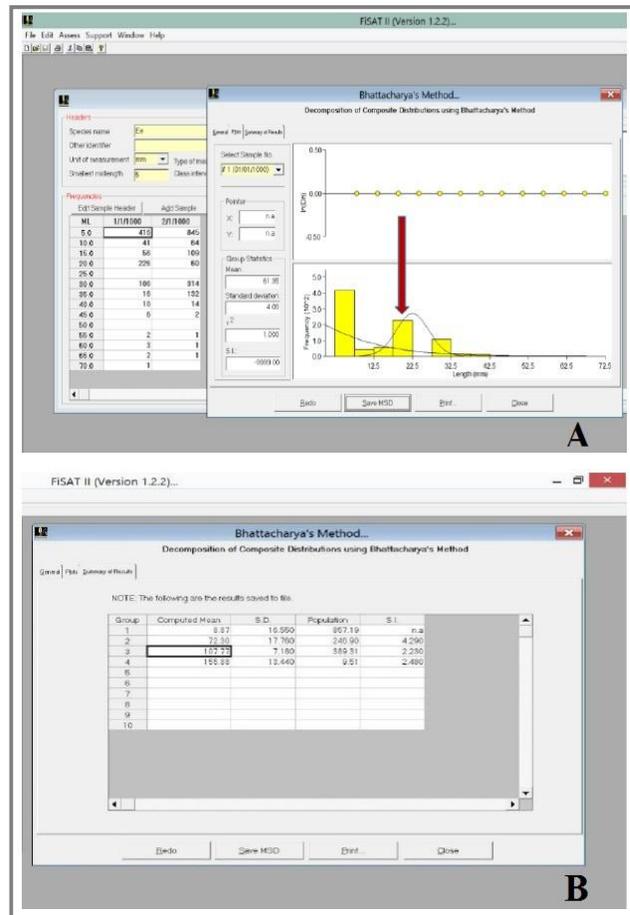


Fig. 6: Finestra di output dell'analisi sulla distribuzione di frequenza delle classi di taglia degli ovociti nel campione. **A**: La freccia indica la classe di taglia target per la determinazione della fecondità. **B**: il riquadro evidenzia il conteggio di ovociti appartenenti alla classe di taglia target per la determinazione della fecondità.

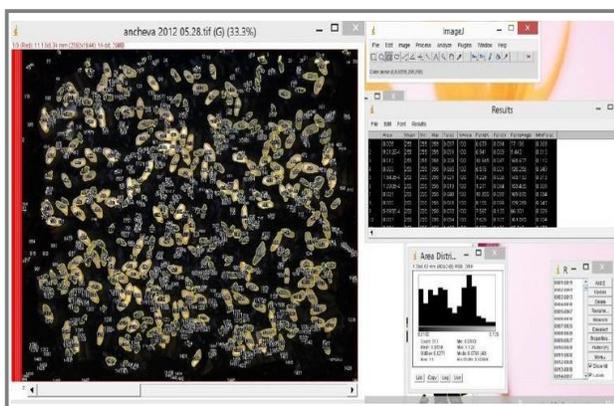


Fig. 5: Esempio di conteggio di ovociti con l'uso del software Image J.

| sample ID | maturity | GSI | GW | SubSW | No ooc. SubS | fecundity |
|-----------|----------|-------|-------|-------|--------------|-----------|
| 11-2 | 3 | 2,74 | 1,02 | 0,021 | 134 | 6518 |
| 11-37 | 3 | 7,34 | 0,268 | 0,022 | 146 | 1783 |
| 20-27 | 4 | 10,54 | 2 | 0,041 | 161 | 7829 |
| 20-59 | 4 | 11,19 | 2,3 | 0,045 | 162 | 8280 |
| 20-71 | 4 | 10,57 | 1,57 | 0,042 | 114 | 4246 |
| 20-81 | 4 | 9,01 | 1,43 | 0,041 | 167 | 5825 |
| 6-13 | 3 | 4,63 | 0,87 | 0,035 | 348 | 8650 |

Tabella V - Dati e stime di fecondità relativi ad alcuni dei campioni analizzati. GSI, indice gonadosomatico; GW, peso delle gonadi; SubSW, peso del sub campione; No ooc. SubS, numero degli ovociti presenti nel sub campione.

IV. CONCLUSIONI

Particolarmente importante è il ruolo che il parametro fecondità riveste nelle valutazioni della biomassa deponente e del potenziale riproduttivo, soprattutto nell'ottica di una gestione sostenibile di stock ittici altamente sfruttati da parte delle marinerie commerciali, come nel caso degli stock di acciughe.

I dati ottenuti tramite il metodo degli ovociti idratati per le stime di fecondità risultano essere confrontabili con i dati delle acciughe ricavati negli anni precedenti per tutto il Mediterraneo [40].

Oltre la metodologia sopra citata, che rappresenta la tecnica più comune ma che talvolta risulta difficile da applicare data la scarsità di femmine idratate campionate, è stato applicato un ulteriore metodo di stima per la fecondità: il metodo *whole mount*. Sebbene gli esperimenti fossero preliminari e volti esclusivamente all'apprendimento della metodologia di indagine piuttosto che alla determinazione finale della fecondità degli individui analizzati, le stime di fecondità ottenute appaiono comunque confrontabili con quelle determinate per l'acciuga nelle medesime aree. Gli esperimenti condotti hanno permesso di stabilire quali siano i criteri e le metodiche di analisi da adottare, in modo da ottenere una stima più accurata possibile.

L'ulteriore vantaggio derivante dall'applicazione del metodo *whole mount* consiste nella possibilità di stimare il numero di uova deposte, non facendo ricorso all'uso di ovociti idratati come nel caso delle tecniche tradizionali citate [17].

Il fenomeno della idratazione delle uova, infatti, essendo piuttosto effimero e inducendo fenomeni di segregazione nelle femmine che devono deporre [18] [41], rende difficile il campionamento di esemplari in questo particolare stato.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Trippel, E. A., 1999. Estimation of stock reproductive potential history and challenges for Canadian Atlantic gadoid stock assessments. *J. Northwest Atlantic Fish. Sci.* 25: 61-81.
- [2] Melià P, Casavola N, Gatto M. 2002. Estimating daily egg production of European anchovy in the Adriatic Sea: a critical appraisal. *PSZN Marine Ecology* 23(Suppl. 1): 272-279.
- [3] Lasker R., 1978. The relation between oceanographic conditions and larval anchovy food in the California current: identification of factors contributing to recruitment failure. In: *Report P.-V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer.* 173: 212-230.
- [4] Belvéze H. e Erzini K., 1983. The influence of hydro-climatic factors on the availability of the sardine (*Sardina pilchardus* Walbaum) in the Moroccan Atlantic fishery. In: *FAO Fish. Report*, 291(2): 285-328.
- [5] Tanaka S., 1984. Variation of pelagic fish stocks in waters around Japan. In *Proceeding of the Expert Consultation to Examine Changes in Abundance and Species Composition of Neritic Fish Resources*. Eds. G. D. Sharp and J. Csirke. In: *FAO Fish. Report*, 291(2): 17-36.
- [6] Leonart J. e Maynou F., 2003. Fish stock assessments in the Mediterranean: state of the art. *Scientia Marina*, 67: 37-49.
- [7] IREPA, 2010. Osservatorio economico sulle strutture produttive della pesca marittima in Italia 2008. Napoli: *Edizioni Scientifiche Italiane*, pp. 184
- [8] Williams V.R. and T.A. Clarke. – 1982. Reproduction, growth, and other aspects of the biology of the gold spot herring, *Herklotsichthys quadrimaculatus* (Clupeidae), a recent introduction to Hawaii. *Fish. Bull.*, U.S., 81: 587-597.
- [9] Hunter J.R. e Macewicz B. J., 1985. Measurement of spawning frequency in multiple spawning fishes. In R. Lasker, editor. *An egg production method for estimating spawning biomass of pelagic fish: application to the northern anchovy, Engraulis mordax*. U.S. Dept Of Commerce NOAA *Technical Report*, 36:41-69.
- [10] Schaefer, K.M. – 1987. Reproductive biology of black skipjack, *Euthynnus lineatus*, an Eastern Pacific tuna. *Bull. Inter-Amer. Trop. tuna Comm.*, 19: 169-227.
- [11] Alheit, J., 1989. Comparative spawning biology of anchovies, sardines, and sprats. *Rapp. p.-v. Reun. Cons. int. Explor. Mer.*, 191:7-14.
- [12] Murua H., Kraus G., Saborido-Rey F., Witthames P. R., Thorsen A. e Junquera S., 2003. Procedures to estimate fecundity of marine fish species in relation to their reproductive strategy. *J. Northw. Atl. Fish. Sci.*, 33: 33-54.
- [13] Holt G. J. e Riley M.C., 2000. Laboratory spawning of Coral Reef Fish: effects of temperature and photoperiod. *UJNR Technical Report* No. 28: 33-38.
- [14] Funamoto T. e I. Aoki, 2002. Reproductive ecology of Japanese anchovy off the Pacific coast of eastern Honshu. Japan. *J. Fish. Biol.*, 60 (1), 154-169.
- [15] Kjesbu O.S., Klungsøyr J., Kryvi H., Witthames P.R., Greer Walker M., 1991. Fecundity, atresia, and egg size of captive Atlantic cod (*Gadus morhua*) in relation to proximate body composition. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 48: 2333-2343.
- [16] Palmer E.E., Sorensen P.W. e Adelman I.R., 1995. A histological study of seasonal ovarian development in freshwater drum in the Red Lakes, Minnesota. *J. Fish Biol.*, 47: 199-210.
- [17] Hunter J.R., Lo N.C.H. e Leong R.H.J., 1985. Batch fecundity in multiple spawning fishes. In: Lasker, R. (Ed.), *An Egg Production Method for Estimating Spawning Biomass of Pelagic Fish: Application to the Northern Anchovy, Engraulis mordax*. NOAA *Technical Report* No. NMFS, 36: 67-77.
- [18] Macewicz B.J., Castro-Gonzalez J.J., Cotero-Altamirano C.E. e Hunter J.R., 1996. Adult reproductive parameters of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) during 1994. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.*, 37: 140-151.
- [19] Ganiats K., Somarakis S., Machias A. e Theodorou A., 2003. Evaluation of spawning frequency in a Mediterranean sardine population (*Sardina pilchardus*). *Mar. Biol.* 142: 1169-1179.

- [20] Ganius K., 2008. Ephemeral spawning aggregations in the Mediterranean sardine, *Sardina pilchardus*: a comparison with other multiple-spawning Clupeoids. *Mar Biol*, 155: 293–301.
- [21] Witthames P.R., Thorsen A., Murua H., Saborido-Rey F., Greenwood L., Dominguez R., Korta M., Kjesbu O.S., 2009. Advances in fecundity methodology applied to some marine fish. *Fish. Bull.* 107, 48–56.
- [22] Parker K., 1980. A direct method estimating northern anchovy, *Engraulis mordax*, spawning biomass. *Fish. Bull.* US. 78: 541-544.
- [23] Palomera I. 2001. The application of the Daily Egg Production Method for Spawning Biomass at the Mediterranean Sea: Overview. *Rapp. Comm. Int. Mer Médit.*
- [24] Lasker, R. (Ed.) 1985 – An egg production method for estimating spawning biomass of pelagic fish: Application to the northern anchovy, *Engraulis mordax*. *NOAA Tech. Rep.* NMFS 36.
- [25] Picquelle S.J. e Stauffer G., 1985. Parameter Estimation for an Egg Production Method of Anchovy Biomass Assessment. In: Lasker R. (Ed.), *An Egg Production Method for Estimating Spawning Biomass of Pelagic Fish: Application to the Northern Anchovy, Engraulis mordax*. *NOAA Technical Rep.* NMFS 36: 7-16.
- [26] Mazzola S., García A. e García Lafuente J., 2000. Distribution, biology and biomass estimates of the Sicilian Channel anchovy. DGXIV MED 96/052 *Final Report*.
- [27] Mazzola, S., Garcia, A., and J. Garcia Lafuente, 2002. The Sicilian Channel anchovy fishery and the underlying oceanographic and biological processes conditioning their interannual fluctuations. DG XIV, MED98-070, *Final Report*.
- [28] ICES, 2004. The DEPM estimation of spawning-stock biomass for sardine and anchovy. *Rapport des Recherches Collectives*, Vol. 268, ICES, Pasara: 95 pp.
- [29] Ferreri R., Basilone G., D’Elia M., Traina A., Saborido-Rey F. e Mazzola S., 2009. Validation of macroscopic maturity stages according to microscopic histological examination for European anchovy. *Marine Ecology*, 30 (Suppl. 1): 181–187.
- [30] Trippel E.A. e Morgan M.J., 1997. Skewed sex ratios in spawning shoals of Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Oceanographic Literature Review*, 44: 511 pp.
- [31] Saborido-Rey F. e Junquera S., 1998. Histological assessment of variations in sexual maturity of cod (*Gadus morhua* L.) at the Flemish Cap (north-west Atlantic). *ICES Journal of Marine Science*, 55: 515–521.
- [32] Domínguez-Petit R., 2007. Study of Reproductive Potential of *Merluccius Merluccius* in the Galician Shelf. *Doctoral Thesis*. University of Vigo, Vigo, Spain: 253 pp.
- [33] Luna L. G., 1968. Manual of histological staining methods of the Armed Forces. *Institute of Pathology*. Third edition. McGraw-Hill, New York, 81pp.
- [34] Preece A., 1975. A manual for histologic technicians. Third edition. Little, *Brown and Co.*, Boston. 482 pp.
- [35] West G., 1990. Methods of assessing ovarian development in fishes: a review. *Aust. J. Mar. Freshw. Res.*, 41: 199 – 222.
- [36] ICES, 2008. Report of the Workshop on Small Pelagics (*Sardina pilchardus*, *Engraulis encrasicolus*) maturity stages (WKSPMAT). *ICES REPORT*, 10–14 November 2008, Mazara del Vallo, Italy. pp.82.
- [37] Hunter J.R. e Goldberg S.R., 1980. Spawning incidence and batch fecundity in northern anchovy (*Engraulis nordax*). *Fish. Bull. U. S.* 78: 811-816.
- [38] Sanz A. e Uriarte A., 1989. Reproductive cycle and batch fecundity of the Biscay anchovy, *Engraulis encrasicolus*, in 1987. *Cal. Coop. Ocean. Fish. Invest. Rep.*, 30: 127-135.
- [39] Bhattacharya, C.G. 1967. A simple method of resolution of a distribution into Gaussian components. *Biometrics* 23: 115-135
- [40] Somarakis S., Palomera I., Garcia A., Quintanilla L., Koutsikopoulos C., Uriarte A. e Motos L., 2004. Daily egg production of anchovy in European waters. *ICES Journal of Marine Science*, 61: 944-958.
- [41] Ganius k., Somarakis S., Machias A., Theodorou A., 2004. Pattern of oocyte development and batch fecundity in the Mediterranean sardine. *Fisheries Research* (Tokyo). 67: 13-23.

Impatto ambientale delle attività di maricoltura sulle comunità macrozoobentoniche in un sito confinato

Sarah Ciancimino
IAMC Istituto Ambiente Marino Costiero
CNR
Napoli, Italia

Paolo Fasciglione, Luigi Maria Valiante
Bioservice soc. coop. a.r.l.
Napoli, Italia

Sommario — Lo studio d'impatto delle attività di maricoltura in un sito confinato, realizzato nell'ambito del progetto OTTIMA, corso di formazione "Tecnologie informatiche per la sicurezza marittima" è stato condotto in base a tecniche di ecologia numerica. In particolare, sono stati utilizzati metodi di ordinamento e *clustering* supportati da test basati su permutazioni, per confrontare le caratteristiche dei campioni di fauna macrozoobentonica prelevati e rilevare le differenze nella struttura della comunità macrozoobentonica fra le diverse stazioni di campionamento all'interno delle aree studiate. Tale studio ha consentito di riconoscere le discontinuità cenotiche rilevanti in rapporto alla struttura specifica e locale delle comunità, fornendo una chiave di lettura delle alterazioni osservate nell'area di studio a causa della presenza dell'impianto di maricoltura. Lo studio ha dimostrato che l'impatto è di tipo puntiforme perché limitato alle sole stazioni sottostanti le gabbie galleggianti ed in un paio di siti fra quelli situati entro un raggio di 100m dalle gabbie stesse. Inoltre, il tipo di alterazione osservata ha prodotto effetti negativi solo sul comparto bentonico e tali effetti sono dipendenti dall'accumulo di sostanza organica nei sedimenti.

Keywords — *Impatto ambientale, Macrozoobenthos, Maricoltura*

INTRODUZIONE

L'obiettivo del presente lavoro è stato quello di individuare la dinamica ecologica per un sito confinato, al fine di identificare gli elementi portanti di una strategia di controllo e gestione della qualità ambientale nel caso della maricoltura in presenza di macrozoobenthos.

Sulla base degli strumenti conoscitivi realizzati l'obiettivo successivo sarà quello di creare un protocollo di lavoro che permetta di valutare la compatibilità ambientale di un impianto di maricoltura con gabbie, che sia al contempo generalizzabile ed affidabile.

Infine, ci si è proposti di realizzare strumenti previsionali atti all'identificazione di modelli gestionali ecocompatibili.

L'obiettivo di tali strumenti previsionali è di permettere una gestione dell'informazione in un contesto di scenari produttivi sulla base delle variabili economiche ed ambientali, al fine di individuare, con una opportuna approssimazione, il grado di sostenibilità delle varie scelte.

A tal fine è stata effettuata l'analisi della componente bentonica dell'ecosistema, con analisi della macrofauna e della granulometria dei sedimenti in un sito confinato.

Il sito, collocato all'interno dell'avamposto di Licata (AG), accoglie un impianto di gabbie galleggianti in-shore e per la sua peculiare collocazione, consente di osservare gli effetti delle attività di maricoltura sull'ambiente circostante all'interno di un'area confinata e quindi in condizioni tali da amplificare i gradienti legati alle eventuali perturbazioni ambientali.

I. MATERIALI E METODI

L'impianto di maricoltura a Licata, in cui vengono prodotte spigole *Dicentrarchus labrax*, saraghi pizzuti *Diplodus puntazzo*, saraghi maggiori *Diplodus sargus*, dentici *Dentex dentex*, pagri *Pagrus pagrus* ed orate *Sparus auratus* è localizzato in un sito che si estende per un'area di circa 21.000 m², al riparo della diga foranea di Licata.

Le strutture di allevamento sono costituite da 24 atolli galleggianti rettangolari, di 7 metri per 14 metri realizzati in polietilene ad alta densità, su cui si fissano reti in nylon con profondità di 7 metri. La maglia è di diverso calibro e larghezza a seconda della pezzatura del pesce da contenere. Complessivamente si dispone per l'allevamento di circa 16.500 m³.

Il piano di campionamento è stato redatto attraverso un'attenta analisi della letteratura scientifica pertinente e di quella tecnica disponibile [19]. È stato inoltre condotto un *survey* preliminare dei due siti di indagine, allo scopo di individuare e definire al meglio la strategia di campionamento nell'intorno degli impianti di allevamento; nello stesso tempo, sono state individuate 4 stazioni di controllo localizzate ad una distanza tale dall'impianto da non esserne influenzate.

Sono state individuate 32 stazioni di campionamento disposte sia nell'intorno delle gabbie di allevamento che a distanza crescente dall'impianto (Fig. 1).

In particolare, le stazioni 1-10 sono state collocate in prossimità dei margini interno ed esterno dell'impianto; il gruppo di stazioni 14-18 a circa 30 metri dal margine esterno delle gabbie; a circa 60 metri dal margine esterno delle gabbie sono state posizionate le stazioni 19-21, mentre a circa 120 metri dallo stesso è stato localizzato il gruppo di stazioni 22-

25. Le ultime stazioni sono state posizionate rispettivamente a circa 200 metri (26-29) e a 300 metri (30-33) dall'impianto. Per motivi contingenti durante il campionamento a nessuna stazione è stato assegnato il numero 11 e questa numerazione è stata poi mantenuta per evitare errori nella riassegnazione degli identificativi.

La disposizione delle stazioni ha permesso di valutare l'intensità dell'impatto delle attività di maricoltura sulla comunità bentonica e, di conseguenza, sull'ambiente marino circostante. Inoltre, la particolare collocazione dell'impianto di allevamento all'interno di un'area confinata ha determinato condizioni tali da amplificare i gradienti legati alle eventuali perturbazioni ambientali.

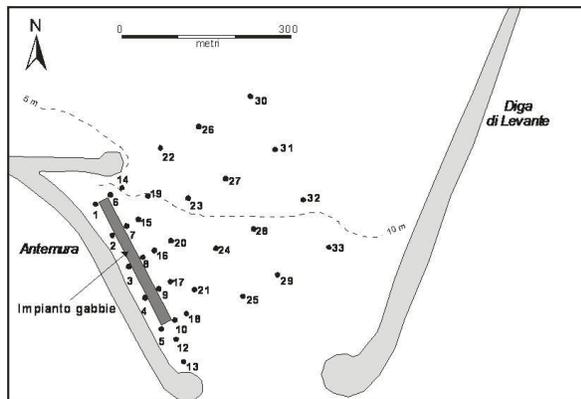


Fig. 1. Localizzazione delle stazioni di campionamento.

A. Campionamento del macrozoobenthos

Sono stati prelevati due campioni di sedimento per ciascuna stazione, da destinare all'analisi della componente macrobentonica ed all'analisi dei sedimenti superficiali (granulometrie e contenuto di sostanza organica).

I campionamenti sono stati effettuati tramite benna Van Veen. Questo strumento è dotato di lunghe braccia attaccate su ogni ganascia, che forniscono una maggior potenza di leva per la chiusura. Inoltre, le braccia fanno in modo che la benna non sobbalzi sul substrato mentre l'imbarcazione rolla quando la benna si chiude. La benna di tipo Van Veen ha una apertura di 0.1 m² ed un volume pari a circa 17 l; la scelta della benna è motivata dall'esigenza di effettuare prelievi puntiformi di volumi paragonabili di sedimento su superfici uguali; la benna Van Veen è particolarmente affidabile per il prelievo di campioni di sedimenti a granulometria fine. Il contenuto di ogni bennata, durante e dopo il lavaggio sulla tramoggia, è stato vagliato con un setaccio con maglia di 1 mm, in modo da separare dal sedimento gli organismi macrobentonici; questi sono stati conservati in un liquido fissativo composto da una miscela d'acqua di mare e formaldeide al 4%, colorata con rosa Bengala per evidenziare gli organismi che erano vitali al momento della cattura.

I campioni di sedimento destinati all'analisi del carbonio organico sono stati immediatamente raffreddati a -20 °C.

B. Analisi di laboratorio

Macrozoobenthos

In laboratorio ogni campione è stato sottoposto a lavaggio in acqua corrente su un setaccio con maglia da 1 mm per eliminare la formaldeide e i residui di fango. Successivamente, sul macrobenthos è stato effettuato lo smistamento dei diversi gruppi tassonomici, durante il quale, per razionalizzare il lavoro di identificazione, sono stati separati i seguenti gruppi tassonomici:

- Molluschi
- Anellidi Policheti
- Crostacei Anfipodi
- Crostacei Anisopodi
- Crostacei Decapodi
- Crostacei Isopodi
- Echinodermi.

Ogni gruppo è stato conservato in alcol etilico a 70° e affidato a uno specialista per l'analisi tassonomica.

Per lo smistamento e l'identificazione si è fatto uso di uno stereomicroscopio da dissezione a luce incidente e trasmessa e di un microscopio ottico a contrasto di fase. L'analisi tassonomica e la caratterizzazione ecologica delle specie sono state effettuate sulla base dell'informazione reperita nei testi riportati in bibliografia [4-9, 18, 24-29, 33-38, 41-44] nonché in numerose pubblicazioni di carattere tassonomico. La nomenclatura adottata è quella proposta nella Checklist delle Specie della Fauna Italiana [24].

E' stato rilevato il peso umido di tutti i *taxa* raccolti in ogni stazione, con un grado di precisione del decimillesimo di grammo; nelle stazioni la biomassa è stata espressa in g m⁻².

Sedimenti

I campioni destinati alle analisi granulometriche sono stati trattati in laboratorio con una soluzione di perossido di idrogeno al 6% allo scopo di rimuovere la sostanza organica. Questa, infatti, favorisce la formazione di aggregati, che potrebbero compromettere il risultato delle analisi successive a causa delle loro dimensioni apparenti, superiori a quelle delle particelle che li costituiscono.

Dopo questo trattamento i sedimenti sono stati disidratati in un essiccatore a 100°C. Successivamente, sono state estratte le componenti fangose e argillose di diametro inferiore a 63 µm con una metodica che consiste nello sciogliere 25 g di sedimento in 250 ml di acqua con l'aggiunta di 10 ml di una soluzione acquosa di sodio metafosfato (NaPO₃)₆ [16, 17].

Tale soluzione si prepara sciogliendo 5 g di sodio metafosfato in un litro di acqua. Si procede, quindi, ad agitare meccanicamente per 15 minuti i sedimenti. Dopo averli lasciati riposare per una notte, si agitano con lo stesso metodo per 15 minuti prima di passarli sul setaccio di 63 µm. In questa fase si sciacqua il campione sino a quando dal setaccio fuoriesce soltanto acqua limpida.

Questa procedura permette di eliminare la frazione pelitica (silt e clay) dal campione, che viene essiccato nuovamente e setacciato attraverso una serie geometrica di setacci (scala di

Wentworth). Tale procedura consente la separazione delle seguenti frazioni granulometriche:

- ghiaia (superiore ai 2 mm di diametro)
- sabbia molto grossolana (compresa tra 2 e 1 mm)
- sabbia grossolana (compresa tra 1 e 0.5 mm)
- sabbia media (compresa tra 0.5 e 0.25 mm)
- sabbia fine (compresa tra 0.25 e 0.125 mm)
- sabbia molto fine (compresa tra 0.125 e 0.063 mm).

Le varie frazioni sono state infine pesate per mezzo di una bilancia analitica con un'approssimazione al centesimo di grammo. Il peso della frazione pelitica è ottenuto per differenza tra il peso iniziale del campione e la somma delle frazioni di diametro superiore a 63 µm.

L'analisi del carbonio organico è stata, invece, effettuata con il metodo Walkley e Black (1934): una volta scongelato a temperatura ambiente per 24 h, il sedimento è stato essiccato all'aria per 24 h e poi in stufa a 40 °C per almeno 24 h; successivamente, una volta tornato a temperatura ambiente, è stato setacciato con maglia da 2 mm; il sottovaglio è stato riposto in barattoli da urine sterili e conservato in frigorifero fino all'operazione di misura, fatta con una complessa titolazione che richiede l'uso, in successione, di solfato d'argento, bicromato di potassio, acido solforico, acqua distillata, acido fosforico, acido 4-difenilamminsolfonato sodico e ferro-ammonio-solfato.

C. Analisi statistiche

Ai fini dello studio sono state applicate:

L'Analisi delle Componenti Principali, tecnica di ordinamento semplice; opera esclusivamente una rotazione rigida degli assi dello spazio multidimensionale dei dati in modo tale da orientarli in maniera coerente con i *pattern* di dispersione dei dati stessi. Ciò consente di rappresentare un insieme di dati in maniera più efficace, anche in un numero ridotto di dimensioni, cioè in un sistema di assi ortogonali (le Componenti Principali) definiti come combinazioni lineari dei descrittori originali. Inoltre, è possibile ottenere anche una rappresentazione delle relazioni fra i descrittori stessi e fra questi ultimi e le Componenti Principali.

Ma nel campo della ricerca ecologica non sempre gli insiemi di dati possiedono le proprietà necessarie ad una corretta applicazione dell'Analisi delle Componenti Principali.

Per tale motivo sono state applicate anche *l'Analisi delle Coordinate Principali* ed altri metodi di analisi (test ANOSIM e test di Mantel); sono state utilizzate due misure di dissimilarità dei campioni di macrofauna bentonica, ovvero quella di Bray-Curtis e quella di Jaccard.

II. RISULTATI

In generale, l'impatto ambientale di un impianto di acquacoltura dipende oltre che dalle dimensioni dell'impianto e dalla sua capacità produttiva, dalle specie in allevamento, dalle tecniche di allevamento, dalla qualità e quantità dell'alimento somministrato e dalle caratteristiche funzionali

degli ecosistemi al contorno (es. capacità portante, livelli di resilienza, ecc.).

La quantificazione degli impatti ambientali risulta difficile, in quanto dipende da differenti fattori quali: la densità di allevamento, il tipo di alimento ed il regime alimentare. Nel caso delle gabbie bisogna prendere in considerazione anche l'idrodinamismo dell'area marina e la profondità. In generale, le conseguenze delle attività produttive sull'ambiente sono determinate dalla relazione tra la quantità e la natura dei prodotti di rifiuto e dallo stato del corpo idrico recettore dei reflui.

Anche se gli effetti dell'acquacoltura in gabbia possono essere spazialmente limitati in termini generali si hanno le seguenti conseguenze: assenza di macrozoobenthos nell'area di fondo corrispondente a quelle delle gabbie, dominanza di specie tolleranti all'arricchimento organico.

Tra le fonti di impatto delle attività di maricoltura l'immissione nell'ambiente circostante di sostanza organica nelle diverse forme è senz'altro quella predominante; tuttavia, non è da sottovalutare, per le scarse conoscenze sulle modalità di dispersione e di persistenza, il rilascio di numerose sostanze chimiche nell'ambiente.

A. Analisi strutturale della comunità bentonica

Nei 33 campioni prelevati nell'area di Licata sono stati rinvenuti 16254 individui, ripartiti in 173 *taxa*. Per 822 di essi, pari al 5,05%, non è stato possibile estendere la classificazione fino al livello di specie; di questi, 789 appartengono al genere *Chaetozone* (Polychaeta), attualmente in fase di revisione sistematica.

I Policheti costituiscono il *syntaxon* maggiormente rappresentato sia nel numero di individui che nel numero di specie; appartengono a questa classe, infatti, 13319 individui, pari all'82% di quelli raccolti, ripartiti in 95 *taxa*, che rappresentano il 56% del totale. Dopo i Policheti, il gruppo tassonomico maggiormente rappresentato, sia pur con valori dieci volte inferiori e con due sole specie, è l'ordine degli Anisopodi (Crustacea), di cui sono stati rinvenuti 1345 individui, tutti appartenenti alla specie *Apeudes acutifrons*, tranne due, ascritti alla specie co-generica *Apeudes latreillii*. Seguono i Molluschi, con 804 individui e 30 specie, e i crostacei Anfipodi, con 652 individui e 28 specie.

Anche in termini di biomassa il gruppo tassonomico più importante è il *phylum* Polychaeta, seguito dai Molluschi, dai crostacei Decapodi e dagli Echinodermi; ciò è in contrasto con i dati solitamente attesi, stante l'elevato peso specifico della conchiglia dei Molluschi; il numero relativamente elevato di esemplari di *Phylo ligustica*, un polichete di dimensioni cospicue, e l'elevatissimo numero di individui di *Capitella capitata* (Polychaeta) spiegano l'apparente anomalia.

In quasi tutte le biocenosi può essere identificato un nucleo fondamentale costituito da un numero limitato di specie, indipendentemente dal numero totale di *taxa* presenti; quest'ultimo può essere anche molto elevato, ma in generale ciò è dovuto alla presenza di molte specie occasionali o rare, che, se sono importanti da un punto di vista zoologico, di solito non forniscono un contributo determinante alla struttura

della comunità, né sono utilizzabili per la caratterizzazione ecologica di un biotopo. Le specie del nucleo sono state individuate sulla base dei valori di dominanza (D), che è l'importanza quantitativa espressa in percentuale sul totale degli individui rinvenuti; il *pool* è stato fissato in 7 *taxa* e a questo appartiene il 70% degli individui totali.

Le specie maggiormente presenti sono, in ordine di dominanza crescente: *Capitella capitata*, *Apsuedes acutifrons*, *Lumbrineris latreilli*, *Laonice cirrata*, *Chaetozone sp.1*, *Malacoceros fuliginosus* e *Philo ligustica*.

Dei *taxa* componenti il *pool*, 9 sono policheti, due (*T. donacina* e *T. flexuosa*) sono molluschi bivalvi e uno (*A. acutifrons*) è un crostaceo anisopode.

L. latreilli è una specie tipica di sedimenti arricchiti di sostanza organica, così come *C. capitata*; quest'ultima, in particolare, è indicatrice di inquinamento organico quando presente con alti valori di dominanza. *A. acutifrons* è rinvenibile soprattutto su sedimenti sabbiosi.

Oltre alla dominanza, per l'analisi descrittiva della comunità bentonica di fondo mobile sono stati presi in considerazione tre parametri strutturali: l'abbondanza totale (A), la ricchezza specifica (RS) e la diversità di specie. La prima è il numero complessivo di individui raccolti in una stazione; la ricchezza specifica è il numero dei *taxa* rinvenuti in una stazione; la diversità di specie, infine, è un parametro ottenuto rapportando i primi due tra loro e con i dati relativi all'intero *stock* campionato. Per l'analisi di questo parametro esistono diversi indici; in questo studio è stato utilizzato l'indice di diversità di Shannon, H' [32].

Nell'area di Licata l'abbondanza totale tende ad attestarsi su valori più alti nelle stazioni vicine alle gabbie (da 1 a 10), mentre assume valori mediamente più bassi nelle altre; al contrario, la ricchezza specifica tende ad assumere valori mediamente più alti nelle stazioni del secondo gruppo, e si attesta su valori sensibilmente più bassi in quelle più vicine alle gabbie, fatta eccezione per la stazione 3.

Questa differenza fra le stazioni vicino le gabbie e le altre appare ancora più evidente se si considera la diversità di specie (indice di Shannon, H'), ad eccezione sempre della stazione 3. La diversità oscilla intorno a valori molto bassi nelle stazioni adiacenti le gabbie (gruppo 1), mentre si assesta intorno a valori alti nelle altre stazioni (gruppo 2), con una differenza fra il valore minimo e quello massimo, registrati rispettivamente nella stazione 7 e nella stazione 22, di cinque unità.

La struttura trofica della comunità appare costituita soprattutto da limivori e detritivori obbligati. I carnivori rappresentano il terzo gruppo trofico in ordine di biomassa decrescente; questo dato non è, tuttavia, indicativo, in quanto questo gruppo è solitamente indipendente dalla natura del substrato.

Gran parte della biomassa dei limivori raccolti a Licata è costituita da policheti appartenenti alle specie *Phylo ligustica* e, in misura minore, *Capitella capitata*; la biomassa dei detritivori, invece, è suddivisa in molte specie, di cui la più importante è il polichete *Laonice cirrata*. I carnivori più

importanti sono i molluschi gasteropodi *Philine aperta* e *Nassarius mutabilis*; queste due specie hanno fornito il 59,6% della biomassa di questa categoria.

B. Analisi dei sedimenti

I fondali marini costituiti da fango o sabbia sono denominati fondi mobili e sono caratterizzati, in genere, da una grande omogeneità strutturale. Lo studio della granulometria dei sedimenti aiuta a comprendere meglio la distribuzione spaziale degli organismi bentonici. Al ruolo prioritario della natura litologica del fondale, generalmente modulato lungo un gradiente idrodinamico e batimetrico, va aggiunto il sensibile effetto che, in ambiente marino costiero, hanno gli apporti sedimentari alloctoni sui rapporti trofici e meccanici tra gli organismi e l'ambiente.

Tra le fonti di impatto ambientale sulle attività di maricoltura l'immissione nell'ambiente circostante di sostanza organica in diverse forme è senz'altro quella predominante. Qualunque sia la fonte di sostanza organica in uscita da un sistema di maricoltura (mangime non ingerito, feci o *fouling* delle gabbie) la sede di accumulo è rappresentata dai fondali circostanti, su un'area più o meno vasta in funzione delle caratteristiche del sito di allevamento e in particolare dell'idrodinamismo [20, 31]. Quindi, lo studio sedimentologico e del contenuto in sostanze organiche fornisce utili informazioni per la valutazione dello stato di salute dei fondali sottostanti l'impianto di allevamento e sulle capacità del comparto bentonico di metabolizzare il carico organico in ricezione.

Il fondale dell'area d'indagine, con l'esclusione dalla zona più interna rappresentata dalle stazioni poste sul lato nord-ovest della griglia di campionamento, è caratterizzato da un sedimenti prevalentemente fangoso: le peliti generalmente costituiscono oltre il 90% dei sedimenti presenti. In questa zona la mediana ha minime fluttuazioni tra le stazioni ed è compresa tra 0,045 e 0,050 mm. L'omogeneità tessiturale del sedimento e il suo buon grado di classazione è dimostrata anche dai bassi valori di deviazione standard: il valore medio è pari a 0,487.

Nei campioni di sedimento raccolti nelle stazioni poste sul lato NW della griglia di campionamento (6, 14, 22, 26 e 30) la componente granulometrica più fine (fanghi e argille) si riduce generalmente al di sotto del 20%, mentre le sabbie diventano prevalenti. Questa brusca variazione litologica dei sedimenti, evidenziata graficamente dall'aumento della mediana che nella stazione 6 raggiunge il valore massimo di 0,150mm, è da collegare a variazioni di piccola scala della fisionomia del fondale e del regime idrodinamico locale. La confluenza delle isobate dei 5 m e dei 10 m in prossimità della diga "Antemura" posta a ridosso dell'impianto di allevamento indicano la presenza di una zona di fondo con un'accentuata pendenza rispetto all'andamento medio del fondo nel resto del porto.

Per quanto concerne il contenuto in sostanza organica, i valori più elevati, compresi tra un minimo di 19,08 g kg⁻¹ e un massimo di 43,06 g kg⁻¹, si osservano nelle stazioni poste tra le gabbie e la diga "Antemura" a causa del ridotto idrodinamismo presente in questa striscia di fondo.

Comunque nella stazione 12 posta circa 25 m più a sud dell'impianto si è registrato in assoluto il valore più elevato, pari a $85,66 \text{ g kg}^{-1}$. Il rilevante accumulo di materia organica in questa stazione è riconducibile alla presenza sul fondo di una piccola zona con basso idrodinamismo ed elevata sedimentazione.

Nelle stazioni poste in prossimità dell'impianto ma dal lato opposto alla diga "Antemura" i valori della sostanza organica sono più bassi e compresi tra $7,72 \text{ g kg}^{-1}$ e $23,12 \text{ g kg}^{-1}$. Con l'aumentare della distanza dall'impianto delle gabbie il contenuto in sostanza organica diminuisce progressivamente anche se in maniera lieve. Nelle stazioni poste a circa 300 m dall'impianto i valori della sostanza organica variano tra $3,43 \text{ g kg}^{-1}$ e $14,99 \text{ g kg}^{-1}$. Nel complesso i valori di sostanza organica rilevati sotto le gabbie sono circa il doppio di quelle misurate nelle stazioni più distanti. Incrementi simili nella concentrazione della sostanza organica sono stati riportati per fondi fangosi [20, 31].

I dati ottenuti dimostrano che il disturbo arrecato dalla presenza dell'impianto di gabbie galleggianti è pressoché circoscritto all'area di fondo immediatamente sottostante le gabbie. Infatti, l'estensione dell'area in cui sono percepibili alterazioni della struttura e della geochimica del sedimento è nell'ordine di grandezza delle poche decine di metri.

C. Correlazione fra i dati macrozoobentonici e sedimentologici

I dati relativi al macrozoobenthos (32 stazioni, 173 taxa) sono stati sottoposti ad un'Analisi delle Coordinate Principali per sintetizzare le eventuali variazioni biocenotiche a carico del comparto bentonico in risposta alla disposizione delle gabbie.

L'Analisi delle Coordinate Principali è stata condotta su due diverse matrici di dissimilarità, ovvero su quelle di Jaccard e di Bray-Curtis. La prima traduce le variazioni di tipo esclusivamente qualitativo, operando su dati binari, mentre la seconda è basata su dati quantitativi, sia pure pesandoli sulla loro scala di variazione.

La posizione delle stazioni di campionamento è riportata in Fig. 2. Ai fini dell'analisi dei dati le stazioni sono state divise in due sottoinsiemi (rosso e blu in Fig. 2). Il primo sottoinsieme raccoglie le stazioni immediatamente a ridosso delle gabbie (staz. 1-10), mentre il secondo raccoglie tutte le rimanenti stazioni (staz. 12-33).

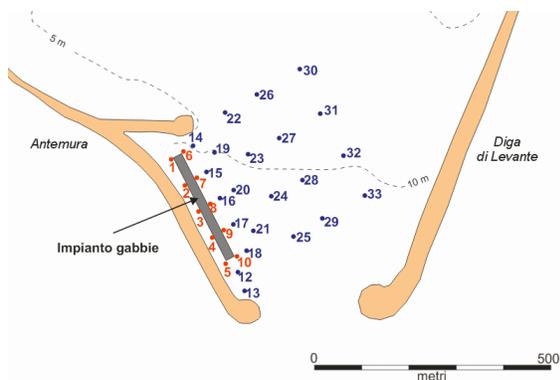


Fig. 2. Suddivisione delle stazioni di campionamento in due sottoinsiemi.

L'Analisi delle Coordinate Principali effettuata sulla matrice di dissimilarità di Jaccard ha fornito l'ordinamento nel piano dei primi due assi mostrato in Fig. 3. Tutti i punti relativi alle stazioni poste al margine delle gabbie (indicati da una croce rossa e con i numeri che vanno da 1 a 10) si dispongono nel semipiano positivo nello spazio definito dal primo asse, risultando quasi completamente disgiunti da quelli che rappresentano le stazioni più lontane dalle gabbie stesse. Soltanto i punti-stazione 13 e 26, fra questi ultimi, mostrano affinità con quelli delle stazioni adiacenti alle gabbie.

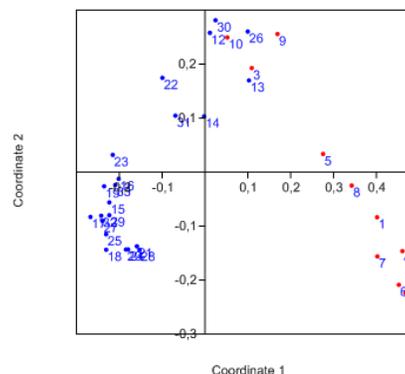


Fig. 3. Ordinamento nel piano delle stazioni in base all'Analisi delle Coordinate Principali (indice di similarità di Jaccard).

La disposizione dei punti di stazione in funzione della distanza dalle gabbie è illustrata in Fig. 4, in cui è stato tracciato l'involuppo convesso dei due gruppi di stazioni nel piano definito dalle prime due coordinate principali. Come si può notare, l'involuppo convesso dei punti limitrofi alle gabbie (in rosso) è quasi completamente disgiunto da quello dei rimanenti punti-stazione.

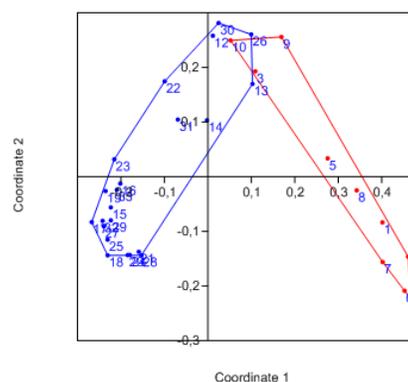


Fig. 4. Ordinamento nel piano delle stazioni con gli involucri convessi.

La separazione osservata nell'ordinamento fra le stazioni di campionamento più direttamente influenzate dalle gabbie e le rimanenti emerge anche dal dendrogramma (Fig. 5), ottenuto mediante l'algoritmo UPGMA e quindi basato sul legame medio. Come si può notare, all'estrema destra si nota un *cluster* (separato dai rimanenti fino all'ultimo internodo) che include le stazioni 1, 2, 4, 5, 6, 7 e 8. Alla sinistra del dendrogramma, invece, le rimanenti stazioni fra quelle più vicine alle gabbie formano un altro *cluster* in cui le stazioni 3, 9 e 10 sono associate alle stazioni 12 e 13, che sono poste immediatamente a sud delle gabbie. Tutte le altre stazioni, con l'eccezione della 26, che mostra una spiccata singolarità, sono raggruppate in un *cluster* posizionato al centro del dendrogramma. Tutte le stazioni, comunque, presentano un livello di similarità piuttosto basso fra loro e nessuna coppia di stazioni ha una similarità superiore a 0.7.

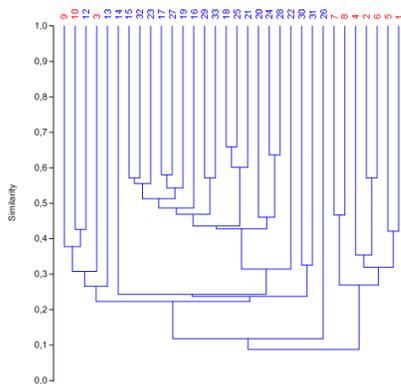


Fig. 5. Clustering con la media tra gruppi(Jaccard).

Se è vero che l'insieme delle stazioni poste al di là delle immediate adiacenze delle gabbie è disgiunto da quello delle stazioni poste al margine delle stesse, è certamente interessante valutare l'eventuale eterogeneità interna al primo gruppo. A questo fine esso è stato suddiviso in due sottoinsiemi di stazioni. Il primo comprende le stazioni da 12 a 21 (in verde in Fig. 6) ed il secondo le stazioni da 22 a 33 (in blu in Fig. 6). I tre insiemi di punti sono stati rappresentati mediante i loro involucri convessi nel piano dei primi due assi dell'Analisi delle Coordinate Principali. I risultati corrispondenti sono riportati in Fig. 7.

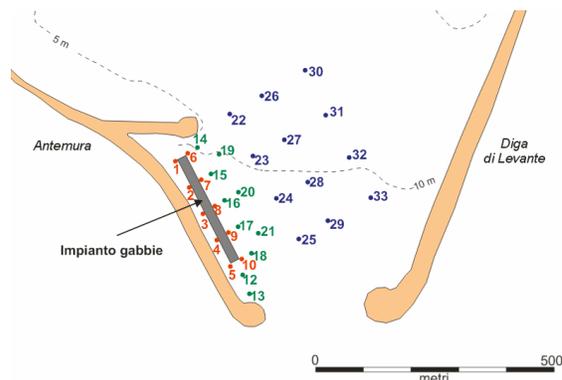


Fig. 6. Suddivisione delle stazioni di campionamento in tre sottoinsiemi.

Gli involucri convessi delle stazioni 12-21 (verde) e delle stazioni 22-33 (blu) sono sovrapponibili e disgiunti da quello delle stazioni adiacenti alle gabbie (1-10, in rosso). Ciò dimostra che non esistono sostanziali differenze fra le stazioni poste immediatamente al di là del perimetro delle gabbie, mentre sono piuttosto nette le differenze con le stazioni poste lungo il perimetro.

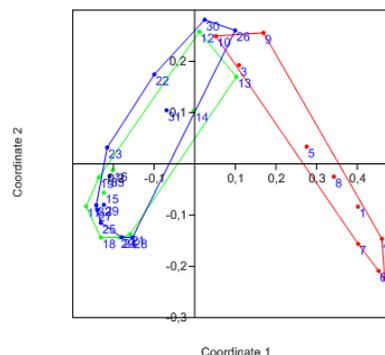


Fig. 7. Ordinamento nel piano delle stazioni con gli involucri convessi.

Lo stesso tipo di risultato nell'Analisi delle Coordinate Principali, sia pure con alcune differenze nella disposizione dei punti, si ottiene sulla base della similarità di Bray-Curtis, che, rispetto a quella di Jaccard, è sensibile agli aspetti quantitativi, sia pure in termini di abbondanze relative e non assolute. L'ordinamento dei punti-stazione nel piano definito dai primi due assi mostra una netta disgiunzione del gruppo delle stazioni adiacenti alle gabbie rispetto alle rimanenti, con la sola eccezione delle stazioni 12 e 13, che sono comunque risultate affini a quelle più direttamente impattate anche sulla base della similarità di Jaccard (Fig. 8). Di conseguenza, gli involucri convessi dei due insiemi di punti si sovrappongono in misura minima con la sola stazione 13 (Fig. 9).

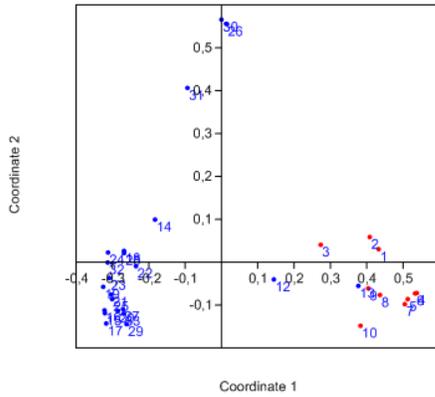


Fig. 8. Ordinamento nel piano delle stazioni in base all'Analisi delle Coordinate Principali (indice di similarità di Bray-Curtis)

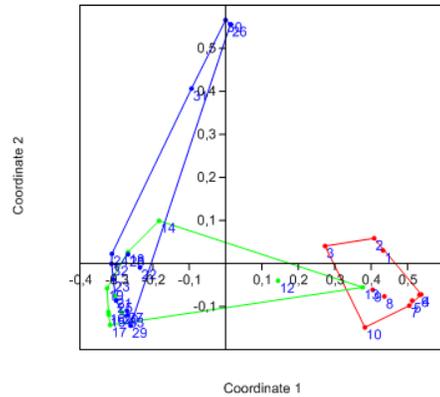


Fig. 10. Ordinamento nel piano delle stazioni con gli involuipi convessi.

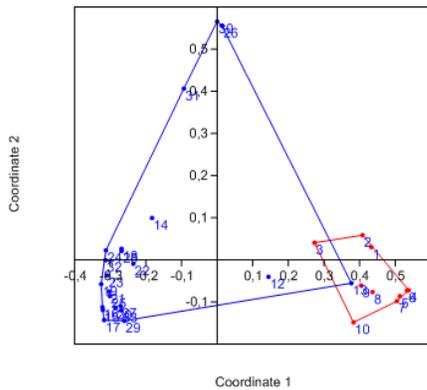


Fig. 9. Ordinamento nel piano delle stazioni con gli involuipi convessi.

Se si rappresentano separatamente i due sottoinsiemi di stazioni esterni all'area occupata dalla gabbie, si nota come la sola differenza fra i due sia costituita dalle stazioni 12 e 13, che risultano molto più affini delle rimanenti alle stazioni più direttamente influenzate dalle gabbie (Fig. 10). L'involuppo convesso delle stazioni 12-21 (verde) è separato da quello delle stazioni 22-33 (blu).

La classificazione secondo l'algoritmo UPGMA (Fig. 11) conferma il quadro fornito dall'ordinamento mediante Analisi delle Coordinate Principali. Infatti, si nota come le stazioni adiacenti alle gabbie si isolano in un cluster ben definito sulla destra del dendrogramma, con la sola aggiunta delle stazioni 12 e 13, la cui affinità per il cluster delle stazioni impattate era già emersa dall'Analisi delle Coordinate Principali. E' interessante notare il fatto che le similarità in gioco all'interno dei cluster principali sono molto più alte di quelle osservate per ciò che riguarda il coefficiente di Jaccard. Ciò indica come da un punto di vista delle abbondanze relative la struttura della comunità sia molto più omogenea di quanto non appaia in termini meramente strutturali. Infatti, le specie più rare sono quelle che contribuiscono in maniera determinante ad abbassare la similarità fra le stazioni.

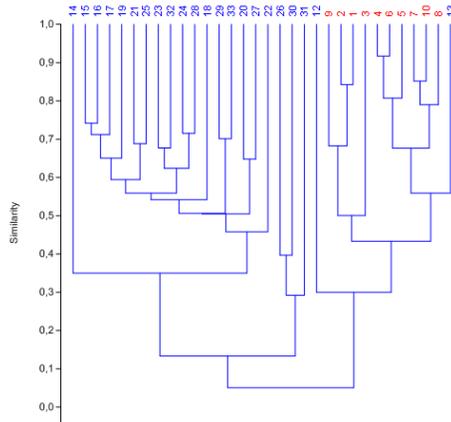


Fig. 11. Clustering con la media tra gruppi (Bray-Curtis).

Se si analizza l'involuppo convesso dei punti-stazione 12-21 in rapporto a quello dei punti stazione 22-33 e, ovviamente, 1-10, si nota come una differenza, sia pure non sostanziale

emerge rispetto al quadro fornito dall'analisi effettuata sul coefficiente di Jaccard. Infatti l'involuppo verde (staz. 12-21, vedi fig. 3.4.9) è parzialmente disgiunto da quello blu (staz. 22-33), e si interseca con quello delle stazioni impattate (da 1 a 10, in rosso) per al già citata stazione 13. Il quadro complessivo, comunque, non introduce elementi difforni da quelli già commentati per le precedenti analisi.

In termini di granulometria e di concentrazione di sostanza organica dei sedimenti le differenze fra le stazioni campionate appaiono non estreme, ma non indipendenti dal posizionamento delle stazioni rispetto alle gabbie.

Un'Analisi delle Componenti Principali effettuata sulla matrice di correlazione basata sulle percentuali di sedimento appartenenti alle classi granulometriche da $\phi = 2$ a $\phi = 4$ e sulla concentrazione della sostanza organica nel sedimento non mostra discontinuità nette fra i punti-stazione, ma evidenzia una tendenza dei punti-stazione adiacenti alle gabbie a disporsi nel quarto quadrante, con l'eccezione dei punti 1 e 6, con quest'ultimo in posizione estrema nel primo quadrante (Fig 12).

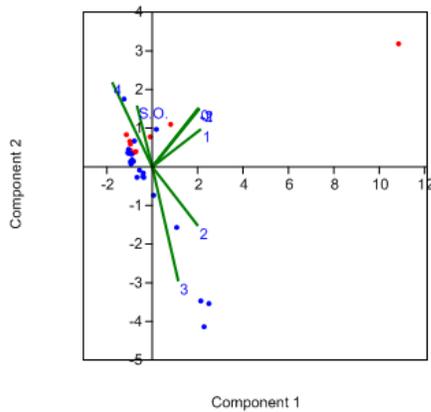


Fig. 12. Ordinamento delle stazioni sulla base della covarianza (bplot).

Il gruppo dei punti-stazione adiacenti alle gabbie è associato ai vettori-variabile per le peliti (etichetta come 4, inteso come valore di ϕ) e la sostanza organica (SO). Il punto più estremo in questo senso, tuttavia, è quello della stazione 12, che è situata immediatamente a sud delle gabbie. Fra i punti stazione solo quello relativo alla stazione 6 si isola nettamente dai rimanenti nello spazio della prima e della seconda Componente Principale, sotto la netta influenza delle granulometrie più grossolane.

I punti relativi alle stazioni meno vicine alle gabbie, infine, sono associati ad un ϕ pari a 2 o 3, ovvero alle sabbie fini, e si disperdono in un insieme che si estende verso il secondo quadrante, mostrando anche una maggiore eterogeneità interna rispetto a quelli adiacenti alle gabbie.

Anche in questo caso sono stati rappresentati gli involuipi convessi relativi ai due gruppi di stazioni, in blu ed in rosso

rispettivamente per le stazioni più lontane e per quello più vicine alle gabbie di ingrasso (Fig 13). Come si può notare, la sovrapposizione fra i due gruppi è modesta e la presenza della stazione 6, certamente anomala rispetto alle altre stazioni al margine delle gabbie, enfatizza il quadro complessivo.

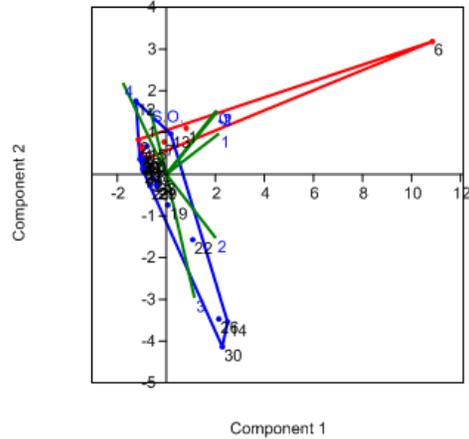


Fig. 13. Ordinamento delle stazioni con gli involuipi convessi (bplot).

Se si analizza anche la terza Componente Principale (Fig. 14), si nota come la separazione fra i punti relativi alle stazioni adiacenti alle gabbie ed i rimanenti appaia più chiara, con la stazione 12 che si isola nello spazio della terza Componente Principale, associata ad elevati valori di sostanza organica (vettore SO). La medesima tendenza, sia pure di minore intensità, è manifestata dai punti-stazione 1, 2 e 4.

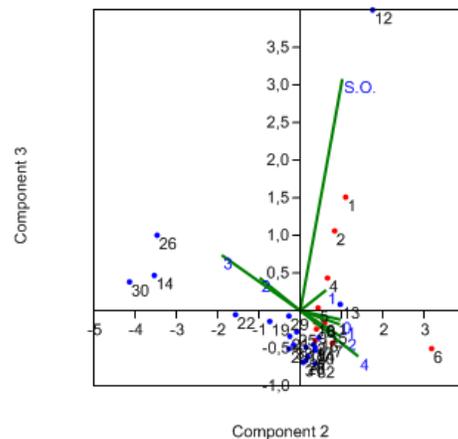


Fig. 14. Ordinamento delle stazioni con la terza Componente Principale

La parziale disgiunzione dei due sottoinsiemi di stazioni di cui si è detto risulta ben evidente anche in questo caso dalla rappresentazione dei relativi involucri convessi (Fig. 15).

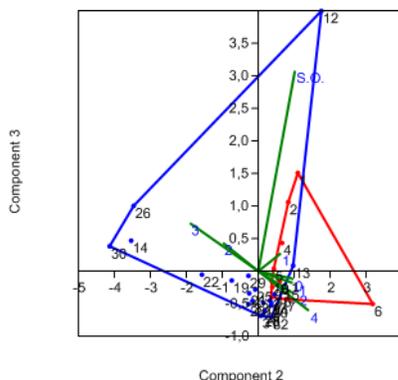


Fig. 15. Ordinate delle stazioni con gli involucri convessi, con la terza Componente Principale

Una serie di test formali per verificare le differenze tra la comunità bentonica delle stazioni adiacenti alle gabbie rispetto a quella delle rimanenti stazioni è stata effettuata mediante ANOSIM sia sulla matrice di dissimilarità di Jaccard che sulla matrice di distanza di Bray-Curtis. Per entrambe le matrici è stata applicata l'ipotesi nulla di uguale variabilità fra i due gruppi ed all'interno degli stessi. Inoltre, è stata controllata la differenza fra le stazioni 12-21 e le stazioni 22-33, ovvero fra i due sottoinsiemi di stazioni esterne al perimetro delle gabbie (in verde ed in blu in Fig. 6).

I risultati hanno mostrato come, sia per la similarità di Jaccard (qualitativa) che per quella di Bray-Curtis (quantitativa relativa) la differenza risulta significativa fra le stazioni 1-10 (adiacenti alle gabbie) e le rimanenti ($R=0.8257$ e $p=0$, $R=0.7771$ e $p=0$, rispettivamente). Al contrario, non risultano significative le differenze interne a quest'ultimo gruppo di stazioni, ovvero in funzione della diversa distanza dalle gabbie, ma fuori dalla loro diretta influenza ($R=0.0197$ e $p=0.266$, $R=0.0010$ e $p=0.409$, rispettivamente per i due coefficienti citati).

Le differenze osservate nella composizione dei popolamenti bentonici sono correlate a differenze nei fattori edafici, che risultano determinanti nel definire le loro caratteristiche. Infatti, sulla base di due distinti test di Mantel è stato possibile rigettare l'ipotesi nulla di indipendenza delle matrici di dissimilarità già citate (Jaccard e Bray-Curtis) da una matrice di distanze di Manhattan che descrive le differenze granulometriche fra le stazioni ($R=0.3366$ e $p=0.995$, $R=0.2815$ e $p=0.999$, rispettivamente per i due coefficienti citati). Rispetto al contenuto in sostanza organica, invece, le differenze composizionali delle comunità sono indipendenti da un punto di vista qualitativo (dissimilarità di Jaccard, $R=0.2001$ e $p=0.928$), mentre non lo sono dal punto di vista della composizione quantitativa relativa (dissimilarità di Bray-Curtis, $R=0.2072$ e $p=0.992$). In altre parole, sembra

esistere una relazione fra il contenuto in sostanza organica del sedimento e l'abbondanza relativa dei *taxa* presenti.

Per verificare quali *taxa* siano associati in maniera significativa con le condizioni ambientali dell'area sotto il diretto influsso delle gabbie è stata effettuata una *Indicator Species Analysis*. Il risultato della stessa è riportato nella tabella che segue per le sole specie risultate significativamente associate ad uno dei due gruppi di stazioni citati (Tab. 1). Al gruppo sotto il diretto influsso delle gabbie (staz. 1-10) sono associate solo tre specie, fra cui, come facilmente prevedibile, il polichete *Capitella capitata*, mentre molte più specie, fra cui alcune certamente sensibili all'accumulo di sostanza organica, caratterizzano le rimanenti stazioni, incluse quelle poste a pochissime decine di metri dalle gabbie.

| Taxon | valore indicatore gabbie | altri siti | p* |
|-------------------------------|--------------------------|------------|-------|
| <i>Capitella capitata</i> | 94 | 1 | 0.001 |
| <i>Nereis caudata</i> | 79 | 0 | 0.001 |
| <i>Arenicola marina</i> | 55 | 0 | 0.001 |
| --- | | | |
| <i>Lumbrineris latreillii</i> | 1 | 94 | 0.001 |
| <i>Diopatra neapolitana</i> | 1 | 93 | 0.001 |
| <i>Laonice cirrata</i> | 4 | 86 | 0.001 |
| <i>Abra alba</i> | 4 | 82 | 0.002 |
| <i>Melinna palmata</i> | 0 | 82 | 0.001 |
| <i>Apeudes acutifrons</i> | 0 | 81 | 0.001 |
| <i>Phylo ligustica</i> | 6 | 79 | 0.003 |
| <i>Ampelisca sarsi</i> | 0 | 77 | 0.001 |
| <i>Notomastus aberans</i> | 0 | 73 | 0.003 |
| <i>Amphura chiayi</i> | 0 | 73 | 0.002 |
| <i>Ampharete acutifrons</i> | 0 | 73 | 0.005 |
| <i>Euclymene oerstedii</i> | 0 | 68 | 0.001 |
| <i>Glycera unicornis</i> | 0 | 68 | 0.001 |
| <i>Ampelisca diadema</i> | 0 | 67 | 0.003 |
| <i>Chone longisetosa</i> | 0 | 64 | 0.006 |
| <i>Nephtys kersivalensis</i> | 0 | 64 | 0.006 |
| <i>Nucula nitidosa</i> | 0 | 61 | 0.010 |
| <i>Prionospio malmgreni</i> | 0 | 59 | 0.007 |

Tab. 1 Indicator Species Analysis.

III. DISCUSSIONE

Questo studio ha dimostrato che l'impatto ambientale dovuto alla presenza delle gabbie nel porto di Licata è limitato alla sola area sottostante l'impianto.

Inoltre le conseguenze degli effetti negativi della maricoltura si sono riscontrati unicamente nella composizione delle comunità macrozoobentoniche.

I risultati derivanti dall'analisi statistica dei dati hanno mostrato con chiarezza tale situazione; infatti, attraverso l'uso di metodi di ordinarimento e *clustering*, supportati da test basati su permutazioni, sono state comparate le caratteristiche dei campioni di fauna macrozoobentonica prelevati, rilevando le differenze nella composizione della comunità macrozoobentonica fra le diverse stazioni di campionamento all'interno delle aree studiate. In altre parole, si sono rilevate le discontinuità cenotiche in rapporto alla composizione specifica e locale delle comunità, fornendo una chiave di lettura delle alterazioni osservate relativa all'area di studio.

In conclusione, dunque, si può affermare che l'impatto delle attività di maricoltura in gabbie galleggianti, nel caso di

siti relativamente confinati o comunque non sufficientemente vivificati, è significativo e si possono verificare alterazioni sensibili della comunità macrozoobentonica legate all'accumulo di sostanza organica. A Licata, infatti, ciò è stato riscontrato con certezza in tutte le stazioni immediatamente adiacenti alle gabbie galleggianti ed in un paio di siti fra quelli situati entro un raggio di 100 m dalle gabbie stesse. In particolare le stazioni ubicate nell'immediato intorno delle gabbie presentano una struttura del popolamento con valori elevati di abbondanza ma estremamente bassi in ricchezza specifica. Tutto ciò è imputabile sia alla presenza delle gabbie di allevamento che alla presenza di un'elevata quantità di detrito vegetale, riscontrato nei campioni, dovuto alla vicinanza, all'esterno del porto, di una estesa prateria di *Posidonia oceanica*. La zona a ridosso della diga foranea del porto di Licata rappresenta, pertanto, un'area di accumulo di detrito vegetale che, a causa della sua abbondanza, costituisce un fattore negativo per l'insediamento di una comunità bentonica particolarmente stabile. Essa è caratterizzata da un ricambio idrico insufficiente a diluire e disperdere i cataboliti provenienti dalle gabbie e pertanto la capacità di resilienza dell'ambiente viene ridotta e la mineralizzazione della sostanza organica limitata.

Ai fini della corretta valutazione dei risultati, quindi, va ribadita la assoluta particolarità del sito di Licata, in cui le attività di maricoltura si collocano all'interno di un'area portuale, con le gabbie galleggianti immediatamente a ridosso della diga foranea. In questa situazione particolare (e probabilmente unica) è comunque impossibile discriminare con assoluta certezza l'effetto delle attività di maricoltura da quello più generale del confinamento delle acque all'interno del porto e degli altri carichi organici che su di esso insistono.

RINGRAZIAMENTI

"Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' - TESSA";

**Si ringrazia la Bioservice soc. Coop. a r. l. per la
disponibilità nel mettere a disposizione i dati
utilizzati nel presente lavoro.**

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Bedulli D., Bianchi C.N., Zurlini G., Morri C.- 1986, "Caratterizzazione biocenotica e strutturale del macrobenthos delle coste Pugliesi," in Indagine Ambientale Del Sistema Marino Costiero Della Regione Puglia; Viel, M., Zurlini, G., Eds ENEA: Roma, Italy, pp. 227-255.

[2] Bellan-Santini, Lacaze J.C., Poizat C.- 1994, "Les biocénoses marines et littorales de Méditerranée. Synthèse, menaces et perspectives," in Patrimoines Naturels, Paris, 19, pp. 1-246.

[3] Borja A., Franco J., Perez V.- 2000, "A marine biotic index to establish the ecological quality of soft bottom benthos within European estuarine and coastal environments," Marine Pollution Bulletin, 40, pp. 1100-1114.

[4] Campoy A.- 1982, "Fauna de España. Fauna de anelidos poliquetos de la península ibérica," Publicaciones de Biología de la Universidad de Navarra Serie Zoológica, Eds. EUNSA, Pamplona, 7(1), pp.782.

[5] Day J.H.- 1967, "A Monograph on the Polychaeta of Southern Africa. Part. I, Errantia," Trustees of British Museum (Natural History), London, pp. 458.

[6] Day J.H. – 1967, "A Monograph on the Polychaeta of Southern Africa. Part. II, Sedentaria," Trustees of British Museum (Natural History), London, pp. 419.

[7] Fauchald K. – 1977, "The Polychaete worms. Definitions and keys to the orders, families and genera," Natural History Museum, Los Angeles County, pp. 1-188.

[8] Fauvel P. – 1927, "Polychètes Sedentaires. Faune de France," Paul Lechevalier Paris, France, pp. 404.

[9] Fauvel P. – 1923, "Polychètes Errantes. Faune de France," 5, Kraus Reprint, Nendeln, Liechtenstein, pp. 488.

[10] Fresi E., Gambi M.C., Focardi S., Bargagli R., Baldi F., Falciai L. - 1983, "Benthic Community and sediment Types: A Structural Analysis," in Marine Ecology, 4(2), pp. 101-121.

[11] Fresi E., Mazzella L., Cinelli L. - 1976, "Approcci allo studio dell'inquinamento marino: il benthos," Mem. Biol. Marina e Oceanografia, N.S., 6 (4), pp. 135-140.

[12] Gamulin, Brida H. - 1965, "Contribution aux recherches sur la bionomie benthique de la baie de Porto Paone (Naples, Italie). Repartition des biocoenoses benthique," Pubbl. Staz. Zool. Napoli, 34, pp.476-500.

[13] Gray J. S. - 1974, "Animal-sediment relationships," Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.12, pp. 223-261.

[14] Griggs G.B., Jhonsons S. – 1978, "Bottom sediment contamination in the bay of Naples, Italy," Marine Pollution Bulletin, 9 (8), pp. 208-214.

[15] Gambi M.C., Dappiano M. – 2003, "Manuale di metodologie di campionamento e studio del benthos marino mediterraneo," Biologia Marina Mediterranea 10 (Suppl.), pp. 637.

[16] Holme N.A., McIntyre A.D. – 1971, "Methods for the study of marine benthos," Blackwell Scientific Publications, Oxford and Edinburgh, pp. 346.

[17] Holme N.A., McIntyre A.D. – 1984, "Methods for the study of marine benthos. 2nd ed.," Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. xii+387

[18] Ingle R. – 1993, "Hermit crabs of the northeastern Atlantic Ocean and Mediterranean Sea. An illustrated key," Chapman & Hall, London, pp. 495.

[19] Cicero A.M., Di Girolamo – 2001, "Metodologie analitiche di riferimento del programma di monitoraggio per il controllo dell'ambiente marino costiero (triennio 2001-2003)," Ministero dell'Ambiente e delle Tutela del Territorio, ICRAM, Roma.

[20] Karakassis I., Tsapakis M., Hatziyanni E., Papadopoulou K.-N., Plaiti W. – 2000, "Impact of cage farming of fish on the seabed in three Mediterranean coastal areas," ICES Journal of Marine Science, 57, pp. 1462-1471.

[21] Legendre L., Legendre P. – 1984, "Écologie numérique. Tome 1. Le traitement multiple des données écologiques," Masson, Paris, et les Presses de l'Université du Québec, pp. 260.

[22] Legendre L., Legendre P. – 1984, "Écologie numérique. Tome 2. La structure des données écologiques," Masson, Paris, et les Presses de l'Université du Québec, pp. 335.

[23] Meinesz A., Boudouresque C.F., Falconetti C., Astier J.M., Bay D., Blanc J.J., Bourcier M., Cinelli F., Cirik S., Cristiani G., Di Geronimo I., Giaccone G., Harmelin J.G., Laubier L., Lovric A.Z., Molinier R., Soyler J., Vamvakas C. – 1983, "Normalisation des symboles pour la représentation et la cartographie des biocénoses benthiques littorales de Méditerranée," Ann. Inst. océanogr., Paris, 59 (2), pp. 155-172.

[24] Minelli A., Ruffo S., La Posta S. – 1995, "Checklist delle specie della fauna italiana," Ed. Calderini, Bologna.

[25] Naylor E. – 1972, "British Marine Isopods. Linnean Synopses of the British fauna," Academic Press, London, 3, pp. 86.

[26] Nordsieck F. – 1982, "Die Europäischen Meeres-Gehäuseschnecken. Prosobranchia," Stuttgart, pp. 539.

[27] Nordsieck F. – 1972, "Die Europäischen Meereschnecken. Opisthobranchia mit Pyramidellidae; Rissoacea," Stuttgart, pp. 327.

[28] Parenzan P. - 1974-1976, "Carta d'identità delle conchiglie del Mediterraneo, Vol. II, Bivalvi," Ed. Bios Taras, Taranto, pp. 546.

[29] Parenzan P. – 1970, "Carta d'identità delle conchiglie del Mediterraneo, Vol. I, Gasteropodi," Ed. Bios Taras, Taranto, pp. 283.

- [30] Parenzan P. – 1933, “Ricerche sulle biocenosi del Golfo di Napoli,” *Atti della Società Italiana per il Progresso della Scienza*, 3 (21), pp. 141.
- [31] Pawar V., Matsuda O., Yamamoto T., Hashimoto T., Rajendran N. – 2001, “Spatial and temporal variations of sediment quality in and around fish cage farms: A case study of aquaculture in the Seto Inland Sea, Japan,” *Fisheries Science*, 67, pp. 619–627.
- [32] Peres J. M., Picard J. – 1964, “Nouveau manuel de bionomie benthique de la Mer Méditerranée,” *Rec. Trav. St. Mar. Endoume*, 31 (47), pp. 5-137.
- [33] Picard J. – 1965, “Recherches qualitatives sur le biocénoses marines des substrats meubles dragables de la région marseillaise,” *Rec. Trav. Stat. mar. Endoume*, 36 (52), pp. 1-160.
- [34] Pielou E.C. – 1975, “Ecological diversity,” John Wiley & Sons, New York, viii+165 pp.
- [35] Poppe G.T., Goto Y. – 1993, “European Seashells. Vol. II (Scaphopoda Bivalvia, Cephalopoda), Germany,” Wiesbaden, Germany, Verlag Christa Hemmen, pp. 221.
- [36] Poppe G.T., Goto Y. – 1991, “European Seashells. Vol. I (Polyplacophora, Caudofoveata, Solenogastera, Gastropoda), Germany,” Wiesbaden, Verlag Christa Hemmen, pp. 352.
- [37] Riedl R. – 1991, “Fauna e Flora del Mediterraneo,” Franco Muzzio Editore, Padova, pp. 777.
- [38] Ruffo S. – 1993, “The Amphipoda of the Mediterranean, Part 3 Gammaridea (Melphidippidae to Talitridae), Ingolfiellidea, Caprellidea,” *Memoires de l'Institut Oceanographique, Monaco*, 13, pp. 577-813.
- [39] Ruffo S. – 1989, “The Amphipoda of the Mediterranean, Part 2: Gammaridea (Haustoriidae to Lysianassidae),” *Memoires de l'Institut Oceanographique, Monaco*, 13, pp. 365-576.
- [40] Ruffo S. – 1982, “The Amphipoda of the Mediterranean, Part 1: Gammaridea (Acanthonotozomatidae to Gammaridae),” *Memoires de l'Institut Oceanographique, Monaco*, 13, pp. 1-364.
- [41] Shannon C.E., Weaver W. – 1949, “The mathematical theory of communication,” Urbana, Univ. Illinois Press.
- [42] Simpson E.H. – 1949, “Measurement of diversity,” *Nature*, 163, 688.
- [43] Tebble, N. – 1966, “British Bivalve Seashells. A Handbook for Identification,” British Museum, Edinburgh, pp. 212.
- [44] Torelli A. – 1982, “Gasteropodi conchigliati. Guide per il riconoscimento delle specie animali delle acque lagunari e costiere italiane,” *AQ/1/96*, 8, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Genova, pp. 232.
- [45] Tortonese E. – 1965, “Echinodermata. Fauna Italiana. Vol. 6,” Edizioni Calderini, Bologna, pp. 422.
- [46] Zariquiey, Alvarez R. – 1968, “Crustáceos Decápodos Ibéricos,” *Investigación Pesquera, Barcellona*, 32, pp. 1-510-

Reef Ball: Stato dell'arte

Mariangela Consoli

Borsista del progetto di formazione e addestramento professionale denominato: "Oceanografia operativa e Tecnologie Informatiche per la sicurezza Marittima - OTTIMA - Obiettivo 1: Oceanografia Operativa e Sicurezza" - PON01_02823

Francesco Pasanisi

ENEA Centro Ricerche di Portici
Unità Tecnica Tecnologie Portici, Laboratorio di Chimica Ambientale

Sommario— Le barriere soffolte sono una tra le più funzionali soluzioni per il controllo dell'erosione costiera. Generalmente esse sono costituite da una struttura in massi naturali, presentano la quota di coronamento al di sotto del livello medio del mare e sono disposte parallelamente alla linea di spiaggia. La principale funzione di protezione si esplica nei confronti delle onde più alte (che, poi, sono quelle a maggiore capacità erosiva) determinandone una notevole perdita di energia. Inoltre le barriere sommerse hanno un impatto limitato sulla qualità delle acque non ostacolando significativamente il ricambio delle stesse impedendo il trasporto dei sedimenti. Tuttavia presentano anche degli svantaggi come, ad esempio, gli alti costi di realizzazione associati soprattutto alla necessità di utilizzare grandi quantità di materiale roccioso proveniente da cave, operazione quest'ultima che produce un significativo impatto ambientale. Al fine di limitare gli effetti negativi sull'ambiente, nel mondo scientifico si sta facendo strada l'idea di impiegare per la realizzazione di queste strutture il calcestruzzo ecocompatibile ed ecosostenibile. In quest'ottica si inseriscono gli elementi *Reef Ball* ovvero moduli in calcestruzzo *seafriendly* dalla caratteristica forma a campana, cavi internamente e forati lungo le pareti laterali. Proprio la particolare conformazione di questi elementi rende tali elementi adatti al miglioramento dell'habitat e della biodiversità dell'ambiente marino nonché allo sviluppo di attività ricreative quali gli sports acquatici come il *diving* o il *surfing*. Tra gli svantaggi associati all'impiego di questi elementi rientrano problemi di stabilità soprattutto in presenza di fondali sabbiosi ai quali si ovvia prevedendo la messa in opera degli stessi con sistemi di ancoraggio (quali materassi di fondazione, coni, spilli ecc.) da scegliere in funzione della tipologia di fondale. Un altro aspetto critico è dato dalle incertezze nella stima del coefficiente di trasmissione (definito come il rapporto tra l'altezza d'onda trasmessa a tergo della scogliera e quella incidente), parametro fondamentale per l'analisi dell'efficacia dell'intervento. Ai fini della stima di questo importante parametro nel caso di barriera soffolta costituita da elementi *Reef Ball* viene illustrato il metodo proposto dall'Università degli Studi di Napoli Federico II e denominato "*Conceptual Approach*".

Keywords—barriere soffolte; *Reef Ball*; coefficiente di trasmissione; *Conceptual Approach*

INTRODUZIONE

L'ambiente costiero è un ecosistema dinamico in cui processi naturali ed antropici si sommano ed interagiscono tra loro modificando l'ambiente nelle sue caratteristiche geomorfologiche, fisiche e biologiche. Le correnti, le maree ed il moto ondoso comportano la continua movimentazione dei sedimenti innescando continui cambiamenti dei territori costieri, che si evidenziano con nuovi assestamenti della linea di riva e con superfici territoriali emerse e sommerse dal mare. Il fenomeno dell'erosione costiera, in particolare, può essere definito come l'avanzamento del mare rispetto alla terra in un periodo di tempo sufficientemente lungo in modo da non portare in conto l'influenza di eventi episodici quali, ad esempio, alcuni tipi di mareggiate. L'erosione costiera può causare non solo la perdita di aree che presentano un valore economico, sociale o ecologico ma anche la distruzione delle difese costiere naturali e l'indebolimento delle difese costiere artificiali, determinando un potenziale rischio per le infrastrutture e la popolazione.

In Italia l'erosione minaccia oltre 1100 km di costa, pari a circa il 24% delle nostre spiagge.

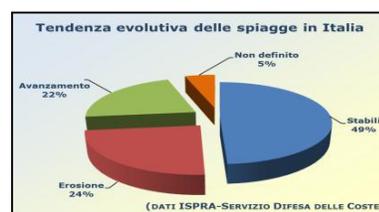


Figura 1 Tendenza evolutiva delle spiagge in Italia (ISPRA)

Una corretta pianificazione territoriale contribuisce a prevenire l'erosione ed è sempre da preferire ad interventi «curativi» di difesa e ripristino della costa. In ogni caso, è indispensabile una conoscenza approfondita del territorio, della batimetria e morfologia dei fondali, dei sedimenti, del regime del moto ondoso e delle correnti, che determinano il trasporto dei sedimenti.

Al fine di contrastare il fenomeno dell'erosione costiera, di fatto in Italia, nel corso degli anni, si è intervenuto adottando principalmente barriere sommerse come opera di protezione del litorale. Queste opere, tipicamente a gettata di massi naturali o artificiali, presentano la cresta al di sotto del livello

medio del mare e sono disposte parallelamente alla linea di costa. Esse determinano una mitigazione dei fenomeni erosivi forzando il frangimento delle onde più alte, determinando una violenta dissipazione turbolenta sulla cresta e, quindi, una laminazione del carico ondoso sulla spiaggia protetta. Inoltre la bassa quota di cresta consente di ridurre l'impatto paesaggistico e di contenere i costi di realizzazione. Al tempo stesso le barriere sofolte consentono un buon ricambio delle acque e, quindi, hanno un limitato impatto sulla qualità delle acque, aspetto particolarmente importante in mari con una ridotta escursione di marea come il Mar Mediterraneo. Tali strutture trattengono i sedimenti mobilizzati sul fondo, impedendo il trasporto dei sedimenti sia verso il largo sia verso riva. Infine per quel che concerne l'aspetto ecologico, in generale, le opere rigide rappresentano un substrato roccioso considerato un habitat ottimale per la colonizzazione delle comunità sessili ([12], [13], [14], [15], [17]).

L'oggetto di questo lavoro di stage è una particolare tipologia di masso impiegabile per la realizzazione di questo tipo di scogliere denominata *Reef Ball*. I *Reef Ball* sono elementi in calcestruzzo aventi una particolare forma a campana, cavi internamente, forati sulle pareti laterali ed assemblati tra loro per formare strutture sommerse. Il vantaggio associato all'impiego di *Reef Ball* risiede nel fatto che permettono di raggiungere, oltre l'obiettivo tecnico-funzionale tipico delle scogliere sofolte tradizionali, anche un obiettivo naturalistico-ecologico. Infatti, questi hanno la predisposizione ad essere delle scogliere "vive" ovvero è possibile impiantare, in appositi incavi, coralli, spugne o altri organismi, che ricoprono la superficie dell'unità; inoltre, la particolare forma e le correnti che si generano, rappresentano una forte forma di attrazione per pesci e microrganismi ([1], [16], [18]). Tali caratteristiche consentono ai *Reef Ball* di inserirsi in ambito litoraneo favorendo un miglioramento dell'habitat marino e un incremento della fruibilità ricreativa e balneare del litorale. Tra gli svantaggi associati all'impiego di questi elementi rientrano problemi di stabilità soprattutto in presenza di fondali sabbiosi ai quali si ovvia prevedendo la messa in opera degli stessi con sistemi di ancoraggio (quali materassi di fondazione, coni, spilli ecc..) da scegliere in funzione della tipologia di fondale ([19], [20], [21]). Un altro aspetto critico è dato dalla stima del coefficiente di trasmissione (definito come il rapporto tra l'altezza d'onda trasmessa a tergo della scogliera e quella incidente), parametro fondamentale per l'analisi dell'efficacia dell'intervento. Viene illustrato il metodo proposto dall'Università degli Studi di Napoli Federico II e denominato "*Conceptual Approach*" ([7], [8]). Questo metodo si compone di tre equazioni, da impiegare in funzione del rapporto tra la sommersenza della struttura, R_{ce} , e l'altezza d'onda incidente, H_{s1} .

I. REEF BALL

A. Caratteristiche fisiche, idrodinamiche e geometriche

I *Reef Ball* sono degli elementi in calcestruzzo *seafriendly* (pH 9) aventi una particolare forma a campana, cavi internamente, forati sulle pareti laterali ed assemblati tra loro per formare strutture sommerse. Nati per creare habitat marini sostenibili e per la riabilitazione di scogliere coralline naturali, i *Reef Ball* possono essere impiegati anche come sistemi di difesa

costiera. Infatti assemblati tra loro consentono di creare barriere frangiflutti sommerse.



Figura 2 Esempio di *Reef Ball* funzionale all'habitat marino (Fonte: www.reefball.org)

Una peculiarità degli elementi *Reef Ball* è la presenza di vuoti sulla superficie degli stessi che si ripercuote sul comportamento idrodinamico di questi moduli in calcestruzzo. Infatti questa caratteristica genera dei piccoli vortici i quali riducono la forza di galleggiamento ed apportano nutrienti.

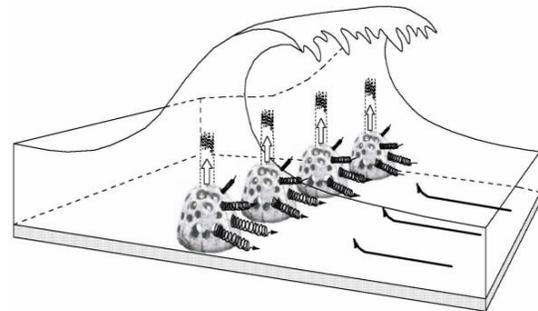


Figura 3 Schematizzazione comportamento idrodinamico dei *Reef Ball*

Quindi, il moto ondoso viene dissipato mediante la generazione di getti e vortici. Inoltre, si verifica il fenomeno dello *shoaling* ovvero le onde che si avvicinano alla linea di riva aumentano la loro altezza relativamente al diminuire della velocità; questo fenomeno può essere sfruttato dagli amanti degli sport acquatici con conseguente incremento dell'attrattiva di un sito.

I *Reef Ball* possono essere realizzati impiegando delle casseforme appositamente brevettate, dalle quali è possibile ottenere diverse configurazioni. In ogni caso, lo *Standard Style* è quello che meglio coniuga economicità, efficienza, stabilità e facilità costruttiva e di posa in opera. In particolare, esistono 9 dimensioni standard. Si riporta una tabella riassuntiva delle caratteristiche geometriche (Tabella 1).

Tabella 1 Dati tecnici Reef Ball (Fonte: www.reefballitalia.it)

Dati tecnici

Materiale: calcestruzzo Seafriendly (PH=9) – Superficie esterna: grezza (lavaggio) – Armatura metallica: esente

| | Diametro | Altezza | Peso | Volume cls | N° fori |
|----------------------|----------|---------|--------------|---------------------|---------|
| Goliath Booster Ring | 2,00 m | 1,00 m | 1816-2727 kg | 1,19 m ³ | 15-25 |
| Goliath | 1,83 m | 1,52 m | 1800-2700 kg | 1,00 m ³ | 25-40 |
| Super Ball | 1,83 m | 1,37 m | 1800-2700 kg | 1,00 m ³ | 22-34 |
| Ultra Ball | 1,83 m | 1,31 m | 1600-2000 kg | 0,70 m ³ | 22-34 |
| Reef Ball | 1,83 m | 1,22 m | 1350-1900 kg | 0,60 m ³ | 22-34 |
| Pallet Ball | 1,22 m | 0,90 m | 700-1000 kg | 0,25 m ³ | 17-24 |
| Bay Ball | 0,90 m | 0,61 m | 170-340 kg | 0,08 m ³ | 11-16 |
| Mini-Bay Ball | 0,76 m | 0,53 m | 70-90 kg | | 8-12 |
| Lo-Pro | 0,61 m | 0,46 m | 35-60 kg | | 6-10 |
| Oyster | 0,46 m | 0,30 m | 15-20 kg | | 6-8 |



I primi tre *Standard Styles* riportati in tabella generalmente sono impiegati esclusivamente come barriere soffolte.

I singoli moduli sono disponibili per diverse altezze, in particolare, da 30 cm fino a 1.52 m. Inoltre, predisponendo degli anelli è possibile raggiungere un'altezza di 2 m o più ([19], [20], [21]).

B. Campi di applicazione

Gli elementi *Reef Ball*, come già accennato, assolvono essenzialmente a una doppia funzione: proteggere il litorale dagli attacchi ondosi e favorire lo sviluppo di habitat idonei per gli organismi marini. Pertanto, i *Reef Ball* si prestano a svariati impieghi, come la protezione della costa, la ricostruzione di scogliere e barriere coralline, la definizione di percorsi di *snorkeling* e di *diving* e le attività ricreative da svolgersi in mare ([6], [9], [10]). I *Reef Ball* possono essere impiegati anche negli impianti di acquacoltura, in particolare, in impianti atti alla produzione di ostriche. Uno studio, condotto in Louisiana, ha dimostrato che l'aggiunta alla pasta cementizia, necessaria per la realizzazione di Reef Ball, di gusci tritati di ostriche o di semi di cotone favorisce maggiormente la crescita, sulla superficie dei Reef Ball, dei molluschi rispetto al solo calcestruzzo ([11]). Di seguito una serie di immagini (tratte dal sito www.reefball.org) che mostrano le possibili applicazioni di questi moduli (Figura 4).



Figura 4 Possibili applicazioni Reef Ball (Fonte: www.reefball.org)

C. Modalità costruttive e di posa in opera

I *Reef Ball* vengono costruiti gettando del calcestruzzo in una cassaforma particolare fatta in fibra di vetro la quale contiene al proprio interno, al centro, una boa circondata da palloncini gonfiabili di diverse dimensioni predisposti al fine di creare i vuoti.

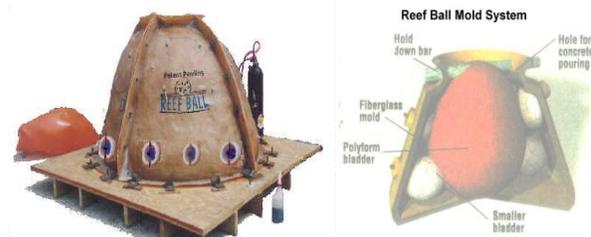


Figura 5 Cassero per Reef Ball (Fonte: www.reefball.org)

Prima di provvedere al getto di calcestruzzo, è necessario stendere del rivestimento in olio vegetale sulla superficie interna di tutto il modulo al fine di consentire al calcestruzzo di aderire alla superficie stessa. Per rimuovere la cassatura, occorre rilasciare la pressione dell'aria dalla camera d'aria. Poi, si provvede a rimuovere le parti che compongono la cassatura.



Figura 6 Scasseratura modulo Reef Ball (Fonte: www.reefball.org)

Quindi, si tampona leggermente la superficie del *Reef Ball* con una spazzola per rendere ruvida la superficie. Questa operazione rende più semplice l'adesione delle specie animali e vegetali sulla superficie dei *Reef Ball*. Gli elementi vengono trasportati sul luogo di posa con un'imbarcazione ed adagiati con l'ausilio di un galleggiante gonfiabile oppure posati con una gru.

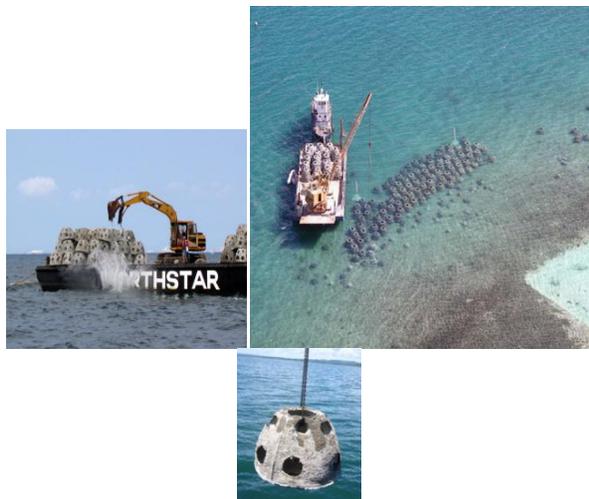


Figura 7 Posa elementi *Reef Ball* (Fonte: www.reefball.org)

In funzione della tipologia di fondale è opportuno prevedere idonei sistemi di ancoraggio; a tal fine la base di ogni *Reef Ball* è conformata in modo da prevedere più opzioni per il sistema di ancoraggio ([19], [20], [21]).



Figura 8 Base dei *Reef Ball* (Fonte: www.reefball.org)

Diversi sono i metodi di ancoraggio; i più comuni prevedono la predisposizione di coni, spilli e pali battuti di fondazione.



Figura 9 Ancoraggio con coni e spilli (Fonte: www.reefball.org)



Figura 10 Ancoraggio con pali battuti (Fonte: www.reefball.org)



Figura 11 Materassino di fondazione (Fonte: www.reefball.org)

D. La prima installazione in scala reale

La prima installazione dei *Reef Ball* si è avuta nel 1998 a sud della Repubblica Dominicana ([11]). In particolare, si è intervenuti per la stabilizzazione di due spiagge: la spiaggia del *Gran Dominicus Resort* a est del molo (a destra in Fig. 12) e la spiaggia dell'*Iberostar Resort* posta a ovest del molo (a sinistra in Fig. 12).



Figura 12 Inquadramento territoriale area di progetto della Repubblica Dominicana (Fonte: www.reefball.org)

Per la stabilizzazione di questa costa sono state predisposte circa 700 unità di elementi *Reef Ball* su tre file a formare una barriera frangiflutti sommersa. Le singole unità hanno un'altezza di 1.20 m con un diametro di base di 1.5/2 m ed un peso di 1600 – 2000 kg. Gli elementi *Reef Ball* sono stati posati a una profondità di circa 2m. Per l'ancoraggio si è fatto riferimento a tondi battuti in fibre di vetro essendo il fondale roccioso. L'efficacia della barriera sommersa in elementi *Reef Ball* viene mostrata in Fig. 13 dove vengono rappresentate le condizioni della spiaggia prima e dopo l'installazione dei *Reef Ball*.



Figura 13 Stesso tratto di spiaggia prima (sx) e dopo (dx) tre anni dall'installazione dei Reef Ball (Fonte: www.reefball.org)

Le foto riportate in Fig. 13 mostrano che il sistema di barriere sommerse ha innescato un accrescimento ed una stabilizzazione della spiaggia, come è possibile evincere anche dai dati riportati in Tabella 2.

Tabella 2 Variazioni nella linea di costa e nel volume di sabbia dal 1998 al 2001 (Fonte: www.reefball.org)

| Profilo | Cambiamento nella linea di costa [m] | Cambiamento nel volume di sabbia [m ³ /m] |
|---------|--------------------------------------|--|
| ovest | +10 | +25.65 |
| est | +13 | +44.25 |

Nell'autunno del 1998, poco dopo l'installazione, la stabilità della scogliera in elementi Reef Ball è stata messa alla prova quando la zona è stata investita da un uragano di terza categoria. A seguito di questo evento nessuna unità ha subito spostamenti o danneggiamenti.

Tenuto conto degli effetti soddisfacenti conseguiti dall'installazione di queste barriere soffolte in scala reale e in zone particolarmente predisposte ad eventi naturali straordinari quali gli uragani, altri progetti sono stati realizzati in tutto il mondo tant'è che la Reef Ball Foundation vanta la realizzazione di oltre 6000 progetti in più di 70 Paesi.

II. STIMA DEL COEFFICIENTE DI TRASMISSIONE

Dall'interazione di una barriera frangiflutti ed un'onda incidente, in generale, possono nascere due fenomeni: la riflessione e la trasmissione.

Il fenomeno della riflessione comporta che parte dell'energia di un'onda incidente venga riflessa. L'altezza dell'onda riflessa dipende dalle caratteristiche dell'ostacolo quali, ad esempio, la rugosità, la permeabilità e l'inclinazione della barriera investita. Ai fini di una corretta progettazione di una barriera frangiflutti occorre valutare il coefficiente di riflessione, k_r , definito come il rapporto tra l'altezza d'onda riflessa verso il largo e l'altezza incidente. Quando questo coefficiente assume valore unitario si parla di riflessione totale. La combinazione di onda riflessa e onda incidente può comportare il raddoppiamento dell'altezza d'onda risultante; pertanto, questo fenomeno va attentamente valutato in fase di progettazione.

Il fenomeno della trasmissione, invece, comporta la diffusione delle onde al di là di una barriera la quale genera delle onde all'interno dell'area da proteggere. Questo fenomeno può risultare dalla filtrazione dell'onda attraverso la barriera oppure dall'acqua che tracima la barriera. Il coefficiente di trasmissione, k_t , definito come il rapporto tra l'altezza d'onda trasmessa a tergo della scogliera e l'altezza incidente è un parametro fondamentale per la valutazione dell'efficacia di un intervento di difesa costiera mediante realizzazione di una barriera sommersa e, quindi, in sostanza è utile ai fini della verifica dell'intervento. Tale rapporto può variare tra 0 e 1 e, in particolare, al valore 0 corrisponde una condizione di trasmissione nulla mentre al valore 1 una condizione di trasmissione completa. In sostanza il coefficiente di trasmissione rappresenta la quantità di energia ondosa incidente trasferita al di là delle barriere frangiflutti. I fattori che maggiormente influenzano il coefficiente di trasmissione sono: la larghezza, il *freeboard*, la permeabilità e il grado di rollio e beccheggio della struttura.

Nel caso di strutture realizzate in elementi Reef Ball, le relazioni valide per la stima del coefficiente di trasmissione sono quelle proposte da Armono ([2], [3], [4], [5]) e relative a particolari disposizioni dei Reef Ball e quelle proposte dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II per un numero di configurazioni più ampio ([7], [8]). In quest'ultimo caso il modello di calcolo adottato è fisicamente basato, *Conceptual Approach*, e consta di tre equazioni da utilizzare in funzione del rapporto tra la sommersione della struttura e l'altezza d'onda incidente.

A. *Conceptual Approache applicato alle barriere soffolte in elementi Reef Ball*

Il *Conceptual Approach* (CA) è un modello di previsione per la stima del coefficiente di trasmissione ideato dall'Università degli Studi di Napoli Federico II ([7]).

Il punto di partenza di questo approccio per le strutture sommerse è costituito dall'equazione del bilancio di energia:

$$\frac{dPle}{db} = \Delta \quad (1)$$

dove: Ple rappresenta l'energia del moto ondoso per unità di larghezza in cresta della struttura;

db è un incremento infinitesimo della larghezza della corona;

Δ rappresenta l'energia media dissipata per unità di area della superficie orizzontale.

Dopo alcune operazioni algebriche si perviene alla seguente equazione differenziale la quale mette in relazione il coefficiente di trasmissione con i parametri della struttura e con i parametri dell'onda come la quota e la larghezza della cresta, l'altezza d'onda incidente e il periodo d'onda:

$$\frac{dK_t}{db} = -\frac{1}{G'} \frac{K_t^{5/2} H_i}{\sqrt{H_i L_0} R_c} \frac{1}{\left(1 + \frac{\lambda R_c}{K_t H_i}\right)^{0.5} \left(1 + \frac{K_t H_i}{\lambda R_c}\right)} \quad (2)$$

dove: L_o è la lunghezza d'onda di acque profonde; H_i è l'altezza d'onda incidente; λ è il rapporto tra l'altezza d'onda trasmessa e l'altezza d'onda a tergo della corona della barriera; R_c è il freeboard della cresta (differenza tra la profondità dell'acqua, d , e l'altezza della struttura, h_s); G' è il coefficiente globale di dissipazione il quale tiene conto di alcune costanti.

Questa equazione ha due soluzioni asintotiche. La prima si applica nel caso di barriere soffolte poggiate direttamente sul fondo ovvero quando $R_c/H_i \gg 1$. In questo caso risulta:

$$K_t = \frac{1}{(K_{i0})^{-1} + G_1' \frac{B}{\sqrt{H_i L_0}} \left(\frac{H_i}{R_c}\right)^{1.5}} \quad (3)$$

dove: B è la larghezza della corona e K_{i0} è il coefficiente di trasmissione per $B = 0$ ovvero per barriere triangolari. La seconda soluzione asintotica può essere ottenuta per il caso specifico di strutture che poggiano sulla cresta di una gettata tradizionale; in questo caso $R_c/H_i \ll 1$ e risulta:

$$K_t = \left(\sqrt{K_{i0}} - G_2' \frac{B}{\sqrt{H_i L_0}} \right)^2 \quad (4)$$

Si può osservare che questa relazione è totalmente indipendente dalla sommersenza relativa cioè dal rapporto R_c/H_i .

Nei casi intermedi, viene proposta una semplice interpolazione lineare tra le due precedenti soluzioni e che coinvolge il rapporto R_c/H_i . In particolare, si ottiene una relazione del tipo:

$$K_t = a \frac{R_c}{H_i} + b \quad (5)$$

È da sottolineare che nelle soluzioni asintotiche l'effetto del coronamento della struttura è rappresentato dalla variabile $B/(H_i L_0)^{0.5}$; in realtà essa può essere vista come la media geometrica dei due più comuni parametri di larghezza del coronamento utilizzati nei modelli di trasmissione e detti B/H_i e B/L_o .

In totale il modello presenta 6 parametri (K_{i0} , G' e i valori di R_c/H_i) che devono essere calibrati per la validità delle soluzioni asintotiche.

Il modello, inizialmente proposto e sviluppato per le onde regolari, è stato modificato per le onde irregolari semplicemente utilizzando l'altezza d'onda significativa H_{si} e il periodo di picco T_p .

Al fine di poter impiegare il *Conceptual Approach* per le barriere soffolte in elementi *Reef Ball*, sono state ri-definite le principali variabili associate alla struttura e coinvolte nel processo di trasmissione. In particolare si è definita una larghezza in cresta nominale, B_t , che nel caso di elementi *Reef Ball* posizionati direttamente sul fondale è definita come:

$$B_t = (n-1)D_r \quad (6)$$

mentre nel caso in cui gli elementi *Reef Ball* siano posizionati con la base rivolta verso l'alto risulta:

$$B_t = nD_r \quad (7)$$

dove D_r rappresenta il diametro degli elementi *Reef Ball* ed n è il numero di file di elementi *Reef Ball* adoperate.

Inoltre, viene introdotta un'altezza R_{ce} per tener conto del fatto che quando i moduli sono posizionati con la base rivolta verso l'alto, a causa dei vuoti che caratterizzano i *Reef Ball*, l'altezza risulta maggiore rispetto alla semplice sommersione geometrica. Pertanto viene definita questa altezza come la differenza tra l'altezza d'acqua e un'equivalente altezza della struttura, h_{se} . In particolare quando i moduli poggiano direttamente sul fondo allora h_{se} coincide con l'altezza del modulo stesso; quando, invece gli elementi *Reef Ball* sono posizionati con la base verso l'alto allora risulta:

$$h_{se} = h_{RB} (2\varphi_p - 0.5) \quad (8)$$

dove φ_p è un coefficiente relativo allo spessore ovvero è una sorta di grado di impacchettamento dei moduli.

Di seguito si illustra la procedura eseguita per la calibrazione delle Equazioni (3) e (4).

Nel piano $[B/(H_{si} L_{op})^{0.5}, K_t^{0.5}]$, l'Equazione (4) rappresenta una retta di intercetta $K_{i0}^{0.5}$ e inclinazione G_2' . La validità di questa soluzione asintotica è stata inizialmente testata plottando i dati sperimentali disponibili per diverse disposizioni dei moduli *Reef Ball* (ottenuti da tests su modello fisico eseguiti da due diversi laboratori americani -*Queen's University Coastal Engineering Research Laboratory* (Canada) e *USACE Engineering Research and Development Center Coastal and Hydraulics Laboratory* (USA) -) e controllando visivamente il trend lineare. In generale, si è riscontrato un buon adattamento quando il rapporto $R_{ce}/H_{si} \leq 0.4$ anche se i dati risultavano dispersi a causa della differente risposta di ogni layout. Questo problema potrebbe essere risolto assegnando ad ogni disposizione dei *Reef Ball* un appropriato indice di dissipazione. In ogni caso, è stato scelto un approccio alternativo ma equivalente per la soluzione di questo problema; in particolare, si è agito correggendo l'ampiezza della struttura, B_t , definendo l'ampiezza di coronamento efficace come:

$$B_t^* = \nu B_t \quad (9)$$

dove: ν rappresenta un fattore di configurazione; rappresenta cioè un' indicatore dell'energia specifica dissipata da ogni disposizione dei Reef Ball. In particolare ν tiene conto degli effetti della macroporosità: la presenza di un elevato numero di vuoti sulla superficie della barriera incrementa il numero di vortici capaci di dissipare l'energia del moto ondoso. Pertanto si è riscontrato che per configurazioni multistrato i valori di ν sono più grandi di 1.

In sostanza B_t^* rappresenta un'ampiezza di coronamento fittizia che stabilisce un'equivalenza, in termini di dissipazione, tra i Reef Ball e le barriere soffolte tradizionali. Questo stratagemma conduce ad un soddisfacente raggruppamento dei dati intorno alla retta di equazione di seguito riportata (Figura 13) :

$$\sqrt{K_t} = -0.2469 \frac{B_t^*}{\sqrt{H_{si} L_{0p}}} + 0.9474 \quad (10)$$

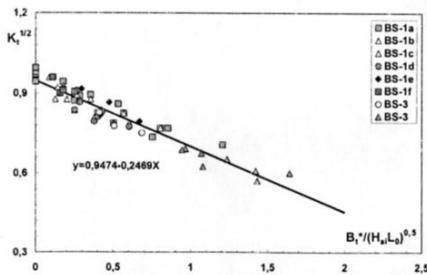


Figura 13 Raggruppamento dei dati sperimentali intorno alla retta di equazione (10) -Buccino M., Calabrese M., Del Vita I., 2013-

E' stato osservato che il coefficiente di dissipazione è identico a quello trovato da Buccino e Calabrese (2007) per le barriere convenzionali ([7]).

Quindi l'Equazione (4) calibrata e valida per $R_{ce}/H_{si} \leq 0.4$ è:

$$K_t = \left[-0.2469 \min \left(4; \frac{B_t^*}{H_{si} L_{0p}} \right) + 0.9474 \right]^2 \quad (11)$$

E' da osservare che il limite superiore di 4 semplicemente corrisponde allo zero della parabola rappresentata dall'Equazione (4).

Ad ogni modo, sono necessari più dati per testare la validità di questa formula per valori più grandi del rapporto $B_t^*/(H_{si} L_{0p})^{0.5}$.

L'Equazione (3) è una funzione di due variabili: la larghezza relativa della struttura e la sommergezza relativa. In questo caso, i dati sono stati inizialmente divisi in due gruppi in funzione del valore assunto dal rapporto H_{si}/R_{ce} (tra 0.3 e 0.4, tra 0.4 e 0.5 e così via). Nell'intervallo (0.68 - 1.1), l'Equazione (3) risulta ragionevolmente verificata e rimane così fino al valore di circa 1.4. Quindi, si è assunto che l'Equazione (3) sia ipoteticamente valida per rapporti H_{si}/R_{ce} tra 0.68 e 1.4 che corrispondono a valori di sommergezza relativa, R_{ce}/H_i , tra 0.71 e 1.47.

L'equazione in forma calibrata è presentata di seguito.

$$K_t = \frac{1}{1 + 0.3 \left(\frac{H_{si}}{R_{ce}} \right)^{1.5} \frac{B_t^*}{\sqrt{H_{si} L_{0p}}}} \quad (12)$$

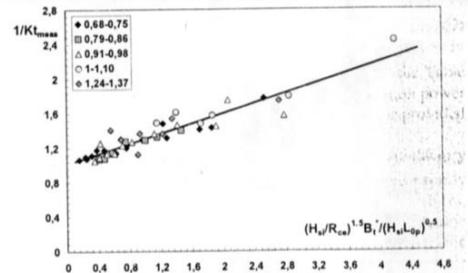


Figura 14 Raggruppamento dati sperimentali intorno alla retta di equazione (12) -Buccino M., Calabrese M., Del Vita I., 2013-

In questa equazione il fattore di dissipazione, 0.3, è ancora molto simile a quello trovato per le barriere convenzionali (pari a 0.33).

Il modello di calcolo per la stima del coefficiente di trasmissione, in sostanza, consta di tre equazioni differenti da impiegare in funzione del rapporto tra la sommergezza della struttura, R_{ce} , e l'altezza d'onda incidente, H_{si} . Vengono discussi due casi: il primo prevede che gli elementi Reef Ball siano poggiati direttamente sul fondo; l'altro assume che i moduli Reef Ball siano posati sul coronamento di una gettata tradizionale.

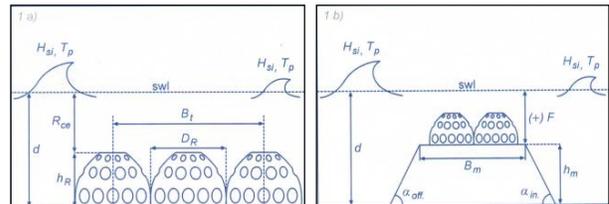


Figura 15 Schema moduli Reef Ball posizionati sul fondo (a sinistra) e sulla cresta di una gettata tradizionale (a destra) - Fonte Reef Ball Italia

Nel primo caso le formule di calcolo sono le seguenti:

$$K_t = \frac{1}{1 + 0.3 R^{*-1.5} b^*} \text{ per } R^* \geq 0.71 \quad (13)$$

$$K_t = \left[-0.25 \min(4; b^*) + 0.9474 \right]^2 \text{ per } R^* \leq 0.4 \quad (14)$$

$$K_t = a R^* + b \text{ per } 0.71 \geq R^* > 0.4 \quad (15)$$

In cui:

$$R^* = \frac{R_{ce}}{H_{si}}$$

$$b^* = \frac{\nu(n-1)D_r}{\sqrt{H_{si} L_{0p}}}$$

In b^* , D_R è il diametro di base degli elementi; n è il numero di file adoperate; L_{0p} è la lunghezza d'onda calcolabile, noto il periodo T_p , dalla relazione approssimata $L_{0p} = 1.56T_p^2$; ν è un coefficiente correttivo che vale 1 se gli elementi sono perfettamente accostati tra loro e vale 0.6 se gli elementi sono distanziati.

I coefficienti a e b dell'Equazione (15) si ottengono come interpolazione lineare delle prime due equazioni (13) e (14).

Le formule di cui sopra possono essere graficizzate. Quindi, per velocizzare la stima del coefficiente di trasmissione è possibile utilizzare l'abaco di seguito riportato in Figura . Infatti calcolati R^* e b^* per intersezione si ottiene il corrispondente valore di K_t in ordinate.

Le equazioni su riportate e il corrispondente abaco sono validi anche quando i moduli *Reef Ball* sono posati sul coronamento di una gettata però a condizione che la sommergezza della gettata sia maggiore della sua altezza ($F \geq hm$). Quando questa condizione non risulta verificata ovvero quando $F < hm$ allora per la stima del coefficiente di trasmissione si utilizza la seguente formula:

$$K_t = \frac{1}{1.18 \left(\frac{F}{H_{si}}\right)^{-0.12} + G_1 \left(\frac{F}{H_{si}}\right)^{-1.5} \frac{B_m}{\sqrt{H_{si} L_{0p}}}} \text{ per } 0.6 \leq \frac{F}{H_{si}} \leq 3 \quad (16)$$

Dove: G_1 è un coefficiente di dissipazione dato da: $G_1 = 0.33 \exp(p)$ essendo p la percentuale del coronamento della gettata effettivamente occupato dai *Reef Ball*.

Può risultare conveniente l'impiego dei seguenti grafici (Figura) che si riferiscono a differenti valori di p (in particolare $p=0.5$, $p=0.75$, $p=1$). Tali curve sono parametrate per diversi valori del coefficiente: $f = F/H_{si}$.

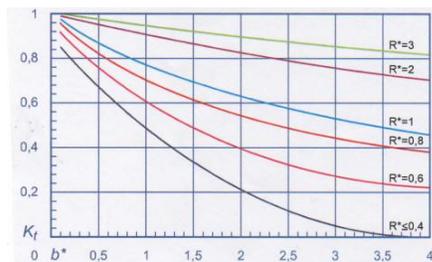


Figura 16 Calcolo del coefficiente di trasmissione in funzione di b^* (Fonte: Reef Ball Italia)

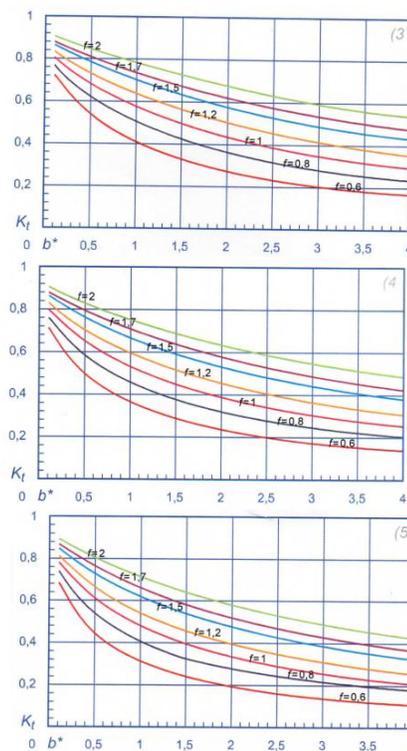


Figura 17 Calcolo del coefficiente di trasmissione in funzione di b^* e per $p=0.5$ (3); $p=0.75$ (4); $p=1$ (5) - (Fonte: Reef Ball Italia)

III. CONCLUSIONI

Le barriere soffolte in elementi *Reef Ball* (ovvero moduli in calcestruzzo *seafriendly* dalla caratteristica forma a campana, cavi internamente e forati lungo le pareti laterali) permettono di raggiungere, oltre l'obiettivo tecnico-funzionale tipico delle scogliere soffolte tradizionali, anche un obiettivo naturalistico-ecologico. Infatti hanno la predisposizione ad essere delle scogliere "vive" e proprio la particolare conformazione di questi elementi fa sì che gli stessi si prestino anche al miglioramento dell'habitat e della biodiversità dell'ambiente marino nonché allo sviluppo di attività ricreative quali gli sports acquatici come il *diving* o il *surfing*.

Il grado di protezione garantito da una barriera soffolta viene stimato attraverso il coefficiente di trasmissione K_t che rappresenta il rapporto l'altezza d'onda a tergo dell'opera e l'altezza d'onda incidente sulla barriera. Tale rapporto può variare tra 0 e 1 e, in particolare, al valore 0 corrisponde una condizione di trasmissione nulla mentre al valore 1 una condizione di trasmissione completa. In sostanza il coefficiente di trasmissione rappresenta la quantità di energia ondosa incidente trasferita al di là delle barriere frangiflutti. Ai fini della stima di questo importante parametro nel caso di barriera soffolta costituita da elementi *Reef Ball* è stato illustrato il metodo proposto dall'Università degli Studi di Napoli Federico II e denominato "Conceptual Approach". Questo metodo si compone di tre equazioni, da impiegare in funzione del rapporto tra la sommergezza della struttura, R_{ce} , e

l'altezza d'onda incidente, H_{si} , equazioni che si sintetizzano in un abaco che consente la rapida stima del coefficiente di trasmissione.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' – TESSA".

Desidero ringraziare il CNR-IAMC di Napoli per l'opportunità di una crescita personale e professionale e l'ENEA Centro Ricerche di Portici per la disponibilità e l'accoglienza riservatemi durante il periodo di stage.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Ansley H., Bailey C. M., Bell M., Artificial Reef Subcommittees of the Atlantic and Gulf States Marine Fisheries Commissions, (2004) "Guidelines for marine artificial reef materials", A joint publication of the Gulf and Atlantic States Marine Fisheries Commissions, 121, Second Edition 2004
- [2] Armono H.D. (2002), "Hemispherical Shaped Artificial Reefs", Ph.D. thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada
- [3] Armono H.D., Hall K. R., Swamidias A. S. J. (2001), "Wave field around hemispherical shape artificial reefs used for fish habitat", Proceedings of Canadian Coastal Conference 2001
- [4] Armono H.D., Hall K. R. (2003), "Wave transmission on submerged breakwaters made of hollow hemispherical shape artificial reefs", Proceedings of 31st annual conference of the Canadian Society for Civil Engineering
- [5] Armono, H.D. (2006), "The study of parameter influence on wave transmission through hemispherical artificial reefs", Proceedings of Coastal Zone Asia Pacific Conference, CZAP 2006, Tuktoyaktuk, Northwest Territories, Canada
- [6] Baine M. (2001), "Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance", *Ocean & Coastal Management*, 44, 241-259
- [7] Buccino M., Calabrese M. (2007), "Conceptual Approach for Prediction of Wave Transmission at Low-Crested Breakwaters", *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 133 (3), 213-224
- [8] Buccino M., Del Vita I., Calabrese M. (2013), "Predicting wave transmission past Reef Ball submerged breakwaters", *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, 171-176.
- [9] Harris L. E., (2001) "Submerged reef structures for habitat enhancement and shoreline erosion abatement", *Coastal Engineering Technical Note*, U.S. Army Corps of Engineers III -XX
- [10] Harris L. E., (2007) "Designed Reefs Coastal Stabilization and Reef Restoration", www.artificialreef.org
- [11] Harris L.E., (2009) "Artificial Reefs for Ecosystem Restoration and Coastal Erosion Protection with Aquaculture and Recreational Amenities", *Reef Journal*, 1, 235-246
- [12] ISPRA (2007), Atlante delle opere di sistemazione costiera, Manuali e Linee Guida.
- [13] ISPRA, 2011, Annuario dei dati ambientali
- [14] ISPRA, 2012, Annuario dei dati ambientali
- [15] ISPRA, 2013, Annuario dei dati ambientali
- [16] Lan C. H., Chen C. C., Hsui C. Y., (2004) "An approach to design spatial configuration of artificial reef ecosystem", *Ecological Engineering*, 22, 217-226
- [17] Quaderni Ispra 2012 "Le strutture sommerse per il ripopolamento ittico e la pesca ("barriere artificiali")
- [18] Sherman R. L., Gilliam D. S., Spieler R. E., (2002) "Artificial reef design: void space, complexity, and attractants", *ICES Journal of Marine Science*, 59, S196-S200
- [19] www.reefball.org
- [20] www.reefballitalia.it
- [21] www.reefinnovation.com

Caratterizzazione e mappatura di habitat bentonici: esempi dall'offshore settentrionale dell'Isola di Capri (Golfo di Napoli, Tirreno meridionale)

Marinella De Lauro¹

¹ Istituto per l'Ambiente Marino Costiero -IAMC-CNR
Napoli, Italia
marinella.delauro@iamc.cnr.it

Crescenzo Violante¹

¹ Istituto per l'Ambiente Marino Costiero -IAMC-CNR
Napoli, Italia
crescenzo.violante@iamc.cnr.it

Sommario— Questo lavoro presenta i risultati di uno studio riguardante la caratterizzazione e la mappatura degli habitat bentonici (*habitat mapping*) di un'area marina ubicata al largo dell'isola di Capri, nel Golfo di Napoli. Lo studio si basa su dati geofisici marini acquisiti con sistemi batimetrici multifascio (Multibeam) e sonde a scansione laterale (Sidescan Sonar), opportunamente integrati con dati di tipo sedimentologico e informazioni sulle biocenosi bentoniche ottenuti tramite campionamenti di fondo e telecamera filoguidata (ROV). I dati acquisiti hanno consentito di ottenere un rilievo accurato della morfologia e della composizione del fondale ad una scala di elevato dettaglio (1:5.000), che ha permesso di delineare gli habitat nella loro diversità e complessità. Gli habitat bentonici sono stati individuati e cartografati tenendo conto della forte relazione esistente tra caratteri geologici e geomorfologici dei fondali marini e tipologia e distribuzione delle comunità biologiche. L'approccio utilizzato ha consentito di realizzare una serie di carte tematiche, che costituiscono un importante supporto scientifico per le politiche riguardanti la gestione dell'ambiente marino. In particolare, i risultati ottenuti forniscono strumenti utili per la progettazione e la gestione di aree marine protette e per gli interventi di tutela e monitoraggio di habitat prioritari, ovvero per la valutazione ambientale di aree sottoposte ad intensa attività antropica.

Keywords— *Habitat mapping; comunità bentoniche; Multibeam; Sidescan sonar; geomorfologia.*

INTRODUZIONE

Informazioni e studi riguardanti gli ambienti marini sono di fondamentale importanza per la gestione degli ecosistemi naturali e per le risorse ad essi collegate. Gli ecosistemi naturali forniscono beni primari (cibo, carburanti, fibre etc.) e la loro tutela, relativamente alle pressioni di natura antropica, è riconosciuta come un obiettivo strategico. La direttiva 2008/56/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 17 giugno 2008, stabilisce un quadro normativo per il raggiungimento di un "buono stato ecologico" da ora al 2020 delle acque marine di cui gli Stati membri sono responsabili.

In tale contesto, un aspetto rilevante riguarda la caratterizzazione ecologica dei fondali marini basata sull'identificazione e la mappatura degli habitat bentonici che, per la loro maggiore strutturazione rispetto all'ambiente pelagico, per la relativa stabilità spazio-temporale e per l'efficacia nel registrare alterazioni ambientali ha ottimi riscontri in cartografia [1].

Il termine habitat nel tempo ha assunto diversi significati ed è tuttora usato con accezioni differenti. Da un punto di vista strettamente biologico, l'habitat è l'ambiente naturale in cui vive una singola specie [2]. Nelle recenti direttive, atti legislativi e documenti europei l'habitat è definito come "l'ambiente fisico (biotopo) con la propria comunità biologica (biocenosi)" [3];[4]. Quest'ultima definizione è stata adottata nel presente lavoro e rappresenta il concetto base su cui è stato effettuato il riconoscimento e la mappatura degli habitat bentonici.

Il termine biocenosi fu coniato nel 1877 dal tedesco Karl Möbius che, esaminando un banco di ostriche, individuò: "una biocenosi o un superorganismo" complesso come "una comunità di esseri viventi e di piante in cui l'insieme di specie e di individui, mutuamente limitato e selezionato rispetto alle condizioni ambientali medie, perpetua, attraverso la riproduzione, il possesso di un ben definito territorio [5]. Nel 1908 Friedrich Dahl, collega di K. Möbius, conì il termine "biotopo" come un insieme di fattori, che determinano le condizioni fisiche di una biocenosi [6]. Successivamente Pérès e Picard ripresero il concetto di biocenosi di Möbius stressando il legame tra biocenosi e biotopo. Quest'ultimo rappresenta un'area geografica di superficie e volume variabili, avente condizioni ambientali dominanti omogenee.

Numerosi autori hanno integrato o parzialmente modificato la definizione di Pérès e Picard [7]; [8]; [9]; [10]; [11]; [12], che resta comunque il principale punto di riferimento per lo studio del benthos mediterraneo, principalmente utilizzata per la costruzione di mappe bionomiche.

Negli ultimi anni le tecniche geofisiche tradizionalmente utilizzate per lo studio geologico dei fondali marini hanno significativamente contribuito alla definizione e alla caratterizzazione degli habitat e dei paesaggi bentonici [13]; [14]; [15]; [16]; [17]; [18]. Allo stato attuale, la gran parte delle classificazioni come il sistema EUNIS in Europa, le linee guida per le Aree Marine Protette della Nuova Zelanda, la Bioregionalizzazione Marina in Australia e la classificazione NOAA CMECS negli Stati Uniti, definiscono gli habitat e i paesaggi marini in base alle loro caratteristiche topografiche, geologiche, oceanografiche e biologiche. Ognuna di tali caratteristiche viene identificata e cartografata separatamente e successivamente combinata con le altre a seconda delle necessità e degli obiettivi da raggiungere [19].

Questo lavoro si basa su indagini geofisiche opportunamente tarate con prelievi di fondo di dettaglio (scala 1:5000), effettuate in un settore marino a nord di Capri (Golfo di Napoli), al fine di ottenere carte tematiche innovative, che illustrano la distribuzione delle componenti fisiche e biotiche degli ecosistemi bentonici [20]; [21]; [22]; [24]; [25] [26]. In particolare, la carta degli habitat bentonici è stata costruita sfruttando la strette relazioni esistenti tra l'ambiente geologico e la distribuzione degli organismi bentonici [27]; [28]; [29].

Lo studio è stato sviluppato nell'ambito di uno stage di perfezionamento previsto dal PON-OTTIMA, supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' - TESSA", sotto la direzione del Dott. Crescenzo Violante, tecnologo presso l'IAMC-CNR di Napoli [30].

I. MATERIALI E METODI

A. Acquisizione ed elaborazione dei dati di backscattering

I dati di *backscattering* (intensità del segnale di ritorno) sono stati acquisiti con sistema *Sidescan Sonar* costituito da:

- *tow fish* digitale modello EdgeTech Df 1000 con doppia frequenza operativa (100/500 KHz) e risoluzione di immagine a 12 bit, operativo fino a 1000 m, trasportato a traino tramite *remote control*;
- cavo coassiale lungo 1500 m;
- unità di controllo e di potenza.

L'acquisizione delle immagini acustiche al largo di Capri è stata effettuata nel mese di febbraio del 2000 dal personale dell'IAMC-CNR [31]; [32] a bordo della N/O Thetis del CNR.

Il sistema di rilevamento è stato configurato con una frequenza di lavoro di 100 kHz e un *range* di 150 m, mentre la spaziatura tra le linee di acquisizione (*overlap*) è stata di circa di 250 m. Ciò ha consentito una sovrapposizione di circa 30% tra due coperture acustiche (*swath*) adiacenti. Il posizionamento delle registrazioni è stato effettuato con sistema DGPS e corretto attraverso l'eliminazione dell'errore di *layback*.

Il rilievo è stato effettuato lungo linee di navigazione disposte parallelamente alle curve batimetriche in un settore compreso tra Punta del Capo a Punta Trasete (Isola di Capri).

I dati acquisiti con sistema Sidescan Sonar sono stati elaborati ad una risoluzione di 0.5 m utilizzando i software Isis 6.4 e DelphMap 2.3 (Triton Inc.), che hanno consentito la costruzione di mappe di *backscattering* e di fotomosaici delle immagini acustiche del fondo mare, che descrivono la distribuzione dei caratteri acustici del fondale (Fig. 4).

B. Acquisizione ed elaborazione dei dati batimetrici multifascio (Multibeam)

I dati batimetrici al largo di Capri sono stati acquisiti a bordo della N/O Thetis del CNR utilizzando un Multibeam SeaBat 8101 (Racal Inc.), con frequenza di lavoro di 240 kHz a profondità d'acqua comprese tra 10 e 150 m e successivamente elaborati dal personale dell'IAMC-CNR [33]; [34].

Il sistema utilizzato comprende i seguenti componenti:

- ✓ un sensore di movimento (MRU), per bilanciare gli effetti del rollio, del beccheggio e delle variazioni di quota dell'imbarcazione (*pitch, roll, heave*);
- ✓ un giroscopio (Robertson SGB 1000S) che definisce l'orientamento dell'imbarcazione rispetto al nord magnetico;
- ✓ un sonda multiparametrica (CTD) che permette la calibrazione dello strumento rispetto alla velocità delle onde acustiche nell'acqua;
- ✓ un mareografo ad alta precisione che permette di calibrare le misure delle profondità d'acqua rispetto alle variazioni del livello del mare controllate dalle maree.

La visualizzazione e l'analisi dei dati batimetrici e di *backscattering* è stata effettuata con l'ausilio del software Global Mapper 13, che lavora in ambiente GIS.

La risoluzione dei dati ha permesso di ottenere un Modello Digitale del Terreno (DTM) con *grid* di 5x5 m (Fig. 7).

C. Campionature di fondo

La campionatura e le indagini subacquee sono state effettuate mediante l'utilizzo della benna. È stata usata una benna tipo "Van-Veen" di dimensioni 20x20x40 cm, munita di due sportelli superiori, che consentono il prelievo della parte più superficiale dei sedimenti.

Questo strumento ha permesso di effettuare campionature rapide, di ottimizzare il tempo nave a disposizione e di ottenere un buon recupero di sedimento.

I campioni al largo di Capri sono stati prelevati e analizzati nel 2000 a bordo della N/O Thetis del CNR da personale dell'IAMC-CNR [31]. Nel presente studio sono stati utilizzati 11 campionamenti tra quelli disponibili a profondità comprese tra 15 e 110 m (Fig. 1).

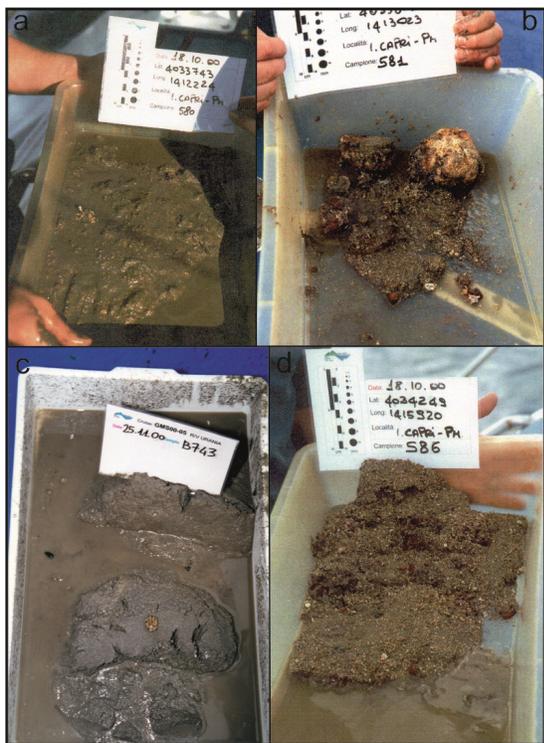


Fig. 1 - Campionamenti di fondo: **a.** Sabbia bioclastica medio grossa in matrice pelitica. **b.** Sabbia grossolana bioclastica in matrice di sabbia fine. **c.** Sabbia fine bioclastica. **d.** Sabbie organogene.

Inoltre la caratterizzazione biologica specifica dei fondali fino ai 30 m è stata effettuata sulla base di documentazione fotografica gentilmente fornita dal Dott. Andrea Sgrosso e dal Dott. Carlo Donadio dell'Università "Federico II" di Napoli. (Fig. 2).



Fig. 2 - Immagini subacquee: **a.** Prateria a Posidonia. In primo piano un esemplare di *Pinna Nobilis*. **b.** Ondulazioni di fondo (ripple) in sabbie ghiaiose. **c.** Biocostruzioni coralligene su roccia.

II. RISULTATI

A. *Facies acustiche*

I dati di *backscattering* sono stati utilizzati per ottenere informazioni dettagliate sulla natura geologica e sulla composizione biologica delle aree investigate. L'analisi e l'interpretazione della mappa del *backscattering* (Fig. 4) elaborata per il settore settentrionale dell'isola di Capri ha consentito di individuare 11 facies acustiche associate sia a fondi duri che mobili (Fig. 3).



Fig. 3 – Esempi di facies acustiche (per la spiegazione si veda il testo): **a.** Facies del tipo 9. **b.** Facies del tipo 7. **c.** Facies del tipo 8.

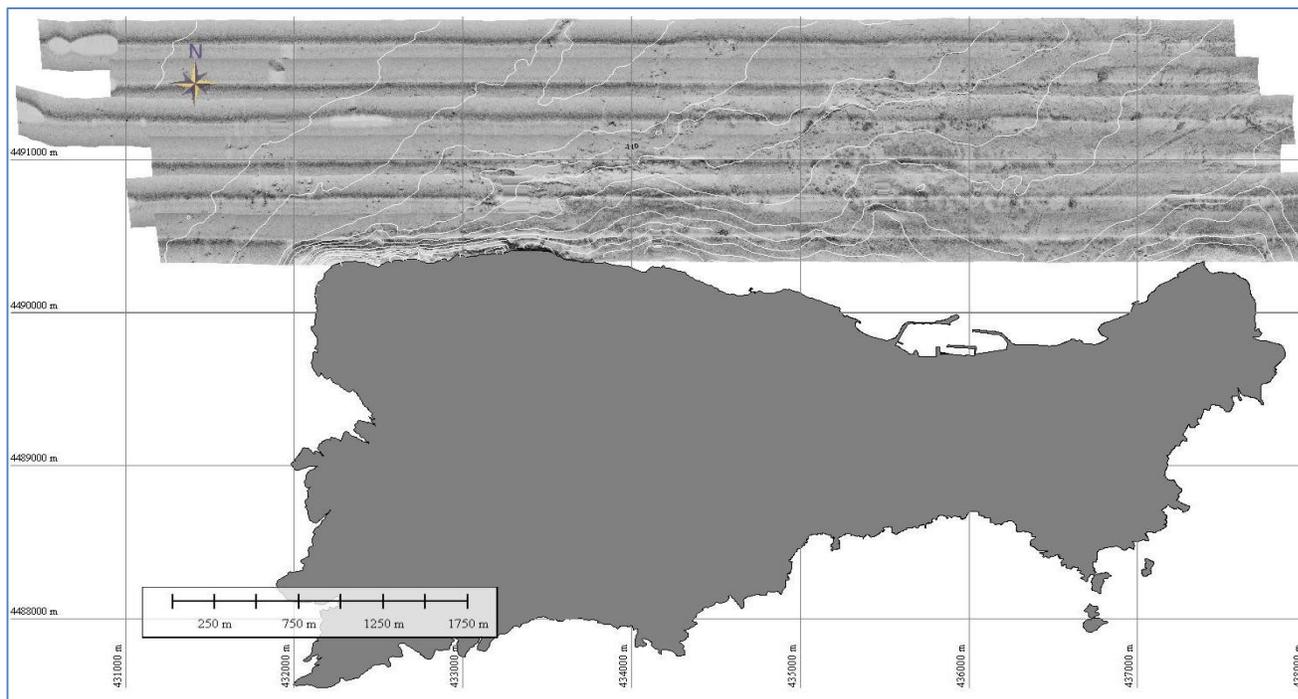


Fig. 4 - Mappa del backscattering dell'area marina compresa a nord dell'isola di Capri (Golfo di Napoli). Le aree più scure corrispondono a più alto backscattering.

Delle 11 facies individuate due sono associate a fenomeni di instabilità gravitativa, una corrisponde al substrato roccioso, cinque di esse sono state identificate sulla base di differenze tessiture, due sono in relazione alla presenza di biocostruzioni, una è il risultato di vegetazione di fondo.

In generale si osserva una generale diminuzione di granulometria procedendo da costa verso largo, a cui si associa un aumento del contenuto pelitico nel settore nord-occidentale dell'isola di Capri. Coperture biodetritiche, costituite da sabbie e ghiaie organogene, si sviluppano a profondità comprese tra i 40 e i 95 m, dove si ritrovano elevate percentuali di bioclasti ed elementi organogeni che si alternano a biocostruzioni di coralligeno e in alcuni casi a roccia affiorante e subaffiorante ed a massi e blocchi di dimensioni metriche.

Da un punto di vista ambientale i caratteri sedimentologici derivanti dall'analisi dei campioni del fondo e dall'interpretazione delle immagini acustiche suggeriscono fondali sotto-alimentati, in cui gran parte dei sedimenti viene prodotta *in situ* da un'intensa attività biologica. Tali condizioni di sotto-alimentazione sono favorite anche dalla presenza diffusa di substrato roccioso nel primo sottofondo [32].

L'interpretazione integrata dei dati geofisici ha consentito di costruire una mappa della composizione del substrato in scala 1:5000, che ha evidenziato la presenza di diverse facies (Fig.5):

1) Facies a zone puntiformi con elevato *backscatter* associate ad aree con *backscatter* variabile (massi metrici):

massi isolati con diametro metrico derivanti da crolli/valanghe di detrito di origine subaerea sono localizzati ad una profondità comprese tra 30 e 100 m a largo di Punta Vivara su una superficie di 0.25 kmq.

2) Facies a strutture sub-circolari di dimensioni variabili altamente riflettenti associate ad aree con *backscatter* variabile (blocchi plurimetrici):

blocchi isolati con diametro plurimetrico derivanti da crolli localizzati ad una profondità di circa 100 m a largo di Punta dell'Arcera (isola di Capri).

3) Ombre acustiche associate ad elevato *backscatter* (roccia affiorante):

aree di fondo caratterizzate da presenza di substrato roccioso sono altamente riflettenti e individuabili per la presenza di ombre acustiche.

4) Facies a *backscatter* basso e omogeneo (peliti sabbiose):

Depositi pelitici con frazione sabbiosa che rispondono acusticamente in modo molto omogeneo caratterizzano i fondali a profondità maggiori di circa 100 m .

5) Facies a *backscatter* medio-alto e disomogeneo (sabbia ghiaiosa organogena):

questa facies si associa a fondi mobili formati da sabbie organogene e ghiaie eterometriche presenti fino a circa - 100 m.

6) Facies a *backscatter* alto e disomogeneo (ghiaia sabbiosa organogena):

questa facies è ricollegabile a sedimenti grossolani formati da ghiaie e sabbie organogene, particolarmente abbondanti fino a circa - 25 m di profondità.

7) Facies a zone puntiformi con elevato *backscatter* e ombre acustiche associate a *backscatter* medio-alto (coralligeno infangato):

aree di fondo caratterizzate da presenza di coralligeno con coperture fangose sono presenti a profondità superiore ai 100m.

8) Facies a zone subcircolari e/o allungate ad *backscatter* elevato e disomogeneo associate a ombre acustiche (coralligeno con sabbie organogene):

questa facies è associata ad aree di fondo comprese tra -80

e -120 m di profondità caratterizzate da elevata produzione biologica sotto forma di biocostruzioni coralligene.

9) Macchie eterogenee ad elevato *backscatter* (coperture di Fanerogame marine - *Posidonia oceanica*):

facies caratteristica di *Posidonia oceanica* in macchie isolate o a formare praterie, presente fino a una profondità di circa 30 m. Le sottili foglie della *Posidonia* interagiscono in modo differente con le onde acustiche, generando aree a *backscattering* generalmente elevato e piuttosto eterogeneo.

10) Facies a *backscatter* medio-basso e disomogeneo (sabbie pelitiche):

sabbie costituite da percentuali variabili di elementi organogeni e bioclastici in matrice pelitica si ritrovano a profondità comprese tra 50 e 100 m.

11) Facies a *backscatter* basso e omogeneo (pelti sabbiose):

depositi fangosi con frazione sabbiosa variabile rispondono acusticamente in modo molto omogeneo; si ritrovano a profondità maggiori di 100 m.

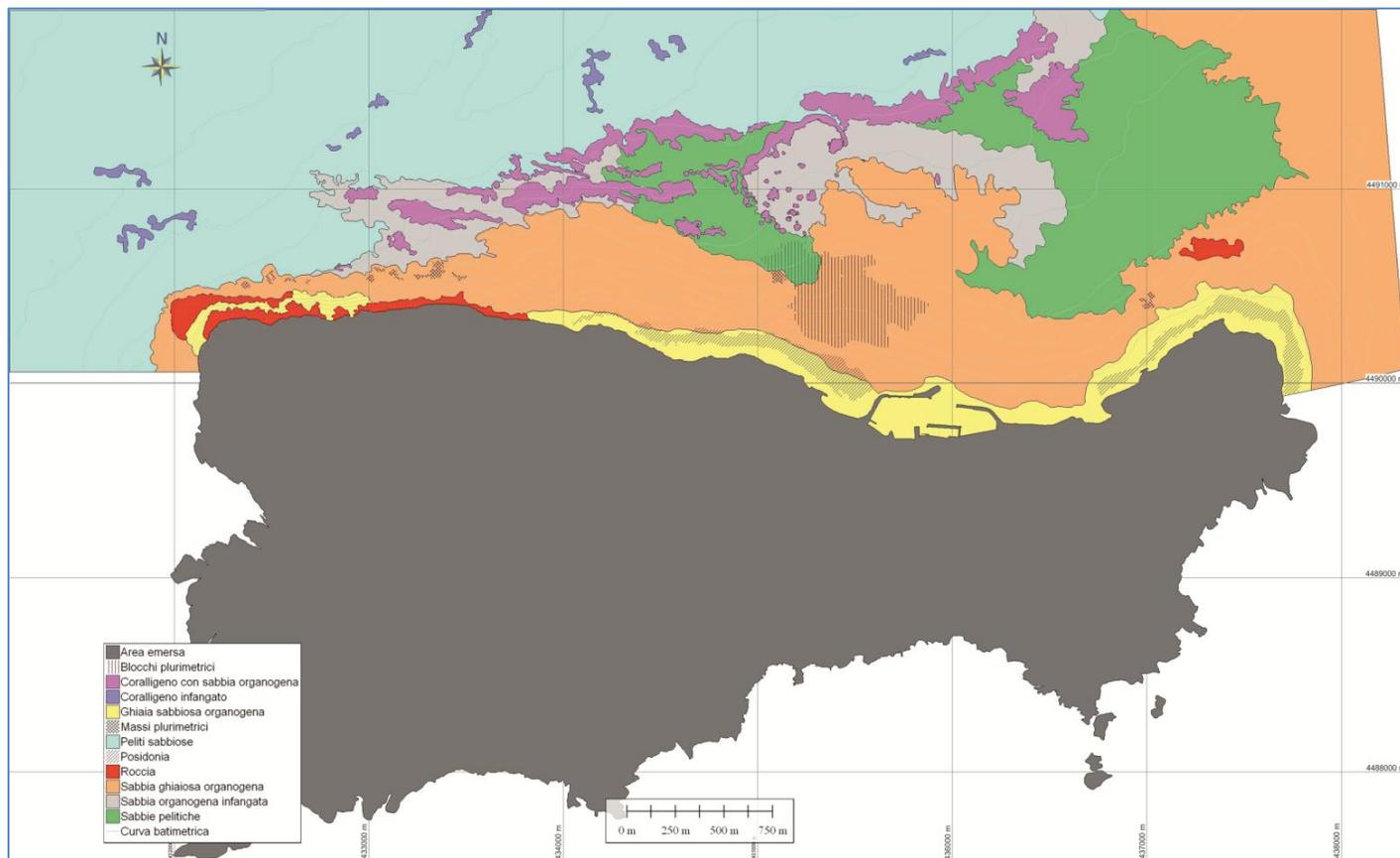


Fig. 5 - Isola di Capri offshore settentrionale - Mappa del substrato 1:5000

B. Mappa delle geoforme

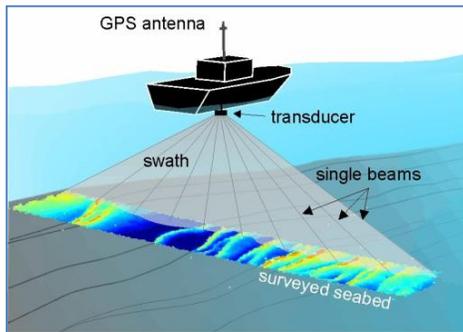


Fig. 6 - Rilievo batimetrico con sistema Multibeam

I dati batimetrici Multibeam (Fig. 6 e Fig. 7) sono stati utilizzati per ottenere informazioni dettagliate sulla morfologia delle aree investigate.

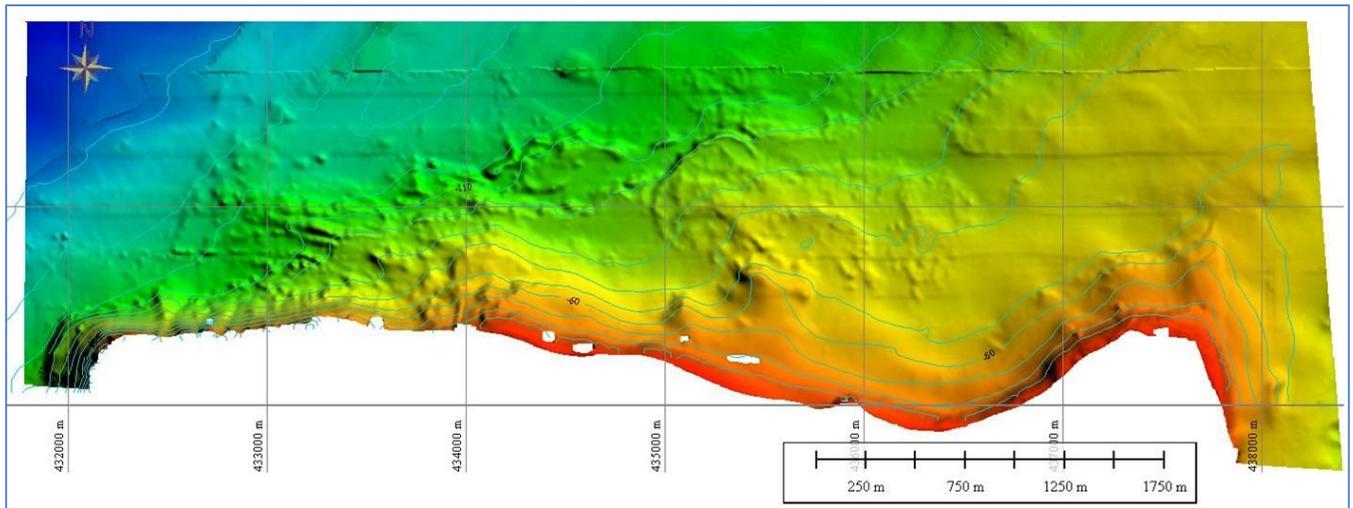


Fig. 7- Rappresentazione in rilievo ombreggiato del fondale marino a largo dell'Isola di Capri (settore settentrionale). Dati da De lauro et al., 2000 [12]

Lo studio delle pendenze e l'interpretazione in chiave morfologica dei dati ha consentito l'individuazione di 5 tipi di geoforme qui di seguito descritte (Fig.8):

1) Banco: Rilievo roccioso di modesta elevazione ed estensione, di forma variabile, che localmente mostra forme derivanti dall'erosione in ambiente semi sommerso durante le fasi di basso stazionamento del livello marino nel Pleistocene-Olocene.

2) Terrazzo: superficie sub-orizzontale o debolmente inclinata derivante dall'erosione in ambiente semi sommerso durante le fasi di basso stazionamento del livello marino nel Pleistocene-Olocene

3) Bordo: struttura costituita dalla sporgenza di substrato roccioso che può delimitare un terrazzo.

4) Piana: fondo su-orizzontale o a debole inclinazione.

5) Pendio: superficie da moderatamente a poco inclinata.

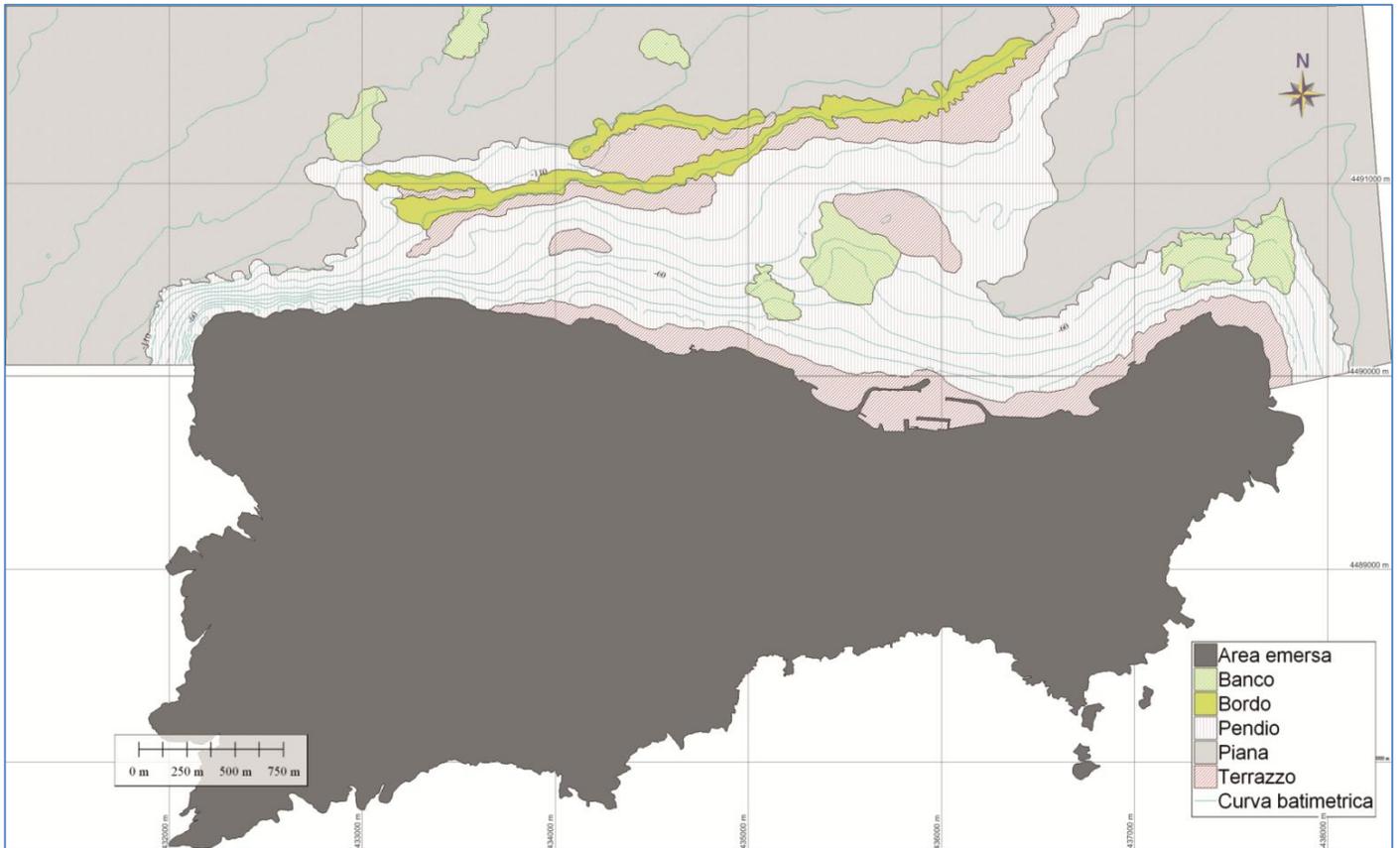


Fig. 8 - Isola di Capri offshore settentrionale - Mappa delle geoforme 1:5000

C. Caratterizzazione e mappatura degli habitat

L'integrazione della mappa del substrato (Fig. 5) con quella delle geoforme (Fig. 8) ha consentito di ottenere la mappa degli habitat marini (Fig. 9). In questo modo sono state definite aree con caratteri fisici specifici potenzialmente in grado di controllare lo sviluppo di determinate biocenosi [30]; [32]; [33]; [34]). La successiva integrazione di dati relativi alle biocenosi bentoniche ha consentito una caratterizzazione biologica degli habitat (Fig. 9).

La mappa è composta da 16 habitat qui di seguito descritti:

- 1) *Piana Fangosa*: fondo debolmente inclinato composto da peliti sabbiose localmente bioturbate da organismi fossori, comprendenti echinodermi, policheti, molluschi e crostacei.
- 2) *Piana sabbiosa*: fondo sabbioso a debole inclinazione colonizzato da organismi fossori in grado di resistere alla perturbazione delle onde sul fondo, come telline, lupini e fasolari.
- 3) *Piana ghiaiosa*: fondo debolmente inclinato composto da sedimenti grossolani organogeni costituiti in prevalenza da rodoliti, briozoi, alghe calcaree e bioclasti.
- 4) *Roccia*: fondo roccioso in parte coperto da pre-coralligeno e gorgonie (*Eunicella Cavolini*).
- 5) *Bordo*: struttura costituita dalla sporgenza di substrato roccioso caratterizzato da presenza di biocostruzioni di coralligeno localmente coperte da fango e circondate da sabbie organogene.
- 6) *Banco con copertura di ghiaia organogena*: rilievo di modesta elevazione ed estensione di forma variabile, che localmente mostra forme derivanti dall'erosione in ambiente semi sommerso durante le fasi di basso stazionamento del livello marino nel Pleistocene-Olocene. E' coperto da ghiaie e sabbie grossolane derivanti dallo smantellamento delle biocostruzioni coralligene.
- 7) *Banco a copertura fangosa*: rilievo di modesta elevazione ed estensione, che localmente mostra forme derivanti dall'erosione in ambiente semi sommerso durante le fasi di basso stazionamento del livello marino nel Pleistocene-Olocene. E' coperto prevalentemente da fanghi terrigeni e localmente da sabbie biodetritiche.

- 8) *Pendio con coralligeno di piattaforma*: pendio moderatamente acclive in cui è insediato un fitto reticolato di piccoli banchi di coralligeno di piattaforma.
- 9) *Pendio con sedimenti organogeni eterogenei*: pendio moderatamente inclinato, coperto da sabbie e ghiaie organogene con molluschi, briozoi e alghe calcaree. Nella parte a maggiore profondità sono presenti

Olocene e ricoperta da ghiaie organogene derivanti dallo smantellamento di strutture coralligene.

- 13) *Terrazzo con sedimenti organogeni eterogenei*: fondo sub-orizzontale derivante dall'erosione in ambiente semi-sommerso durante le fasi di basso stazionamento del livello marino nel Pleistocene-Olocene e coperto da sabbie e ghiaie organogene localmente caratterizzato da piccoli banchi di

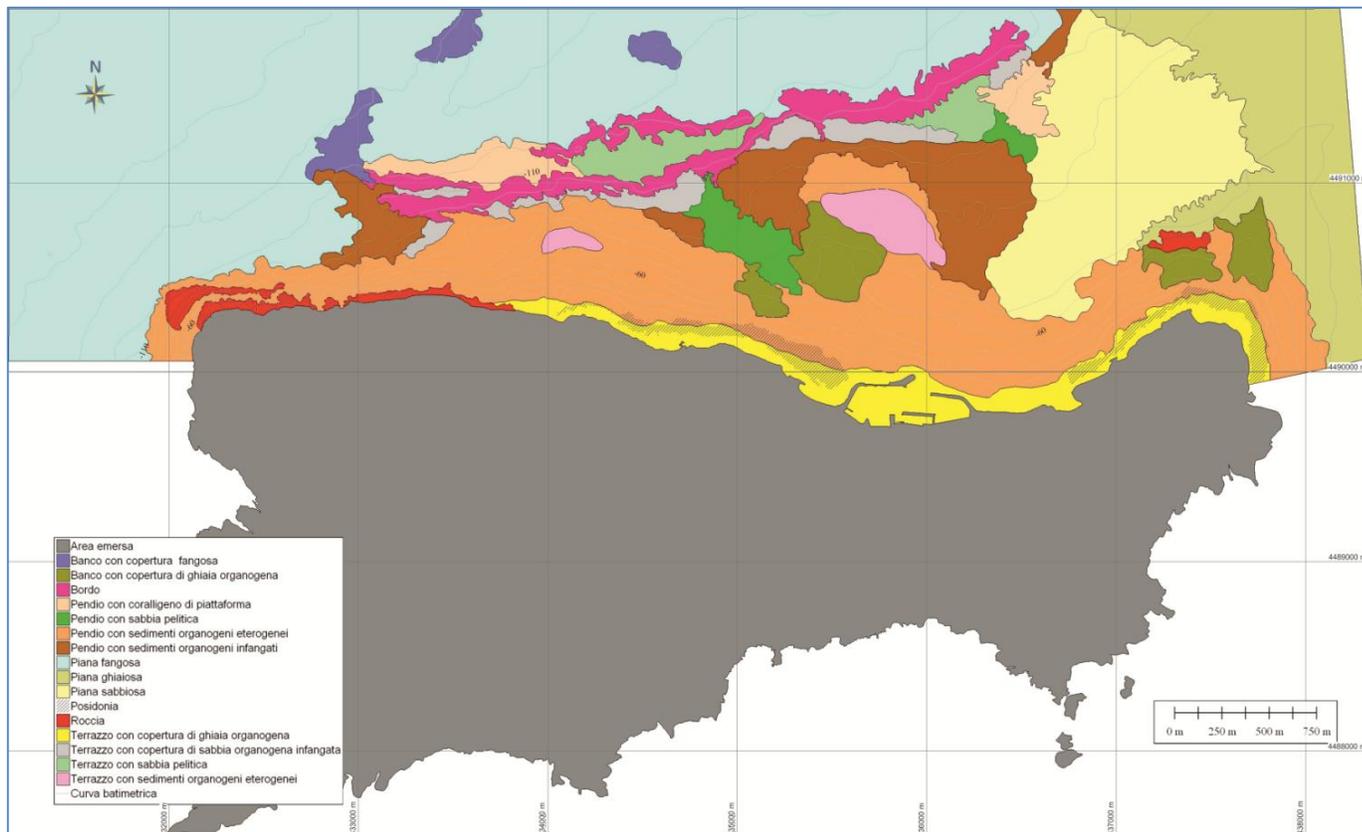


Fig. 9 – Isola di Capri offshore settentrionale – Mappa degli habitat 1:5000

sparsi banchi di coralligeno di piattaforma, in cui vivono popolazioni di echiurini.

- 10) *Pendio con sedimenti organogeni infangati*: superficie variamente inclinata coperta da elementi organogeni in matrice fangosa, colonizzata da faune che vivono sia alla superficie che all'interno dei sedimenti (molluschi, policheti, isopodi, anfipodi, decapodi, echinodermi).
- 11) *Pendio con sabbia pelitica*: superficie debolmente inclinata, coperta da sabbie ricche di frammenti carbonatici e bioclastici, localmente colonizzata da organismi fossori (lamellibranchi).
- 12) *Terrazzo con coperture di ghiaie organogene*: superficie sub-orizzontale derivante dall'erosione in ambiente semi-sommerso durante le fasi di basso stazionamento del livello marino nel Pleistocene-

coralligeno da popolamenti di alghe emifotofile (*Cystostera* spp.)

- 14) *Terrazzo con copertura di sabbia organogena infangata*: superficie sub-orizzontale derivante dall'erosione in ambiente semi-sommerso durante le fasi di basso stazionamento del livello marino nel Pleistocene-Olocene e ricoperta da sabbie organogene derivanti dallo smantellamento di strutture coralligene, in abbondante matrice pelitica.
- 15) *Terrazzo con sabbia pelitica infangata*: superficie sub-orizzontale derivante dall'erosione in ambiente semi-sommerso durante le fasi di basso stazionamento del livello marino nel Pleistocene-Olocene e ricoperta da sabbie terrigene con abbondanti elementi bioclastici. E' localmente

colonizzato da fauna che vive sia in superficie che in profondità.

- 16) *Posidonia*: piante superiori organizzate sia in praterie sia in ceppi isolati a profondità maggiori (fino ai -30 m), con sistema radicale di ancoraggio al substrato che intrappola quantità significanti di peliti. Le praterie sono riccamente popolate da abbondanti specie di foraminiferi, molluschi, briozoi e serpulidi.

III. CONCLUSIONI

- L'uso di metodologie geofisiche che includono rilievi Sidescan Sonar e Multibeam di alta risoluzione ha consentito di identificare e mappare con elevato grado di dettaglio i caratteri abiotici e gli habitat potenziali delle biocenosi bentoniche.
- La caratterizzazione e mappatura degli habitat bentonici è stata effettuata integrando i caratteri morfologici (geoforme) e la composizione dei fondali (substrato) con informazioni sulle comunità bentoniche dominanti. Tale approccio ha permesso di stabilire un forte legame tra geodiversità e biodiversità.
- L'approccio utilizzato in questo studio ha importanti ricadute di carattere applicativo, in quanto fornisce strumenti per un concreto supporto scientifico alle politiche riguardanti la gestione dell'ambiente marino. Oltre a costituire uno strumento utile per lo sviluppo di strategie per il monitoraggio e la gestione e tutela di Aree Marine Protette, la conservazione della biodiversità e la gestione della pesca, esso contribuisce alla costruzione di banche dati georeferenziate degli habitat bentonici, inclusi quelli di importanza prioritaria indicati dalle direttive europee (Natura 2000 e Direttiva 2008/56/CE).

A. Autori e Affiliazioni

La Dott.ssa Marinella De Lauro è laureata in Scienze Biologiche all'Università "Federico II" di Napoli ed è attualmente Collaboratore Tecnico Enti di Ricerca presso l'IAMC-CNR di Napoli.

Il Dott. Crescenzo Violante è Tecnologo presso IAMC-CNR sede di Napoli dove è responsabile del laboratorio di Sidescan Sonar. I suoi principali interessi scientifici riguardano il *geohazard* e la mappatura/caratterizzazione in chiave geologica ed ecologica di aree marine costiere.

RINGRAZIAMENTI

Con stima ed ammirazione ringrazio il Dott. Crescenzo Violante che pazientemente mi ha formata e seguita nel mio primo percorso presso IAMC-CNR. Ringrazio inoltre con affettuosa riconoscenza la Dott.ssa Eliana Esposito che mi ha dato la possibilità di conoscere questa stupenda realtà che da tempo auspicavo. Ringrazio inoltre il Dott. Andrea Sgrosso e il Dott. Carlo Donadio dell'Università "Federico II" di Napoli per aver fornito la documentazione fotografica subacquea.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Bianchi N. e Zurlini G. (1984) Criteri e prospettive di una classificazione ecotopologica dei sistemi marini costieri italiani. *Acqua e Aria*, 785-796.
- [2] Castro P., Michael E. Huber (2011) *Biologia marina* ISBN: 9788838666513 McGraw-Hill editor.
- [3] Connor, D. (1995) The development of a biotope classification in Great Britain and Ireland—principles and structure of classification. In: Hiscock, K. (Ed.), *Classification of Benthic Marine Biotopes of the North-East Atlantic*. Proceedings of a BioMar-Life workshop held in Cambridge, 16–18 November 1994, Cambridge UK, Peterborough, Joint Nature Conservation Committee, pp. 30–46.
- [4] Hiscock, K. (Ed.) (1995) *Classification of benthic marine biotopes of the North-East Atlantic*. Proceedings of a BioMar-Life Workshop held in Cambridge, 16–18 November, 1994, Joint Nature Conservation Committee, Peterborough, UK, p. 105.
- [5] Keller D.R. & F.B. Golley (eds) (2000). *The Philosophy of Ecology: From Science to Synthesis*. University of Georgia Press, Athens, Georgia, USA: 114 pp
- [6] Dahl F. (1908) Grundsätze und Grundbegriffe der bioecologischen Forshung. *Zool. Anz.*, T. 33: 349-353.
- [7] Pérès J. M. e Picard J. (1958) *Manuel de bionomie benthique de la mer Méditerranée*. Recueil des Travaux de la Station Marine d'Endoume, 23 (14): 5-122
- [8] Pérès J. M. e J. Picard (1964) - *Nouveau Manuel de Bionomie Benthique de la Mer Méditerranée*. Recueil des Travaux de la Station Marine d'Endoume, Bull. N. 31, fasc. n. 47: 5-137.
- [9] Meinesz B. et al. (1983) *Cartes de la végétation sous-marine des Alpes Maritimes (côtes françaises de la Méditerranée)*. II - La végétation mixte à *Cymodocea nodosa* - *Zostera noltii* - *Caulerpa prolifera* et la limite supérieure de l'herbier de *Posidonia oceanica* entre Juan-les-Pins et Golfe Juan. *Ann. Inst. océanogr.*, Paris
- [10] Bellan S., Lacaze J.C. & Poizat C. (1994) *Les biocénoses marines et littorales de Méditerranée, synthèse, menaces et prospectives*. Muséum National d'Histoire Naturelle Paris
- [11] Balduzzi A., Bianchi C., Cattaneo R. et al. (1994) *Primi lineamenti di bionomia bentica dell'isola Gallinara*. *Atti del 10° Congresso A.I.O.L.*: 603-617.
- [12] Relini G. (2000) *Nuovi contributi per la Conservazione della Biodiversità Marina in Mediterraneo*. *Biol. Mar. Mediterr.*, 7 (3): 173-211
- [13] Blondel P. e Murton B. J. (1997) *Handbook of Sidescan Sonar Imagery*. John Wiley & Sons, Praxis Publishing. Pp 303
- [14] Diviacco P. (1999) *Aree Marine Protette-Finalità e gestione*. Comunicazione Edizione, Forlì
- [15] Courtney, R. C. and Fader, G.B.J. (1994) *A new understanding of the ocean floor through multibeam mapping: Science Review 1992 and 1993 of the Bedford Institute of Oceanography*. Dept. of Fisheries and Oceans, p. 9-14.
- [16] Fader G., Pickrill R.A., Todd B., Courtney C. and Parrott R. (1999) *The Emerging Role of Marine Geology in Benthic Ecology*. *Geological Survey of Canada pub.*, 14, 29-36
- [17] Anderson, J. T., Gregory, R. S., and Collins, W. T. (2002) *Acoustic classification of marine habitats in coastal Newfoundland*. – *ICES Journal of Marine Science*, 59, 156–167.
- [18] Roff J.C., Taylor M. E., Laughren J. (2009) *Geophysical approaches to the classification, delineation and monitoring of marine habitats and their communities*. *Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst.* 13, 77–90
- [19] Madden, C. J., K. Goodin, R.J. Allee, G. Cicchetti, C. Moses, M. Finkbeiner, D. Bamford, E. (2009) *Coastal and Marine Ecological Classification Standard*. NOAA and NatureServe. 107 p
- [20] Kostylev V. E., Todd B. J., Gordon B. J. Fader, R. C. Courtney, Gordon D. M. Cameron, Richard A. Pickrill R.A. (2001) *Benthic habitat mapping on the Scotian Shelf based on multibeam bathymetry, surficial*

- geology and sea floor photographs. *Marine Ecology progress series*. Vol 219: 121- 137, 2001
- [21] Kostylev, V.E., and Hannah, C.G. (2007) Process-driven characterization and mapping of seabed habitats, in Todd, B.J and Greene, H.G., eds *Mapping the Seafloor for Habitat Characterization: Geological Association of Canada, Special Paper 47*, p. 171-184
- [22] Post A.L. (2008) The application of physical surrogates to predict the distribution of marine benthic organism. *Ocean & Coastal Management*, 51, 161 -179
- [23] Greene, H.G., eds., *Mapping the Seafloor for Habitat Characterization: Geological Association of Canada, Special Paper 47*, p. 171-184
- [24] Masetti G., Sacile R., Trucco A. (2010) Caratterizzazione remota del fondale marino tramite analisi e mosaicatura del backscatter, Atti 14a Conferenza Nazionale ASITA – Brescia 9-12 novembre, 2010, 1275-1280
- [25] Shumchenia E.J. n, King J.W. (2010) Comparison of methods for integrating biological and physical data for marine habitat mapping and classification. *Continental Shelf Research* 30: 1717-1729
- [26] Zamanillo et al. (2011) Sidescan sonar imagery processing software for under water research and education purposes. *Journal of Maritime Research*, Vol. VIII. No. 1, pp. 87-100, 2011.
- [27] Violante C., Mazzola S. (2012a) Geophysical techniques for protection and management of marine habitat: example from the Campania offshore, Eastern Tyrrhenian Sea. *Proceeding of 7th EUREGEO - EUropean congress on REgional GEOScientific cartography and Information systems*, Bologna, Italy, 2012, 395-397
- [28] Violante C., Mazzola S. (2012b) From benthic landscape to habitat: examples from the Campania offshore, Eastern Tyrrhenian sea. *Gehoab 2012, Orcas Island, USA, 2-6 May 2012*, abs.
- [29] Olenin S., Ducrottoy J.P. (2006) The concept of biotope in marine ecology and coastal management. *Marine Pollution Bulletin*, 53, 20-29
- [30] Violante C. e De Lauro M. (2013) Rapporto tecnico Campagna SEASCAPE_12 R/V Urania. Istituto per l’Ambiente Marino Costiero_IAMC-CNR, Napoli
- [31] De Lauro, M., Budillon, F., Ferraro, L., Molisso, F., Violante, C., Di Stefano, F., Musella, S., Spinelli, D. (2000) Studio di fattibilità propedeutico all’istituzione dell’Area Marina Protetta denominata “Isola di Capri”. *Acquisizione di dati batimorfologici e sedimentologici*. CNR, Istituto di Ricerca “Geomare sud”, Napoli, Rapporto Tecnico RINT7, 56 pp. De Lauro M., Budillon F., Ferraro F., Molisso F., Violante C., Spinelli D., Musella S. (2003): Tecniche di acquisizione ed elaborazione dati per la realizzazione di cartografia tematica in aree marine costiere: l’esempio delle isole Flegree. In: *Ambiente marino costiero e territorio delle Isole Flegree (Ischia, Procida E Vivara – Golfo di Napoli)*. Risultato di uno studio multidisciplinare. *Mem. Acc. Sc. Fisiche e Matematiche*, vol. 5, 45-66. ISBN 88-207-3557-1
- [32] D’Argenio B., Violante C., Sacchi M., Budillon F., Pappone G., Casciello E., Cesarano M. (2004) Capri, Bocca Piccola and Punta Campanella (southern Italy), marine and onland geology compared. In: G. Pasquarè and C. Venturini (Eds), *Digital elevation model of the Naples bay and adjacent areas, eastern Tyrrhenian sea*. In: Pasquarè G. and Venturini C.(Eds) *Mapping Geology in Italy*, APAT, Roma, 35-42. Ruolo: Autore pari dignità.
- [33] Violante, C., Aloia, A., Battaglini, L., D’Angelo, S., Di Stefano, F., Lettieri, M., Fiorentino, A., Russo, G. F. (2013a) The submerged landscape and habitats off the Cilento coast (Eastern Tyrrhenian Sea) – Linking geo- and bio-diversity at different scale in a European Geopark. *Gehoab 2013, Rome Italy 6-10 May 2013*, abs.
- [34] D’Angelo S., Lettieri M., Violante C., Russo G. F., Fiorentino A., Di Stefano F. (2013) Carta geologica con elementi tematici e carta dei paesaggi sottomarini del Parco Nazionale del Cilento,Vallo di Diano e Alburni. *European and Global Geopark*.

Valutazione della qualità delle acque e dello stato di conservazione delle biocenosi bentoniche di fondo duro dell'Area Marina Protetta di Capo Carbonara (Sardegna)

Federica Ferrigno

Istituto per l'Ambiente Marino Costiero del Consiglio Nazionale delle Ricerche (IAMC-CNR)
Napoli, Italy
federica.ferrigno@uniparthenope.it

Ivan Guala

International Marine Centre (IMC)
Oristano, Italy
i.guala@imc-it.org

Sommario—Uno studio delle comunità bentoniche di substrato duro è stato effettuato nell'Area Marina Protetta di Capo Carbonara (Villasimius, Italia) al fine di evidenziare lo stato di conservazione di biocenosi e specie di interesse conservazionistico e di valutare lo stato ecologico delle acque costiere. In particolare sono stati utilizzati indicatori biologici che sfruttano la capacità delle comunità macroalgali superficiali e dei popolamenti coralligeni di rispondere alle variazioni delle condizioni ambientali dovute a pressioni antropiche. I risultati hanno evidenziato la presenza di comunità e specie di interesse conservazionistico localmente molto abbondanti, l'assenza di condizioni di criticità e uno stato ecologico ottimale del corpo idrico nell'area marina indagata. Un confronto temporale ha evidenziato come i risultati siano consistenti con quelli ottenuti in studi precedenti. Un confronto metodologico tra due *software* per analisi di immagine è stato realizzato al fine di identificare il procedimento più adeguato per la stima della copertura di specie macroalgali da immagini fotografiche.

Keywords—comunità macroalgali; coralligeno; biocenosi bentoniche; qualità ecologica; Mar Mediterraneo; Area Marina Protetta Capo Carbonara

INTRODUZIONE

La valutazione della qualità dei corpi idrici e la stima dello stato di conservazione delle biocenosi bentoniche di fondo duro, in particolare quelle macroalgali, sono utili per contribuire alla gestione della fascia costiera, soprattutto in area marine sottoposte a tutela ambientale. La conoscenza dei fattori che determinano la variabilità spaziale e temporale delle biocenosi e l'identificazione dell'origine naturale o antropica di eventuali disturbi, è cruciale per stabilire misure di gestione e tutela di habitat e specie sensibili e protette.

Le biocenosi di fondo duro dei piani superficiali (mesolitorale e frangia infralitorale) sono caratterizzate dalla presenza di comunità macroalgali particolarmente importanti dal punto di vista della biodiversità nel Mediterraneo [1, 2]. Tali comunità sono caratterizzate da una diversa sensibilità

alle condizioni ambientali e da tempi di risposta molto brevi alle variazioni di qualità dell'ambiente [3, 4, 5, 6]: esse, pertanto, sono utilizzate come indicatori biologici per la valutazione dello stato ecologico delle acque costiere ai sensi della direttiva quadro sulle acque (2000/60/UE).

Su substrati rocciosi più profondi, anche la biocenosi del coralligeno è considerata un buon indicatore di qualità ambientale, grazie alla presenza di specie particolarmente sensibili [7, 8, 9, 10, 11]. Il coralligeno è una formazione biocostruita prodotta da alghe calcaree incrostanti, su cui crescono numerose specie animali e vegetali, la cui sovrapposizione costituisce un ecosistema eterogeneo e complesso, con un alto grado di biodiversità [12]; in ragione di tale eterogeneità e complessità a livello strutturale e di interazione tra i diversi descrittori, lo studio della biocenosi coralligena necessita di una conoscenza approfondita della variabilità spaziale e temporale e dei fattori che la determinano. Il coralligeno è considerato un ecosistema fragile e vulnerabile, di particolare interesse dal punto di vista conservazionistico, ed è tutelato da diversi accordi internazionali (Direttiva Habitat, 92/43/CEE; Protocollo SPA/BIO, Convenzione di Barcellona; Convenzione di Berna).

Un recente studio sulla distribuzione delle comunità superficiali ha messo in evidenza che la costa rocciosa dell'Area Marina Protetta di Capo Carbonara (in seguito AMPCC) è dominata per oltre l'80% da popolamenti algali più o meno continui del genere *Cystoseira* (*C. amentacea* var. *stricta*, *C. crinita*, *C. brachycarpa* e *C. compressa*) e per circa il 30% da bioconcrezioni a vermeti (*Dendropoma petraeum*) [13, 14, 15, 16]. Localmente, sono presenti affioramenti superficiali di *Posidonia oceanica* che formano le cosiddette "recif barriere" [13, 15, 16, 17, 18].

Su substrati scarsamente illuminati, in particolare lungo falesie a strapiombo, sotto grandi massi e all'ingresso delle grotte sono diffusi gli elementi tipici delle biocenosi

Questo studio è stato finanziato dall'Ente Gestore dell'Area Marina Protetta Capo Carbonara, misura POR FESR 2007-2013.

coralligene. Le specie algali più comuni sono *Halimeda tuna*, *Flabellia petiolata*, *Codium* spp., *Palmophyllum crassum*, *Lithophyllum stictaeforme* e *Peyssonnelia* spp.; tra gli invertebrati si registrano localmente alte densità di Gorgonie (*Paramuricea clavata*, *Eunicella cavolini*, *E. singularis*), spugne (*Axinella damicornis*, *Oscarella lobularis*, *Petrosia ficiformis*, *Phorbas tenacior*, *Spirastrella cunctatrix*), briozoi (*Myriapora truncata*, *Pentapora fascialis*, *Sertella septentrionalis*, *Smittina cervicornis*), antozoi (*Parazoanthus axinellae*, *Polycyathus muelleriae*), ascidie (*Clavelina* sp., *Halocynthia papillosa*) e serpulidi (*Protula tubularia*) [19, 20, 21]. Le informazioni quantitative sullo stato delle biocenosi coralligene nell'AMPCC sono solo parziali; uno studio recente ne ha evidenziato una diversa composizione rispetto ad altre aree del Mediterraneo influenzate dalla pressione antropica [22]. Tuttavia, una più accurata conoscenza dei pattern naturali di distribuzione della biocenosi è cruciale per qualsiasi iniziativa di gestione e conservazione [23].

Gli obiettivi del presente lavoro sono stati la caratterizzazione delle biocenosi bentoniche di fondo duro nell'AMPCC, la valutazione dello stato ecologico e la determinazione della qualità dei corpi idrici mediante l'applicazione di specifici indicatori biologici. L'utilizzo di tali indici, ricavati attraverso metodiche non distruttive, è particolarmente indicato nelle aree marine protette; queste in genere sono zone fragili e sensibili nelle quali l'obiettivo stesso delle indagini è quello di tutelare e salvaguardare le biocenosi presenti dagli effetti delle pressioni antropiche.

MATERIALI E METODI

Le indagini sono state svolte nell'AMPCC nell'estate 2013. I rilievi in campo sono stati realizzati lungo i seguenti settori costieri dell'AMP: settore 1, S. Caterina; settore 2, Isola dei Cavoli e settore 3, Isola di Serpentara (Fig. 1).

Le indagini sulle biocenosi di fondo roccioso dei piani superficiali sono state realizzate mediante l'applicazione dell'indice CARLIT (*Cartography of littoral and upper-sublittoral benthic communities*) [6, 24], in ampio uso nel Mediterraneo per la valutazione della qualità ecologica dei corpi idrici costieri.



Fig. 1. Indicazione dei tre settori costieri indagati.

L'indice CARLIT associa un livello di sensibilità al disturbo antropico a ciascuna comunità dominante rilevata lungo la linea di costa presa in esame; considera inoltre la morfologia della costa (costa bassa, costa alta, blocchi decimetrici) e il tipo di substrato (naturale o artificiale) come fattori che maggiormente influiscono sulla distribuzione dei popolamenti macroalgali [6]. La presenza e l'abbondanza (in termini di lunghezza della linea di costa) delle comunità bentoniche dominanti sono state registrate direttamente su un supporto cartografico cartaceo (immagini satellitari).

Per la determinazione delle caratteristiche geomorfologiche della costa si è fatto riferimento all'indagine precedentemente condotta nell'AMPCC [15, 16], differenziando tra costa alta, costa bassa e blocchi decimetrici [6]. I dati sono stati successivamente digitalizzati e georeferenziati mediante l'impiego di un Sistema Informativo Geografico (GIS); l'abbondanza delle comunità dominanti e delle caratteristiche morfologiche della costa sono state valutate, in termini di lunghezza di costa occupata (in metri), separatamente per ciascuno dei tre settori. A ciascuna comunità rilevata è stato attribuito un valore di sensibilità al disturbo antropico secondo le categorie definite da [6] e integrate da [24].

I dati sono stati sottoposti ad una elaborazione preliminare finalizzata a valutare (per ciascun settore e per l'intera area di studio): i) la lunghezza totale della costa indagata, ii) la lunghezza totale delle diverse situazioni geomorfologiche rilevanti, iii) lo sviluppo lineare dei popolamenti superficiali dominati da macroalghe. Una volta calcolata la lunghezza di ciascun tratto costiero specificato da una determinata comunità e da una determinata situazione geomorfologica, è stato calcolato il Valore di Qualità Ecologica (*Ecological Quality Value* o EQV) secondo la relazione (1)

$$EQV = \frac{\sum (l_i * SL_i)}{\sum l_i} \quad (1)$$

dove, l_i è la lunghezza della linea di costa occupata dalla comunità "i" e SL_i è il livello di sensibilità (*Sensitivity Level*) associato alla comunità "i". Successivamente, lo stato ecologico delle acque costiere del SIC è stata calcolata mediante il Rapporto di Qualità Ecologica (*Ecological Quality Ratio* o EQR) (2)

$$EQR = \frac{\sum EQV_{s_i} * l_i}{\sum l_i} \quad (2)$$

ossia il rapporto tra i valori di qualità ecologica calcolati nell'area di studio (EQV_{s_i}) e i valori di riferimento (EQV_{r_i}) definiti da [6], per ogni situazione rilevante da un punto di vista geomorfologico.

I valori di EQR ottenuti, compresi tra 0 e 1, sono stati impiegati per classificare lo stato ecologico (SE) in una delle 5 classi (da elevato a pessimo), come richiesto dalla WFD, secondo la classificazione proposta da [6] indicata in Tab. 1.

| EQR | SE |
|---------------|----------|
| > 0,75 - 1 | elevato |
| > 0,60 - 0,75 | buono |
| > 0,40 - 0,60 | moderato |
| > 0,25 - 0,40 | povero |
| > 0 - 0,25 | pessimo |

Tab. 1. EQR e corrispondente stato ecologico (ES) secondo la WFD [14].

I valori di EQV e EQR sono stati calcolati separatamente per ciascuno dei tre settori e mediati per la stima dello stato ecologico dell'intero corpo idrico indagato [25]. I risultati sono stati confrontati con quelli calcolati, per gli stessi settori, con i dati raccolti durante la precedente campagna del 2011 [15], al fine di valutare variazioni temporali dello stato ecologico delle comunità indagate e dei corpi idrici. Un'analisi della varianza (ANOVA) è stata effettuata per valutare le possibili differenze spaziali (tra settori e tratti di costa) e temporali (tra anni) del *Sensitivity Level* (SL) associato alle comunità investigate [26].

Per quanto riguarda i popolamenti algali che costituiscono il coralligeno è stato applicato l'indice ESCA (*Ecological Status of Coralligenous Assemblages*) [22, 27, 28], basato sulla valutazione della copertura percentuale dei principali *taxa* o gruppi morfologici attraverso analisi di immagini fotografiche [22, 28]. Le immagini fotografiche sono state ricavate in immersione lungo pareti verticali o sub-verticali a profondità comprese tra 30 e 36 metri, in 12 stazioni equamente suddivise in 3 località in prossimità dei settori precedentemente investigati. Inoltre, in ciascuna stazione sono stati effettuati rilevamenti visivi per la valutazione delle caratteristiche strutturali delle stazioni (profondità, inclinazione e natura del substrato) e l'identificazione di potenziali elementi di disturbo come la presenza di specie aliene (*C. cylindracea*), di mucillagini e lenze. Inoltre, è stata stimata l'abbondanza di specie di interesse conservazionistico, con particolare riferimento ai gorgoniacei dei generi *Paramuricea* e *Eunicella*, e il loro stato (altezza, presenza di lesioni e necrosi delle colonie) per mettere in evidenza eventuali criticità.

Le fotografie sono state analizzate mediante specifici *software* per analisi di immagine che consentono la discriminazione tra specie presenti nella superficie fotografata. Al fine di identificare il metodo che minimizzasse i tempi relativamente lunghi per ricavare i dati di copertura dei *taxa* o gruppi morfologici rilevanti, sono stati messi a confronto due diversi *software* per analisi d'immagine, ImageJ e Seascape.

A tal scopo sono state analizzate diverse immagini fotografiche ottenute durante il monitoraggio delle biocenosi coralligene. Per ognuna di esse, sono stati calcolati i tempi di analisi impiegati con ciascuno dei *software*, valutando nello specifico le differenze relative al loro utilizzo. Inoltre sono state confrontate le superfici di ricoprimento dei principali *taxa* individuati in ogni immagine fotografica, in termini di percentuale, per ciascun *software*.

Successivamente sono state calcolate le medie delle superfici coperte dai vari *taxa* nelle diverse foto, al fine di ottenere il valore di SL di ciascun *taxon*/gruppo di quell'area; in tal modo è stato possibile valutare l'ordine di grandezza delle differenze ottenute attraverso l'uso dei due *software*.

RISULTATI

A. Biocenosi di fondo roccioso dei piani superficiali

Complessivamente l'indagine è stata condotta lungo circa 12 km di costa rocciosa pari a circa il 25 % dello sviluppo costiero dell'intera AMPCC e al 31 % della frazione rocciosa della costa (Tab. 2).

Sulla base di [15] e [16] la costa bassa è risultata la morfologia prevalente; essa rappresenta complessivamente circa il 91% della costa esaminata, seguono la costa alta (8%) e la costa a blocchi decimetrici (1%).

Lungo i settori costieri dell'AMPCC indagati sono state rilevate complessivamente 9 comunità dominanti, tutte caratterizzate da un livello di sensibilità medio-alto (10-15) e alto (>15) (Tab. 3).

In Fig. 2, per ciascuno dei tre settori, è riportata l'abbondanza (in percentuale) delle comunità dominanti in termini di lunghezza di costa occupata. La categoria più frequente è rappresentata dai popolamenti abbondanti di *C. amentacea* (*Cystoseira* 3), seguita da *Cystoseira* 4 e da *Cystoseira* 2. Nelle Fig. 3, 4 e 5 sono riportate le mappe con la distribuzione delle comunità dominanti rilevate nei tre settori.

Sulla base delle comunità rilevate, lo stato ecologico delle acque costiere calcolato come EQR, per ciascuno dei tre settori indagati, è risultato pari a 0,84 a S. Caterina e 0,95 sia all'Isola dei Cavoli che all'Isola di Serpentara; il valore medio riferibile all'intero corpo idrico è pari a 0,92. In tutti i casi i valori di EQR corrispondono a uno stato ecologico delle acque costiere "elevato" secondo la classificazione indicata dalla WFD (Tab. 1).

I valori di EQR per l'intera AMPCC, calcolati come media tra quelli ottenuti per ciascun settore, sono risultati pari a 0,91 per il 2011 e 0,92 per il 2013. Il confronto degli EQR calcolati per le due campagne (2011 e 2013) non ha mostrato differenze significative né tra i due anni né tra i tre settori considerati [26].

| Sviluppo costiero | Lunghezza (m) |
|------------------------------|---------------|
| totale AMPCC | 47'900 |
| sviluppo costiero indagato | 11'973 |
| costa rocciosa | 38'920 |
| costa sabbiosa | 6'820 |
| costa ciottolosa | 2'160 |
| settore 1 (S. Caterina) | 3'222 |
| settore 2 (Isola dei Cavoli) | 5'261 |
| settore 3 (Serpentara) | 3'490 |

Tab. 2. Caratteristiche generali e lunghezza della costa nell'AMPCC e della costa sottoposta all'indagine.

| Comunità | Descrizione | Livello di sensibilità | Sviluppo costiero (m) |
|-----------------------------|--|------------------------|-----------------------|
| Alge fotofile | popolamenti a <i>Dictyota/Padina/Laurencia/Stypocaulon</i> | 10 | 816.4 |
| Cystoseira 1 | rari talli isolati di <i>Cystoseira amentacea</i> | 10 | 272.1 |
| Cystoseira 2 | popolamenti scarsi di <i>Cystoseira amentacea</i> | 12 | 1532.3 |
| Cystoseira 3 | popolamenti abbondanti di <i>Cystoseira amentacea</i> | 15 | 5251.7 |
| Cystoseira 4 | cinture quasi continue di <i>Cystoseira amentacea</i> | 19 | 2153.3 |
| <i>Cystoseira compressa</i> | popolamenti a <i>Cystoseira compressa</i> | 12 | 857.8 |
| <i>Cystoseira crinita</i> | popolamenti a <i>Cystoseira crinita</i> | 20 | 247.5 |
| <i>Dendropoma petraeum</i> | concrezioni a vermeti | 20 | 805.9 |
| <i>Posidonia oceanica</i> | formazioni affioranti di <i>Posidonia oceanica</i> | 20 | 35.6 |

Tab. 3. Descrizione delle principali comunità rilevate nell'area di studio e indicazione del relativo sviluppo costiero e del

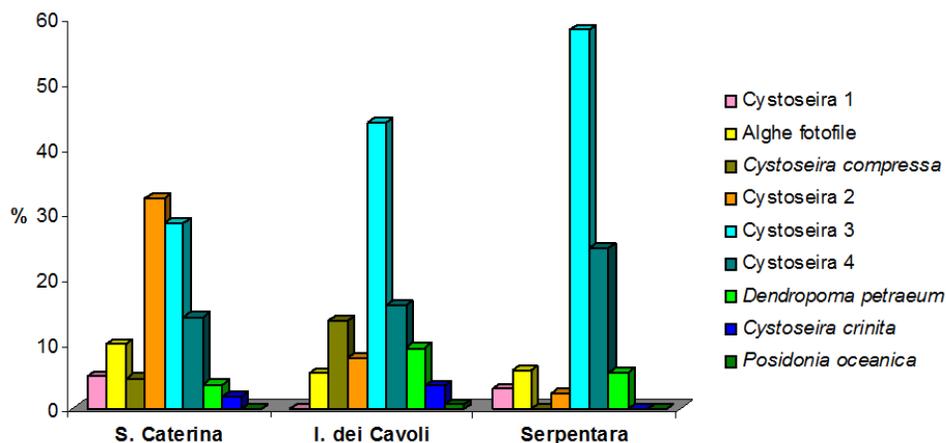


Fig. 2. Abbondanza di ciascuna comunità dominante rilevata nei tre settori indagati (le comunità sono disposte in ordine crescente di livello di sensibilità).

| Settore | EQR 2011 | EQR 2013 |
|-------------------|-------------|-------------|
| S. Caterina | 0,86 | 0,84 |
| Isola dei Cavoli | 0,98 | 0,95 |
| Serpentara | 0,89 | 0,95 |
| EQR totale | 0,91 | 0,92 |

Tab. 4. Confronto degli EQR calcolati per il 2011 e il 2013.

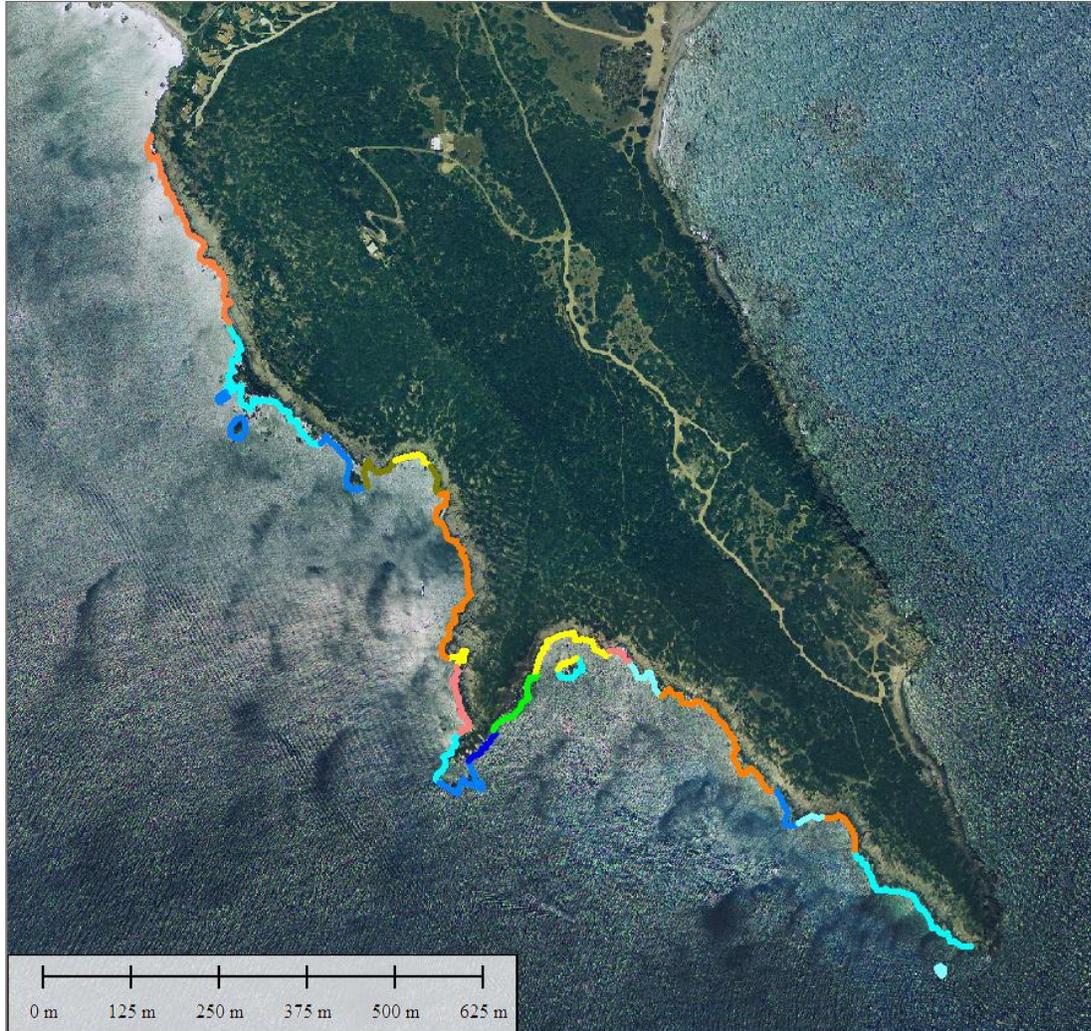


Fig. 3. Distribuzione delle comunità dominanti nel settore 1 (S. Caterina).

- Posidonia oceanica*
- Dendropoma petraeum*
- Cystoseira crinita / brachycarpa*
- Cystoseira amentacea* 4
- Cystoseira amentacea* 3
- Cystoseira compressa*
- Cystoseira amentacea* 2
- Cystoseira amentacea* 1
- Alghe fotofile

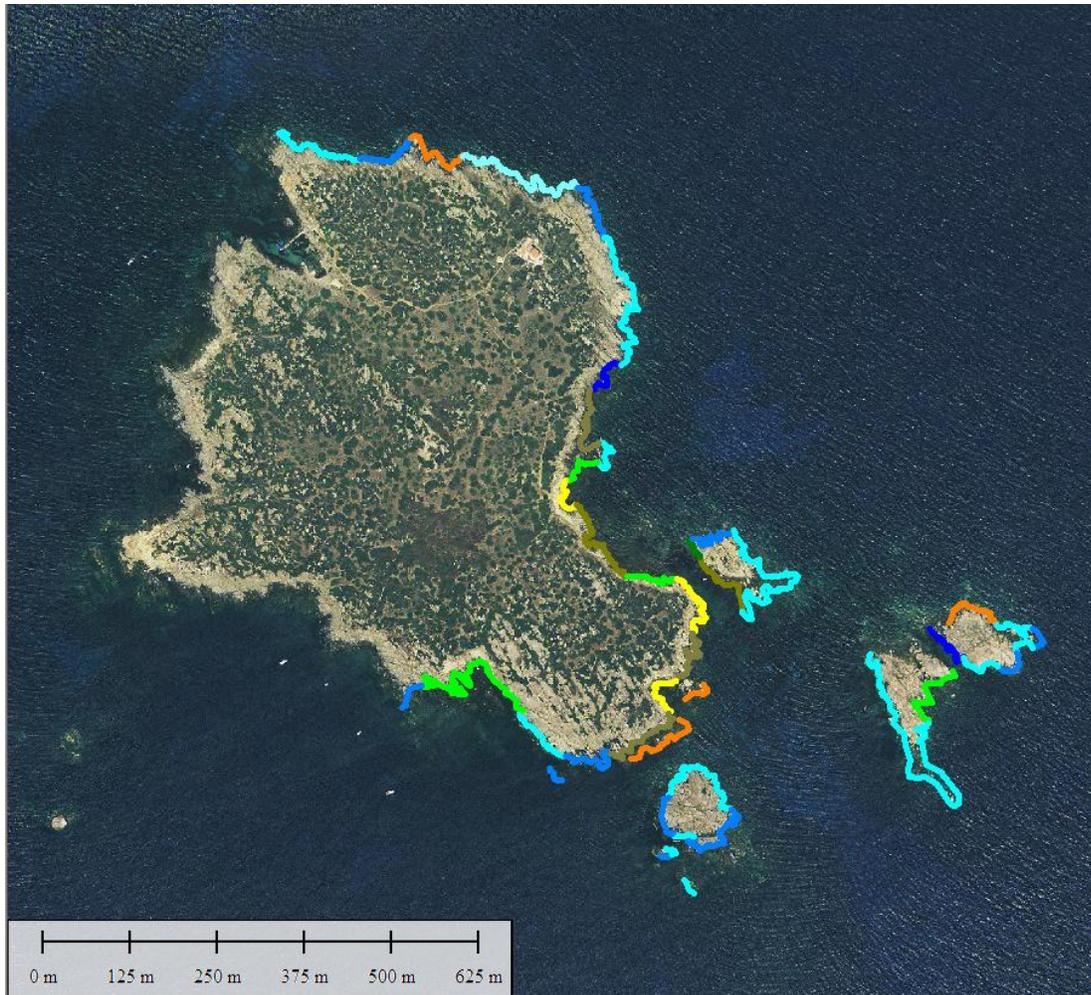


Fig. 4. Distribuzione delle comunità dominanti nel settore 2 (Isola dei Cavoli).

- Posidonia oceanica*
- Dendropoma petraeum*
- Cystoseira crinita / brachycarpa*
- Cystoseira amentacea 4*
- Cystoseira amentacea 3*
- Cystoseira compressa*
- Cystoseira amentacea 2*
- Cystoseira amentacea 1*
- Alghe fotofile

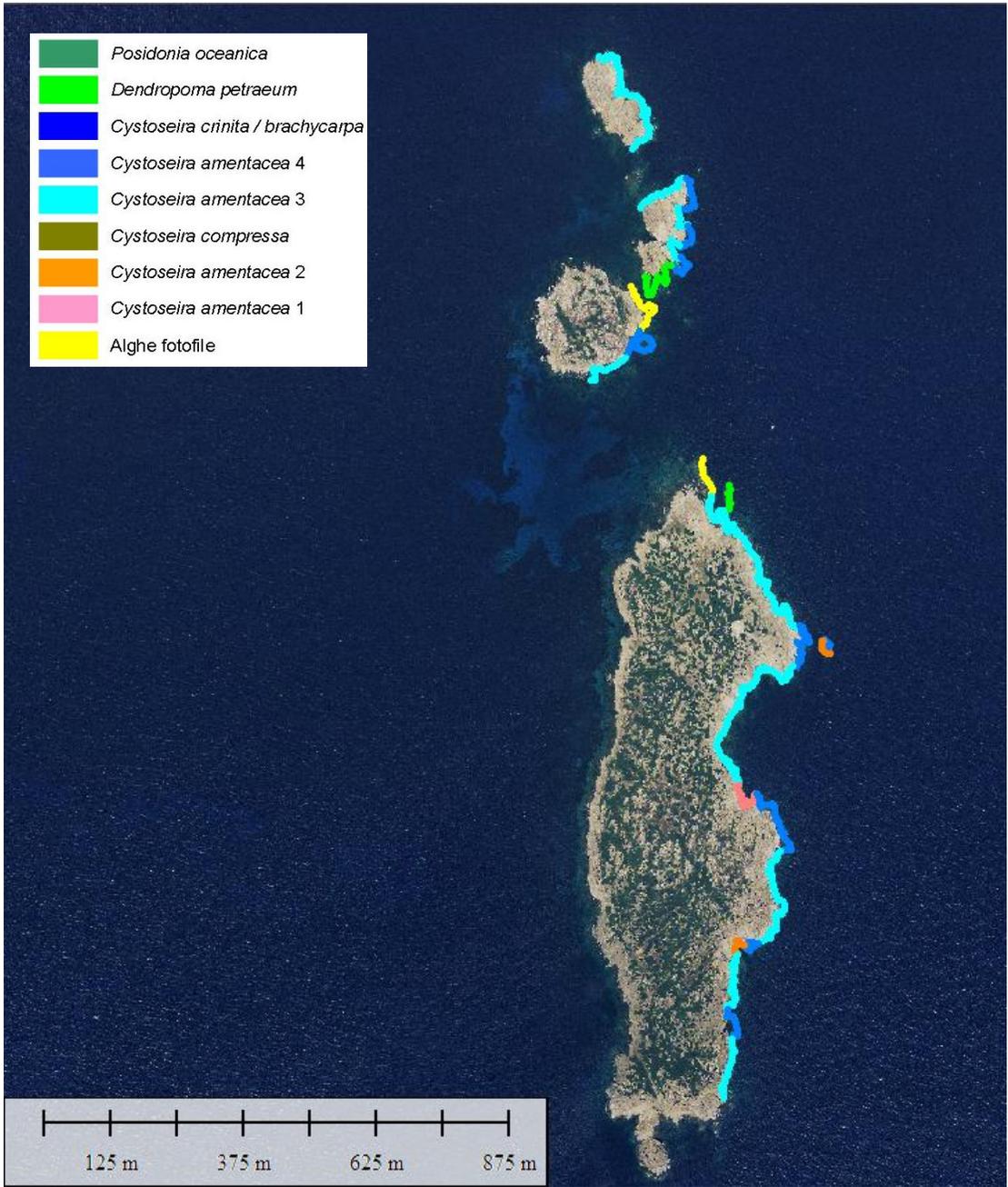


Fig. 5. Distribuzione delle comunità dominanti nel settore 3 (Isola di Serpentara).

B. Biocenosi del coralligeno

I popolamenti coralligeni studiati presentavano uno strato basale di corallinacee incrostanti variamente sviluppato ma sempre presente. Gli elementi dominanti sono risultati le Peyssonneliacee e un feltro algale costituito principalmente da alghe filamentose di piccole dimensioni.

L'indice ESCA calcolato per le tre località studiate ha mostrato valori più elevati all'Isola dei Cavoli (0.89) e a Serpentara (0.85), entrambe classificabili in una classe di qualità elevata, mentre S. Caterina (0.68) ha presentato valori più bassi che identificavano una qualità buona (Tab. 5). Il valore medio riferibile all'intero corpo idrico è risultato pari a 0,81, corrispondente a uno stato ecologico "elevato" secondo la classificazione indicata dalla WFD.

Complessivamente sono state registrate 77 colonie di *P. clavata*, concentrate in due stazioni all'Isola dei Cavoli e una a S. Caterina; in queste stazioni la densità media (numero medio di colonie per m²) variava tra $3,3 \pm 2,3$ e $14,3 \pm 7,2$ (Fig. 6). Sono state misurate 29 colonie con altezza media compresa tra $8,6 \pm 2,5$ cm e $23,6 \pm 2,7$ cm (Fig. 7).

Sono state censite 106 colonie di *E. cavolini*, distribuite in 10 delle 12 stazioni indagate; in queste stazioni la densità media variava tra $0,3 \pm 0,3$ e $12,0 \pm 2,5$ colonie per m² (Fig. 8). Sono state misurate 68 colonie con altezza variabile tra 12 cm e $28,0 \pm 3,0$ cm (Fig. 6).

| Località | Numero medio taxa/gruppi | Eterogeneità | SL | EQR | Classe |
|---------------|--------------------------|--------------|------|------|---------|
| S. Caterina | 0,63 | 0,98 | 0,42 | 0,68 | buono |
| I. dei Cavoli | 0,94 | 0,80 | 0,92 | 0,89 | elevato |
| Serpentara | 0,89 | 0,79 | 0,85 | 0,85 | elevato |

Tab. 5. Valori dell'indice ESCA calcolato per le tre località studiate.

Eunicella singularis è stata registrata soltanto in una stazione con una sola colonia di 27 cm di altezza (Fig. 6 e 7).

Nelle colonie selezionate non sono state riscontrate lesioni imputabili a impatti meccanici; in una sola colonia di *P. clavata* all'Isola dei Cavoli è stato stimato un livello di necrosi pari a circa il 30%.

Caulerpa cylindracea è stata registrata presente o abbondante in tutte le osservazioni effettuate a S. Caterina e in due stazioni a Serpentara; all'Isola dei Cavoli invece è stata rilevata in una sola replica. Durante l'intera campagna di campionamento la mucillagine è stata rilevata soltanto su una gorgonia. Lenze e altri attrezzi da pesca abbandonati (nasse) sono stati rinvenuti sporadicamente in numerose stazioni, ma soltanto una volta all'interno delle repliche.

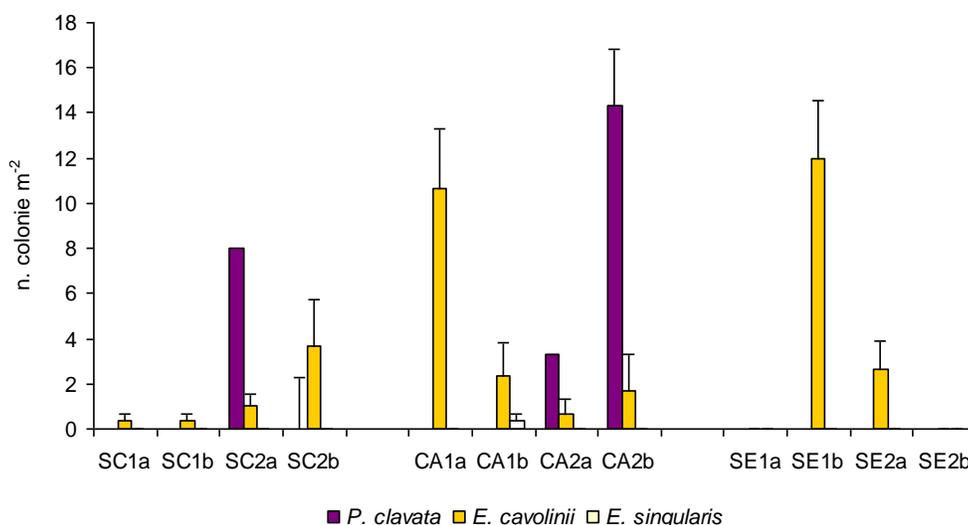


Fig. 6. Densità media (\pm errore standard) di gorgonie registrato in ciascuna stazione di campionamento.

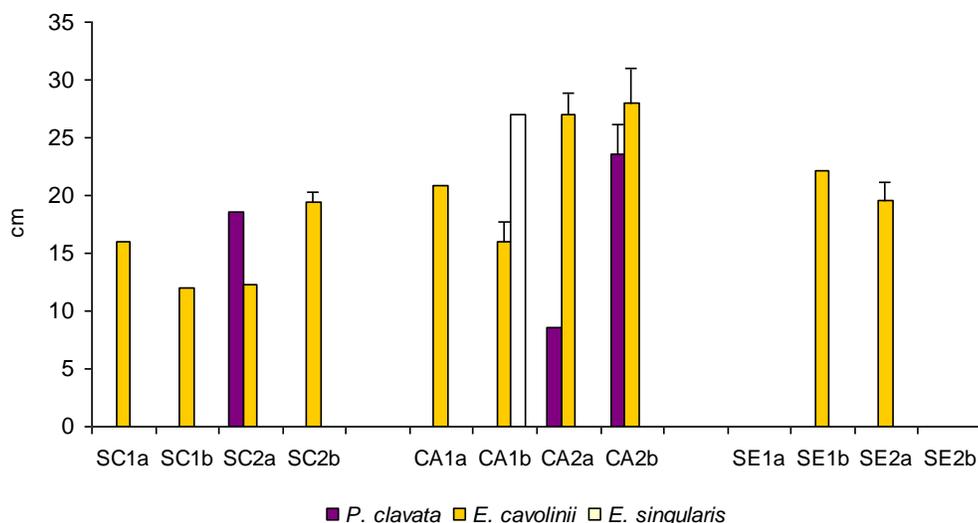


Fig. 7. Altezza media (\pm errore standard) delle gorgonie registrate nelle stazioni di campionamento.

C. Confronto tra software per analisi d'immagine

Il confronto tra i due software di analisi d'immagine, ImageJ e Seascape, ha fatto risaltare tempi complessivi di utilizzo analoghi. Tuttavia sono state riscontrate differenze rilevanti tra le varie fasi operative dovute alle diverse impostazioni insite in ciascun programma: caricamento nel programma dell'immagine da analizzare, selezione delle impostazioni da utilizzare, salvataggio in formato jpeg

dell'immagine analizzata e in formato xls dei dati ottenuti. In Tab. 6 sono riportate le principali differenze riscontrate tra i due software ed evidenziati pregi e limiti.

Per quanto riguarda il calcolo delle medie delle superfici dei vari taxa nelle diverse foto, funzionali all'individuazione del valore di SL di ciascun taxon/gruppo, i due software hanno prodotto i medesimi valori (Tab. 7).

| Fattori | SEASCAPE | IMAGEJ |
|---|----------|--------|
| intuitività | v | x |
| velocità caricamento immagine | x | v |
| utilizzo immagine ad alta definizione | x | v |
| precisione selezione oggetto | v | v |
| velocità selezione oggetto | v | x |
| semplicità di utilizzo | v | x |
| semplicità di consultazione del manuale | v | x |
| praticità estrazione dati | v | x |
| salvataggio in jpeg | x | v |
| utilizzo stessa palette di colori per foto diverse | v | x |
| conversione pixel/cm nei dati estratti | x | v |
| possibilità di non selezione di un oggetto per la misura totale della specie | v | x |
| velocità analisi 100% della foto | v | x |
| identificazione e selezione di oggetti piccoli e non riconoscibili facilmente | x | v |
| necessità di memoria RAM maggiore di 1 GB | v | x |

Tab. 6. La tabella mostra di pregi (v) e limiti (x) dei due software di analisi di immagine confrontati.

| Specie/Taxon | Media di area% Seascape | Media di area% ImageJ | SL Seascape | SL ImageJ |
|---|-------------------------|-----------------------|-------------|-----------|
| Algal turf | 2,5 | 3,7 | | |
| <i>Flabellia petiolata</i> | 0,4 | 1,0 | -2 | -2 |
| <i>Halimeda tuna</i> | 0,1 | 0,1 | 1 | 1 |
| Introduced species (<i>Caulerpa racemosa</i>) | 0,3 | 0,5 | 3 | 3 |
| <i>Palmophyllum crassum</i> | 0,1 | 0,1 | 3 | 3 |
| <i>Peyssonnelia spp</i> | 4,8 | 6,2 | 1 | 1 |
| <i>Pseudochlorodesmis furcellata</i> | 0,4 | 0,3 | -1 | -1 |

Tab. 7. Confronto tra le medie (%) dei campioni delle superfici di ricoprimento di ogni taxon/gruppo, con relativo SL, dei due software di analisi d'immagine, Seascape e ImageJ.

CONCLUSIONI

L'indagine ha evidenziato come le comunità sublitorali di substrato roccioso siano dominate da popolamenti algali del genere *Cystoseira* che complessivamente colonizzano l'86% della costa esplorata. *Cystoseira amentacea* è la comunità prevalente in tutti e tre settori analizzati: a S. Caterina prevale in forma di popolamenti a macchie (*Cystoseira* 2) e cinture discontinue (*Cystoseira* 3); a Serpentara, dominano le cinture discontinue ma sono ben rappresentate anche le cinture quasi continue (*Cystoseira* 4); all'Isola dei Cavoli, i popolamenti a *D. petraeum* e a *C. crinita* e l'affioramento superficiale di *P. oceanica* di Cala Is Cascias, sebbene siano dominanti lungo meno del 14% della costa indagata, forniscono un contributo rilevante al valore di EQR, essendo caratterizzati da massimi livelli di sensibilità.

Gli alti valori di EQR rilevati indicano uno stato ecologico elevato delle acque costiere dell'AMP e i risultati ottenuti sono coerenti con quanto rilevato in studi precedenti [15, 16, 29].

La mancanza di differenze, sia tra i settori che tra i due anni di campionamento, indica la presenza di caratteristiche omogenee del corpo idrico dell'AMPCC e l'assenza di recenti variazioni della qualità delle acque. Inoltre la corrispondenza dei valori di EQR tra le diverse aree dell'AMPCC e nei diversi anni suggerisce che i tre settori indagati possano essere considerati rappresentativi di tutta l'area [26].

I popolamenti coralligeni sono risultati ben stratificati e diversificati con caratteristiche strutturali tipiche dell'habitat considerato. La qualità ecologica è risultata alta in tutta l'area. I valori più bassi dell'indice (Secca di S. Caterina) sono legati alla maggiore copertura di feltro algale, considerato un indicatore di aree stressate, in quanto le specie filamentose che lo costituiscono sono tolleranti e opportuniste [30, 31]. L'incremento del feltro può essere anche legato allo sviluppo di specie invasive [32]; infatti, S. Caterina è la località dove *C. cylindracea* è stata osservata più frequente e abbondante.

Eunicella cavolini è risultata distribuita più uniformemente rispetto a *P. clavata* che, al contrario era concentrata in un numero limitato di pareti. Queste specie sono caratterizzate da un differente grado di tolleranza nei confronti della luce che, in genere, si manifesta con una diversa distribuzione batimetrica; infatti *P. clavata* essendo una specie sciafila si riscontra in genere a maggiori profondità [1]. *Eunicella singularis* è stata rilevata in una sola occasione lungo le pareti inclinate oggetto dell'indagine probabilmente in virtù della presenza di zooxantelle simbiotiche che rendono questa specie più tollerante nei confronti della luce e, pertanto, caratteristica di fondali orizzontali poco inclinati [1].

Nel complesso lo studio delle biocenosi bentoniche di fondo duro nell'AMPCC non ha evidenziato particolari criticità o rilevanti elementi di disturbo e lo stato ecologico del corpo idrico è risultato ottimale.

Infine il confronto tra i due software di analisi d'immagine, ha indicato come Seascape risulti più pratico e intuitivo, da preferire in caso di ricoprimento del 100% dell'immagine fotografica. ImageJ invece è risultato più

preciso, in virtù della possibilità di utilizzare immagini con una qualità più elevata in termini di pixel, ma più lento nel caso di un ricoprimento totale dell'immagine. ImageJ, pertanto, è più appropriato in caso di identificazione di pochi oggetti non facilmente individuabili.

BIBLIOGRAFIA

- [1] RELINI G., GIACCONE G., 2009. Gli habitat prioritari del protocollo SPA/BIO (Convenzione di Barcellona) presenti in Italia. Schede descrittive per l'identificazione. Biol. Mar. Medit., 16(1): 1-372.
- [2] RELINI G., TUNESI L., 2009. Le specie protette del protocollo SPA/BIO (Convenzione di Barcellona) presenti in Italia. Schede descrittive per l'identificazione. Biol. Mar. Medit., 16(2): 1-433.
- [3] ORFANIDIS S., PANAYOTIDIS P., STAMATIS N., 2001. Ecological evaluation of transitional and coastal waters: A marine benthic macrophytes-based model. Mediterr. Mar. Sci., 2 (2): 45-65.
- [4] ORFANIDIS S., PANAYOTIDIS P., STAMATIS N., 2003. An insight to the ecological evaluation index (EEI). Ecol. Ind., 3: 27-33.
- [5] ARÉVALO R., PINEDO S., BALLESTEROS E., 2007. Changes in the composition and structure of Mediterranean rocky-shore communities following a gradient of nutrient enrichment: descriptive study and test of proposed methods to assess water quality regarding macroalgae. Mar. Pollut. Bull., 55: 104-113.
- [6] BALLESTEROS E., TORRAS X., PINEDO S., GARCÍA M., MANGIALAJO L., TORRES DE M., 2007. A new methodology based on littoral community cartography for the implementation of the European Water Framework Directive. Mar. Pollut. Bull., 55: 172-180.
- [7] CECCHI E., GENNARO P., PIAZZI L., RICEVUTO E., SERENA F. (2014) - Development of a new biotic index for ecological status assessment of Italian coastal waters based on coralligenous macroalgal assemblages. Eur. J. Phycol., 49(3): 298-312.
- [8] DETER J., DESCAMP P., BALLESTA L., BOISSERY P., HOLON F. (2012) - A preliminary study toward an index based on coralligenous assemblages for the ecological status assessment of Mediterranean French coastal waters. Ecol. Ind., 20: 345-352.
- [9] GATTI G., MONTEFALCONE M., ROVERE A., PARRAVICINI V., MORRI C., ALBERTELLI G., BIANCHI C.N. (2012) - Seafloor integrity down the harbor waterfront: the coralligenous shoals off Vado Ligure (NW Mediterranean). Adv. Limnol., 3: 51-67.
- [10] KIPSON S., FOURT M., TEIXIDO N., CEBRIAN E., CASAS E., BALLESTEROS E., ZABALA M., GARRABOU J. (2011) - Rapid biodiversity assessment and monitoring method for highly diverse benthic communities: a case study of Mediterranean coralligenous outcrops. PLoS ONE, 6(11): 2713.
- [11] GATTI G., BIANCHI C.N., MORRI C., MONTEFALCONE M., SARTORETTO S., 2015. Coralligenous reefs state along anthropized coasts: Application and validation of the COARSE index, based on a rapid visual assessment (RVA) approach. Ecol. Ind., 52: 567-576
- [12] BALLESTEROS E. (2006) - Mediterranean coralligenous assemblages: a synthesis of present knowledge. Oceanog., Mar. Biol. Annu. Rev., 44: 123-195.
- [13] GUALA I., PALOMBO L., SIMEONE S., 2011a. Standardizzazione dei dati esistenti relativi a habitat e specie riconducibili al Protocollo ASPIM (Standard Data-entry Form) presenti nell'AMP Capo Carbonara. Rapporto Tecnico Fondazione IMC - Centro Marino Internazionale ONLUS, 2:2011, 49 pp. + allegati, unpublished.
- [14] GUALA I., ANGIUS R., FRAU F., CINTI M.F., VERONA A., PALIAGA B., 2011b Distribution and morphology of vermetid concretions in the Capo Carbonara Marine Protected Area (South-East Sardinia). 38° Congresso Nazionale della Società Italiana di Biogeografia. Roma, 14-17 Dicembre 2011, unpublished.

- [15] GUALA I., ANGIUS R., PALOMBO L., SIMEONE S., FRAU F., CINTI M. F., VERONA A., PALIAGA B., 2011c. Indagine su habitat e specie del mesolitorale e della frangia infralitorale nell'Area Marina Protetta di Capo Carbonara. Rapporto Tecnico Fondazione IMC – Centro Marino Internazionale ONLUS, 5:2011, 31 pp. + allegati, unpublished.
- [16] GUALA I., ANGIUS R., CINTI M.F., FRAU F., VERONA A., PALIAGA B., 2012. Indagine su habitat e specie di fondo roccioso superficiale nell'Area Marina Protetta di Capo Carbonara (Sardegna). Atti del Quarto Simposio Internazionale IBIMET "Il monitoraggio costiero mediterraneo: problematiche e tecniche di misura". Livorno, 12-14 Giugno 2012. CNR-IBIMET Editore. 349-356. ISBN: 978-88-95597-13-3.
- [17] CINTI M.F., FRAU F., PALIAGA B., SIMEONE S., PALOMBO L., GUALA I., 2011. Priority habitats according to the SPA/BIO protocol (Barcelona Convention) present in the MPA Capo Carbonara. *Biol. Mar. Medit.* 18(1): 302-304.
- [18] FRAU F., CINTI M.F., PALIAGA B., GUALA I., 2011. Protected species according to the SPA/BIO protocol (Barcelona Convention) present in the Marine Protected Area Capo Carbonara. *Biol. Mar. Medit.* 18(1): 309-311.
- [19] MURENU M., ORTU A., CORRIAS S., SABA T., PORCU C., CAU A., 2006. Mappatura delle biocenosi bentoniche nella zona "A" dell'Area Marina Protetta di Capo Carbonara (Sardegna sud-orientale). *Biol. Mar. Medit.* 13(1): 481-484.
- [20] AA.VV., 2008a. Monitoraggio tecnico-scientifico nell'Area Marina Protetta di Capo Carbonara. Relazione finale "Lista ASPIM", Gennaio 2008. 21 pp. + allegati, unpublished.
- [21] CORRIAS A., 2008. The effect of marine protected areas on the biological environment. a case of study in southern Sardinia (Capo Carbonara MPA). PhD Thesis Università di Cagliari. 145 pp. + allegati, unpublished.
- [22] RICEVUTO E., CECCHI E., MURA L., GUALA I., PIAZZI L. 2011. L'utilizzo dei popolamenti coralligeni come indicatori ecologici: valutazione dei pattern di variabilità spaziale e risposta allo stress. 21° Congresso della Società Italiana di Ecologia. Palermo, 3-6 Ottobre 2011, unpublished.
- [23] ABBIATI M., AIROLDI L., COSTANTINI F., FAVA F., PONTI M., VIRGILIO M., 2009. Spatial and temporal variation of assemblages in Mediterranean coralligenous reefs. *Actes du 1er Symposium sur les Coralligène et autres Bio-Concrétions calcaires de Méditerranée* (Tabarka, 15-16 Janvier 2009).
- [24] MANGIALAJO L., SARTONI G., GIOVANARDI F., 2008. Quaderno metodologico sull'elemento biologico macroalghe e sul calcolo dello stato ecologico secondo la metodica CARLIT. Pubblicazioni ISPRA. 105 pp. <http://www.isprambiente.gov.it/files/icram/macroalg.pdf>
- [25] GENNARO P., RENDE S.F., 2011. Elemento di Qualità Biologica Macroalghe. Integrazione al Quaderno metodologico ISPRA per il calcolo dello stato ecologico secondo la metodologia CARLIT. Procedure di campionamento per la raccolta DATI. Dicembre 2011. 19 pp., unpublished.
- [26] FERRIGNO F., BOI S., CINTI M.F., PALIAGA B., GUALA I., 2014. Spatial and temporal distribution of shallow assemblages in the Marine Protected Area of Capo Carbonara (Sardinia). *Biologia Marina Mediterranea*, 21(1): 257-258.
- [27] CECCHI E., PIAZZI L., 2010. A new method for the assessment of the ecological status of coralligenous assemblage. *Biol. Mar. Medit.* 17:162-163.
- [28] CECCHI E., PIAZZI L., SERENA F., 2010. The use of coralligenous assemblages in the monitoring survey along the Tuscany coasts: the assessment of sampling procedures and results of five-years studies. 3° Simposio CNR Livorno, unpublished.
- [29] ARPAS, 2011. Monitoraggio marino costiero ai sensi della L. 979/82. Relazione finale sull'attività 2008-2009, unpublished.
- [30] BALATA D., PIAZZI L., BULLERI F., 2007. Increase of sedimentation in a subtidal system: effects on the structure and diversity of macroalgal assemblages. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 351: 73-82.
- [31] PIAZZI L., GENNARO P., BALATA D., 2011. Effects of nutrient enrichment on macroalgal coralligenous assemblages. *Mar. Pollut. Bull.* 62: 1830-1835.
- [32] PIAZZI L., BALATA D., CINELLI F., 2007. Invasions of alien macroalgae in Mediterranean coralligenous assemblages. *Cryptogamie algol.* 28: 289-301.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' (PON TESSA – OTTIMA). Si ringraziano direzione e staff della Fondazione IMC e dell'Area Marina Protetta di Capo Carbonara; il Dr. Luigi Piazzi e il Dr. Enrico Cecchi per il determinante contributo alle attività di campo, alle analisi di immagine e all'interpretazione dei risultati, il Dr. Stefano Boi per il supporto logistico alle attività di campo.

Analisi di interazioni preda-predatore in organismi zooplanctonici mediante un approccio lagrangiano

Anna Maffia

Dipartimento di Scienze e Tecnologie
Istituto per l'Ambiente Marino Costiero (IAMC-CNR)
Napoli

Marco Uttieri

Dipartimento di Scienze e Tecnologie
Università degli Studi di Napoli "Parthenope"
Napoli

Ai Nihongi, J. Rudi Strickler
School of Freshwater Sciences
University of Wisconsin-Milwaukee
Milwaukee

Sommario— L'idea alla base di questo lavoro, svolto nell'ambito del corso di formazione OTTIMA (Oceanografia operativa e Tecnologie Informatiche per la sicurezza Marittima), è quella di descrivere le traiettorie di nuoto di piccoli organismi zooplanctonici attraverso un approccio lagrangiano. In particolare, lo studio si è concentrato sul comportamento di nuoto di *Daphnia pulex*, comunemente chiamata "pulce di mare", un cladocero di acqua dolce (appartenente alla famiglia dei Daphniidae) in risposta a tentativi di attacco da parte del pesce predatore *Pimephales promelas* (un pesce osseo d'acqua dolce della famiglia dei Cyprinidae).

La digitalizzazione delle immagini è avvenuta utilizzando il programma ImageJ 1.46r (Wayne Rasband, National Institutes of Health, USA) e il suo plug-in MTrackJ. I dati relativi alle traiettorie di *D. pulex* e *P. promelas* sono stati analizzati utilizzando MatLab. Si sono ottenute informazioni relative a: andamento temporale delle componenti del moto; traiettorie 3-D; distanza di attacco tra preda e predatore; velocità di fuga di *D. pulex* e velocità di attacco di *P. promelas*. I risultati hanno consentito di studiare le dinamiche di interazione preda-predatore, evidenziando in particolare le modalità di attacco di *P. promelas* e le reazioni di fuga di *D. pulex*, fornendo importanti elementi per la comprensione dell'ecologia e del funzionamento delle reti trofiche acquatiche.

Keywords — Comportamento natatorio; risposte di fuga; *Daphnia pulex*; *Pimephales promelas*

INTRODUZIONE (HEADING 1)

Il moto in un fluido può essere analizzato utilizzando due differenti approcci: quello euleriano e quello lagrangiano [1], [2]. La descrizione lagrangiana fornisce un'idea immediata

dello spostamento delle particelle, anche se, a dispetto dell'immediatezza delle informazioni così ottenute, la descrizione matematica del fenomeno è molto complicata. Per questo motivo, nell'analisi delle equazioni del moto, si preferisce una descrizione euleriana in cui le variabili indipendenti (x, y, z, t) sono legate da un set di equazioni differenziali alle derivate parziali.

L'idea alla base di questo lavoro consiste nel descrivere le traiettorie di nuoto di piccoli organismi zooplanctonici attraverso un approccio lagrangiano. Quest'approccio potrebbe rivelarsi, infatti, uno strumento molto utile per caratterizzare più dettagliatamente le traiettorie e i differenti pattern di movimento degli organismi zooplanctonici [3].

Il comportamento di nuoto di questi organismi si può efficacemente definire come il risultato di un compromesso tra la necessità di ricerca del cibo, quella di accoppiarsi e quella di evitare i predatori [3]. In questo contesto, risulta molto interessante studiare le caratteristiche del movimento dello zooplancton come risposta adattativa alle variabili ambientali esterne. Alcuni comportamenti di nuoto possono diminuire il rischio di predazione [4]. Per esempio, a parità di dimensioni e pigmentazione delle prede, una minore velocità di nuoto può ridurre il tasso d'incontro con un predatore visivo [5], [6].

In questo lavoro, saranno approfonditi il comportamento di nuoto, soprattutto in riferimento alla riduzione del rischio di predazione, e il comportamento di fuga dei cladoceri (Phylum: Arthropoda; Classe: Crustacea; Sottoclasse: Branchiopoda; Ordine: Cladocera). Questi organismi sono i maggiori rappresentanti dello zooplancton d'acqua dolce [7], [8] e possono rappresentare un'importante componente del popolamento zooplanctonico in ambienti costieri [9], [10]. Essi hanno un corpo di ridotte dimensioni, genericamente compreso fra 0,2 e 3 mm di lunghezza. La biologia di questi organismi è ben conosciuta sia per quanto riguarda la

morfologia, sia la fisiologia, che, in particolare, le modalità di riproduzione [11], [12].

Fra i cladoceri più abbondanti si registrano le specie appartenenti al genere *Daphnia*, comprendente oltre 100 specie [12]. Questo genere è oggetto di numerosissimi studi che hanno riguardato svariati aspetti dell'ecologia e della biologia di *Daphnia* [13]. Già nell'800, infatti, Metchnikoff [14] usò *Daphnia* per validare le sue teorie sull'immunità cellulare, che gli valsero il Premio Nobel nel 1908; gli studi di Weismann nel 1885 [15] sulla *D. pulex* furono strumentali per sviluppare le sue teorie sul trasferimento delle informazioni ereditarie negli animali; Woltereck nel 1909 [16] usò *Daphnia* per sviluppare la nozione di "plasticità fenotipica", cioè la capacità di un organismo di cambiare le sue caratteristiche in risposta all'ambiente, una idea che permette di distinguere la genetica dagli effetti ambientali. Più recentemente, *Daphnia* è stata oggetto di studi di ecotossicologia, relativi agli effetti di sostanze tossiche su questi organismi [17], [18], [19] e di studi di genetica, che hanno permesso a *D. pulex* di essere il solo crostaceo ad avere l'intero genoma sequenziato [20], [21].

Le dimensioni dei cladoceri (0,2 - 3 mm) e le velocità medie sperimentate da questi organismi (dell'ordine di mm s^{-1}), determinano che essi si trovino a vivere in una zona di confine che separa gli habitat acquatici in due reami paralleli: il "reame viscoso" e il "reame inerziale" [22], [23]. Quindi i cladoceri (e in generale lo zooplankton) oltre a costituire un link trofico tra autotrofi ed i livelli trofici superiori, costituisce anche un importantissimo link tra reame viscoso e reame inerziale [23], [24], [25].

Il comportamento di nuoto di *Daphnia* è un aspetto molto studiato in letteratura [26], [27]. Il suo movimento, infatti, in quanto caratteristica adattativa, può essere una importante fonte di informazioni sulle risposte comportamentali di questi animali alle variabili ambientali esterne. Inoltre, è un aspetto chiave per comprendere aspetti di autoecologia [28], inclusa la separazione delle nicchie tra le specie [29].

Smith e Baylor [30] individuarono due tipologie di movimento di questi cladoceri: la "danza rossa" e la "danza blu". La danza rossa consiste in una sequenza di salti ed affondamenti che permettono all'animale di rimanere all'incirca alla stessa profondità nella colonna d'acqua minimizzando i costi energetici connessi al movimento. La danza blu, invece, è un insieme di movimenti veloci e per lo più orizzontali, apparentemente utilizzati dai cladoceri per spostarsi rapidamente fra zone diverse fino a trovare una zona ricca di cibo. Altri studi confermano la predominanza di stimoli luminosi nell'orientamento e nel controllo dell'attività natatoria dei cladoceri [31]. Inoltre, si è osservato che il comportamento di nuoto dei cladoceri è influenzato anche dalla polarizzazione della luce [32]. Anche la temperatura influenza in maniera consistente il comportamento di nuoto [33], così come la presenza di sostanze chimiche, elementi tossici e pesticidi [34], [35], [36] e anche i fattori biologici, come per esempio le infezioni da *Vibrio cholerae* [37]. Il nuoto di *Daphnia* ha delle caratteristiche che sono controllate, inoltre, dalla taglia, dall'età e dal sesso degli individui [38], [39], [40].

In particolare, gli adattamenti evoluti da *Daphnia* per ridurre il rischio di predazione possono riguardare il ciclo di vita, le caratteristiche morfologiche e quelle comportamentali [41], [42]. Essi includono una difesa "pre-incontro", per ridurre la probabilità iniziale d'identificazione della preda da parte del predatore, e dei meccanismi "post-incontro", per ridurre la possibilità di cattura dopo l'attacco. I primi meccanismi sono ben documentati e comprendono, per esempio, la riduzione delle dimensioni del corpo delle primipare [43], [44] e la migrazione verticale giornaliera (DVM) [45], [46]. Esempi di difesa "post-incontro" sono le modificazioni morfologiche che aumentano la difficoltà di presa del predatore e i comportamenti di fuga [47]. E' ben documentato che sia i meccanismi pre-incontro che quelli post-incontro possono essere indotti dalla presenza di segnali chimici provenienti dai predatori (kairomoni) [45], [48], [49], [50], [51].

La ben documentata importanza dell'interazione luce-kairomoni nella regolazione delle DVM [52], [53], [54], [55], [56] induce a riflettere sulla possibilità che essa influenzi anche i meccanismi di difesa "post-incontro" come il comportamento di fuga. Nihongi *et al.* (in prep.) [57] hanno evidenziato come il numero, la frequenza e la velocità degli spostamenti in avanti (*spinning*) compiuti da *D. pulex* fossero maggiori al buio piuttosto che alla luce e che, al buio, la presenza di kairomoni determinasse una diminuzione del numero di spostamenti in avanti, ma un aumento della velocità e della lunghezza degli stessi, probabilmente per aumentare la capacità dei cladoceri di sfuggire ai predatori.

In generale, il comportamento di nuoto di *Daphnia* è ancora un comportamento individuale poco studiato. In molti casi gli esperimenti sono stati compiuti utilizzando la predazione simulata con l'uso di kairomoni [49], mentre in pochi casi le osservazioni sono compiute utilizzando la presenza del predatore in vasca e analizzando le traiettorie di entrambi gli organismi [39].

Inoltre, la complessità comportamentale di questi piccoli animali rende necessario l'utilizzo di strumenti di analisi capaci di caratterizzare efficientemente le traiettorie degli organismi in funzione delle differenti condizioni che essi possono sperimentare. Dal 1998 è utilizzata una strumentazione capace di descrivere le traiettorie degli organismi in 3D [58]. Questo ha consentito una maggiore precisione dei lavori nell'analizzare il comportamento di fuga [59], [39], [49], rispetto ai precedenti studi che già analizzavano il fenomeno descrivendo però le componenti del moto in 2D [38], [26].

Per quanto riguarda la velocità media di nuoto di *Daphnia*, uno dei riferimenti può essere il lavoro di O'Keefe *et al.* (1998) [6]. Gli autori hanno confrontato cloni di *D. pulex* (plx1, plx2 e plx3) con cloni di *D. pulicaria* (plc1 e plc2), di *D. magna* (mag) e di *D. lumholtzi* (lum) calcolando una velocità media di nuoto in 3D di *D. pulex* tra i 10 mm s^{-1} e i 20 mm s^{-1} (Fig. 1).

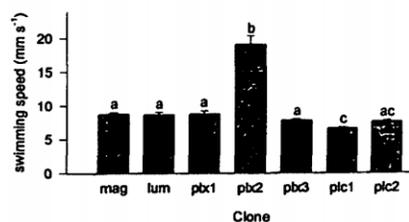


Figura 1 - Velocità di nuoto dei sette cloni usati nello studio (*D. magna* (mag), *D. lumholtzi* (lum), *D. pulex* (plx1, plx2 e plx3), *D. pulicaria* (plc1 e plc2)), misurati alla scala temporale di 1/30 s (N= 30 per ciascun clone) (Fig. 2 da O'Keefe *et al.* 1998).

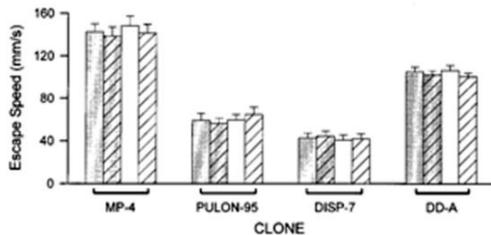


Figura 2 - Velocità di fuga misurata in esperimenti di predazione simulata per i quattro cloni analizzati nello studio di *D. pulicaria* (MP-4 e PULON-95) e *D. pulex* (DISP-7 e DD-A). Nell'ordine, per ciascun clone, sono mostrate le condizioni di buio, luce, controllo e presenza di kairomoni. Le barre di errore sono gli errori standard (Fig. 2 da Brewer *et al.* 1999).

Per quanto riguarda, invece, le velocità di fuga di *Daphnia*, Brewer *et al.* (1999) [49] ci forniscono importanti riferimenti. Gli autori hanno analizzati cloni ibridi di *D. pulex* e *D. pulicaria* in esperimenti di predazione simulata con l'utilizzo di kairomoni (in Fig.2 i cloni sono DISP-7 e DD-A). Si osserva che per il clone DISP-7 la velocità di fuga era intorno ai 40 mm s⁻¹, mentre per il clone DD-A la velocità di fuga media era circa di 100 mm s⁻¹.

In questo contesto, questo lavoro si prefigge di osservare e quantificare, attraverso l'uso di filmati 3D, il comportamento e l'efficacia del comportamento individuale di fuga di *D. pulex* nell'evitare piccoli pesci predatori (*Pimephales promelas*). I dati utilizzati hanno, inoltre, consentito di valutare le modalità di attacco del pesce, permettendo così una ricostruzione più completa delle dinamiche preda-predatore e fornendo importanti elementi per la comprensione dell'ecologia e del funzionamento delle reti trofiche acquatiche.

I. MATERIALI E METODI

A. Set-up del sistema di osservazione

Il comportamento di nuoto di individui di *D. pulex* attaccati da esemplari del pesce *P. promelas* è stato osservato in laboratorio utilizzando un sistema ottico 3D [58]. Questo sistema utilizza quattro specchi e due divisori di fascio per ricevere dati tridimensionali (Fig. 3A) e permette di ottenere contemporaneamente una vista frontale ed una vista laterale dello stesso fenomeno. La vasca utilizzata ha dimensioni 10 x

10 x 16 cm. Tuttavia, per osservare gli animali liberi di nuotare, il campo visivo della telecamera (zona 3D) è stato limitato ad una zona 9 x 9 x 12 cm, a 2 cm di distanza dalla superficie e 1 cm di distanza dalla parete laterale della vasca (Fig. 3B), evitando così fenomeni di *wall-effect* (ovvero modificazioni nel comportamento di nuoto indotti dalla presenza di una barriera fisica).

B. Condizioni luminose e registrazione delle immagini

Gli esperimenti sono stati condotti al buio. Per illuminare il campo di vista è stata utilizzata una luce laser rossa (He-Ne laser, lunghezza d'onda $\lambda = 632$ nm) che *D. pulex* non percepisce [60] e che pertanto può essere usata come luce di background senza influenzare il moto dei cladoceri [3]. Alcuni esemplari di *D. pulex* sono stati posti con una pipetta dolcemente nella vasca contenente acqua dechlorurata a 21°C, avendo cura di acclimatarli per quindici minuti, prima di iniziare le osservazioni.

Per evitare qualsiasi turbolenza, la vasca durante l'osservazione è rimasta coperta. Per le riprese è stata utilizzata una videocamera Sony XC-77 munita di obiettivo Carl Zeiss 80 mm, che consentiva una registrazione del movimento con una frequenza di 30 frames s⁻¹ su supporto VHS.

Questa frequenza, seppur bassa per risolvere il dettaglio cinematico delle risposte di fuga, consente la registrazione e quindi l'analisi del nuoto di un organismo. In generale, filmati ad alta frequenza sono molto brevi, mentre in questo lavoro la bassa frequenza consente di registrare il moto per un intervallo di tempo più lungo, necessario per comprendere le risposte adattative in termini di comportamento natatorio.

C. Animali utilizzati

Per l'esperimento sono stati utilizzati cloni di *D. pulex* forniti dal Dott. Stanley Dodson (Università di Wisconsin-Madison) e provenienti dal Lago Mendota (Wisconsin). Gli animali sono stati allevati a temperatura ambiente (~ 21°C), in condizioni di luce naturale e sono stati alimentati quotidianamente con una miscela di alghe verdi *Ankistrodesmus falcatus*, *Chlamydomonas reinhardtii* e *Selenastrum capricornutum* dalla cultura UTEX di laboratorio (Università del Texas). Queste alghe sono state coltivate con soluzione arricchita nutriente in acqua dolce (Sigma B5282). Come predatori sono stati utilizzati individui adulti di *Pimephales promelas* (Cyprinidae), una specie opportunistica con ampio spettro alimentare (zooplankton, macroinvertebrati, detrito) [61]. *P. promelas* utilizza sia stimoli visivi che meccano-recettivi per cibarsi [62] e, in particolare, i cladoceri rappresentano la più importante componente zooplanctonica nella sua dieta [63].

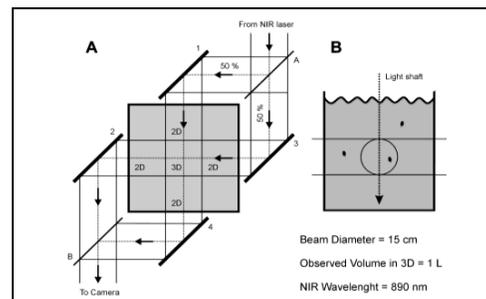


Figura 3 - Sistema ottico che permette le osservazioni di *D. pulex* in condizione di nuoto libero. (A) Vista dall'alto del sistema: 1, 2, 3 e 4 sono specchi piani rettangolari. A e B sono separatori di fascio 50/50. (B) Vista laterale della vasca. La *D. pulex* nel cerchio è quella nella zona 3D, e quella tra le due linee è nella zona 2-D.

TABLE I. NUMERO DI FRAMES DISPONIBILI PER CIASCUN ESPERIMENTO, UTILIZZATI E CONVERSIONE IN SECONDI.

| ID | Tipologia | Durata totale (frames) | Durata totale (s) | Durata sequenza utile (frames) | Durata sequenza utile (s) |
|-------|-----------|------------------------|-------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Esp.2 | Fuga | 182 | 6,1 | 140 | 4,7 |
| Esp.4 | Fuga | 324 | 10,8 | 120 | 4,0 |
| Esp.5 | Fuga | 424 | 14,1 | 134 | 4,5 |
| Esp.6 | Fuga | 315 | 10,5 | 200 | 6,7 |
| Esp.1 | Cattura | 700 | 23,3 | 286 | 9,5 |
| Esp.8 | Cattura | 309 | 10,3 | 202 | 6,7 |

D. Analisi dei video

Sono stati realizzati sei video di durata variabile tra i 6 s e i 23 s (Tab. I). L'osservazione dei video ha permesso di identificare le sequenze in cui *P. promelas* attaccava un esemplare di *D. pulex*. Tuttavia, sono stati considerati per l'analisi solo le sequenze in cui *D. pulex* e *P. promelas* erano visibili entrambi nella zona 3D. Quattro di questi esperimenti si sono conclusi con la fuga di *D. pulex* (Esp2, Esp4, Esp5 e Esp6), mentre in due esperimenti (Esp1, Esp8) il cladocero viene catturato da *P. promelas*. Le due condizioni sono state analizzate separatamente come esperimenti "di fuga" e "di cattura". Tutte le sequenze sono state trasferite dalle videocassette al disco rigido del computer utilizzando il programma DV gate Motion (SONY). I file .avi così ottenuti sono stati digitalizzati manualmente attraverso il software ImageJ 1.46r (Wayne Rasband, National Institutes of Health, USA) e il suo plug-in MTrackJ [64].

Per *D. pulex* è stato scelto di digitalizzare il punto centrale del corpo che può considerarsi il punto che il predatore deve raggiungere perché la cattura della preda vada a buon fine. Per *P. promelas* è stata digitalizzata l'estremità anteriore, cioè la posizione della bocca, perché eravamo interessati a verificare la distanza tra il pesce e la sua preda subito prima dell'attacco e dell'eventuale cattura.

Per ciascun esperimento e per ciascun animale, sono state digitalizzate le posizioni $D_{xz}=(x,z)$ e $D_{yz}=(y,z)$, utilizzate poi per realizzare un'unica matrice di posizioni D_{xyz} . Le posizioni registrate dal programma erano originariamente in pixels. I dati sono stati, quindi, convertiti in mm utilizzando due fattori di conversione differenti: 4,2 per gli assi x e y (1 mm=4,2 pixel) e 4,7 per l'asse z (1 mm=4,7 pixel).

E. Verifica degli spikes

Prima di procedere all'analisi dei dati, per ciascun esperimento si è proceduto alla verifica della presenza di spikes (errori di registrazione dei dati). Si è analizzato l'andamento temporale, realizzando dei grafici che mostrano le componenti x, y e z del movimento di *D. pulex* e *P. promelas* in funzione del tempo (t). La verifica ha evidenziato che i valori misurati ricadevano tutti all'interno del range

tipico di comportamento di nuoto di *D. pulex* e *P. promelas*, confermando l'efficacia dell'utilizzo del tracking manuale.

F. Analisi degli attacchi e delle fughe

In primo luogo è stato utilizzato un grafico 3D per descrivere le traiettorie di *D. pulex* e *P. promelas*. In rosso è stata descritta la traiettoria del pesce, mentre quella del cladocero è stata descritta utilizzando un colore differente a seconda della velocità raggiunta dall'organismo per ciascun tempo (blu = tra 0 e 10 mm s⁻¹; ciano= tra 10 e 40 mm s⁻¹; giallo= tra 40 e 60 mm s⁻¹; verde= tra 60 e 100 mm s⁻¹ e rosso >100 mm s⁻¹). Sono stati messi in evidenza, in ciascun grafico, il punto di partenza dei due individui, con un quadrato □ blu quello di *D. pulex* e con un □ rosso quello di *P. promelas*. Inoltre, si sono evidenziati i punti di attacco: ciascun punto è stato individuato da un asterisco * e da un'etichetta che ne chiarisce la successione temporale ('a1', 'a2'...).

Per i grafici 3D è stato scelto di rappresentare la completa estensione dell'asse x e y della vasca (90 mm); tuttavia, siccome le traiettorie si evolvono più lungo l'orizzontale che lungo la verticale, per questioni di miglioramento grafico si è considerato solo un intervallo di 40 mm di profondità della vasca, anche se ad una altezza diversa a seconda dell'esperimento.

Inoltre, per ciascun esperimento, attraverso la realizzazione un grafico multi-plot si sono messi in evidenza, in funzione del tempo: 1) la distanza tra la bocca di *P. promelas* e *D. pulex*; 2) la velocità di *D. pulex* e 3) la velocità di *P. promelas*. Le velocità sono state calcolate determinando la distanza d_i percorsa dall'individuo tra il tempo t_i e t_{i+1} :

$$d_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}$$

e utilizzando il fattore di conversione 30 (1 s = 30 frame) per ottenere un valore di velocità espresso in mm*s⁻¹

$$v_i = d_i \times 30s^{-1}$$

Nei grafici multi-plot sono stati messi in evidenza sia i momenti di attacco, come identificati nel grafico 3D ('a1', 'a2'...), ma anche le diverse fasi in cui è stata scomposta la sequenza: fasi di attacco, fase di pre-allontanamento e fase di allontanamento. Ciascuna fase di attacco comincia quando la distanza tra *D. pulex* e *P. promelas* è massima, continua con il momento di attacco (quando la distanza diventa minima) e prosegue con l'allontanamento fino a che la distanza non raggiunge un nuovo massimo. Durante la fase di pre-allontanamento, generalmente, la distanza tra i due organismi rimane costante. Durante l'allontanamento la distanza aumenta fino alla fine del video. Nel caso di cattura, invece, la traiettoria analizzata s'interrompe nel momento dell'ingestione.

Al fine di valutare meglio le strategie di fuga di *D. pulex*, per ognuno dei piani ortogonali (XY, XZ, YZ) sono stati calcolati, utilizzando MatLab, gli angoli formati dalla retta che congiunge la bocca del pesce e il cladocero al momento dell'attacco (t), e quelli formati dalla retta che congiunge la posizione di *D. pulex* al momento dell'attacco (t) con quella al

momento immediatamente successivo (t+1). La differenza tra questi due angoli (α) è stata calcolata per ogni esperimento e per ciascun attacco, per poter verificare se differenze negli angoli di fuga potessero influire sulla efficacia della strategia difensiva del cladocero.

G. Analisi statistica

Per ogni esperimento è stata calcolata la velocità media di nuoto di *D. pulex* tra un attacco e l'altro mediando i valori di velocità inferiori a 40 mm s^{-1} . La scelta di questa soglia è basata su evidenze di letteratura che riportano velocità medie di fuga di *D. pulex*, calcolate in tre dimensioni, pari a $48,13 \text{ mm s}^{-1}$ per gli individui adulti di 5 giorni [39], e pari a circa 40 mm s^{-1} e 100 m s^{-1} per ibridi di *D. pulicaria* e *D. pulex* [49].

Inoltre, per ogni esperimento, si è provveduto a calcolare la velocità di fuga media, mediando i valori massimi raggiunti da *D. pulex* a seguito degli attacchi di quell'esperimento. Quindi, per esempio, la velocità media di fuga per un esperimento con tre attacchi ('a1', 'a2' e 'a3'), è data dalla media dei tre valori di velocità massimi registrati in corrispondenza degli attacchi.

Infine, si sono calcolate le distanze medie di attacco, intese come la distanza minima che si raggiunge tra il pesce e la preda, subito prima della fuga di *Daphnia*.

Un'analisi formale dei dati è stata realizzata attraverso una one-way ANOVA per paragonare le medie di velocità di nuoto, di velocità di fuga e delle distanze di attacco dei differenti campioni. ANOVA può essere applicata assumendo che ciascun esperimento sia un campione indipendente. L'ipotesi nulla è che tutti i campioni abbiano lo stesso valore medio. Quando p è stato verificato essere $< 0,01$, l'ipotesi nulla è stata rigettata. In questa fase non si è tenuta in considerazione la variabilità intraindividuale.

Per il confronto dei valori, l'ANOVA è stata accoppiata ad un test di confronto multiplo post-hoc utilizzando il metodo di Tukey delle differenze significative (HSD) [65], una procedura a step singolo di confronto medie. L'ANOVA e, in aggiunta, anche l'analisi multcompare è stata realizzata con MATLAB.

II. RISULTATI

Le sequenze analizzate sono state descritte separatamente, dividendole tra quelle che si concludono con la fuga di *D. pulex* (esperimenti "di fuga") e quelli nei quali, invece, *D. pulex* non riesce a scappare (esperimenti "di cattura"). concludono con la sua cattura.

A. Esperimenti "di fuga"

Gli esperimenti Esp.2, Esp.4, Esp.5, Esp.6 si concludono con la fuga di *D. pulex* e sono caratterizzati da elementi comuni che possono essere efficacemente mostrate dalle Fig.4 e Fig.5, descrittive dell'Esp.2. In particolare, il grafico 3D permette di descrivere in maniera chiara le traiettorie di *D. pulex* (linea multicolor) e di *P. promelas* (linea rossa) (Fig. 4), mentre il grafico multiplot evidenzia come si possa rappresentare la sequenza dividendola in fasi: le fasi di attacco (a1, a2, ...), la fase di pre-allontanamento e quella di allontanamento. Ciascuna fase di attacco comincia nel

momento di massima distanza, comprende il "momento di attacco" e finisce quando la distanza ridiventa massima (Fig. 5).

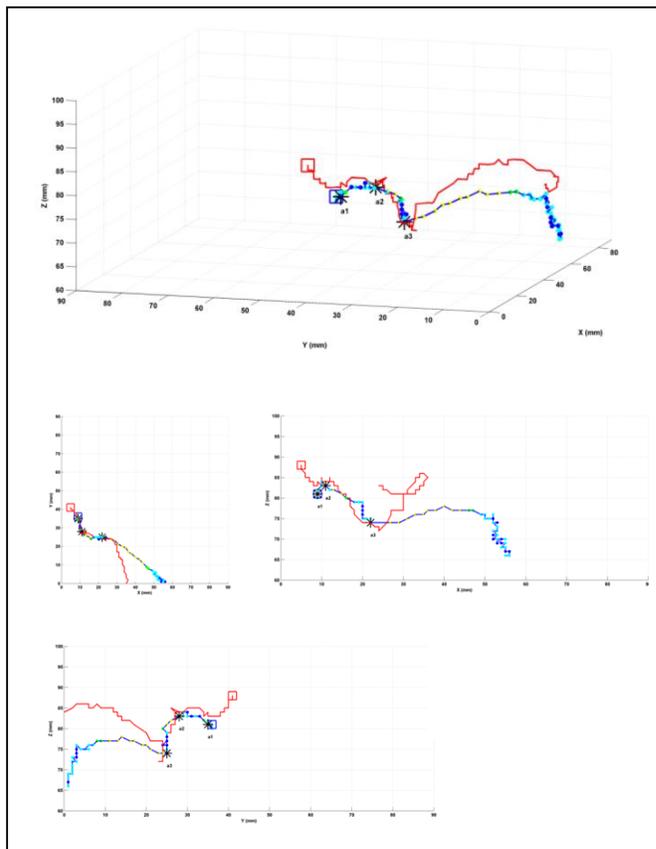


Figura 4 - Esperimento 2: Proiezioni delle traiettorie 3D secondo agli assi a) x-y-z; b) x-y; c) x-z; d) y-z. La traiettoria di *P. promelas* in rosso. La traiettoria di *D. pulex* è colorata in maniera da evidenziare la velocità raggiunta dal cladocero (blu = tra 0 e 10 mm s^{-1} ; ciano= tra 10 e 40 mm s^{-1} ; giallo= tra 40 e 60 mm s^{-1} ; verde= tra 60 e 100 mm s^{-1} e rosso $>100 \text{ mm s}^{-1}$). La tabella mostra i valori degli angoli di fuga (α). I riquadri mostrano i punti di partenza degli individui. Le etichette e gli asterischi evidenziano i punti di attacco (a1, a2 e a3).

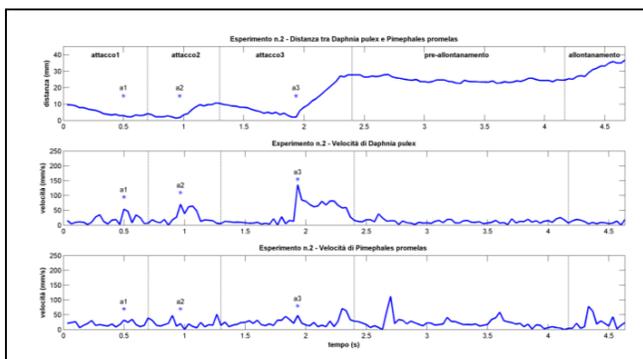


Figura 5 - Esperimento 2: confronto tra a) distanza tra *D. pulex* e la bocca di *P. promelas*; b) la velocità di *D. pulex* in funzione del tempo; c) la velocità di

P. promelas in funzione del tempo. Le etichette e gli asterischi evidenziano i punti di attacco (a1, a2 e a3). Le linee tratteggiate dividono le differenti fasi.

TABLE II. VELOCITÀ MASSIMA, DISTANZA MINIMA E ANGOLI DI

| | n. | v max | d min | α_{XY} | α_{XZ} | α_{YZ} |
|--------|----|--------------|-------|---------------|---------------|---------------|
| Esp. 2 | a1 | 54 | 2,2 | 22,86 | 35,68 | 85,83 |
| | a2 | 70,8 | 1,4 | 13,30 | 25,74 | 12,72 |
| | a3 | 136,2 | 2 | 13,96 | -11,88 | -86,69 |
| Esp. 4 | a1 | 69,0 | 2,2 | 58,68 | 67,43 | 57,38 |
| | a2 | 51,6 | 4,5 | 83,90 | 72,14 | 17,60 |
| Esp. 5 | a1 | 57,9 | 3,0 | -52,15 | -74,09 | 21,94 |
| | a2 | 72,9 | 2,5 | -22,42 | 63,47 | 10,50 |
| | a3 | 78,3 | 1,0 | 3,82 | -68,23 | -65,59 |
| | a4 | 128,8 | 2,2 | -86,10 | 82,35 | 32,99 |
| Esp. 6 | a1 | 57,7 | 3,1 | -43,88 | 84,14 | 21,17 |
| | a2 | 114,4 | 2,4 | 19,66 | -84,25 | 32,02 |
| Esp. 8 | a1 | 50,0 | 3,0 | 41,65 | 14,04 | 76,00 |
| | a2 | 186,7 | 4,7 | -65,82 | 12,10 | -75,00 |
| | a3 | 65,4 | 3,0 | 0,00 | 71,60 | -71,60 |
| | a4 | 69,5 | 3,0 | 69,66 | 53,37 | 35,09 |
| | a5 | 94,8 | 2,2 | 45,81 | -77,21 | 68,10 |

Inoltre in tabella II, per ciascun esperimento, sono descritte la velocità massima per ciascun attacco, la distanza minima e gli angoli di fuga (α) per i tre piani ortogonali.

Si osserva che la velocità di fuga di *D. pulex* in risposta al primo attacco non supera mai i 69 mm s⁻¹ e che in tutti gli esperimenti (ad eccezione dell'Esp.4) la velocità di fuga aumenta progressivamente in risposta negli attacchi successivi al primo (Tab.II). Inoltre, in tutti gli esperimenti (ad eccezione dell'Esp.4) la fuga efficace di *D. pulex* è caratterizzata da una velocità dell'ordine di 100 mm s⁻¹ (Tab. II).

Le traiettorie analizzate hanno anche consentito di stimare con precisione le distanze di attacco tra *P. promelas* e *D. pulex*, che oscillano tra i 2 e i 3,5 mm.

Infine, un'analisi degli angoli di fuga (α) ha consentito di descrivere meglio le traiettorie di fuga di *D. pulex*, anche in funzione della direzione di attacco di *P. promelas*. Gli angoli di fuga (α), formati dalla traiettoria di attacco del pesce e la traiettoria di fuga di *D. pulex* sono mostrati nella tabella II, per ciascuno dei piani ortogonali e per ciascun attacco. E' emerso che le fughe efficienti sono sempre effettuate con un angolo di circa 90°, almeno su uno dei piani ortogonali, e con una velocità maggiore di 100 mm s⁻¹. Quando una di queste caratteristiche manca la fuga non è efficiente. Questa geometria di fuga consente a *Daphnia* di allontanarsi dal volume di attacco del pesce. Anche nel caso dell'Esp.4, nel quale non si raggiungono velocità superiori a 100 mm s⁻¹, solo la fuga effettuata con un angolo 84° nel piano XY permette a *D. pulex* di distogliere il pesce dal suo inseguimento (Tab.II).

B. Esperimenti "di cattura"

I due esperimenti che si concludono con la cattura di *D. pulex* sono l'Esp.1 e l'Esp.8. Queste due sequenze, tuttavia presentano grandi differenze e peculiarità. Si descrivono, quindi, in dettaglio entrambi gli esperimenti.

Nel caso dell'Esp.1, diversamente dagli altri esperimenti, nella vasca c'è un solo individuo di *D. pulex*. La velocità e la forma delle traiettorie di *D. pulex* sono molto particolari rispetto agli esperimenti precedenti. Inoltre, non è stato possibile dividere la sequenza in fasi ben distinte, come fatto nei precedenti esperimenti, perché la velocità risultava all'incirca costante e abbastanza elevata (20/50 mm s⁻¹) per tutta la sequenza analizzata e la distanza tra i due organismi rimaneva pressoché costante. Si sono evidenziati due attacchi. Durante l'attacco 'a1' il pesce raggiunge e cattura *D. pulex*, tenendola in bocca per circa 2 ds. Nel momento della cattura, la velocità del pesce è elevatissima (200 mm s⁻¹). Per alcuni decimi di secondo il cladocero rimane intrappolato e infatti le traiettorie e le velocità dei due animali coincidono. Successivamente, *D. pulex* riesce a liberarsi e dopo 2,2 s viene definitivamente catturata dal pesce. Dall'analisi delle immagini si nota come, diversamente dagli altri casi, una traiettoria elicoidale caratterizzi la fuga di *D. pulex*. La traiettoria è molto chiara negli ultimi istanti prima della cattura del primo attacco ('a1'). La velocità di *P. promelas*, dopo un picco di 200 mm s⁻¹, che permette al pesce di avvicinarsi a *Daphnia* all'inizio della sequenza, rimane inferiore a 50 mm s⁻¹ fino agli istanti precedenti all'attacco 'a1', quando raggiunge prima valori di circa 100 mm s⁻¹ e poi valori di 200 mm s⁻¹ al momento dell'attacco 'a1'. Quando *Daphnia* riesce a scappare dalla bocca del pesce, la velocità di *P. promelas* rimane molto bassa, continua l'inseguimento e arriva a 90 mm s⁻¹ nel secondo e definitivo attacco 'a2'.

In questo esperimento, a causa della prima cattura ('a1') e poi della definitiva cattura ('a2') non è stato possibile analizzare le traiettorie di fuga e i rispettivi angoli (α).

La sequenza dell'Esp.8, invece, è stata divisa in sei fasi. All'inizio della sequenza, la distanza tra il pesce e *D. pulex* diminuisce velocemente al primo attacco ('a1') il cladocero fugge con una velocità di circa 50 mm s⁻¹. La velocità raggiunta da *D. pulex* in fuga, durante il secondo attacco, è molto elevata (187 mm s⁻¹), tal da far aumentare velocemente la distanza tra pesce e cladocero. La velocità di *D. pulex* resta elevata, superiore a 60 mm s⁻¹ per circa 0,3 s, poi diminuisce, in corrispondenza di un picco di velocità del pesce. A questo punto il pesce si avvicina e la traiettoria del pesce risulta molto interessante: il pesce in questo caso non nuota in maniera rettilinea inseguendo la sua preda, ma interseca più volte la traiettoria di *D. pulex*, in particolare prima dell'attacco 'a3'. Le velocità di fuga di *D. pulex* in risposta agli attacchi 'a3' e 'a4' sono molto basse e non riescono a distogliere il pesce. All'attacco 'a5' il cladocero fugge con una velocità di circa 95 mm s⁻¹, ma successivamente il pesce sferza l'ultimo e decisivo attacco a *D. pulex*, catturandola.

In questo esperimento, che si conclude con la cattura di *D. pulex*, gli angoli di fuga α non superano mai i 77° in nessuno dei tre piani ortogonali e in nessuno degli attacchi (Tab. II).

TABLE III. VELOCITÀ MEDIA, VELOCITÀ DI FUGA E DISTANZA MEDIA DI *D. PULEX* PER CIASCUN ESPERIMENTO

| | v media ± SE (mm s ⁻¹) | v fuga media ± SE (mm s ⁻¹) | Distanza di attacco media ± SE (mm) |
|-------|---------------------------------------|--|--|
| Esp.2 | 12,4 ± 0,7 | 87,0 ± 25,1 | 1,9 ± 0,2 |
| Esp.4 | 8,7 ± 0,8 | 60,3 ± 8,7 | 3,4 ± 1,2 |
| Esp.5 | 10,4 ± 1,0 | 84,5 ± 15,4 | 2,2 ± 0,4 |
| Esp.6 | 9,2 ± 0,8 | 86,1 ± 28,4 | 2,8 ± 0,4 |
| Esp.1 | 20,4 ± 0,5 | - | - |
| Esp.8 | 8,9 ± 0,8 | 93,23 ± 22,3 | 3,2 ± 0,4 |

| Velocità massime di fuga | | | | | |
|--------------------------|---------|----|---------|------|--------|
| Source | SS | df | MS | F | Prob>F |
| Groups | 1573,3 | 4 | 393,33 | 0,21 | 0,926 |
| Error | 20355,2 | 11 | 1850,47 | | |
| Total | 21928,6 | 15 | | | |
| Distanze | | | | | |
| Source | SS | df | MS | F | Prob>F |
| Groups | 5,4782 | 4 | 1,36955 | 1,72 | 0,2145 |
| Error | 8,7362 | 11 | 0,7942 | | |
| Total | 14,2144 | 15 | | | |

C. Analisi statistica

La tabella III mostra le velocità medie di nuoto, le velocità medie di fuga e le distanze medie di *D. pulex* per ciascun esperimento. I risultati mostrano che la velocità media di nuoto varia in un range tra $8,7 \pm 0,8 \text{ mm s}^{-1}$ e $20,4 \pm 0,5 \text{ mm s}^{-1}$, mentre le velocità di fuga medie sono state rilevate tra $60,3 \pm 8,7 \text{ mm s}^{-1}$ e $93,2 \pm 22,3 \text{ mm s}^{-1}$. I risultati consentono anche una stima accurata della distanza di attacco di *P. promelas*, comprese fra $1,9 \pm 0,2 \text{ mm}$ a $3,4 \pm 1,2 \text{ mm}$.

Tutti i risultati sono statisticamente simili, come verificato dall'ANOVA (Tab. IV). Ciò indica un'omogeneità di comportamento in *D. pulex*, con assenza di variabilità interindividuale. Inoltre, si rileva anche un'uniformità statistica nelle distanze di attacco di *P. promelas*.

III. DISCUSSIONI E CONCLUSIONI

Le differenze che si verificano nel comportamento individuale di nuoto degli organismi zooplanctonici in generale e, in particolare, di *Daphnia* possono essere ecologicamente molto significative, in quanto influenzano la selezione da parte dei predatori che più facilmente individuano i soggetti più veloci nel movimento [6]. Come altri lavori già hanno evidenziato [66], [67], è molto importante, quindi, che le differenze di comportamento individuale di nuoto a piccola scala, così come tutti gli aspetti che influenzano la visibilità delle prede, siano inclusi nei modelli di selezione delle prede, per evitare conclusioni erranee.

I risultati mostrano che, in risposta ad un attacco di *P. promelas*, *D. pulex* risponde effettuando dei salti ad una velocità che può arrivare a valori dell'ordine di 100 mm s^{-1} . Le distanze di attacco tra *P. promelas* e *D. pulex* oscillano tra i 2

e i 3,5 mm. Infine, una analisi degli angoli di fuga (α) ha consentito di descrivere meglio le traiettorie di fuga di *D. pulex*, anche in funzione della direzione di attacco di *P. promelas*. È emerso che le fughe efficienti sono sempre effettuate con un angolo di circa 90° . Questa geometria di fuga consente a *Daphnia* di allontanarsi dal volume di attacco del pesce.

L'analisi ha permesso, quindi, di rilevare importanti informazioni relativamente al comportamento individuale di fuga di *D. pulex*. In primo luogo, le velocità medie di nuoto misurate in 3D in questi esperimenti trovano buon riscontro nella letteratura. Le velocità medie in questo lavoro vanno dagli $8,7 \text{ mm s}^{-1}$ ai $20,4 \text{ mm s}^{-1}$ (Tab. III), in accordo con le velocità riscontrate da O'Keefe *et al.* (1998) [6] per *D. pulex*, misurate tra i 10 mm s^{-1} e i 20 mm s^{-1} (Fig. 1).

Per quanto riguarda le velocità di fuga, i valori riscontrati nel presente lavoro variano fra $60,3$ e $93,2 \text{ mm s}^{-1}$ (Tab. III). Un riscontro positivo può essere trovato in Brewer *et al.* (1999) [49] nel quale le velocità di fuga medie osservate erano intorno ai 40 mm s^{-1} , per un clone, e di circa di 100 mm s^{-1} , per l'altro clone, in pieno accordo con quanto rilevato nel presente studio (Fig. 2).

Negli esperimenti condotti da Chang e Hanazato (2003) [39] relativi all'efficacia di cattura di un copepode (*Mesocyclops leuckarti*) su 5 specie diverse di cladoceri (*Bosmina longirostris*, *B. fatalis*, *Diaphanosoma brachyurum*, *Ceriodaphnia reticulata*, *Daphnia ambigua* e *D. pulex*), la velocità di fuga di *D. pulex*, calcolata in 3D, è stata di $48,13 \text{ mm s}^{-1}$ per gli individui adulti di 5 giorni. Gli autori hanno osservato che la velocità di nuoto durante la fuga dipendeva dalla specie e, per ogni specie, dalla dimensione e dall'età degli individui. Nel presente studio gli individui analizzati erano tutti adulti appartenenti alla stessa coorte. Le alte velocità di fuga registrate nel presente lavoro confermano che il comportamento natatorio rappresenta un adattamento comportamentale cruciale per la riduzione del rischio di predazione.

Infine, Browman *et al.* (1989) [68] avevano calcolato che la velocità di fuga media in 2D di *D. pulex* inseguita da *Leptodora kindti*, un cladocero carnivoro di acqua dolce, era pari a $31,5 \pm 8,4 \text{ mm s}^{-1}$. Inoltre, gli autori osservavano che la distanza tra l'adulto e *Leptodora* al momento della fuga di *Daphnia*, per gli individui adulti, era di $6,2 \pm 1,5 \text{ mm}$. In questo caso, i valori di velocità di fuga sono minori rispetto a quanto riportato nel presente lavoro, mentre le distanze di attacco sono maggiori. Ciò sottolinea come le risposte di *Daphnia* siano fortemente legate al tipo di stimolo, ed in particolare alla differente natura del predatore.

Come evidenziato nel corso del lavoro, *Daphnia* risulta essere molto sensibile ai cambiamenti delle condizioni dell'ambiente esterno. L'interesse scientifico dimostrato per le modificazioni comportamentali relative al comportamento di nuoto di *Daphnia* è ampiamente giustificato dai possibili effetti a cascata che esse potrebbero apportare al funzionamento delle reti trofiche acquatiche. Comprendere meglio quali sono le caratteristiche del nuoto di questi organismi (velocità, angolo di fuga...) risulta, quindi,

importante per capire possibili cambiamenti risultanti da numerosi fattori, incluse possibili fonti di inquinamento.

In particolare, il comportamento di nuoto di *Daphnia* è influenzato dalla presenza di sostanze chimiche [34], [69], [70]. Elementi tossici come il cadmio influenzano la crescita dei daphnidi e, siccome la velocità è influenzata dalle dimensioni degli organismi, incidono anche sul comportamento di nuoto di questi cladoceri [71].

Anche i pesticidi, come il *Carbaryl* (1-naftil metilcarbammato), influenzano il movimento dei daphnidi, anche in funzione della loro concentrazione: alte concentrazioni inducono movimenti di fuga veloci che espongono i cladoceri a maggiori rischi di predazione [34]. Inoltre, la presenza di inquinanti può alterare la percezione dei segnali chimici dei predatori e quindi avere un impatto sulla capacità di fuga dei cladoceri.

Essendo, quindi, il comportamento di nuoto di *Daphnia* un ottimo descrittore della *fitness* di questo cladocero in differenti condizioni ambientali, esso può efficacemente utilizzarsi come indice di qualità ambientale. Le caratteristiche che rendono questi cladoceri degli ottimi bioindicatori sono anche la loro diffusione elevatissima in quasi tutti gli ambienti acquatici del mondo e, soprattutto, l'alta sensibilità dimostrata verso le sostanze chimiche tossiche [72].

Per permettere una veloce individuazione di contaminanti in corpi d'acqua, per esempio nel campo del trattamento delle acque reflue o anche nel settore dell'approvvigionamento idrico, negli ultimi decenni si è sviluppato il "biological early warning system" (BEWS) [69], [73]. La sensibilità di *D. magna* alla presenza di inquinanti è utilizzata da questo sistema biologico real-time di allerta precoce nella determinazione di sostanze tossiche. Il BEWS, in particolare, integra differenti caratteristiche comportamentali del nuoto di *D. magna* tra cui la fototassi, la velocità di nuoto e il comportamento di *spinning* in maniera da aumentarne la sensibilità e la stabilità delle analisi [34], [35], [74], [75].

Quando il livello di tossicità calcolato dal sistema supera la soglia di allerta, si innesca automaticamente un allarme automatico [76], [77]. Come nel caso del BEWS, la variazione del comportamento di nuoto di *Daphnia* può risultare importante per progettare sistemi di allerta in grado di verificare in tempo reale cambiamenti nella qualità dell'acqua.

Questo lavoro, quindi, bene si inserisce nel contesto della ricerca sul comportamento di nuoto attraverso un approccio lagrangiano di *Daphnia* e costituisce un piccolo ma significativo tassello nella comprensione degli adattamenti comportamentali di questo cladocero in risposta a variazioni ambientali.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' – TESSA".

Il lavoro è stato realizzato nell'ambito dello stage del corso OTTIMA (Oceanografia operativa e Tecnologie Informatiche

per la sicurezza Marittima) presso il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Università degli Studi di Napoli "Parthenope", che si ringrazia vivamente per la disponibilità e per il indispensabile supporto scientifico.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Pickard G.L. e Emery W.J., 1982. Descriptive Physical Oceanography—An Introduction, 4th edition. Pergamon Press, Oxford, 249 pp.
- [2] Emery W.J., Thomson R.E., 1998. Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Pergamon Press, Oxford, 634 pp.
- [3] Uttieri M., Mazzocchi M.G., Nihongi A., Ribera d'Alcalà M., Strickler J.R., Zambianchi E., 2004. Lagrangian description of zooplankton swimming trajectories. *Journal of Plankton Research* 26, 99-105.
- [4] Gerritsen J., Strickler R., 1977. Encounter probabilities and community structure in zooplankton: a mathematical model. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 34, 73-82.
- [5] Buskey E.J., Coulter C., Strom S., 1993. Locomotory patterns of microzooplankton: potential effects of food selectivity of larval fish. *Bulletin of Marine Science* 53, 29-43.
- [6] O'Keefe T.C., Brewer M.C., Dodson S.I., 1998. Swimming behavior of *Daphnia*: its role in determining predation risk. *Journal of Plankton Research* 20, 973-984.
- [7] Hebert P.D.N., 1977. Niche overlap among species in the *Daphnia* carinata complex. *Journal of Animal Ecology* 46, 399-409.
- [8] de Bernardi R., Peters R.H., 1987. Why *Daphnia*? In: Peters, R. H., de Bernardi, R., (Eds.), 1987. *Daphnia*. Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia. Consiglio Nazionale delle Ricerche: Verbania-Pallanza, 353-366.
- [9] Mazzocchi M.G., Ribera d'Alcalà M., 1995. Recurrent patterns in zooplankton structure and succession in a variable coastal environment. *ICES Journal of Marine Science* 52, 679-691.
- [10] Ribera d'Alcalà M., Conversano F., Corato F., Licandro P., Mangoni O., Marino D., Mazzocchi M.G., Modigh M., Montresor M., Nardella N., Saggiomo V., Sarno D., Zingone A., 2004. Seasonal patterns in plankton communities in a pluriannual time series at a coastal Mediterranean site (Gulf of Naples): an attempt to discern recurrences and trends. *Scientia Marina* 68, 65-83.
- [11] Decestecker E., De Meester L., Mergeay J., 2009. Cyclical parthenogenesis in *Daphnia*: sexual versus asexual reproduction. In: Schön, I., Martens, K., Dijk, P., (Eds.), 2009. *Lost Sex - The Evolutionary Biology of Parthenogenesis*. Springer Science - Business Media: Dordrecht, 295-316.
- [12] Ebert D., 2005. Ecology, Epidemiology, and Evolution of Parasitism in *Daphnia*; National Library of Medicine (US), National Center for Biotechnology Information. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?db=Books>: Bethesda (MD).
- [13] Ebert D., 2011. A Genome for the Environment. *Science* 331, 539-540.
- [14] Metchnikoff M.E., 1884. Ueber eine Sprosspilzkrankheit der Daphnien. Beitrag zur Lehre über den Kampf der Phagozyten gegen Krankheitserreger. *Virchows Arch. Pathol. Anat. Physiol.* 9, 177.
- [15] Weismann A., 1885, Die Continuität des Keimplasma's als Grundlage einer Theorie der Vererbung. Gustav Fischer, Jena.
- [16] Woltereck R., 1909. Weitere experimentelle Untersuchungen über Artveränderung, speziell über das Wesen quantitativer Artunterschiede bei Daphniden. *Verhandlungen der Deutschen Zoologischen Gesellschaft* 19, 110-173.
- [17] Villegas-Navarro A., Romero Gonzales M.C., Rosas Lopez E., 1999. Evaluation of *Daphnia magna* as an indicator of toxicity and treatment efficacy of textile wastewater. *Environmental International* 25, 619- 624.
- [18] Bernot R.J., Brueske M.A., Evans-White M.A., Lamberti G.A., 2005. Acute and chronic toxicity of imidazolium-based ionic liquids on *Daphnia magna*. *Environmental Toxicology and Chemistry* 24, 87-92.
- [19] Tyagi V.K., Chopra A.K., Durgapal N.C., Kumar A., 2007. Evaluation of *Daphnia magna* as an indicator of Toxicity and Treatment efficacy of

- Municipal Sewage Treatment Plant. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management* 11, 61 – 67.
- [20] Christie A.E., McCoole M.D., 2012. From genes to behavior: investigations of neurochemical signaling come of age for the model crustacean *Daphnia pulex*. *Journal of Experimental Biology* 215, 2535-44.
- [21] Colbourne J.K. et al., 2011. The Ecoresponsive Genome of *Daphnia pulex*. *Science* 331, 555-561.
- [22] Purcell E.M., 1977. Life at low Reynolds numbers. *American Journal of Physics* 45, 3-11.
- [23] Naganuma T., 1996. Canoid copepods: linking lower-higher trophic levels by linking lower-higher Reynolds numbers. *Marine Ecology Progress Series* 136, 311-313.
- [24] Kerfoot W.C., 1978. Combat between predatory copepods and their prey: Cyclops, Epischura, and Bosmina. *Limnology and Oceanography* 23, 1089-1102.
- [25] Vogel S., 1994. *Life in Moving Fluids* (2nd edn). Princeton: Princeton University Press.
- [26] Dodson S.I., Ryan S., Tollrien R., Lampert W., 1997. Individual swimming behavior of *Daphnia*: effects of food, light and container size in four clones. *Journal of Plankton Research* 19, 1537-1552.
- [27] Uttieri M., Sandulli R., Spezie G., Zambianchi E., 2014. From small to large scale: a review of the swimming behavior of *Daphnia*. In El-Doma M., *Daphnia: Biology and Mathematics Perspectives*. Nova Science Publishers, Inc. pp. 309-327.
- [28] Strickler J.R., 1977. Observation of swimming performances of planktonic copepods. *Limnology and Oceanography* 22, 165–170.
- [29] Strickler J.R., 1985. Feeding currents in copepods: two new hypotheses. In Laverack, M.S. (ed.), *Physiological Adaptations of Marine Animals*. Society for Experimental Biology, pp. 459–485.
- [30] Smith F.E., Baylor E.R., 1953. Color responses in the Cladocera and their ecological significance. *American Naturalist* 87, 49-55.
- [31] Young S., Taylor V. A., Watts, E., 1984. Visual factors in *Daphnia* feeding. *Limnology and Oceanography* 29, 1300-1308.
- [32] Baylor E. R., Smith F. E., 1953. The orientation of Cladocera to polarized light. *American Naturalist* 87, 97-101.
- [33] Ziarek J.J., Nihongi A., Nagai T., Uttieri M., Strickler R., 2011. Seasonal adaptations of a pulicaria swimming behaviour: the effect of water temperature. *Hydrobiologia* 661, 317–327.
- [34] Dodson S., Hanazato T., Gorski P.R., 1995. Behavioral responses of *Daphnia pulex* exposed to carbaryl and Chaoborus kairomoni. *Environmental Toxicology and Chemistry* 14, 43–50.
- [35] Baillieux M., Blust, R., 1999. Analysis of the swimming velocity of cadmium-stressed *Daphnia magna*. *Aquatic Toxicology* 44, 245–254.
- [36] Cerbin S., Kraak, M.H.S., de Voogt P., Visser P.M., Van Donk E., 2010. Combined and single effects of pesticide carbaryl and toxic *Microcystis aeruginosa* on the life history of *Daphnia pulicaria*. *Hydrobiologia* 543, 129-138.
- [37] Nihongi A., Ziarek J.J., Nagai T., Uttieri M., Zambianchi E., Strickler J.R., 2011. *Daphnia pulicaria* hijacked by *Vibrio Cholera*: Altered swimming behavior and predation risk implications. In Giri Kattel, *Zooplankton and Phytoplankton*. Nova Science Publishers, Inc.
- [38] Dodson S., Ramcharan C., 1991. Size-specific swimming behavior of *Daphnia pulex*. *Journal of Plankton Research* 13, 1367-1379.
- [39] Chang K.H., Hanazato T., 2003. Vulnerability of cladoceran species to predation by the copepod *Mesocyclops leuckarti*: laboratory observations on the behavioral interactions between predator and prey. *Freshwater Biology* 48, 476-484.
- [40] Brewer M.C., 1998. Mating behaviours of *Daphnia pulicaria*, a cyclic parthenogen: comparisons with copepods. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 353, 805-815.
- [41] Dodson S. I., 1989. The ecological role of chemical stimuli for the zooplankton: predator induced morphology in *Daphnia*. *Oecologia* 78, 361-367.
- [42] Tollrian R., Dodson S.I., 1999. Inducible defenses in cladoceran, p. 177–202. In Tollrian R. and Harvell C.D. (eds.), *The ecology and evolution of inducible defenses*. Princeton University Press. Princeton, N.J.
- [43] Machacek J., 1991. Indirect effect of planktivorous fish on the growth and reproduction of *Daphnia galeata*. *Hydrobiologia* 225, 193-197.
- [44] Stibor H., 1992. Predator induced life-history shifts in a freshwater cladoceran. *Oecologia* 92, 162-165.
- [45] Dodson S.I., 1988. The ecological role of chemical stimuli for the zooplankton: predator-avoidance behavior in *Daphnia*. *Limnology and Oceanography* 33, 1431-1439.
- [46] Lampert W., 1993. Ultimate causes of diel vertical migration of zooplankton: New evidence for the predator avoidance hypothesis. *Archiv für Hydrobiologie–Beiheft Ergebnisse der Limnologie* 39, 79–88.
- [47] Pijanowska J., 1993. Diel vertical migration in zoo plankton: fixed or inducible behavior? *Arch. Hydrobiol.* 39, 89-97.
- [48] Tollrian R., Harvell C.D., 1999. Inducible defenses: current ideas. In Tollrian R. and Harvell C.D. (eds.), *The ecology and evolution of inducible defenses*. Princeton University Press. Princeton, N.J..
- [49] Brewer M.C., Dawidowicz P., Dodson S., 1999. Interactive effects of fish kairomone and light on *Daphnia* escape behavior. *Journal of Plankton Research* 21, 1317-1335.
- [50] Ringelber J., Van Gool E., 1998. Do bacteria, not fish, produce 'fish kairomone'? *Journal of Plankton Research* 20, 1847-1852.
- [51] De Meester L., Pijanowska J., 1996. On the trait-specificity of the response of *Daphnia* genotypes to the chemical presence of a predator. In Lenz P.H., Hartline D.K., Purcell J.E., Mac-Millan D.L. (eds.) *Zooplankton: Sensory Ecology and Physiology*. Gordon and Breach, Amsterdam, pp. 407-418.
- [52] Lampert W., 1989. The adaptive significance of diel vertical migration of zooplankton. *Functional Ecology* 3, 21-27.
- [53] Beklioglu M., Gozen A.G., Yildirim F., Zorlu P., Onde S., 2008. Impact of food concentration on diel vertical migration behaviour of *Daphnia pulex* under fish predation risk. *Hydrobiologia* 614, 321-327.
- [54] Zaret T.M., 1980. *Predation and freshwater communities*. Yale University Press, New Haven & London.
- [55] Ringelberg J., 1999. The photobehaviour of *Daphnia* spp. as a model to explain diel vertical migration in zooplankton. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 74, 397-423.
- [56] Larsson P., Lampert W., 2012. Finding the optimal vertical distribution: behavioural responses of *Daphnia pulicaria* to gradients of environmental factors and the presence of fish. *Freshwater Biology* 57, 2514-2525.
- [57] Nihongi A., Ordemann A., Lovern S.B., Strickler J.R., (in prep). Fish Kairomones can Induce Spinning Behavior of *Daphnia pulex* in the Dark.
- [58] Strickler J.R., 1998. Observing free-swimming copepods mating. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 353, 671-680.
- [59] Seuront L., Schmitt F.G., Brewer M.C., Strickler J.R., Souissi S., 2004. From random walk to multifractal random walk in zooplankton swimming behavior. *Zoological Studies* 43, 498-510.
- [60] Smith K.C., Macagno E.R., 1990. UV photoreceptors in the compound eye of *Daphnia magna* (Crustacea, Branchiopoda). A fourth spectral class in single ommatidia. *Journal of Comparative Physiology* 166, 597–606.
- [61] Herwig B.R., Zimmer K.D., 2007. Population ecology and prey consumption by fathead minnows in prairie wetlands: importance of detritus and larval fish. *Ecology of Freshwater Fish* 16, 282–294.
- [62] Salgado S.D., Hoyt R.D., 1996. Early behaviour formation in fathead minnow larvae, *Pimephales promelas*: implications for sensory function. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology Journal* 28, 91-106.
- [63] Held J.W., Peterka J.J., 1974. Age, growth, and food habits of the fathead minnow, *Pimephales promelas*, in North Dakota saline lakes. *Transaction of the American Fisheries Society* 103, 743-756.
- [64] Meijering E., Dzyubachyk O., Smal I., 2012. Methods for Cell and Particle Tracking. In: *Imaging and Spectroscopic Analysis of Living Cell* (Ed. P. M. Conn). Volume 504 of *Methods in Enzymology*. Elsevier, February 2012, Ch. 9, pp. 183-200.

- [65] Hochberg Y., Tamhane A.C., 1987. Multiple Comparison Procedures. John Wiley & Sons, New York.
- [66] Main K.L., 1985. The influence of prey identity and size selection of prey by two marine fishes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 88,145-152.
- [67] Scott A., 1987. Prey selection by juvenile cyprinids from running water. *Freshwater Biology* 17, 129-142.
- [68] Browman H.I., Kruse S., O'Brien W.J., 1989. Foraging behavior of the predaceous cladoceran, *Leptodora kindti*, and escape responses of their prey. *Journal of Plankton Research* 11, 1075-1088.
- [69] Butterworth F.M., Gunatilaka A., Gonsebatt M.E., 2001. Biomonitoring and biomarkers as indicators of environmental change 2: A handbook, Plenum Publishers, New York, 2001.
- [70] Shimizu N., Ogino C., Kawanishi T., Hayashi Y., 2002. Fractal analysis of *Daphnia* motion for acute toxicity bioassay. *Environmental Toxicology* 17, 441-448.
- [71] Baillieux M., Scheunders P., 1998. On-line determination of the velocity of simultaneously moving organisms by image analysis for the detection of sublethal toxicity, *Water Research* 4, 1027-1034.
- [72] van der Schalie W.H., Shedd T.R., Knechtges P.L., Widder M.W., 2001. Using higher organisms in biological early warning systems for real-time toxicity detection. *Biosensors and Bioelectronics* 16, 457-465.
- [73] Green U., Kremer J.H., Zillmer M., Moldaenke C., 2003. Detection of Chemical threat agents in drinking water by an early warning real-time biomonitor, *Environmental Toxicology* 18, 368-374, 2003.
- [74] Kieu N.D., Michels E., Meester L.D., 2001. Phototactic behavior of *Daphnia* and the continuous monitoring of water quality: Interference of fish kairomones and food quality. *Environmental Toxicology and Chemistry* 5, 1098-1103.
- [75] Jeong T.Y., Jeon J., Kim S.D., 2014. Development and evaluation of new behavioral indexes for a biological early warning system using *Daphnia magna*. *Drinking Water Engineering and Science* 7, 1-9.
- [76] Jeon J.H., Kim J.H., Lee B.C., Kim S., 2008. Development of a new biomonitoring method to detect the abnormal activity of *Daphnia magna* using automated grid counter device. *Science of Total Environment* 389, 545-556.
- [77] Lechelt M., Blohm W., Kirschneit B., Pfeiffer M., Gresens E., Liley J., Holz R., Lüting C., Moldaenke C., 2000. Monitoring of surface water by Ultrasensitive *Daphnia* Toximeter, *Environmental Toxicology* 15, 390-400.

Applicazione di un modello di qualità delle acque alla foce del fiume Sarno

Scarpa Ester

Istituto per l'Ambiente Marino Costiero
IAMC –CNR, Napoli
Napoli, Italia

Cianelli Daniela, Zambianchi Enrico

Dipartimento di Scienze e Tecnologie
Università degli Studi di Napoli "Parthenope"
Napoli, Italia

Sommario— Il fiume Sarno è stato definito in vari studi scientifici il “fiume più inquinato d'Europa”, in quanto caratterizzato da anni da un gravissimo inquinamento i cui effetti ricadono su un'area densamente popolata. Il fiume attraversa un territorio caratterizzato da realtà industriali importanti, da un sistema fognario - depurativo spesso incompleto e inadeguato e da una serie di scarichi e prelievi insistenti sul corso d'acqua, spesso di natura abusiva, che hanno alterato le proprietà chimico-fisiche, biologiche ed ecologiche delle acque. Studi recenti testimoniano, inoltre, che il fiume Sarno risulta essere una tra le fonti principali di inquinamento da metalli pesanti nel Mar Tirreno. Il presente studio riguarda l'applicazione del modello di qualità delle acque QUAL2K per riprodurre lo stato qualitativo del tratto di valle del fiume Sarno al fine di valutare l'impatto ambientale sul Golfo di Napoli, in termini di concentrazione alla foce dei principali inquinanti. Mediante una fase di calibrazione e validazione, in funzione dei dati del monitoraggio dell'ARPAC degli anni 2005, 2006 e 2007, è stato ricostruito lo stato qualitativo in diverse condizioni di flusso, cioè in periodi umidi e in periodi asciutti, e in condizioni caratterizzate da attività antropiche più intense. Sono stati riprodotti i profili di concentrazione della domanda biochimica di ossigeno (BOD), dell'azoto ammoniacale (NH_4), dei nitrati (NO_3) e del cromo totale (Cr). Il modello riproduce l'andamento medio dei profili di concentrazione di tali parametri suggerito dalle misure, consentendo di integrarle in termini spaziali e temporali e di calcolare le concentrazioni alla foce.

Keywords—fiume Sarno; modelli di qualità delle acque; QUAL2K; Golfo di Napoli.

INTRODUZIONE

Il fiume Sarno, protagonista da anni di un'emergenza ambientale e socio-economica a causa di un grave inquinamento [1], [2], scorre attraverso la piana del Sarno e raggiunge il mare nel Golfo di Napoli, tra Torre Annunziata e Castellammare di Stabia. L'elevata densità di popolazione dell'area, lo sviluppo industriale, l'uso intensivo di fertilizzanti e pesticidi in agricoltura e la presenza di un sistema fognario inadeguato sono tra le cause di inquinamento del fiume. Recenti studi del “Dipartimento di Scienze mediche e preventive” dell'Università Federico II [3] evidenziano l'impatto ambientale che tale inquinamento ha sul Golfo di Napoli, sottolineando la necessità di considerare il fiume Sarno una delle principali fonti di metalli pesanti nel Mar Tirreno. I modelli di qualità delle acque sono un valido

strumento che integra nello spazio e nel tempo le informazioni derivanti dal monitoraggio sullo stato qualitativo delle acque superficiali. Tali modelli permettono di ottenere informazioni in situazioni in cui il monitoraggio non è possibile e di predire scenari futuri [4]. Questi modelli possono essere applicati a diversi corpi d'acqua (laghi, fiumi, acque costiere, estuari), descrivendo i processi di trasporto, in funzione delle caratteristiche idrologiche e idrodinamiche, e le interazioni biochimiche e fisiche tra i costituenti [4]. La modellazione matematica del sistema fluviale, come modellazione del regime idraulico e della qualità, consente di descrivere le relazioni tra i carichi inquinanti e i corpi d'acqua, e di ottenere i profili di concentrazione di ogni inquinante in funzione delle caratteristiche del corso d'acqua. Tra i più popolari modelli di qualità delle acque si possono citare: QUAL2K, SIMCAT, TOMCAT, MONERIS [5]. Nell'ambito del presente lavoro è stato applicato il modello di qualità fluviale QUAL2K al fiume Sarno. Lo scopo dello studio è stato valutare la qualità del corso d'acqua nell'area di valle, in un tratto di una decina di chilometri a partire dalla foce, che recepisce già in partenza un significativo carico inquinante dal reticolo idrografico di monte. In particolare si è concentrata l'attenzione sulla domanda biochimica di ossigeno (BOD), sull'azoto ammoniacale (NH_4) e sui nitrati (NO_3), che caratterizzano i reflui delle industrie conserviere, e sul cromo totale (Cr), metallo pesante correlabile a diversi cicli produttivi dell'industria siderurgica, chimica e manifatturiera, e soprattutto della concia delle pelli. Per questa sostanza è stato riscontrato un quasi sistematico superamento degli SQA (Standard di Qualità Ambientale) nei vari siti di monitoraggio della rete ARPAC (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Campania) localizzati lungo l'asta del fiume [6]. La calibrazione del modello è stata effettuata considerando i dati di qualità del periodo estivo degli anni 2005, 2006, 2007. La validazione ha riguardato l'inverno degli stessi anni. Il modello validato è stato poi utilizzato per riprodurre i profili di concentrazione nel periodo agosto-settembre, periodo di massima attività dell'industria conserviera. I risultati hanno consentito di evidenziare il valore delle concentrazioni alla foce degli inquinanti che costituiscono un potenziale rischio per gli ecosistemi acquatici estuarini.

I. IL MODELLO DI SISTEMA FLUVIALE

Lo strumento modellistico consente di rappresentare in forma numerica le dinamiche dell'ecosistema fluviale e di riprodurre l'evoluzione combinata delle sue componenti, nel tempo e nello spazio, in termini quantitativi [7]. I modelli capaci di rappresentare il sistema fluviale, devono essere modelli dinamici, che mutano e si evolvono in risposta ad ingressi controllabili (interventi di gestione), non controllabili (variazioni meteorologiche e/o carichi inquinanti incontrollati) e anche alla dinamica interna del sistema stesso. Il modello di qualità fluviale è costituito da un modello matematico, ovvero da un insieme di equazioni differenziali che descrivono l'evoluzione dei parametri chimici, fisici e biologici di qualità: BOD, (*Biochemical Oxygen Demand*), COD (*Chemical Oxygen Demand*), nutrienti (azoto e fosforo), sostanze organiche tossiche e metalli pesanti, prendendo in considerazione anche la componente biologica, come l'attività fitoplanctonica [7]. Il sistema di equazioni viene poi tradotto e risolto numericamente a partire da una serie di dati in ingresso. La simulazione numerica effettuata col modello permette di riprodurre il comportamento dell'ecosistema alla luce di diversi scenari, siano essi caratterizzati da particolari condizioni meteorologiche, da una particolare configurazione degli scarichi o da interventi di gestione alternativi, e fornisce quindi la possibilità di valutare le situazioni più critiche oppure quelle più idonee a raggiungere determinati standard di qualità. Il modello di qualità costituisce quindi uno strumento fondamentale ai fini scientifici, per comprendere le relazioni tra i carichi inquinanti e i profili di concentrazione che si instaurano lungo il corso d'acqua, e per i gestori della risorsa idrica, per prescrivere e pianificare misure e interventi per la tutela della qualità del corpo idrico.

A. Componenti dell'ecosistema acquatico e meccanismi di autodepurazione

Il modello dell'ecosistema acquatico deve riprodurre l'interazione tra le componenti biotiche del sistema e le sostanze immesse dall'esterno, riproducendo i meccanismi naturali di autodepurazione. Dall'ambiente esterno provengono inquinanti naturali e sostanze tossiche, i primi (nutrienti) considerati inquinanti solo se in quantità eccessiva; le seconde, come i metalli pesanti, non sono biodegradabili e quindi non sono eliminabili per autodepurazione, ma soggette a fenomeni di bioaccumulo nella catena alimentare [7]. Dall'esterno pervengono quindi nutrienti, ossigeno ed energia sotto forma di radiazione solare, coinvolti nella catena alimentare e nella biodegradazione dei composti del carbonio, dell'azoto e del fosforo (autodepurazione). In particolare, le alghe assimilano azoto e fosforo inorganici presenti in fosfati, ammoniaca e nitrati. Batteri specializzati sono responsabili dell'ammonificazione dell'azoto organico (proveniente sia dagli scarichi civili che dalla mortalità delle stesse alghe o di altri organismi acquatici) dell'ossidazione dell'ammoniaca (nitrificazione), della denitrificazione e della decomposizione della sostanza organica carboniosa. La dinamica seguita da una sostanza biodegradabile soggetta ad un flusso monodimensionale, come quello considerato dai principali modelli di qualità fluviale, nell'ipotesi di completa miscelazione verticale e laterale nella sezione, è descritta dall'equazione di avvezione-diffusione-reazione:

$$\frac{\partial C(t,x)}{\partial t} = -u(t,x) \frac{\partial C(t,x)}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C(t,x)}{\partial x^2} - f(C(t,x)) \quad \dots\dots(1)$$

dove t è il tempo ed x la distanza da un punto a monte preso come riferimento, $C(t,x)$ rappresenta la concentrazione dell'inquinante nel tempo lungo il tratto di fiume a valle del riferimento; $u(t,x)$ rappresenta il campo di velocità del fluido, D il coefficiente diffusivo e $-f(C(t,x))$ il termine cinetico che modella la dinamica di biodegradazione per la particolare sostanza considerata.

B. Calibrazione e validazione del modello

La calibrazione del modello è stata effettuata sulla base delle misure disponibili in determinate sezioni dei parametri di qualità, agendo sia sui parametri idraulici inseriti nel modello che sui tassi delle varie cinetiche, cercando di minimizzare la discrepanza tra i dati misurati e la risposta del modello. La validazione, effettuata a partire da un nuovo dataset, consiste nell'individuare le *performance* del modello tali da garantire la riproducibilità dei risultati [8].

MATERIALI E METODI

I. IL MODELLO QUAL2K

Il presente lavoro consiste nell'applicazione di un modello di qualità fluviale al fiume Sarno mediante l'utilizzo del software QUAL2K dell'USEPA (*United States Environmental Protection Agency*). Il modello QUAL2K accoppia il modello idraulico, schematizzando il sistema fluviale come monodimensionale e simulando un flusso stazionario non uniforme, e il modello di qualità, descrivendo le cinetiche dei principali parametri di qualità dell'acqua su scala giornaliera. Il modello effettua inoltre un bilancio di calore in funzione di dati meteorologici con variabilità giornaliera per poter stimare la temperatura e consente di riprodurre i profili di concentrazione degli inquinanti lungo l'asta fluviale mediante bilanci di massa. Nel descrivere la struttura del modello, si farà riferimento al contenuto del manuale di QUAL2K [9].

A. Schematizzazione idraulica del modello

Il modello schematizza il fiume come suddiviso in una serie di tratti di lunghezza variabile, la cui dimensione è scelta dall'utente (Fig.1).

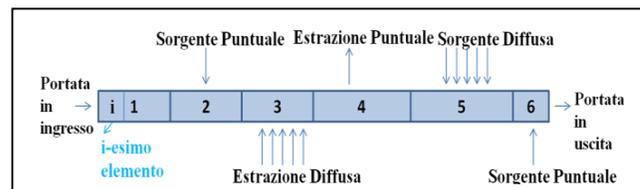


Fig. 1 Schematizzazione idraulica

Tali tratti si assume abbiano caratteristiche idrauliche costanti (pendenza, larghezza del fondo, etc.) e per ognuno di essi sono consentite immissioni o prelievi puntuali e non puntuali. E' possibile prendere in considerazione sistemi con affluenti. Ogni tratto (*reach*) può essere inoltre suddiviso in una serie di elementi di uguale lunghezza. L'elemento va a costituire l'unità computazionale fondamentale del modello. Per ogni elemento viene effettuato un bilancio di massa dato

dall'equazione di continuità (2), in condizioni di moto stazionario:

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{out,i} \quad (2)$$

Dove:

Q_i = il flusso uscente dall'elemento i verso l'elemento $i+1$ [m^3/d]

Q_{i-1} = il flusso entrante dall'elemento a monte $i-1$ [m^3/d]

$Q_{in,i}$ = il flusso totale entrante nell'elemento da sorgenti di tipo puntiforme e non [m^3/d]

$Q_{out,i}$ = il flusso totale uscente dall'elemento dovuto ad estrazioni puntuali e non [m^3/d]

Una volta fornita a QUAL2K la portata all'ingresso del tronco oggetto di studio e calcolate le portate uscenti da ogni elemento mediante i bilanci di massa, vengono calcolate la profondità e la velocità della corrente attraverso la formula di Manning o scale di deflusso. Nella presente trattazione è stata utilizzata la formula di Manning (3) per la risoluzione del modello idraulico, per cui i dati necessari sono: la pendenza del canale, la larghezza delle sponde e la loro pendenza ed il coefficiente di Manning. Il modello QUAL2K ammette soltanto canali di sezione rettangolare o trapezoidale. In questo caso la relazione fra portata e profondità sarà data da:

$$Q = \frac{S_0^{1/2} A_c^{5/3}}{n P^{2/3}} \quad (3)$$

dove:

Q = la portata [m^3/s];

S_0 = la pendenza del fondo [m/m];

n = coefficiente di Manning [$s/m^{1/3}$]

A_c = l'area della sezione trasversale [m^2], funzione della la profondità idrica H ;

P = perimetro bagnato [m].

Mediante procedimento iterativo si può calcolare la profondità idrica H , l'area trasversale della sezione A_c e attraverso l'equazione di continuità la velocità media della corrente.

B. Bilanci di massa e di calore

La modellazione della temperatura deriva da un bilancio di calore. Tale bilancio per un elemento "i" considera gli scambi di calore con gli elementi adiacenti, con i sedimenti al fondo, con l'atmosfera e quelli dovuti alle sorgenti e ai prelievi.

L'equazione di bilancio del calore è espressa come:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} T_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} T_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i} T_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (T_{i-1} - T_i) + \frac{E'_i}{V_i} (T_{i+1} - T_i) + \frac{W_{h,i}}{\rho_w C_{pw} V_i} \left(\frac{m^3}{10^6 cm^3} \right) + \frac{J_{a,i}}{\rho_w C_{pw} H_i} \left(\frac{m}{100 cm} \right) + \frac{J_{s,i}}{\rho_w C_{pw} H_i} \left(\frac{m}{100 cm} \right) \quad (4)$$

Dove: T_i = la temperatura nell'elemento i [$^{\circ}C$];

t = il tempo [d];

E'_i = coefficiente di dispersione di massa tra gli elementi "i" e "i+1" [m^3/d];

$W_{h,j}$ = il carico netto di calore da sorgenti puntuali e distribuite nel tratto i [cal/d];

ρ_w = la densità dell'acqua [g/cm^3];

C_{pw} = il calore specifico dell'acqua [$cal/g^{\circ}C$];

$J_{a,i}$ = il flusso di calore all'interfaccia aria-acqua [$cal/(cm^2 d)$];

$J_{s,i}$ = il flusso di calore fra i sedimenti e l'acqua [$cal/(cm^2 d)$].

Il modello QUAL2K richiede la definizione di latitudine e longitudine, fuso orario, data della simulazione, l'indicazione del periodo dell'ora legale o solare, al fine di inquadrare le condizioni di irraggiamento locali dell'area. Una serie di dati meteorologici sono inoltre richiesti per valutare opportunamente ogni termine del bilancio relativo allo scambio di calore all'interfaccia aria-acqua.

Il modello QUAL2K applica inoltre il seguente bilancio di massa in ogni elemento per ogni componente:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} c_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i} c_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (c_{i-1} - c_i) + \frac{E'_i}{V_i} (c_{i+1} - c_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i \quad (6)$$

Dove: W_i = carico esterno del generico costituente entrante nell'elemento i [g/d]; c_i la concentrazione della generica variabile, S_i = costituenti prodotti o accumulati a causa delle reazioni e dei trasferimenti di massa [$g/(m^3 d)$].

Il sistema fisico all'interno del quale possono essere scritti i bilanci di massa fra i costituenti e i bilanci di calore viene schematizzato come segue (Fig.2):

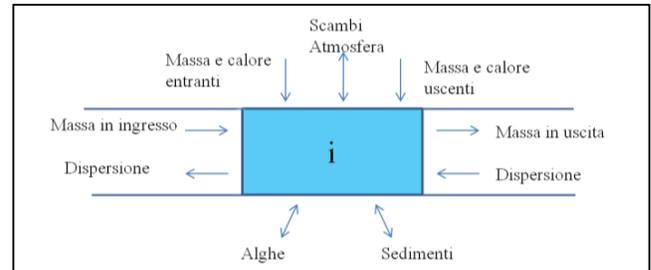


Fig.2 Bilanci di massa e di calore sull'i-esimo elemento

I processi cinetici ipotizzati nel modello sono: idrolisi; ossidazione; nitrificazione; denitrificazione; fotosintesi; morte; respirazione; escrezione. Mentre i processi di trasferimento di massa sono: reazione; sedimentazione; richiesta di ossigeno del sedimento. Le principali variabili di stato del modello sono: ossigeno disciolto, solidi sospesi inorganici, conduttività, azoto organico disciolto, azoto ammoniacale, azoto nitrico, fosforo organico, fosforo inorganico, fitoplancton, patogeni, detrito, alcalinità, carbonio inorganico totale, alghe di fondo, BOD a base carboniosa.

C. Principali cinetiche biochimiche

Il modello QUAL2K applica relazioni matematiche che definiscono le variazioni delle concentrazioni delle variabili di stato del modello in funzione dei processi in cui sono

coinvolte. Di seguito si illustrano le variabili su cui è stata posta attenzione nell'ambito di tale studio.

L'azoto ammoniacale aumenta per via dell'idrolisi dell'azoto organico e per la morte ed escrezione del fitoplancton e delle alghe di fondo. Le perdite sono dovute alla nitrificazione e alla fotosintesi, perciò la variazione di azoto ammoniacale nel tempo (S_{an}) risulta:

$$S_{an} = ONHydr + (1 - f_{nop})q_{Np}PhytoDeath + (1 - f_{nob})q_{Nb} \frac{BotAlgDeath}{H} + PhytoExN + \frac{BotAlgExN}{H} - Nitriif - P_{ap}PhytoUpN - P_{ab} \frac{BotAlgUptakeN}{H} \quad (8)$$

dove f_{nop} rappresenta la quantità di azoto organico sul totale interno [adimensionale] e q_{Np} la quota parte delle cellule di azoto nel fitoplancton e q_{Nb} la quota parte delle cellule di azoto nelle alghe di fondo.

La stima della nitrificazione dell'azoto ammoniacale è:

$$N - NH_4Nitriif = F_{oxan}k_n(T)n_a \quad (9)$$

dove:

$k_n(T)$ = tasso di nitrificazione in funzione della temperatura [1/d]; F_{oxan} = limitazione da bassa concentrazione di ossigeno [adimensionale]; n_a = concentrazione dell'azoto ammoniacale [mg/L]; P_{ap} e P_{ab} indicano l'ammoniaca come fonte preferenziale di azoto per il fitoplancton e le alghe di fondo rispettivamente.

L'azoto nitrico aumenta con la nitrificazione dell'ammoniaca e cala con la denitrificazione e la fotosintesi:

$$S_{nn} = Nitriif - Denitriif - (1 - P_{ap})PhytoUpN - (1 - P_{ab}) \frac{BotAlgUptakeN}{H} \quad (10)$$

dove: $Denitriif = F_{oxdn}k_{dn}(T)n_n$

$k_{dn}(T)$ = tasso di denitrificazione in funzione della temperatura [1/d] e F_{oxdn} = effetto dovuto a bassa concentrazione di ossigeno nella denitrificazione [adimensionale].

Il modello descrive il BOD a base carboniosa scomponendo la matrice in due contributi distinti, uno ad ossidazione lenta e l'altro ad ossidazione veloce.

Il CBOD lento aumenta per effetto della dissoluzione del detrito e cala a causa dell'idrolisi e dell'ossidazione:

$$S_{cs} = (1 - F_f)r_{od}DetriDiss - SlowCHydr - SlowCOxid \quad (11)$$

Dove: r_{od} = frazione di CBOD nel detrito; F_f è la frazione di detrito disciolto che si trasforma in CBOD veloce.

Il BOD rapido è generato a sua volta dalla dissoluzione del detrito, dall'idrolisi della parte ad ossidazione lenta e consumato per effetto delle reazioni di ossidazione e denitrificazione:

$$S_{cf} = F_f r_{od} DetriDiss + SlowCHydr - FastCOxid - r_{ondn} Denitri \quad (12)$$

dove: $FastCOxid = F_{oxc}K_{dc}(T)c_f$;

$K_{dc}(T)$ = velocità di ossidazione del BOD veloce [d^{-1}] e r_{ondn} = frazione dell'ossigeno perso per nitrati soggetti a denitrificazione; F_{oxc} = attenuazione dovuta a bassa concentrazione di ossigeno [adimensionale].

Quando le misure a disposizione non consentono la distinzione tra BOD ad ossidazione lenta o veloce è possibile portare a zero il BOD lento e porre le misure di BOD pari al BOD ad ossidazione veloce.

Il modello biochimico permette all'utente di gestire in un opportuno foglio di lavoro, i meccanismi cinetici di tutti i costituenti. I parametri fondamentali a cui uno specifico costituente risponde possono essere modificati al fine di calibrare il modello.

II. AREA DI STUDIO

L'area oggetto di studio (Fig. 3) è il bacino idrografico del fiume Sarno che trae origine da copiose sorgenti del massiccio calcareo dei monti Picentini, alle spalle della città di Sarno (SA). Il fiume Sarno, dopo un percorso complessivo di circa 24 km, sfocia nel Golfo di Napoli tra Torre Annunziata e Castellammare di Stabia. Lungo il suo decorso il fiume riceve da sinistra l'Alveo Comune Solofrana-Cavaioia che vi recapita le acque di questi due torrenti. La grande disponibilità della risorsa "acqua" in quest'area ha da sempre favorito gli usi plurimi della stessa: idropotabile, agricolo e industriale.

Il Bacino del Sarno è suddiviso in tre province: alla provincia di Avellino appartiene la fascia montana ad est, nella quale ricade il polo conciario di Solofra; alla provincia di Salerno appartengono la fascia montana che delimita a sud il bacino e la parte centrale dell'Agro Sarnese-Nocerino, nel quale ricade il polo agro-alimentare; alla Provincia di Napoli appartengono la fascia costiera e la zona vesuviana [2].

Il Sarno è da tempo riconosciuto come uno tra i fiumi più inquinati d'Europa [1], [2], [3], [10]. Il fiume attraversa un territorio densamente popolato con una popolazione che oscilla intorno al milione di abitanti, caratterizzato da realtà industriali importanti, che costituiscono la fonte principale di inquinamento. La presenza di un sistema fognario - depurativo incompleto e inadeguato, di un'attività agricola che usa fitofarmaci e fertilizzanti chimici e di una serie di scarichi e prelievi insistenti sul corso d'acqua spesso di natura abusiva, hanno alterato le proprietà chimico-fisiche, biologiche ed ecologiche delle acque. Oltre all'industria alimentare dedita alla produzione di conserve vegetali (in particolare di pomodoro), e alle concerie, è presente anche un'industria metalmeccanica e farmaceutica (la Novartis, situata a 200 m dalla foce, è una delle aziende farmaceutiche più grandi del mondo). In base ad uno studio della Polizia riguardante le 39 città del bacino del Sarno, soltanto 13 di queste possiedono un sistema fognario che ricopre tra il 67% e il 100% dell'area [11].

Il disinquinamento del fiume Sarno è iniziato nel 1973 con il Progetto speciale di risanamento dell'intero Golfo di Napoli ma a tutt'oggi non è stato concluso. Con il DPCM del 14 aprile 1995 è stato dichiarato lo stato di emergenza in ordine alla situazione socio-economica e ambientale del fiume [12]. I progetti finalizzati al risanamento dell'area prevedono il completamento della costruzione del sistema depurativo del Sarno, la progettazione e realizzazione delle reti fognarie dell'intero bacino, il progetto e i relativi lavori di dragaggio e bonifica dei sedimenti, nonché l'attuazione di specifici interventi sulle aziende e sulle industrie presenti nel territorio per ridurre l'impatto sull'ambiente. Attualmente è l'ARCADIS (Agenzia Regionale Campana Difesa Suolo) incaricata del coordinamento degli interventi per gestire tale emergenza. Ai fini della classificazione dello stato ecologico e chimico delle acque del Sarno, l'ARPAC a partire dal 2001 ha individuato sei siti di monitoraggio lungo l'asta principale del fiume, uno sull'Alveo Comune e uno sul Torrente Solofrana, in corrispondenza dei punti maggiormente significativi dal punto di vista dei carichi inquinanti. Tale rete è rimasta invariata sino al 2012. Nel periodo 2001-2012, l'ARPAC ha quindi condotto il campionamento delle acque e l'analisi dei parametri chimico-fisici con una frequenza mensile. I parametri macrodescrittori di riferimento per la definizione del livello di qualità delle acque sono definiti dal d.lgs. 152/99 prima e dal d.lgs. 152/06 poi, nonché integrati da vari D.M., tra cui in ultimo il n.260/2010. Tali norme hanno fissato una serie di indici basati sull'analisi di elementi di natura biologica, chimico-fisica, idro-morfologica per la definizione dello stato ecologico delle acque, mentre per la definizione dello stato chimico hanno indicato una serie di sostanze chimiche pericolose. Dallo studio condotto la qualità delle acque fluviali è risultata cattiva o pessima, con un significativo trend di peggioramento nel tempo. Inoltre si è riscontrato un significativo peggioramento da monte verso valle, imputabile ad un carico inquinante derivante da reflui urbani scarsamente depurati che cresce lungo l'asta fluviale [6]. Tra i parametri analizzati dall'ARPAC è presente un ampio set di sostanze pericolose, inizialmente limitato ai metalli pesanti (As, Cd, Cr, Hg, Cu, Zn, Pb), ma poi esteso, con l'evoluzione della normativa, a svariate nuove sostanze, come solventi organici alogenati, idrocarburi policiclici aromatici e un ampio set di fitofarmaci. In particolare è stato riscontrato un quasi sistematico superamento degli SQA nei vari siti di monitoraggio per quanto riguarda il cromo totale, inquinante correlabile a diversi cicli produttivi dell'industria siderurgica, chimica e manifatturiera, e soprattutto della concia delle pelli [6].

Dal 2013 è operativa una nuova rete di monitoraggio, attraverso la quale l'ARPAC, in risposta ai Piani di Gestione e Tutela delle Acque e alla nuova normativa sul monitoraggio, ha avviato un rilevamento dei parametri di qualità chimico-fisica e biologica al fine di verificare entro il 2015 il rispetto degli obiettivi di qualità ambientale. Lo studio della qualità delle acque fluviali è fondamentale anche per valutare gli impatti ambientali degli inquinanti veicolati alla foce sul mare.

A. Il Golfo di Napoli e il fiume Sarno

Il Golfo di Napoli, in cui il Sarno sfocia, è un'area soggetta ad intense attività antropiche che vanno dai densi insediamenti

urbani a quelli industriali, all'intenso traffico marittimo. La qualità degli ecosistemi marini in questa area è direttamente influenzata dalle attività umane e le acque presentano proprietà idrografiche e biologiche che riflettono gli stress antropici. Per tali motivi il Golfo è una delle aree chiave del progetto PERSEUS (*Policy-oriented marine Environmental Research in the Southern European Seas*), finanziato dalla Commissione Europea per approfondire le relazioni tra le pressioni antropiche e gli ecosistemi marini e definire strumenti innovativi per raggiungere gli obiettivi di "Buono stato ambientale"(GES) della MSFD (*Marine Strategy Framework Directive*). Tali obiettivi sono perseguibili mantenendo i livelli d'inquinamento e i loro effetti biologici entro limiti accettabili, che non producano significativi impatti sull'ambiente marino. Gli impatti dell'inquinamento da contaminanti, elementi e composti chimici tossici, persistenti e bioaccumulabili, possono essere diretti o indiretti. Questi possono essere danni alle risorse viventi e agli ecosistemi marini che causano la perdita di biodiversità, i rischi per la salute umana, l'ostacolo per le attività marine come la pesca e il turismo e il deterioramento della qualità delle acque e degli usi sostenibili dei beni e servizi legati al mare [1].

Il fiume Sarno rappresenta la principale fonte di inquinanti in ingresso nella parte orientale del Golfo: da recenti studi del Dipartimento di Scienze Mediche Preventive dell'Università Federico II [3], [10] è emerso che la principale fonte di inquinamento da IPA (composti cancerogeni con forte impatto sulle risorse biologiche marine) e da metalli pesanti nel Mar Tirreno è costituita proprio dal Sarno. La complessa circolazione nel Golfo di Napoli, determinata dall'interazione di vari fattori quali i venti, la circolazione nel Mar Tirreno, la complessa topografia del fondo e l'interazione tra le correnti nella colonna d'acqua [13], determina la dispersione di tali inquinanti, che risulta orientata a sud-ovest [3] il che desta particolare attenzione per l'Area Marina Protetta di Punta Campanella. I livelli significativi di inquinamento nelle acque del fiume e nei sedimenti potrebbero causare effetti dannosi sugli organismi terrestri ed acquatici e sulla salute umana. Il livello di cromo totale nei sedimenti vicino alla foce supera i limiti di legge italiani, mentre il suo livello nelle acque dell'estuario risulta superiore al CCC (*Criterion Continuous Concentration*), che è uno standard qualitativo dell'USEPA che indica la più alta concentrazione di una data sostanza nelle acque superficiali, alla quale una comunità acquatica può essere esposta indefinitamente senza ricavarne effetti inaccettabili.

Nelle acque costiere sottoposte all'influenza della foce del fiume Sarno paradossalmente è presente una straordinaria ricchezza di organismi bentonici, fitoplanctonici e nectonici e non risulta un'evidenza dell'inquinamento da metalli che precluda la commestibilità o la modifica delle proprietà organolettiche delle risorse della pesca. Tuttavia andrebbero condotte ulteriori indagini su come tali sostanze impattino sugli ecosistemi marini e sui potenziali rischi per la salute umana attraverso il consumo di pesce nella regione Campania. La foce del Sarno è anche un'importante fonte di composti azotati e di sostanza organica, oltre che di altri nutrienti, data la presenza dell'industria conserviera e degli scarichi domestici, le cui concentrazioni è importante valutare ai fini

del raggiungimento del GES e della definizione dei traguardi ambientali relativamente all'eutrofizzazione delle acque marine [14].

La possibilità di interpretare in diverse condizioni, mediante la modellazione numerica, le concentrazioni dei principali inquinanti alla foce del fiume, può essere di supporto nelle attività di ricerca volte ad approfondire le conoscenze riguardo i livelli di inquinamento nel Golfo di Napoli.

III. APPLICAZIONE DEL MODELLO QUAL2K: DATI DI INPUT E IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO

La simulazione dello stato qualitativo del tratto di valle del fiume Sarno ha richiesto il reperimento di un'ampia mole di dati, messi a disposizione da vari enti preposti al monitoraggio (ARPAC, Centro Funzionale per la Previsione, Prevenzione e Monitoraggio Rischi e l'allertamento ai fini di protezione civile della Regione Campania) e alla gestione e tutela del bacino idrografico (Autorità di Bacino Campania Centrale). Tali dati riguardano il periodo 2003 - 2010. Le misure dei parametri di qualità non consentono di interpretare lo stato qualitativo in tutti gli anni di riferimento, in quanto non sempre disponibili con la stessa frequenza spaziale e

temporale, per cui l'attenzione è stata posta sugli anni 2005-2007, per i quali le informazioni risultano più esaurienti.

Il tronco del fiume Sarno ha una lunghezza complessiva di 10 km a partire dalla foce ed è stato suddiviso in 30 tratti di lunghezza compresa tra 0.1 km e 0.82 km, ognuno costituito da un solo elemento. La calibrazione del modello è stata effettuata utilizzando come riferimento i dati di qualità dei periodi estivi provenienti dalle stazioni di monitoraggio dell'ARPAC (Fig. 3) localizzate lungo il tronco oggetto di studio (Tab.1). La validazione ha riguardato i mesi invernali al fine di valutare la capacità del modello calibrato di riprodurre la qualità delle acque in differenti condizioni meteorologiche e di portata.

In particolare nelle simulazioni sono stati considerati i seguenti parametri: domanda biochimica di ossigeno (BOD_u, riferito ad un periodo di 20 giorni necessari per ossidare tutta la sostanza organica), azoto ammoniacale (NH₄), nitrati (NO₃) e cromo totale (Cr). Il BOD, l'azoto ammoniacale e i nitrati sono parametri che caratterizzano i reflui civili e dell'industria conserviera, mentre il cromo totale è l'inquinante tipico rilasciato dalle concerie

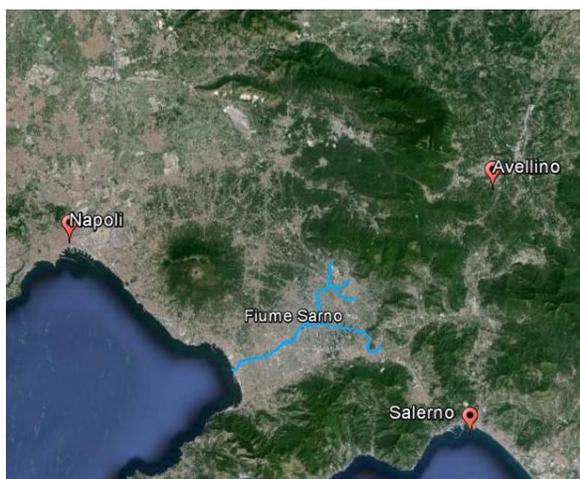


Fig. 3. Area di studio e rete di monitoraggio

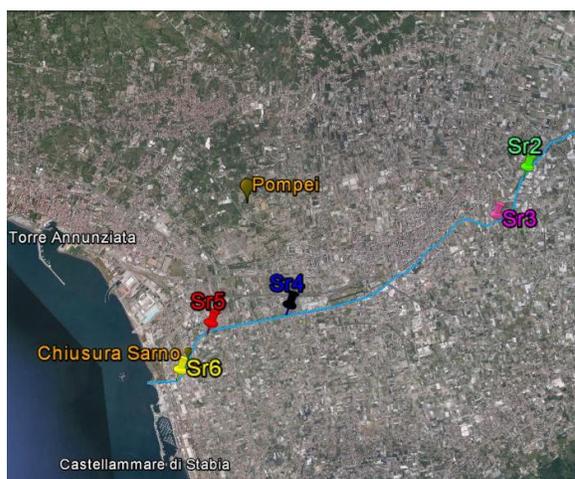


TABELLA 1. STAZIONI DI MONITORAGGIO DELL'ARPAC

| Stazioni di monitoraggio | Sr2 | Sr3 | Sr4 | Sr5 | Sr6 |
|--------------------------|------|------|------|------|------|
| Distanza dalla foce (Km) | 8.47 | 7.39 | 3.03 | 1.52 | 0.52 |

E' disponibile, in ogni sito di monitoraggio e per ogni parametro, un dato mensile, per cui, ai fini della calibrazione, sono state mediate le misure estive del periodo Giugno-Agosto per ogni anno, ottenendo valori rappresentativi mediamente di un periodo secco. Ai fini della validazione sono state mediate le misure dei mesi da gennaio a marzo, rappresentativi di un periodo caratterizzato da portate maggiori e da condizioni meteorologiche tipiche di periodi più umidi. Sono stati esclusi dalle simulazioni i periodi di piena, perché riguardano casi eccezionali, lontani dalle condizioni di deflusso medie. Le

portate sono state ricavate dai dati di tirante idrico, messi a disposizione dal "Centro Funzionale per la Previsione, Prevenzione e Monitoraggio Rischi e l'allertamento ai fini di protezione civile", relativi alla stazione idrometrica di Chiusura Sarno e dalla scala di deflusso relativa a tale sezione, fornita dall'ex Autorità di Bacino del fiume Sarno. La portata all'ingresso del tronco di studio è stata ottenuta depurando la portata calcolata a Chiusura Sarno dell'apporto relativo agli scarichi. I dati meteorologici richiesti ai fini delle simulazioni sono dati di temperatura dell'aria, umidità relativa e velocità del vento relativi alle stazioni meteorologiche ubicate nel comune di Pompei e di Quindici. Sono stati mediat i dati orari dei parametri meteorologici relativi agli stessi giorni in cui erano disponibili le misure dei parametri di qualità, fino ad ottenere dei valori medi orari rappresentativi di un giorno tipo del periodo in esame. Per la definizione del modello idraulico sono stati utilizzati i risultati del rilievo topografico effettuato

dall'ex Autorità di Bacino del fiume Sarno [15], dal quale sono state ricavate le caratteristiche geometriche delle sezioni e la pendenza dei vari tratti. Il modello di qualità prevede la definizione all'*headwater*, ovvero all'imbocco del tronco in esame, oltre che della portata, anche dei parametri di qualità. Per tali valori si è scelto di considerare, in tutte le simulazioni i valori registrati in corrispondenza della stazione Sr2, cioè quella più vicina all'imbocco, in quanto nel tratto compreso tra l'*headwater* e la stazione suddetta non sono presenti scarichi. I valori di partenza dei parametri delle reazioni biochimiche, oggetto di calibrazione, sono quelli di *default* del programma.

Le informazioni relative agli scarichi puntuali agenti lungo il tronco in esame sono state fornite dall'Autorità di Bacino Campania Centrale e riguardano il censimento degli scarichi svolto dall'ARPAC nei primi anni del 2000. Tale censimento indica la posizione e il diametro degli scarichi, l'origine, civile o industriale, e se sono depurati o meno. In base a tali informazioni sono stati ipotizzati un grado di riempimento dello scarico mediamente pari al 30%, la pendenza e la scabrosità al fine di valutarne la portata. I dati di qualità sono stati stimati considerando, per quelli depurati, i limiti imposti dal d.lgs. 152/2006 nelle Tabelle 1 e 3 dell'Allegato 5 considerando i parametri delle acque reflue civili e delle industrie tipiche dell'area. Per quanto riguarda quelli non depurati si è fatto riferimento ai "Criteri di assimilazione alle acque reflue domestiche" contenuti nei Regolamenti della Regione Campania del 2012 e 2013 e alle composizioni tipiche dei reflui delle industrie conserviere contenuti nei Rapporti tecnici di alcuni impianti della zona. Gli affluenti del Sarno, con i relativi scarichi, sono stati rappresentati come un unico scarico gravante sul tronco principale. Le portate e la composizione degli scarichi possono variare in funzione delle attività antropiche, quindi del periodo di analisi. I parametri delle cinetiche di reazione, i parametri delle acque degli

scarichi, le condizioni all'*headwater* e i parametri idraulici sono state oggetto della calibrazione.

Al fine di individuare scenari critici per il livello qualitativo delle acque, il modello, calibrato e validato, è stato poi applicato per simulare dei giorni rappresentativi, per ogni anno dal 2005 al 2007, del periodo di massima attività dell'industria conserviera, ovvero del periodo Agosto-Settembre. Non è possibile, invece, individuare condizioni critiche legate all'industria conciaria in quanto non è noto un periodo tipico di massima attività che farebbe supporre un aumento dei livelli di cromo.

RISULTATI

I. CALIBRAZIONE

Per eseguire le simulazioni relative alle varie fasi si è fatto riferimento ad una serie di studi riguardanti l'applicazione del modello QUAL2K ad altri corsi d'acqua [16], [17], [18]. La calibrazione, riferita ai periodi estivi degli anni 2005, 2006 e 2007, è stata effettuata partendo dalle ipotesi riportate nella tabella 2. Si è considerato costante il contributo complessivo degli scarichi nei tre anni di analisi, in modo da valutare gli effetti di un differente impatto degli stessi al variare della portata. Si può notare che la percentuale di acque reflue sul totale della portata che raggiunge la foce varia dal 70 all'80%. La calibrazione ha riguardato, per il modello idraulico, le pendenze dei tratti in cui è stata suddivisa l'asta fluviale, mentre, per il modello di qualità, i parametri che regolano la reazione di ossidazione del BOD e i processi che determinano l'evoluzione della concentrazione di cromo totale lungo il percorso. I parametri che regolano la nitrificazione e la denitrificazione sono quelli di *default*.

TABELLA 2 IPOTESI PER LA CALIBRAZIONE

| Calibrazione | Estate 2005 | Estate 2006 | Estate 2007 |
|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Q headwater (m ³ /s) | 2.95 | 3.4 | 1.9 |
| Portata scarichi (m ³ /s) | 7.4 | 7.4 | 7.4 |
| % Acque reflue sul totale | 0.72 | 0.69 | 0.79 |

Per la calibrazione sono stati riportati risultati relativi al BOD e al cromo totale. Per quanto riguarda il BOD nella Figura 4(a) sono illustrati i risultati ottenuti nel 2005. Le misure oscillano tra i 10 mgO₂/L nella stazione prossima all'*headwater* e i 66 mgO₂/L nei pressi della foce. Le simulazioni consentono di stimare la concentrazione alla foce di BOD che risulta di circa 75 mgO₂/l. Il cromo totale presenta nel 2007 (Fig. 4 (b)) un andamento decrescente delle concentrazioni lungo il percorso. I valori di cromo totale oscillano tra i 120 µg/l all'inizio del tratto e i 10 µg/l alla foce.

In definitiva la calibrazione sembra efficace per il BOD in quanto consente di riprodurre l'andamento crescente del profilo di concentrazione suggerito dalle misure e stimarne il valore alla foce. L'andamento decrescente dei profili di cromo è coerente con le misure e testimonia la diluizione che avviene grazie al contributo degli scarichi, privi di tale inquinante.

II. VALIDAZIONE

Il modello calibrato è stato validato con un nuovo set di dati relativi ai mesi invernali degli anni 2005, 2006 e 2007, nelle ipotesi riportate nella tabella 3. Si è ipotizzato che metà degli scarichi industriali fossero relativi all'industria conserviera, la cui attività è concentrata nei mesi estivi, e per tale motivo che la loro portata fosse nulla nei mesi invernali. Si è quindi ridotto e nuovamente considerato costante il contributo complessivo degli scarichi nei tre anni di analisi. La percentuale di acque reflue sul totale della portata che raggiunge la foce varia dal 50 al 60%. L'impatto è ogni anno inferiore al periodo estivo, coerentemente con la riduzione delle portate degli scarichi e con l'incremento della portata in ingresso che si verifica nei mesi invernali. Sono illustrati in Figura 5 i risultati ottenuti per l'azoto ammoniacale e l'azoto nitrico. Le concentrazioni di azoto ammoniacale misurate

nell'inverno del 2006 (Fig.5(a)) sono di circa 1200 µg/l a monte e di circa 700 µgN/l alla foce, concentrazione debolmente sovrastimata dal valore simulato che è di circa 1600 µgN/l. Le concentrazioni di azoto nitrico nell'inverno del 2005 (Fig.5(b)) vanno dai 3500 µgN/l nella stazione di monte ai circa 7000 µgN/l nella stazione di valle, mentre la concentrazione simulata alla foce è di 6000 µgN/l.

La validazione esprime la capacità del modello calibrato di riprodurre l'andamento medio dei profili di azoto ammoniacale e azoto nitrico, con lievi scostamenti alla foce tra i valori simulati e quelli misurati. Quando le simulazioni sovrastimano le concentrazioni di inquinanti entro livelli di inquinamento considerati limite per il rispetto degli ecosistemi acquatici, forniscono un'informazione a vantaggio di sicurezza.

TABELLA 3. IPOTESI PER LA VALIDAZIONE

| Validazione | Inverno 2005 | Inverno 2006 | Inverno 2007 |
|--------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Q headwater (m ³ /s) | 7.76 | 4.8 | 5.3 |
| Portata scarichi (m ³ /s) | 7 | 7 | 7 |
| % Acque reflue sul totale | 0.5 | 0.6 | 0.6 |

III. SIMULAZIONI NEI GIORNI DI MASSIMA ATTIVITÀ DELL'INDUSTRIA CONSERVIERA

TABELLA 4. Ipotesi Per Il Caso Di Massima Attività Dell'Industria Conserviera

| Massima attività industria | 20/09/2005 | 18/08/2006 | 29/08/2007 |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|
| Q headwater (m ³ /s) | 7.8 | 3.7 | 1.8 |
| Portata scarichi (m ³ /s) | 8.5 | 8.5 | 8.5 |
| % Acque reflue sul totale | 0.5 | 0.7 | 0.8 |

Si è scelto di effettuare delle simulazioni di giorni rappresentativi del periodo di massima attività dell'industria conserviera, ovvero i mesi di Agosto e Settembre. A tal fine si è scelto il giorno, per ogni anno, in cui le misure registravano la massima concentrazione alla foce di BOD, azoto ammoniacale e azoto nitrico. Le ipotesi sono riportate nella tabella 4. La portata degli scarichi è stata incrementata, ovvero gli stessi scarichi industriali considerati nei mesi invernali corrispondenti ad industrie conserviere sono stati incrementati rispetto al periodo estivo. La percentuale di acque reflue sul totale della portata defluente alla foce varia dal 50% all'80%. Per quanto riguarda il BOD (fig.6(a)) le misure vanno da circa 20 mg/l nella stazione a monte a 70 mg/l in quella a valle il giorno 20/09/2005 e l'andamento crescente è riprodotto dal modello che suggerisce alla foce una concentrazione di 62 mgO₂/l. Il 18/06/2006 (fig.6(b)) le simulazioni suggeriscono nella stazione a monte una concentrazione pari a circa 20 mgO₂/l e alla foce di circa 80 mgO₂/l.

Il modello risulta ben calibrato per simulare i profili dell'azoto ammoniacale che determinano alla foce, nel 2005 e 2006 (fig.6(c) (d)), una lieve sovrastima della concentrazione pari a circa 2000 µgN/l, rispetto ai 1000 µgN/l misurati. Le misure di azoto nitrico non sono ben riprodotte dal modello nell'agosto 2007 (fig.6(f)), mentre sembrano fornire una buona stima nell'agosto 2006 (fig.6(e)) con una concentrazione di circa 7500 µgN/l alla foce. Nel 2007 la concentrazione è sottostimata alla foce con un valore di circa 5000 µgN/l rispetto agli 8000 µgN/l suggeriti dalle misure. In

definitiva il modello calibrato e validato riesce, nell'ipotesi di massima attività dell'industria conserviera, a riprodurre le concentrazioni alla foce di BOD, azoto ammoniacale, mentre si discosta dalle misure alla foce per quanto riguarda l'azoto nitrico.

Osservando i risultati delle simulazioni si deduce che il modello calibrato, nelle varie ipotesi di analisi, permette di simulare in maniera coerente con le misure i profili di BOD e cromo totale consentendo di dedurre le concentrazioni alla foce. Il modello consente di riprodurre l'andamento medio decrescente dei profili di concentrazione di azoto ammoniacale, fornendo una lieve sovrastima delle concentrazioni alla foce. La calibrazione, per quanto riguarda l'azoto nitrico, determina talvolta una sottostima delle concentrazioni alla foce, pur riproducendone mediamente l'andamento crescente.

E' importante considerare che i profili di concentrazione di un dato parametro sono influenzati dall'entità della portata in ingresso, dall'apporto complessivo dei reflui e dal rapporto tra i due. Occorre sottolineare che fattori come la concentrazione della portata in ingresso, le concentrazioni delle singole sorgenti e il rapporto tra tali concentrazioni, concorrono al valore di concentrazione in un punto di un'asta fluviale e per tale motivo non è facile notare differenze evidenti tra le concentrazioni di uno stesso parametro nei vari periodi.

Nel corso delle simulazioni è risultato inoltre evidente che nel determinare le concentrazioni lungo il corso d'acqua

prevalgono il trasporto avvevivo e l'effetto delle sorgenti puntuali lungo il percorso, rispetto alla diffusione e agli effetti

dell'attività fitoplanctonica.

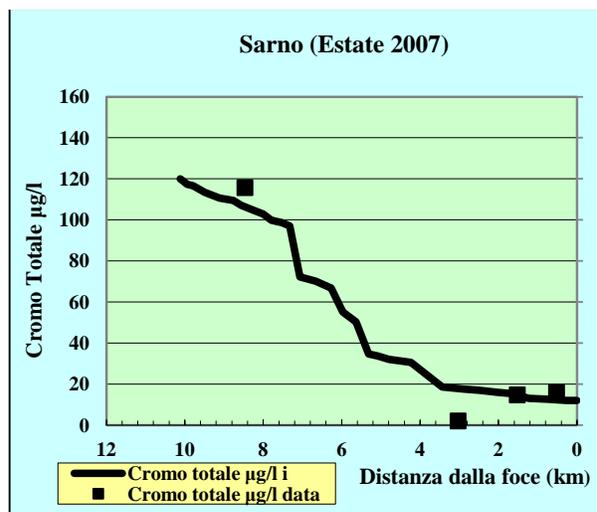
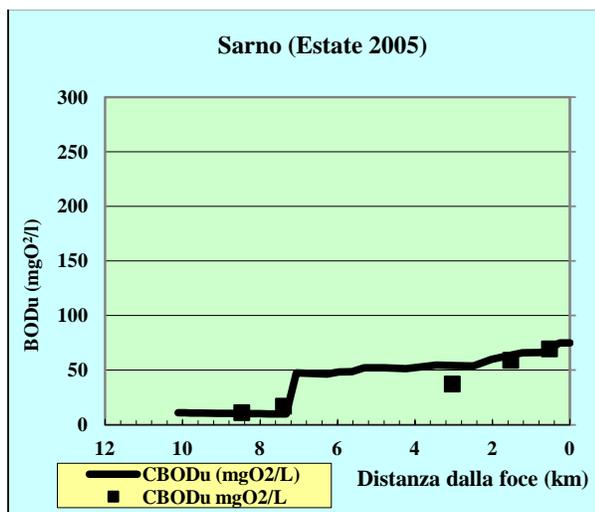


Fig 4. Risultati della calibrazione per BOD e cromo totale

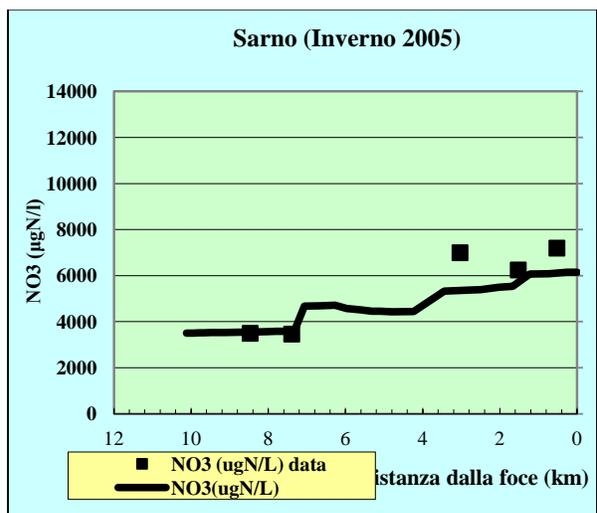
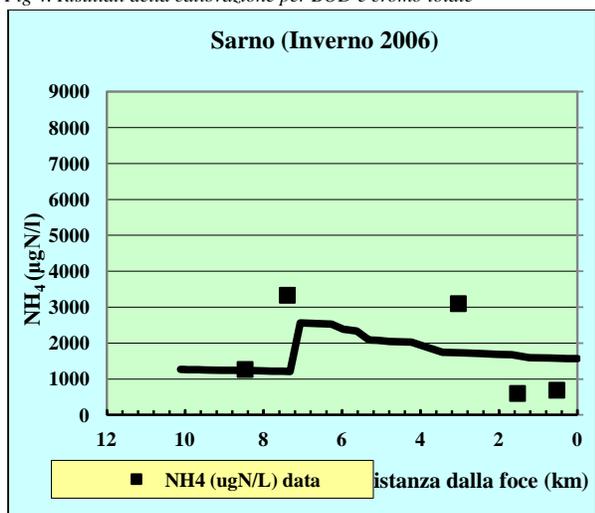


Fig 5. Risultati della validazione per azoto ammoniacale e azoto nitrico

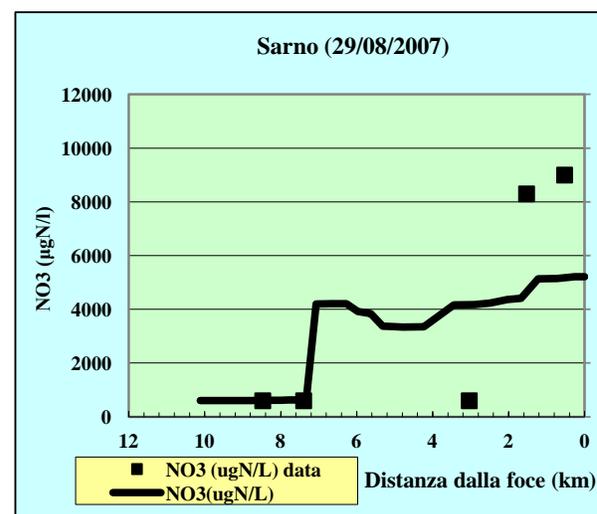
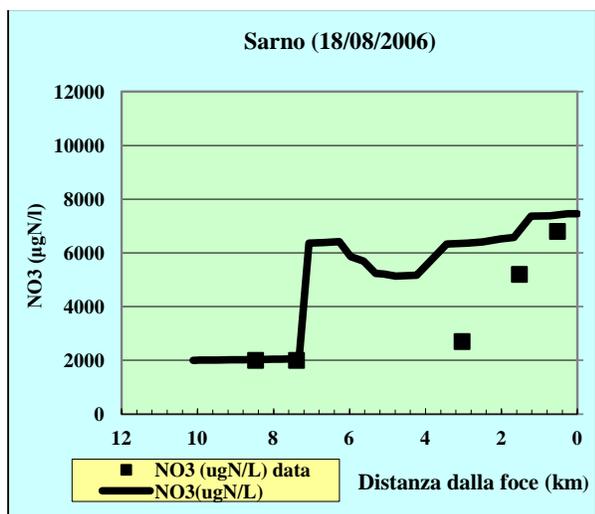
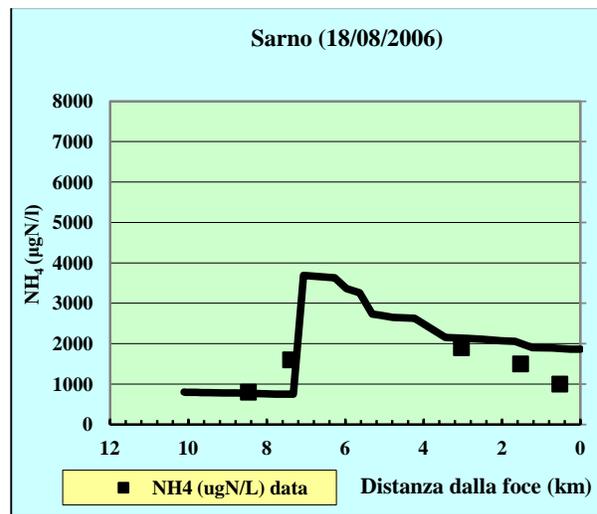
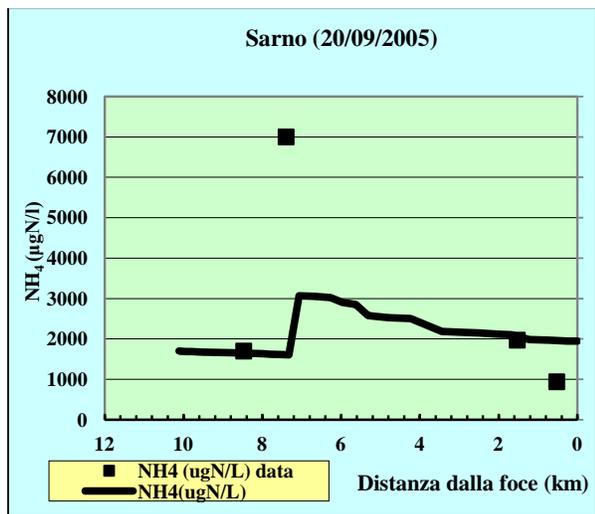
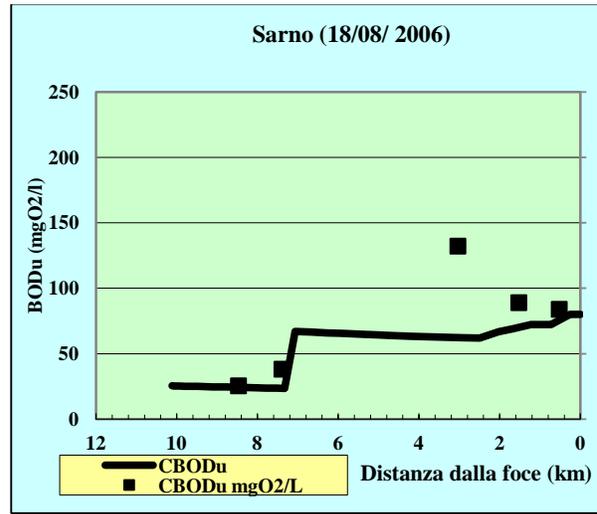
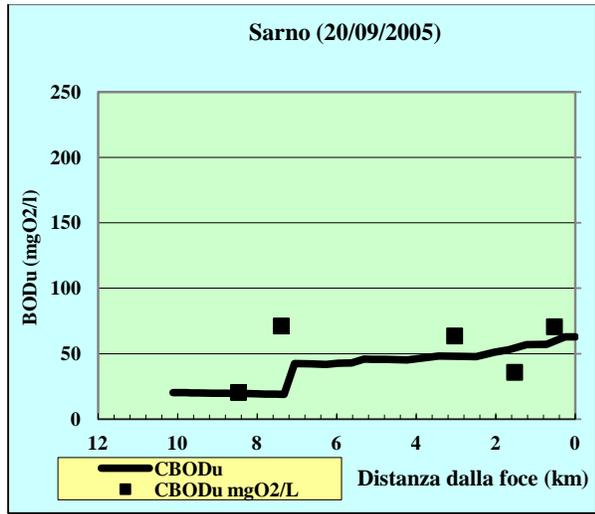


Fig 6. Risultati del periodo di massima attività dell'industria conserviera

CONCLUSIONI

Il fiume Sarno, caratterizzato da un grave inquinamento [1], [2] per la presenza di scarichi attribuibili a diverse attività industriali e a insediamenti civili, è stato oggetto del presente studio. Lo svolgimento del lavoro ha richiesto l'applicazione del modello di qualità delle acque QUAL2K al tratto di valle dell'asta principale del fiume che si estende per una decina di chilometri a monte della foce. Lo scopo dello studio era valutare le concentrazioni alla foce di BOD, azoto ammoniacale e azoto nitrico, caratteristici degli scarichi delle industrie conserviere e del cromo totale, tipico degli scarichi delle concerie, a partire da misure puntuali di tali parametri di qualità ricavabili dal monitoraggio ARPAC degli anni 2003-2010.

La qualità ambientale degli ecosistemi marini del Golfo di Napoli, in cui il Sarno sfocia, è fortemente influenzata dalle attività umane dell'area. Sistemi inadeguati di depurazione dell'industria conserviera e conciaria possono portare a significativi livelli di inquinamento nelle acque e nei sedimenti. I composti dell'azoto sono nutrienti che in quantità eccessiva possono causare fenomeni di eutrofizzazione, mentre i metalli pesanti come il cromo sono sostanze classificate pericolose per l'ambiente, per gli ecosistemi acquatici e per la salute umana, in quanto una lunga esposizione può causare diverse patologie. A partire dalle misure dei parametri di qualità, da dati idrometrici e meteorologici forniti dal "Centro Funzionale per la Previsione, Prevenzione e Monitoraggio Rischi e l'allertamento ai fini di protezione civile", dai risultati del censimento degli scarichi dell'ARPAC e del rilievo topografico dell'Autorità di bacino del fiume Sarno, è stato possibile impostare il modello. Il modello QUAL2K, dopo una fase di calibrazione, relativa al periodo estivo degli anni 2005, 2006 e 2007, e una fase di validazione, relativa al periodo invernale degli stessi anni, ha permesso di simulare l'andamento dei profili di concentrazione dei parametri suddetti, anche in giorni critici rappresentativi del periodo di massima attività dell'industria conserviera.

I risultati delle simulazioni confermano l'efficacia della calibrazione per quanto riguarda il BOD, e il cromo totale, permettendo di estrapolarne le concentrazioni alla foce. L'andamento decrescente delle concentrazioni di azoto ammoniacale suggerito dalle misure è confermato dalle simulazioni, che forniscono una lieve sovrastima delle concentrazioni alla foce nei mesi invernali e di massima attività dell'industria conserviera. Il modello fornisce talvolta una evidente sottostima delle concentrazioni alla foce di azoto nitrico riproducendo in ogni caso l'andamento mediamente crescente lungo l'asta fluviale. Gli scostamenti dal valore misurato sono imputabili all'ampia variazione dei dati intorno al valore medio.

I risultati ottenuti evidenziano l'importanza dell'applicazione di un modello come QUAL2K ad un'area ad elevato rischio ambientale quale l'area di foce del fiume Sarno. L'utilizzo di un modello numerico di qualità delle acque rappresenta la possibilità di avvalersi di uno strumento numerico efficace in vari periodi dell'anno e in condizioni caratterizzate da intensa attività industriale. Le simulazioni realizzate consentono inoltre di integrare i risultati del

monitoraggio sia su scala spaziale che temporale e di ricavare indicazioni sul livello di qualità delle acque anche nei periodi in cui tale monitoraggio non è possibile. La possibilità di prevedere le concentrazioni dei principali inquinanti alla foce del Sarno, fonte principale di inquinanti nella parte orientale del Golfo di Napoli, costituisce uno strumento fondamentale per integrare gli studi scientifici volti allo studio dei livelli di inquinamento in tale area.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' - TESSA".

Si ringrazia l'Ing. Matteo Gentilella del "Centro Funzionale per la Previsione, Prevenzione e Monitoraggio Rischi e l'allertamento ai fini di protezione civile" della Regione Campania per aver fornito: i dati relativi a direzione e velocità del vento della stazione denominata "Torriello", i dati idrometrici della stazione "Chiusura Sarno", i dati igrometrici delle stazioni "Pompei" e "Torriello", i dati termometrici delle stazioni "Pompei" e "S. Mauro", del periodo 2003-2010. Si ringrazia l'Ing. Massimo Della Gatta dell'"Autorità di Bacino Campania Centrale" per aver fornito il censimento degli scarichi eseguito dall'ARPAC e i risultati del rilievo topografico dell'asta fluviale nel 2004 eseguiti dall'ex Autorità di bacino del fiume Sarno. Si ringrazia la Dott.ssa Loredana Pascarella dell'ARPAC per i dati relativi al monitoraggio dei parametri di qualità delle acque.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] V. Tornero and M. Ribera D'Alcalá, "Contamination by hazardous substances in the Gulf of Naples and nearby coastal areas: A review of sources, environmental levels and potential impacts in the MSFD perspective", *Science of the Total Environment* 466-467 (2014) 820-840, 2014.
- [2] Legambiente, *Goletta del Fiume Sarno: analisi numeri e riflessioni sull'ecosistema del Bacino del Fiume Sarno*, 2014.
- [3] P. Montuori, P. Lama, S. Aurino, D. Naviglio, M. Triassi, "Metals loads into the Mediterranean Sea: estimate of Sarno River inputs and ecological risk", *Ecotoxicology*, 2013 Mar;22(2):295-307.
- [4] *Water resources systems planning and management*, UNESCO 2005: Chapter 12: Water quality modelling and prediction.
- [5] G. Tsakiris and D. Alexakis, "Water quality models: an overview" Centre for the Assessment of Natural Hazards and Proactive Planning and Laboratory of Reclamation Works and Water Resources Management, School of Rural and Surveying Engineering, National Technical University of Athens, Greece, 2012.
- [6] ARPAC Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Campania, "Relazione sul monitoraggio delle acque superficiali del fiume Sarno", 2014.
- [7] S. Marsili Libelli et al., *Modellistica fluviale*, 2000.
- [8] C. Belmonte, *Modellazione della qualità delle acque superficiali: applicabilità e validazione del QUAL2K sull'asta principale del canale emiliano romagnolo*, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, 2013.
- [9] S.C. Chapra, and G.J. Pelletier, *QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality: Documentation and Users Manual*, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept, Tufts University, 2008.

- [10] P. Montuori, M. Triassi, "Polycyclic aromatic hydrocarbons loads into the Mediterranean Sea: Estimate of Sarno River inputs. *Mar Pollut Bull.* 2012 Mar;64(3):512-20, 2012.
- [11] M. Giordano, Inquinamento del Mar Mediterraneo da idrocarburi policiclici aromatici: stima del fiume Sarno, inputs e valutazioni d'impatto ambientale, Dipartimento di Medicina Pubblica e della Sicurezza Sociale, Università degli Studi di Napoli Federico II, 2011.
- [12] Protezione civile, "Emergenza socio economico ambientale del fiume Sarno" <www.protezione.civile.gov.it>
- [13] D. Cianelli, M. Uttieri, B. Buonocore, P. Falco, G. Zambardino, E. Zambianchi, "Dynamics of a very special Mediterranean Coastal Area: the Gulf of Naples" In: Columbus F (ed) *Mediterranean Ecosystems: Dynamics, Management and Conservation*. Nova Science Publishers, Inc, New York, 2011
- [14] ISPRA, Strategia per l'Ambiente Marino, Valutazione iniziale Sottoregione Mediterraneo Occidentale, Arricchimento di nutrienti e sostanze organiche, 2012.
- [15] Autorità di bacino del fiume Sarno, "Il rilievo dell'asta fluviale del fiume Sarno e dei suoi affluenti, livellazione di precisione", 2004.
- [16] J. Carroll, S. O'Neal, and S. Golding, "Wenatchee River Basin Dissolved Oxygen, pH, and Phosphorus Total Maximum Daily Load Study", 2006.
- [17] P.B. Kalburgi, C.B. Shivayogimath and B.K. Purandara, "Application of QUAL2K for Water Quality Modeling of River Ghataprabha (India)", *Journal of Environmental Science & Engineering*; 4, 12, p6, 2010.
- [18] Nakhaei Nader, Shahidi Amir Etemad, "Waste water discharge impact modeling with QUAL2K, case study: the Zayandeh-rood River", 2010.

Messa a punto di un sistema per il rilievo di correnti di fondo in acque basse mediante sensori idrofonici

Marina Sposato

IAMC-CNR Napoli

Vincenzo Di Fiore

IAMC-CNR Napoli

Sommario-Il seguente lavoro è stato svolto presso il laboratorio di Geofisica dell'Istituto per l'Ambiente Marino Costiero della sede di Napoli di cui è responsabile il dott. Vincenzo Di Fiore.

Il gruppo di Geofisica sta sviluppando un sistema in grado di determinare in modo indiretto la velocità e direzione delle correnti di fondo, utilizzando idrofoni a bassa frequenza e ad alta sensibilità.

L'impiego di sensori idrofonici (piezoelettrici) è utilizzato per il monitoraggio delle onde sonore in acqua attraverso la variazione di pressione. Questa caratteristica può essere anche impiegata per il monitoraggio di correnti di fondo. E' infatti risaputo che le correnti producono variazioni di pressioni al loro passaggio che si traducono in variazioni di tensione alle estremità delle piastre piezoelettriche degli idrofoni. Determinando la pressione è possibile identificare la velocità e direzione della corrente, distribuendo ad opportune distanze una serie di sensori idrofonici. Chiaramente la sensibilità dei sensori deve essere tale da apprezzare la variazioni di pressione anche esigue prodotte da correnti di lieve entità. Il sistema suddetto se opportunamente calibrato, può anche essere utilizzato come radar di fondo per il rilievo di natanti di dimensioni anche piccole purché motorizzati.

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, progetto "Sviluppo di tecnologie per la "Situational sea Awareness"-TESSA".

Keywords----Idrofoni; correnti di gradiente e di deriva;

INTRODUZIONE

Con il termine *correnti marine* ci si riferisce al movimento di massa d'acqua non collegato alla marea o al moto ondoso. Le correnti, di cui il navigante nota solo l'effetto superficiale, esistono lungo tutta la massa

d'acqua, e talvolta solo in determinati strati senza causare effetti visibili in superficie. Esse sono presenti prevalentemente in acque profonde ed in mari aperti. Inoltre, mentre le correnti di marea hanno un ciclo temporale ben definito, le correnti marine sono permanenti (o stazionarie) oppure stagionali (o semipermanenti).

Esistono diversi tipi di correnti marine e possono essere classificate:

- in base alle cause che le creano (*correnti di gradiente e correnti di deriva*);
- secondo la temperatura dell'acqua che si sposta confrontata con la temperatura dell'acqua che la circonda (correnti calde o fredde);
- in base alla profondità in cui si verificano:
 - superficiali se interessano lo strato d'acqua dalla superficie ai 200 m;
 - interne se interessano lo strato d'acqua al di sotto dei 200 metri;
 - di fondo se interessano lo strato d'acqua vicino al fondale marino.

Il moto orizzontale delle correnti superficiali è causato dall'azione combinata di correnti di gradiente e correnti di deriva, le prime sono dovute alla differenza di pressione su luoghi diversi della superficie del mare ed alla differenza di densità delle masse d'acqua adiacenti. Queste correnti si generano quando la superficie dell'acqua assume una certa inclinazione, fatto che accade per l'azione del vento, o per la presenza di masse d'acqua contigue di diversa temperatura e/o salinità. Le correnti di gradiente, dovute a diversa pressione atmosferica ed all'ammassamento dell'acqua dovuto al vento, tendendo a ristabilire l'orizzontalità della superficie marina, sono d'intensità modesta e pressoché irrilevanti ai fini della navigazione in mare aperto.

La situazione cambia in prossimità di costa: se il vento che spira verso la costa è d'intensità adeguata, si

possono ammassare lungo costa notevoli masse d'acqua che, non potendo rifluire verso il largo a causa del vento contrario, danno luogo a forti correnti che scorrono parallelamente alla costa.

Le correnti di gradiente, dovute a differenza di densità, si presentano soprattutto negli strati interni della massa d'acqua ed hanno effetto apprezzabile sulla navigazione solo nell'esempio sopra descritto.

Le correnti di deriva sono dovute all'azione di trascinamento creato dall'attrito esistente tra la massa d'aria in movimento (vento) e la massa d'acqua superficiale del mare.

I forti venti costanti come gli alisei che spirano sull'Oceano Atlantico, ed i monsoni che spirano nell'Oceano Indiano, sono la causa di gran parte delle correnti di deriva costanti.

Il vento tende a trascinare lo strato superficiale delle acque marine nella sua stessa direzione, il movimento di deriva si trasmette agli strati inferiori con intensità decrescente e direzione man mano variabile; il movimento inizia con ritardo rispetto al momento d'inizio dell'azione del vento e solo gradualmente raggiunge la velocità di regime.

Venti leggeri possono generare deboli correnti di deriva in circa sei ore, sono necessarie ben 48 ore di vento forte perché la relativa corrente di deriva raggiunga la velocità di regime.

L'intensità della corrente di deriva a regime è circa 1,5% della velocità del vento che l'ha generata, velocità che dipende anche da altri fattori, ed in particolare dall'ampiezza dello specchio d'acqua libero da ostacoli, denominato *fetch*, esistente nella direzione di provenienza del vento. *Fetch* limitati non consentono alla corrente di raggiungere velocità della percentuale sopra indicata, anche se il vento spira dalla stessa direzione per periodi di tempo superiori alle 48 ore.

Lo spostamento dell'acqua dovuto al processo di marea costituisce la corrente di marea, a carattere periodico, le cui caratteristiche sono definite sia dall'ampiezza della marea che dalla conformazione dei bacini d'acqua interessati dal fenomeno.

Tali correnti possono presentare carattere diurno, semidiurno o misto e sono prevedibili con ampio anticipo; non a caso vengono riportate nelle "Tavole di Marea", nei "Portolani", ecc.

Le forze che mettono in movimento sia le correnti di gradiente sia quelle di deriva, tendono a muovere la massa d'acqua in una ben determinata direzione. Nel caso delle correnti di gradiente: dal luogo di livello maggiore verso quello a livello minore; nel caso di correnti di deriva: nello stesso senso di propagazione del vento. La direzione di propagazione è, però, sensibilmente diversa da quella descritta sopra.

In particolare:

- le correnti che si propagano nell'emisfero Nord subiscono una deviazione verso la destra rispetto alla direzione di propagazione;
- le correnti che si propagano nell'emisfero Sud subiscono una deviazione verso sinistra.

Queste deviazioni sono causate dalla rotazione terrestre che genera una particolarissima forza, detta forza di Coriolis, la quale agisce su tutte le masse in movimento sul pianeta ed il cui effetto è più sentito quanto più è grande la massa in movimento.

Oltre alla forza di Coriolis, sulla direzione e sull'intensità delle correnti marine, influiscono anche altri fattori:

natura e vicinanza della costa

- presenza di golfi o stretti,

- maggiore o minore profondità delle acque.

La determinazione degli elementi di una corrente può avvenire attraverso misure:

Dirette Sistema Lagrangiano: si suppone di seguire il movimento di una particella di acqua nel tempo (x, t); in pratica, non si fa altro che misurare la distanza percorsa da un oggetto alla deriva nel tempo, risalendo così alla sua direzione e velocità. La determinazione degli elementi di una corrente (R_c , V_c) a bordo viene effettuata proprio in questo modo.

Sistema Euleriano: si misura il flusso di acqua che attraversa una sezione (oppure un punto fisso) di fluido nel tempo (x, t). Per fare ciò, si sistema un sensore (elica, tubo di Pitot...), il quale, investito dalla corrente, consente la determinazione della direzione e dell'intensità della corrente

Si risale ai parametri della corrente estrapolandola da relazioni di dipendenza nota da altri parametri fisici.

La zona costiera (figura 1) è definita convenzionalmente come la fascia di transizione in cui la terra ferma incontra il mare e dove le caratteristiche ambientali sono strettamente influenzate dai processi di idrodinamica marina. Tale zona si estende verso mare fino al limite della piattaforma continentale e verso terra fino alla massima quota raggiunta dalle onde. La zona costiera può essere suddivisa, da terra verso mare, in tre aree:

- La costa: fascia di larghezza indefinita che si può estendere verso l'entroterra anche per alcuni chilometri dalla riva fino alle zone ove sono più evidenti le differenze della morfologia dei terreni;
- La spiaggia (emersa e sommersa): deposito costiero litoraneo costituito da sedimenti marini incoerenti (sabbie oppure ghiaie) esteso verso terra fino al limite raggiunto dalle onde; La piattaforma continentale: parte sommersa che normalmente costituisce i bordi di tutti i continenti, la sua estensione va dal limite esterno della spiaggia sommersa fino al ciglio della scarpata continentale.

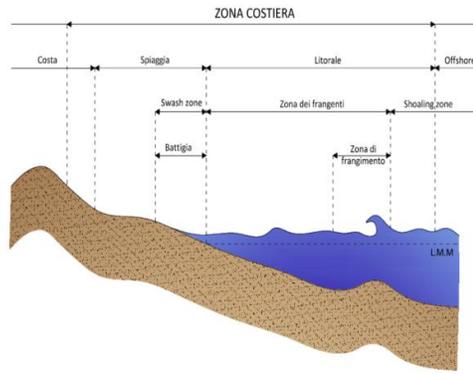


Figura 1. Suddivisione della zona costiera.

Convenzionalmente il limite tra terra ferma e mare è indicato dalla linea di riva, intesa come regione di separazione tra area emersa e area sommersa la cui posizione muta a causa dell'azione del moto ondoso e delle maree.

La spiaggia si suddivide in una zona più arretrata (retroriva), esposta all'azione del mare solo durante le mareggiate o quando la marea è insolitamente elevata, ed una zona più avanzata (battigia), esposta alla continua oscillazione della superficie libera dell'acqua. La retroriva è definita anche come spiaggia emersa, la battigia come spiaggia intertidale essendo compresa tra il livello medio delle alte e delle basse maree.

I litorali sono interessati dalla presenza di correnti che determinano l'instaurarsi di un sistema circolatorio; le correnti marine a media scala possono essere suddivise in correnti costiere e correnti litoranee. Le prime, indipendenti dal moto ondoso e quindi dal fenomeno del frangimento, si sviluppano al largo della zona dei frangenti; le seconde invece sono completamente dipendenti dal moto ondoso e si sviluppano dentro la surf-zone, compresa tra la linea di riva e la linea dei frangenti (figura2).

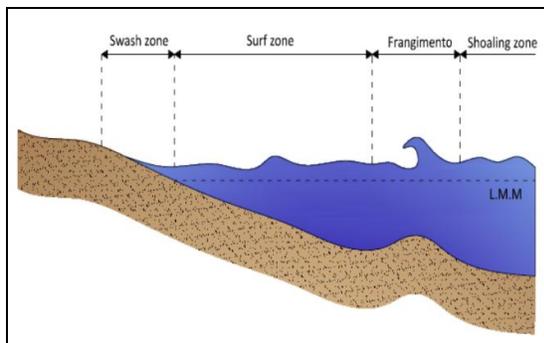


Figura 2. Suddivisione circolazione litoranea.

In questo sistema la circolazione può essere suddivisa secondo due direzioni prevalenti:

- in direzione ortogonale alla linea di costa, dove si possono osservare le rip-currents;

- in direzione parallela alla costa dove le correnti long-shore si intensificano man mano che ci si sposta verso la linea dei frangenti.

La velocità della corrente lungo riva, tenendo conto del termine legato alla turbolenza, assumerà un andamento prossimo a quello triangolare, con un picco della velocità meno elevato e una forma più arrotondata. Di seguito si riporta l'andamento della velocità proposto da Longuet-Higgins (1970), al variare del parametro P (pressione) funzione del coefficiente di turbolenza C .

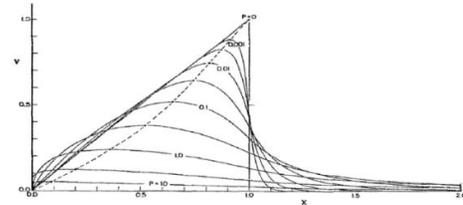


Figura 3. Forma teorica della corrente long-shore (Longuet-Higgins)

La parte della meccanica dei fluidi che studia il movimento dei liquidi e dei gas si chiama fluidodinamica.

Quando si studia il movimento di un fluido, conviene pensarlo come "ideale" cioè privo di attriti tra le singole molecole che lo compongono (viscosità) e tra le molecole e le pareti del recipiente o condotto che lo contiene. Inoltre si ritiene che il liquido sia incompressibile, vale a dire che la sua densità rimane costante.

Si chiama linea di corrente la curva che ha per tangente in ogni suo punto il vettore velocità delle particelle del fluido.

Si chiama vena fluida la parte di fluido limitata verticalmente da due sezioni S_1 e S_2 e lateralmente da un certo fascio di linee di corrente.

Un fluido è in regime stazionario (o permanente) quando scorre in modo che la forma delle linee di corrente non si altera nel tempo. Ciò significa che la pressione e la velocità delle particelle del fluido si mantengono in ogni punto costanti nel tempo, pur essendo diverse da luogo a luogo. In regime permanente le linee di corrente coincidono con le traiettorie delle particelle del fluido.

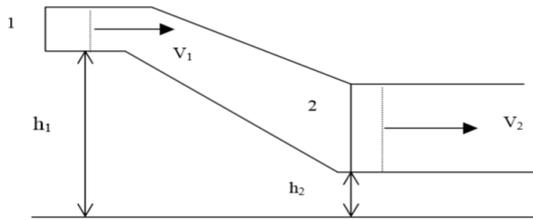
Un fluido è in regime laminare quando i diversi strati del fluido scorrono gli uni sugli altri senza mescolarsi, come nel caso dell'acqua che esce da un rubinetto poco aperto.

Un fluido è in regime turbolento quando è animato da moti vorticosi che producono un rimescolamento in tutta la massa del fluido, come nel caso dell'acqua che esce da un rubinetto molto aperto.

La portata è la quantità di liquido che attraversa una sezione normale della corrente nell'unità di tempo; si può misurare in $[l/s]$ o $[m^3/s]$.

Per la legge di Bernoulli Si consideri un fluido in regime stazionario che scorre in un tubo o in una vena

nel quale cambi oltre all'area della sezione trasversale, anche la quota.



Per il principio di conservazione della massa si ha che:

$$m_1 = m_2;$$

$$d_1 S_1 X_1 = d_2 S_2 X_2; \quad (1)$$

$$d_1 S_1 V_1 t = d_2 S_2 V_2 t;$$

se il fluido è incompressibile $d_1 = d_2$ e quindi:

$$S_1 V_1 = S_2 V_2 \quad (2)$$

La quale mostra che la velocità del fluido è inversamente proporzionale alla sezione della vena.

La grandezza $Q = \text{volume}/\text{tempo} = SV$ che rappresenta il volume di fluido che passa nell'unità di tempo si chiama portata volumica e si misura in m^3/s . La grandezza SVd si chiama portata massica e si misura in Kg/s .

Bernoulli nel 1738 enunciò il seguente teorema che esprime la legge di Conservazione dell'energia nel caso di una massa fluida in movimento:

$$p + dgh_1 + \frac{1}{2}dv_1^2 = p + dgh_2 + \frac{1}{2}dv_2^2 \quad (4)$$

$$p + dgh + \frac{1}{2}dv^2 = \text{cost} \quad (5)$$

Dove i tre termini della (5) vennero così chiamati:

p = pressione vera o piezometrica (se il tubo è aperto P è la pressione atmosferica)

dgh = pressione d'altezza (dovuta alla gravità)

$1/2dv^2$ = pressione dinamica (dovuta al moto del fluido).

$$p_1 - p_2 = dg(h_2 - h_1) = dgh \quad (6)$$

L'equazione di Bernoulli ha validità generale nel senso che descrive il comportamento di un fluido anche quando questo è fermo. Infatti, in tal caso, si ha:

Per stimare la velocità della corrente mediante l'impiego di idrofoni è necessario effettuare misure della pressione.

Considerando le variazioni di pressione e i vari contributi significativi che possono influire sulla pressione, possiamo ritenere che la pressione totale misurabile con gli idrofoni in un punto è:

$$P_{tot} = Ph(z) + Pd(v) + P_{an} + P_{bn} + P_{sn} \quad (7)$$

Dove in un dato punto:

P_{tot} è la pressione totale;

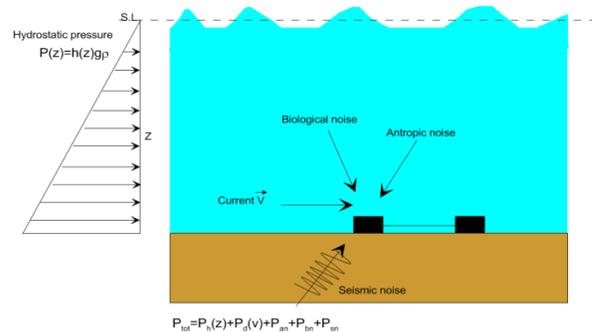
$P_h(z)$ è la pressione idrostatica, tale pressione è dipendente solo dalla profondità;

$P_d(v)$ è la pressione dinamica connessa con la velocità del fluido; tale pressione è legata alla velocità del fluido ed in condizioni stazionarie e di continuità è possibile calcolarla con la legge di Bernoulli. Nel segnale registrato l'energia legata a questa variazione di pressione è paragonabile all'effetto equivalente ad una corrente DC come per le correnti elettriche;

P_{an} è la pressione connessa con l'attività antropica, tale pressione è di difficile valutazione. Il contributo è legato all'attività di imbarcazioni, lavori in mare come estrazione del petrolio ecc., Comunque la banda è sempre pressoché maggiore ai 5-10 Hz;

P_{bn} è la pressione connessa con l'attività biologica marina. Tale contributo è compreso tra la banda degli ultrasuoni e fino a 5-10 Hz (cetacei di grosse dimensioni);

P_{sn} è la pressione connessa con il noise sismico. Tale effetto è connesso con i terremoti ed interessa una banda anche al di sotto di 1 Hz. Però tali eventi sono eccezionali e sono quindi facilmente identificati perché segnali transienti.



Partendo dall'equazione di Bernoulli, considerando che la velocità è costante e che sono soddisfatte la continuità e la stazionarietà dei filetti idrici, per due punti posti alla stessa profondità e partendo dalla (2) si ha:

$$p_1 + dgh_1 + \frac{1}{2}dv_1^2 = p_2 + dgh_2 + \frac{1}{2}dv_2^2 \quad (8)$$

Considerando che $h_1 = h_2$, e $d = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$ si ha:

$$p_1 - p_2 = 1/2(dv_1^2 - dv_2^2);$$

$$p_1 - p_2 = 1/2(v_1^2 - v_2^2); \quad d = 1 \text{ g}/\text{cm}^3; \quad (9)$$

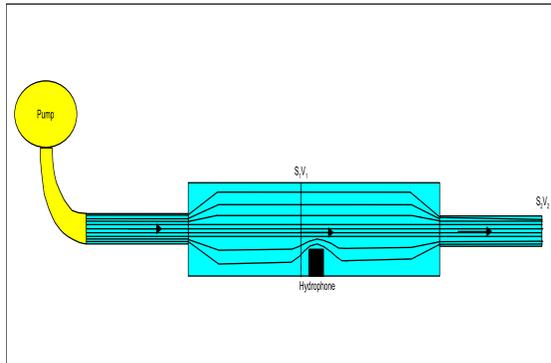
$$2(p_1 - p_2) = (v_1^2 - v_2^2);$$

Quindi conoscendo p_1 e p_2 è possibile ricavare le velocità v_1 e v_2 .

Il sistema ha più incognite che equazioni e pertanto per essere risolto è necessario effettuare misure sperimentali. A tale scopo può essere realizzato un tubo idraulico di prova con possibilità di variare la portata di immissione all'interno del tubo. Per l'equazione della continuità è possibile determinare la velocità di uscita (misurando la portata) e quindi note le sezioni attraversate dal fluido è possibile conoscere la velocità in prossimità dell'idrofono. A questo punto conoscendo la pressione tramite misure effettuate è possibile costruire delle curve Pressione-Velocità da utilizzare poi in campo, per quel determinato sensore.

Assunzioni per le misure:

- *Fluido incompressibile*: ad un certo volume di fluido entrante nel tubo corrisponderà un ugual volume di fluido uscente;
- *Fluido non viscoso*: si trascura l'attrito interno del fluido e quello tra il fluido e le pareti del tubo;
- *Fluido in moto laminare*: scorrimento del fluido per lamine parallele;
- Sezione trasversale idrofono molto piccola rispetto a S_1 per evitare effetti turbolenza ma anche per trascurare nel computo di S_1 l'ingombro dimensionale dell'idrofono.



Sistema idrodinamico per la taratura degli idrofoni

Quindi essendo: $S_1 V_1 = S_2 V_2$;
si ha:

S_1, S_2 note

$S_2 V_2 =$ portata (viene misurata cronometrando nel tempo la quantità di fluido)

$$V_1 = S_2 V_2 / S_1 \quad (10)$$

Il tubo idraulico deve avere un rivestimento interno tale da rendere minimo l'attrito tra il fluido e le pareti del tubo.

La velocità di immissione attraverso la pompa deve essere tale da verificare che il numero di Reynolds sia contenuto per il flusso laminare cioè:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (11)$$

Se $N_R > 2000$ flusso turbolento

Se $N_R < 2000$ flusso laminare

dove:

ρ è la densità del fluido;

V è la velocità;

d è la lunghezza della superficie attraversata

μ è la viscosità del fluido

| | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|---------|---------|------|
| acqua -8°C | 2,408 | 0,002 | -8°C | | | |
| acqua -4°C | 2,068 | 0,002 | -4°C | | | |
| acqua 0°C | 1,787 | 0,002 | 0°C | | | |
| acqua 4°C | 1,567 | 0,002 | 4°C | | | |
| acqua 8°C | 1,386 | 0,001 | 8°C | | | |
| acqua 12°C | 1,235 | 0,001 | 12°C | | | |
| acqua 16°C | 1,109 | 0,001 | 16°C | | | |
| acqua 20°C | 1,001 | 0,001 | 20°C | 834,167 | 834,167 | 20°C |
| acqua 28°C | 0,833 | 0,001 | 28°C | | | |
| acqua 32°C | 0,765 | 0,001 | 32°C | | | |
| acqua 40°C | 0,653 | 0,001 | 40°C | | | |
| acqua 48°C | 0,566 | 0,001 | 48°C | | | |
| acqua 52°C | 0,529 | 0,001 | 52°C | | | |
| acqua 60°C | 0,467 | 0,000 | 60°C | | | |
| acqua 80°C | 0,355 | 0,000 | 80°C | | | |
| acqua 90°C | 0,315 | 0,000 | 90°C | | | |
| acqua 100°C | 0,282 | 0,000 | 100°C | | | |

| Sostanza | Viscosità dinamica | | | Viscosità cinematica | | |
|----------|--------------------|------|------|----------------------|------------------------------------|------|
| | cP | Pa s | Note | cSt | 10 ⁻⁶ m ² /s | Note |

Tabella 1: Viscosità dell'acqua a diverse temperature

I MATERIALI E METODI

Il sistema di acquisizione ha utilizzato una rete di sensori idrofonici collegati mediante un sistema di connessione via cavo. Il rilievo dei sensori piezoelettrici avviene in funzione del tempo mediante un intervallo di campionamento fissato e per un periodo di tempo di circa 30 minuti. Il sistema è gestito mediante software dedicato. Il software sviluppato mediante script in LABVIEW esegue anche in real-time tutti i processi necessari ad estrarre il segnale utile.

Caratteristiche del sistema da utilizzare:

1. N. 24 sensori idrofonici collegate secondo array lineare;
2. Cavo marino bipolare per n. 24 idrofoni in collegamento differenziale;
3. Sistema di acquisizione costituito da Notebook, scheda DAQ da 24 canali minimo 24 bit, morsettiera e case per trasporto a bordo;

4. Sistema di alimentazione con possibilità di autonomia di minimo 12 ore;

Gli idrofoni (figura8) utilizzati sono sensori piezoelettrici. La piezoelettricità è la proprietà di molti materiali di sviluppare, se sottoposti a forze meccaniche, cariche elettriche sulla superficie (effetto piezoelettrico diretto) o, viceversa, di esibire una deformazione meccanica (effetto piezoelettrico inverso) se sottoposti ad un campo elettrico. L'accoppiamento dell'energia elettrica e meccanica rende i materiali piezoelettrici utili per una vasta gamma di applicazioni, raggruppabili nelle seguenti classi:

- sensori –sfruttano l'effetto diretto (sensori di pressione);
- attuatori –sfruttano l'effetto indiretto (motori ultrasonici);
- risonanza – sfruttano sia l'effetto diretto che quello indiretto (idrofoni, filtri);
- conversione di energia – conversioni intensive di energia meccanica in energia elettrica (generatori ad alto voltaggio).

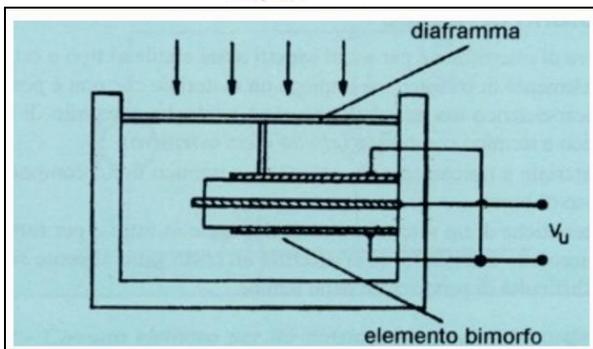


Figura8. Idrofono piezoelettrico

Quando le onde sonore mettono in vibrazione la membrana, essa fa variare la pressione su un cristallo

piezoelettrico (figura 9), generando una differenza di potenziale,

La scelta delle frequenze di lavoro e quindi del tipo di idrofoni è legata alle specifiche operative dell'utilizzatore.

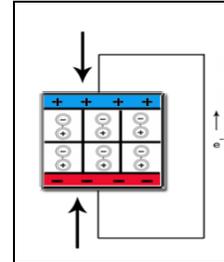


Figura 9. Sistema ceramico sottoposto a compressione

Qualora si comprima la struttura cristallina, si provoca una riduzione della distanza fra i centri delle due cariche dei dipoli ed una conseguente diminuzione del momento dipolare, che genera una modifica delle cariche esterne: se le due superfici sono collegate, si verifica un flusso di elettroni da quella negativa a quella positiva oppure, nel caso siano isolate, si ha una diminuzione della differenza di potenziale fra le due facce. Quest'ultima variazione può essere rilevata ed amplificata mediante un circuito elettrico.

L'effetto piezoelettrico è espresso dalle seguente relazione:

$$D_i = d_{ijk} * T_{jk} \text{ (effetto diretto)} \quad (12)$$

$$S_j = d'_{ijk} * E_i \text{ (effetto indiretto)} \quad (13)$$

Dove D_i è la componente dello spostamento elettrico, E la componente del campo elettrico, S_{jk} la componente di deformazione, T_{jk} la componente di stress, e d_{ijk} la componente del coefficiente di carica piezoelettrica o di deformazione.

II RISULTATI

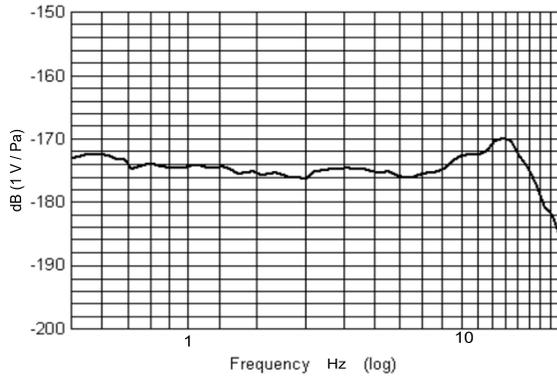
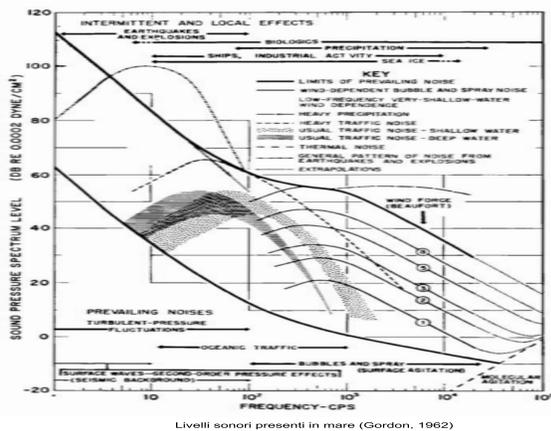


Figura 10. Curva di risposta dell'idrofono

Il suono si propaga sotto la superficie dell'acqua in modo più efficiente e veloce che nell'aria e su distanze molto maggiori. Non deve meravigliare, dunque, che suoni e rumori nell'ambiente marino, più che l'eccezione, rappresentino la regola. Alcuni di questi hanno natura geofisica, come la pioggia, le onde, i movimenti dei ghiacci e i terremoti, altri invece, biologica, come quelli prodotti da numerose specie marine per orientarsi, nutrirsi, comunicare e proteggersi. A questi suoni naturali, negli ultimi anni, se ne sono aggiunti molti altri prodotti dall'uomo, caratterizzati da un'intensità e una diffusione tali, da aver quasi completamente coperto i rumori dell'ambiente marino.



Livelli sonori presenti in mare (Gordon, 1962)

Le fonti principali sono state individuate nella navigazione, nell'attività di estrazione di gas e petrolio dai fondali, in quella di ricerca dei relativi giacimenti e, soprattutto, nell'utilizzo dei sonar attivi da parte delle navi militari e commerciali. Si deve considerare,

inoltre, il rumore prodotto durante le attività di dragaggio e di costruzione di qualunque struttura in mare, quello causato dall'utilizzo dei dispositivi pinger per le attività di pesca e di acquacoltura ed il rumore proveniente dallo spazio sovrastante la superficie dell'acqua, come quello causato dai generatori eolici.

E' interessante notare come il noise antropico è comunque superiore ai 10 Hz di frequenza.

I dati sono stati acquisiti, come detto in precedenza, mediante streamer a 24 canali collegato con altrettanti idrofoni inter-distanziati a 2,5 m.

Il cavo è stato steso nella direzione della corrente ad una profondità costante di 50 cm circa. Trovandoci in prossimità della foce del fiume Volturno, le velocità delle correnti sono abbastanza contenute (1-6 dm/s, fonte Autorità di Bacino dei Fiumi Liri Garigliano Volturno)

Il processing dei dati tende ad estrarre il segnale ascrivibile alle correnti. Considerando come già detto precedentemente, che:

- la $P_d(v)$ è la pressione dinamica connessa con la velocità del fluido, tale pressione è legata alla velocità del fluido che in condizioni stazionarie e di continuità è possibile calcolarla con la legge di Bernoulli. Rispetto alla frequenza, tale effetto potrebbe ritenersi come un contributo in continuità e quindi con caratteristiche equivalenti ad DC per le correnti;
- la P_{an} è la pressione connessa con l'attività antropica, tale pressione è di difficile valutazione. Il contributo è legato all'attività di imbarcazioni, lavori in mare estrazione del petrolio ecc., Comunque la banda è sempre pressoché maggiore ai 5-10 Hz;
- P_{bn} è la pressione connessa con l'attività biologica marina. Tale contributo è compreso tra la banda degli ultrasuoni e fino a 5-10 Hz (cetacei di grosse dimensioni);
- P_{sn} è la pressione connessa con il noise sismico. Tale effetto è connesso con i terremoti ed interessa una banda anche al di sotto di 1 Hz. Però tali eventi sono eccezionali e tali da essere facilmente identificati perché segnali transienti.

Possiamo estrarre il segnale correlato con la corrente operando con un filtro particolare che consente lo shunt di tutte le fasi al di sopra dei 0,5 Hz.

Eseguendo un plotaggio dei dati raw si notano tutti gli eventi connessi con la navigazione ecc. Lo spettro relativo ai raw data mostra la maggior parte dell'energia incentrata per frequenze al di sopra dei 0,5 Hz.

Dopo il relativo filtraggio si nota energia concentrata al di sotto di 0,1 Hz. Questa energia è probabilmente connessa con gli effetti dinamici della corrente. Infatti,

dai valori di tensione misurati (0.06-0.12 V), attraverso la conversione con il fattore di taratura degli idrofoni (1 V/Pa) vengono fuori pressioni di 0,06-0.12 Pa.

Da misure di tarature già effettuate Pressione – Velocità possiamo associare alla pressione idrofonica il relativo valore di velocità. Infatti, considerando che la variazione di 1 Pa corrisponde ad una velocità di 1.15 m/s, nel nostro caso abbiamo velocità di 0.052 m/s sull'idrofono n. 3 e fino a 0,104 m/s sull'idrofono n. 24.

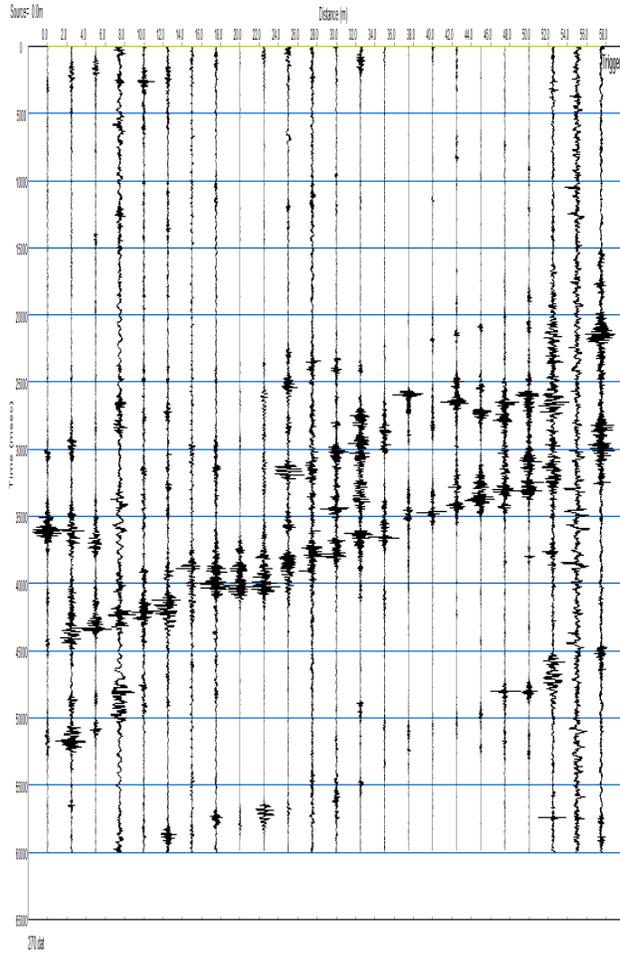


Figura16. Raw data – Ampiezza normalizzate a tutto il dataset

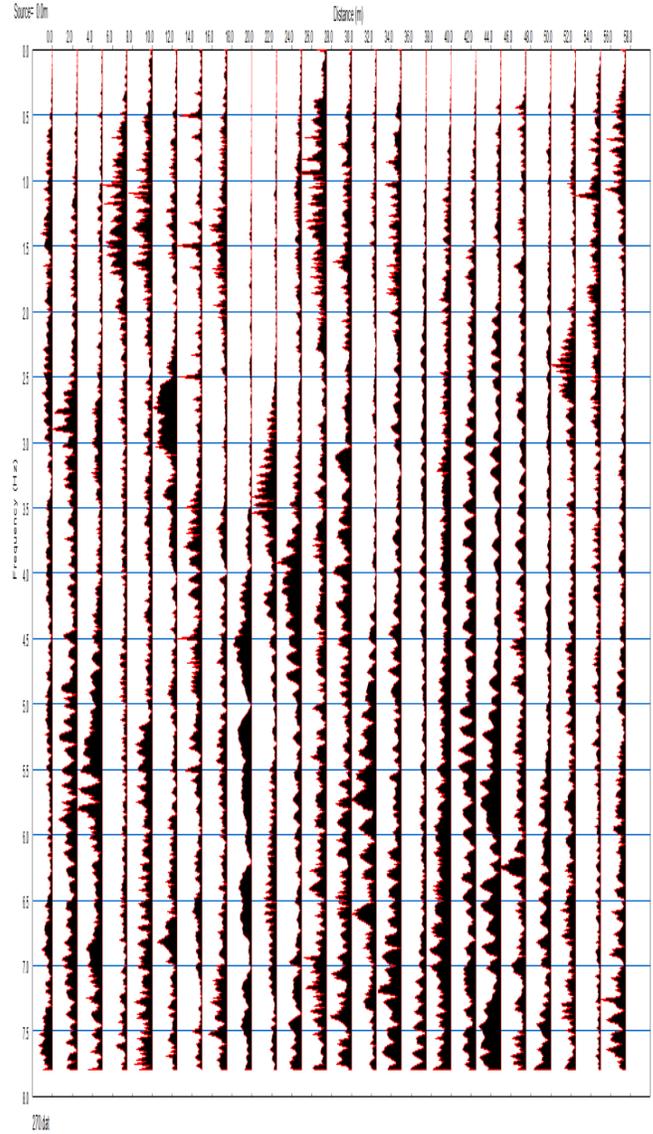


Figura17. Analisi spettrale raw data – Ampiezza normalizzate a tutto il dataset

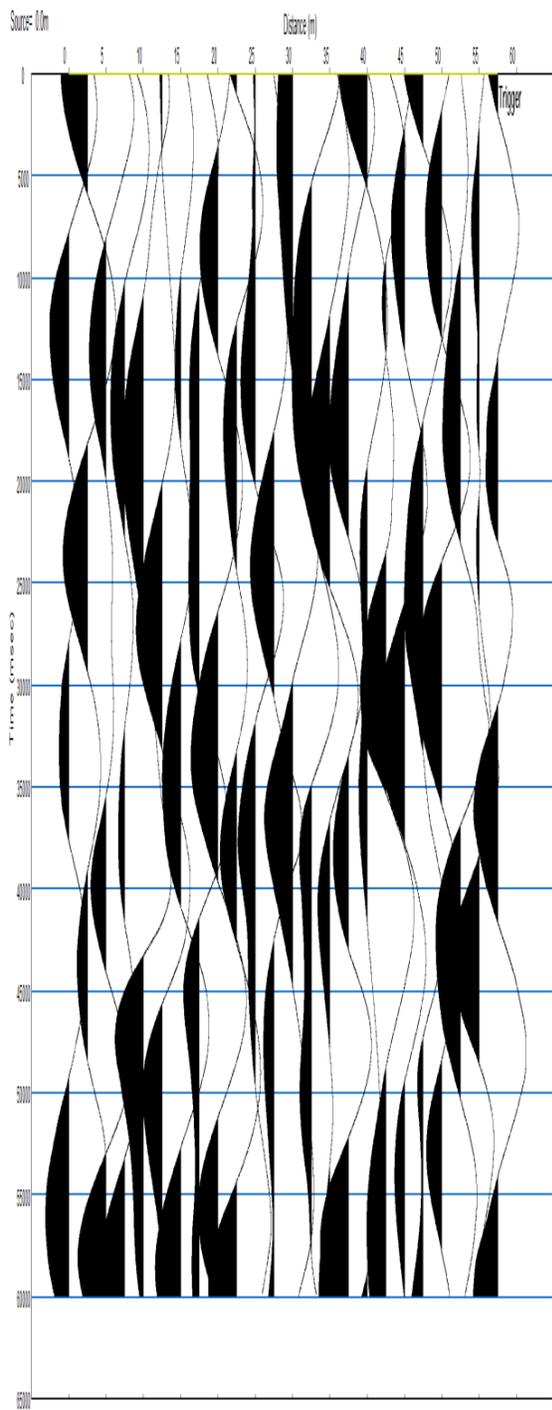


Figura 18. Raw data – Ampiezza normalizzate a tutto il dataset

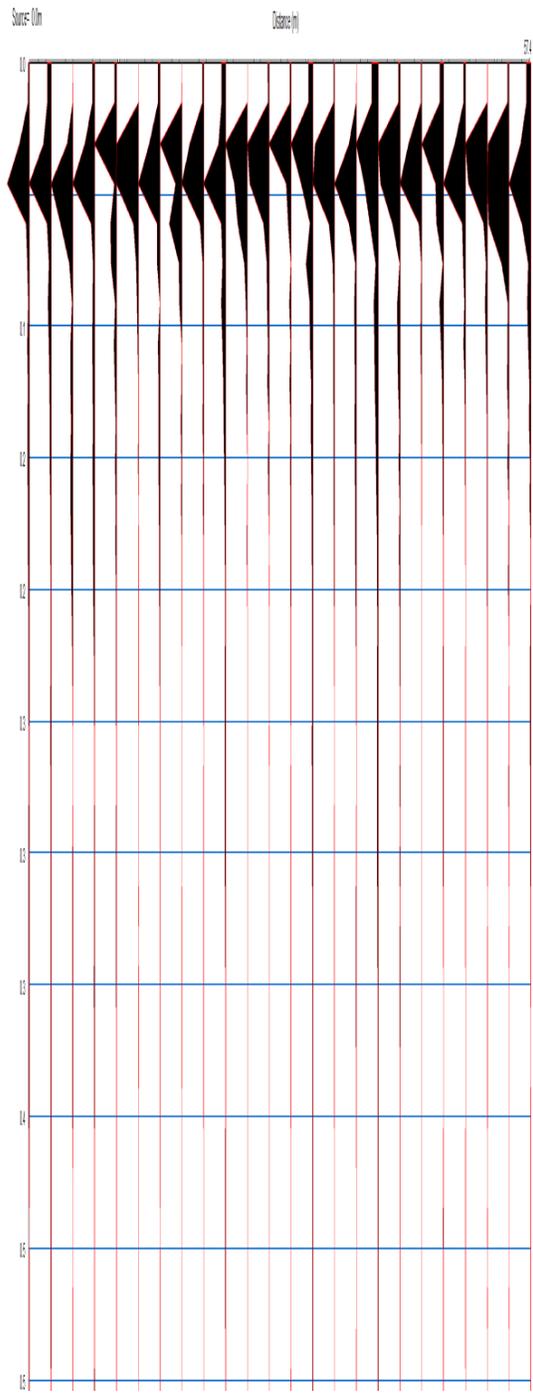


Figura19. Analisi spettrale processed data – Ampiezza normalizzate a tutto il dataset

III CONCLUSIONI

Sulla base della sperimentazione eseguita ed in base ai risultati acquisiti possiamo ritenere che in particolari condizioni è possibile determinare in modo indiretto la velocità delle correnti in prossimità del fondo marino, fiumi ecc. Tale possibilità in futuro permetterebbe di sviluppare array di sensori anche per prevedere aree di potenziale accumulo dei sedimenti a basso costo ed in continuo.

Applicazioni possono essere sviluppate per l'erosione costiera, velocità di interrimento dei bacini, monitoraggio

correnti corsi d'acqua ma anche come radar acustico nei porti a controllo della navigazione da diporto che spesso non è rilevata dai radar elettromagnetici convenzionali.

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, progetto "Sviluppo di tecnologie per la "Situational sea Awareness"-TESSA".

Marine Litter nell'ambito della Strategia Marina

Fabrizio Carmelo Serrentino
IAMC-CNR
Napoli, Italy
fabrizioserrentino@gmail.com

Giuseppe Andrea De Lucia
National Research Council IAMC-CNR
Oristano, Italy
giuseppe.delucia@cnr.it

Sommario - Tale progetto ha previsto, dopo un periodo di formazione presso l'istituto IAMC-CNR di Napoli, un successivo periodo di stage svolto, in questo caso, presso la sede dell'IAMC-CNR di Oristano. Lo stage ha avuto come obiettivo principale quello di valutare la presenza e le modalità di accumulo di *marine litter* (ML) costituito principalmente da rifiuti più leggeri, prodotti sulla terraferma, i quali hanno una elevata possibilità di trasformarsi in ML in quanto possono essere facilmente veicolati dalle acque piovane o dal vento. Inoltre, la lentezza con la quale determinati tipi di rifiuti si degradano determina anche lunghi tempi di permanenza nell'ambiente marino. I rifiuti possono accumularsi in prossimità della zona sorgente, ma anche percorrere notevoli distanze. L'accumulo di rifiuti in specifiche aree marine può essere determinato, dunque, non solo dalla vicinanza alle sorgenti ma anche dall'andamento delle correnti e dalla persistenza e resistenza del materiale a decomporsi. Gli accumuli di rifiuti solidi possono essere osservati sui fondali marini, sulla superficie del mare, lungo i litorali, soprattutto in prossimità di centri abitati o comunque in aree con un elevato sviluppo antropico. In questo lavoro, si analizza l'accumulo del ML in due ambienti differenti: sugli arenili e in colonna d'acqua. Le campagne di raccolta dati sugli arenili sono state effettuate coinvolgendo, in un più ampio progetto didattico-ambientale, scuole primarie e secondarie. I dati in colonna d'acqua, invece, sono stati raccolti mediante una rete planctonica "manta trawl", la quale riesce ad intrappolare frammenti galleggianti che poi in una fase successiva vengono analizzati in laboratorio. Infine, sono stati valutati gli effetti del ML su organismi marini in particolare su *Caretta caretta*, specie usata come indicatore biologico nel Mediterraneo.

Keywords—marine litter; *Caretta caretta*; marine strategy; Sardegna;

INTRODUZIONE

I rifiuti plastici in mare sono molto resistenti e persistenti, si considerano necessari dai 10 a 600 anni affinché si possano degradare; questo lasso di tempo, considerato il sempre crescente accumulo di detriti di plastica in mare, è certamente incompatibile al raggiungimento di uno stato ambientale soddisfacente. Qualunque rifiuto impropriamente smaltito, trasportato o conservato, è potenzialmente un rifiuto marino. Molto importante è risalire alla zona source della tipologia di ML. Le principali sorgenti provenienti da attività terrestri sono riscontrabili da uno scorretto smaltimento dei rifiuti nelle singole case; un errata gestione dei rifiuti urbani a tutti i livelli, dalla raccolta al trasporto, fino al trattamento e eliminazione finale; smaltimento delle acque reflue comunali non trattate, sia per la mancanza di un idoneo impianto di trattamento sia come conseguenza di forti precipitazioni che

determinano l'arrivo in mare di grandi volumi di acqua e di tutto ciò che essa è in grado di trasportare; smaltimento illecito di rifiuti industriali che possono contenere, ad esempio, residui dei processi di lavorazione, imballaggi o materiale grezzo, sferule di plastica o resina utilizzate come materie prime; abbandono sulle spiagge di rifiuti vari, derivanti da attività turistiche e ricreative. I rifiuti provenienti da fonti terrestri finiscono in mare attraverso fiumi, scarichi, sbocchi di acque reflue e si accumulano lungo i litorali attraverso l'azione del vento e delle onde. Tuttavia, anche le attività marittime possono rappresentare fonti rilevanti di ML, come la pesca commerciale, la navigazione mercantile, il trasporto passeggeri e navigazione da diporto, le piattaforme per l'estrazione di greggio e gas, gli allevamenti ittici e una scorretta gestione dei rifiuti prodotti e gestiti nelle aree portuali. Il materiale organico decomponendosi ritorna ai suoi composti di base mentre la maggior parte delle materie plastiche non si decompone completamente. In tale processo, inoltre, entra in gioco anche la fotodegradazione da luce solare a causa della quale i detriti vengono gradualmente frammentati in pezzi sempre più piccoli che, in funzione della tipologia del materiale dal quale originano, possono galleggiare o affondare. L'insieme di questi effetti può causare alla flora ed alla fauna marina danni gravi se non irreversibili (soffocamento, annegamento, fame e indebolimento); va infatti ricordato che i detriti di più piccole dimensioni, ad esempio *micro* e *meso-detriti*, sono simili al plancton, che è parte fondamentale della catena alimentare marina. La rimozione di questi detriti infinitesimali provocherà inevitabilmente anche quella di una certa quantità di plancton, privando pesci ed altri organismi del loro nutrimento con ripercussioni sull'intera catena alimentare mentre la raccolta di detriti di maggiori dimensioni potrebbe avere effetti negativi su pesci di taglia analoga o superiore; di qui la necessità di ideare metodi di raccolta innocui sui quali basare i sistemi di pulizia. A livello indiretto i detriti, trasportati da venti, correnti o dagli stessi natanti in transito, possono trasformarsi in vettori di specie invasive. Inoltre, l'ingestione di plastica può portare lungo la catena alimentare al *bioaccumulo* di tossine in pesci, uccelli e altre forme di vita marina. Tuttavia, la conoscenza dell'argomento è per alcuni aspetti ancora lacunosa e l'impatto dei detriti marini è continuamente oggetto di indagine a causa della limitata conoscenza circa la distribuzione di tali detriti in colonna d'acqua. I detriti di plastica hanno impatti ambientali ed economici significativi nei sistemi marini [1]. Si stima che ogni anno 6,4 milioni di tonnellate di rifiuti marini sono smaltiti negli oceani e nei mari; circa 8 milioni di articoli di

rifiuti marini vengono gettati tutti i giorni, di cui approssimativamente 5 milioni sono persi accidentalmente dalle navi [2]. A livello Europeo, questo tipo di inquinamento viene affrontato dalla direttiva quadro sulla strategia per l'ambiente marino 2008/56/CE, che prevede il raggiungimento di uno stato ambientale soddisfacente per tutte le acque marine dell'UE entro il 2020 [3].

I. MATERIALI E METODI

A. Campionamento dei detriti marini spiaggiati

La raccolta di ML su arenili consente di acquisire informazioni ai fini dello studio dello spiaggiamento dei rifiuti marini, in particolare relativamente a quantità, andamento e possibili fonti. Queste informazioni, utilizzate per mettere a punto misure di riduzione degli input e testarne l'efficacia, hanno come obiettivo finale quello di minimizzare la quantità di rifiuti immessi nell'ambiente marino. La selezione delle aree di indagine deve essere effettuata prendendo in considerazione tutte le possibili fonti di immissione di rifiuti solidi all'interno della specifica Regione. Pertanto, dovrebbero essere scelte spiagge corrispondenti alle seguenti tipologie di aree: grandi centri urbani, foci fluviali e aree portuali. Deve essere rappresentata almeno un'area di indagine per ciascuna tipologia. Come criteri generali, le spiagge devono essere composte da sabbia o ghiaia ed esposte al mare aperto, facilmente accessibili ai rilevatori tutto l'anno, avere una lunghezza minima di 100 metri, se possibile, avere più di 1 km di lunghezza, essere prive di costruzioni o insediamenti mobili per tutto l'arco dell'anno e non essere soggette ad alcuna altra attività di raccolta di rifiuti. Sebbene le spiagge sabbiose siano le più facili per i rilevamenti, le spiagge ghiaiose, ciottolose e rocciose possono essere incluse nel programma di valutazione. Una volta effettuata la scelta delle spiagge di riferimento, deve essere identificata l'unità di campionamento. Per unità di campionamento si intende una porzione della spiaggia da campionare che copre l'intera larghezza dalla battigia fino al sistema retrodunale o alla vegetazioni e/o ai manufatti. La Convenzione per la protezione dell'ambiente marino dell'Atlantico o OSPAR Convention Nord Est è lo strumento legislativo che disciplina la cooperazione internazionale in materia di protezione dell'ambiente nel Nord Est Atlantico. Unisce e risale alla Convenzione del 1972 di Oslo sul dumping dei rifiuti in mare e alla Convenzione del 1974 di Parigi sulle fonti terrestri d'inquinamento marino. Durante i campionamenti si prendono in considerazione due lunghezze corrispondenti a due unità di campionamento e a due diverse attività di censimento del rifiuto (Fig.1): un unità di lunghezza di 100 metri per identificare tutti i rifiuti solidi presenti e un unità di lunghezza di 1 km per identificare gli oggetti di dimensioni maggiori di 50 cm. Se una spiaggia non è abbastanza lunga si utilizzerà solo l'unità di campionamento di 100 metri. Le singole unità di campionamento contenute nelle spiagge di riferimento devono essere descritte in apposite schede. Nella scheda identificativa della spiaggia devono essere registrate le caratteristiche fisiche e geografiche della spiaggia stessa e riportate le altre informazioni riguardanti

eventuali fonti di inquinamento circostanti, quali fiumi, centri abitati etc.. Se una spiaggia possiede più di una unità di campionamento, allora la distanza minima di separazione deve essere di almeno 50 m. Il punto iniziale e il punto finale di ciascuna unità di campionamento devono essere registrati tramite coordinate GPS. Tutti gli oggetti (*items*) vengono assegnati ad una categoria identificata con un numero [3]. Il numero totale degli oggetti appartenenti alla singola categoria deve essere riportato sulla scheda. Il campionamento dovrà essere fatto procedendo in maniera sistematica ortogonalmente alla linea di costa lungo transetti distanziati di circa 2 metri per l'area di campionamento lunga 100 metri e di circa 4 metri per l'area di campionamento di 1 km. La lunghezza lineare della costa è il parametro secondo il quale viene standardizzata la misura della quantità di rifiuti rilevati che verranno espressi come numero di items/km. Devono essere conteggiati gli elementi visibili sull'arenile escludendo quelli rinvenuti scavando. La conta, il peso, la descrizione della categoria e la registrazione vengono eseguiti in laboratorio (Fig.2). Gli oggetti più ingombranti e non removibili devono essere marcati per non essere conteggiati una seconda volta quando il campionamento viene ripetuto. Gli elementi non riconducibili ad una particolare categoria di rifiuto o sconosciuti vengono catalogati come "altra voce" con una breve descrizione dell'oggetto. Per ogni oggetto vengono effettuate foto digitali in modo che possano essere identificati successivamente e se necessario aggiunti agli elenchi. Le spiagge di riferimento devono essere monitorate due volte l'anno, durante la stagione primaverile e quella autunnale.



Fig.1. Unità di campionamento di 100 m (segmento colore rosa); unità di campionamento di 1 km; (segmento colore viola); area totale coperta dal campionamento (in colore con transetti ortogonali alla costa).



Fig.2. Lavoro di *sorting* in laboratorio

B. Campionamenti in colonna d'acqua

In colonna d'acqua si trovano soprattutto microplastiche che sono generate dalla continua frammentazione di grandi oggetti a causa, in particolare dell'attività della radiazione solare [4]. I rifiuti plastici si ritrovano ovunque in ambiente marino e costiero, dai poli all'equatore alle coste continentali, alle piccole isole remote, poiché essi viaggiano su lunghe distanze spinti dalle correnti e dai venti oceanici [2]. Diversi studi hanno dimostrato che le micro-plastiche assorbono PCB dall'acqua di mare [6]. Oltre all'assorbimento dall'esterno,

nella matrice plastica sono contenuti vari additivi di particolare rischio come coloranti, stabilizzatori UV, agenti opacizzanti, ritardanti di fiamma bromurati, plastificanti ftalati e agente *bisfenolo*[6]. Durante il processo di degradazione i composti chimici presenti nella matrice plastica sfuggono e vengono trasportati a lunga distanza [7]. Un contributo considerevole alla presenza di microplastiche è dato dalle industrie di *pellet* [8]. Nell'ambito delle materie plastiche, con il termine *pellet* si indicano piccoli granuli in materiale plastico di varia forma (in genere piccoli cilindri o dischetti del diametro di circa 1÷5 mm), costituiti da polimero o da una miscela polimerica e utilizzati come materia prima per la realizzazione dei prodotti finiti in materiale plastico (Fig.3). Questi granuli plastici derivano dal petrolio, il quale viene estratto e poi inviato in raffineria per essere trattato in etano e propano. Con un sistema di riscaldamento ad alta temperatura, etano e propano vengono poi convertiti in etilene e propilene. Successivamente, tali sostanze chimiche sono combinate con un catalizzatore per trasformarsi in polimero. Un polimero è essenzialmente una catena di molte molecole legate insieme e può variare a seconda del tipo di plastica che si vuole produrre. Il monitoraggio delle microplastiche in colonna d'acqua si articola in due fasi principali: in una prima fase si individuano gli *hot spot* con percorsi determinati, mentre attraverso transetti selezionati si stimano le tendenze di densità. I campionamenti in colonna d'acqua sono stati eseguiti attraverso la *manta trawl* che è una particolare tipologia di rete usata anche per i campionamenti di ML; il vantaggio principale del suo utilizzo è che grandi volumi di acqua possono essere campionati rapidamente intrappolando il materiale di interesse. L'acqua di mare passa attraverso setacci o reti in contenitori chiusi che poi vengono rimossi per analizzare le microplastiche intrappolate. La rete utilizzata per questo lavoro ha una lunghezza di 6 m con una tessitura di maglia di 333µm e un flussimetro per stimare il volume di acqua (Fig.4). Il singolo campionamento viene svolto con una frequenza di 3 repliche per una durata di 20 minuti ciascuna.

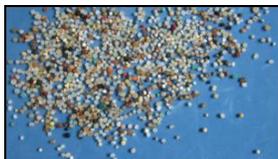


Fig.3. Pellet



Fig.4. Manta trawl

C. Effetti sul Biota, monitoraggi su *Caretta caretta*

La *Caretta caretta* è la tartaruga marina più comune del Mar Mediterraneo, la specie è molto minacciata in tutto il bacino ed è a rischio di estinzione nelle acque territoriali italiane. Sono animali onnivori, si nutrono di molluschi, crostacei, gasteropodi, echinodermi, pesci e meduse, ma nei loro stomaci è stato trovato di tutto, dalle buste di plastica a tappi, preservativi, bambole, portachiavi, bottoni, penne, posate e altri oggetti di plastica. I prodotti chimici presenti nelle particelle di plastica quando ingerite dagli organismi *biomagnificano* e in particolare sono: *difenile polibromurato eteri* (PBDE), *idrocarburi policiclici aromatici* (IPA) e *nonilfenolo* (NP) [9]. In uno studio su *Caretta caretta* nel Mediterraneo occidentale, sono state rinvenute nel 79,6% dei casi dell'intero campione di tartarughe, presenza di detriti di origine antropica nel loro tratto digerente, di cui circa il 60% (*n.items*) di origine plastica [10].

Le tartarughe marine sono degli ottimi indicatori per il Mediterraneo perché: si cibano esclusivamente in mare, sono relativamente abbondanti in Mediterraneo, ingeriscono una grande varietà di plastiche, confondono le plastiche flottanti per meduse [11], solitamente non rigurgitano materiale indigesto e dunque i contenuti stomacali delle tartarughe sono rappresentative dell'inquinamento ambientale. Molto dannose sono anche le ingestioni degli ami dei palamiti, le cui esche attraggono questi animali. Spesso le tartarughe rimangono intrappolate in reti da pesca e lenze che possono renderle incapaci di raggiungere la superficie per la respirazione. Vengono effettuate due tipologie di analisi: se l'animale viene ritrovato vivo, si analizza il contenuto fecale (*fecal pellet analysis*) per verificare la presenza assenza di plastica ingerita, se invece viene ritrovato morto, si esegue la necropsia (Fig.5) e vengono usati i contenuti stomacali per stimare le tendenze di misura e le differenze regionali di ML.

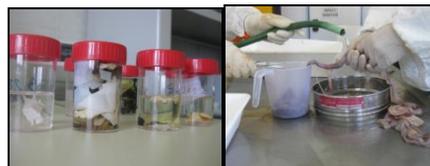


Fig.5. Fecal pellet analysis e necropsia

II. RISULTATI

D. Monitoraggio marine litter spiaggiato

I siti presi in esame, nel periodo Aprile 2013, sono spiagge che sono state scelte essenzialmente in base a due parametri principali la composizione e l'esposizione; infatti, i siti di *Torregrande* ed *Arborea* sono interni al golfo di Oristano (IGO), quindi più protetti dalle mareggiate, mentre i siti di *San Giovanni* e *Is Arenas* (Fig.6) si trovano all'esterno del golfo (EGO) dunque più esposti ai venti prevalenti come il *Maestrale*. Nei siti IGO l'abbondanza degli oggetti rinvenuti sugli arenili (Fig.7) è decisamente più bassa (Fig.8) rispetto ai

siti EGO; nelle tre repliche effettuate ad *Arborea* si riscontra il massimo valore nella replica A con 350 campioni mentre nel sito di *Torregrande* la replica C conta 480 campioni. Nelle stazioni EGO la situazione è molto diversa, in quanto i valori sono nettamente più alti, infatti sulla spiaggia di *San Giovanni* si registra nella replica C un valore di 7.629 campioni; mentre sulla spiaggia di *Is Arenas* la replica A conta ben 28.406 campioni.

Questa distribuzione viene schematizzata nel grafico (Fig.9) riportando la media del numero di *items* censito per sito.



Fig.6. Arenili monitorati

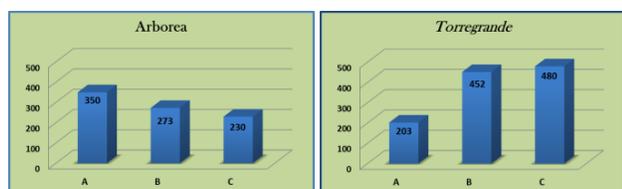


Fig.7. Risultati grafici di marine litter spiaggiato (N. items) – Siti IGO

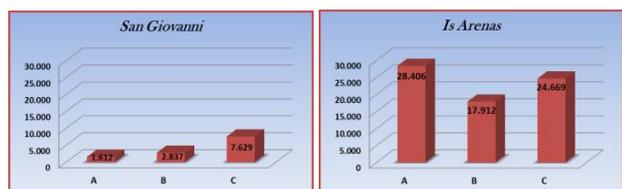


Fig.8. Risultati grafici di marine litter spiaggiato (N. items) - Siti EGO

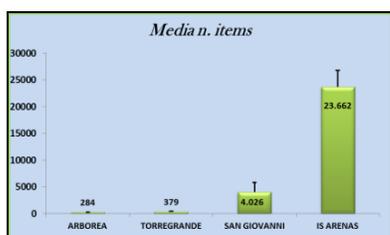


Fig.9. Media n. items per sito

Tra le varie categorie di detriti di plastica rinvenuti, si è deciso di graficare solo la categoria dei *plastic pellet* perché rappresentano una categoria particolarmente abbondante e interessante dal punto di vista idrodinamico. In futuro, infatti, si potrebbero mappare i percorsi seguiti in mare attraverso modelli specifici. Si può notare (Fig.10), come i valori non si discostino dallo schema di distribuzione generale visto in precedenza con la stessa distribuzione tra siti IGO ed EGO *pellet*. I valori sono particolarmente bassi nel sito di *Torregrande* con soli 6 *pellet* nella replica C e ad *Arborea* si raggiungono i 47 campioni nella replica A. Gli arenili esterni al golfo hanno i valori più alti, infatti *Is Arenas* conta 5.917 campioni nella replica B, mentre a *San Giovanni* troviamo 2.523 nella replica C. La categoria di ML maggiormente registrata (Fig.11) è la *hard plastic* cioè frammenti di plastica dura che superano le 50.000 unità poi i *plastic pellet* con poco meno di 20.000 unità e a seguire polistirolo, cotton fioc, buste in plastica, tappi di bottiglia.

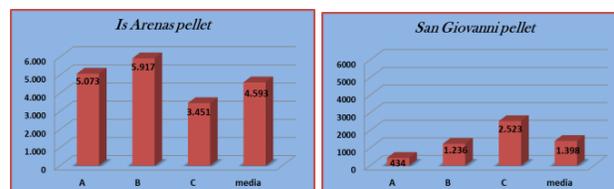
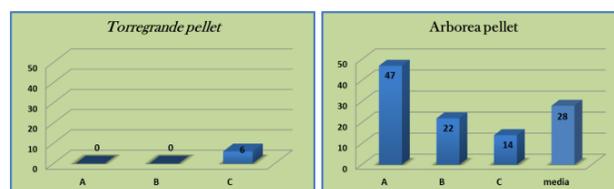


Fig.10. Risultati grafici di pellet spiaggiato (N. items)- Siti IGO ed EGO pellet

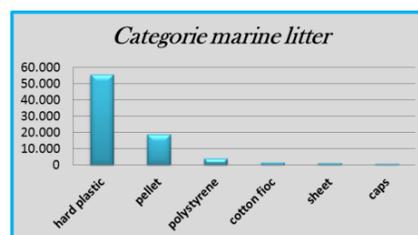


Fig.11. Media dei n. items dei siti indagati divisi per categorie di marine litter

E. Monitoraggio in colonna d'acqua

L'area di studio comprende cinque siti (Fig.12); tre sono stati scelti all'interno del golfo di Oristano (IGO²): *La Caletta*, *Foce del Tirso* e *Marceddi*, due esterni al golfo (EGO²), l'isola di *Mal di Ventre* e una *zona off-shore* localizzata a circa 20 miglia dalla costa. I dati di ML in colonna d'acqua indicano una situazione molto diversa rispetto a quella relativa ai dati dello spiaggiato: si nota, infatti, una distribuzione spaziale molto poco marcata tra siti IGO² (Fig.13) e siti EGO² (Fig.14). Infatti i valori molto simili di densità (Fig.15) lasciano intuire che il ML in colonna d'acqua è distribuito in modo più uniforme rispetto ai valori di ML spiaggiato. Pertanto possiamo ipotizzare una diversa spiegazione legata alle diverse modalità di distribuzione nei due diversi ambienti (in acqua bassa - zone di *frangenza* e in mare aperto).



Fig.12. Siti monitorati marine litter in colonna d'acqua

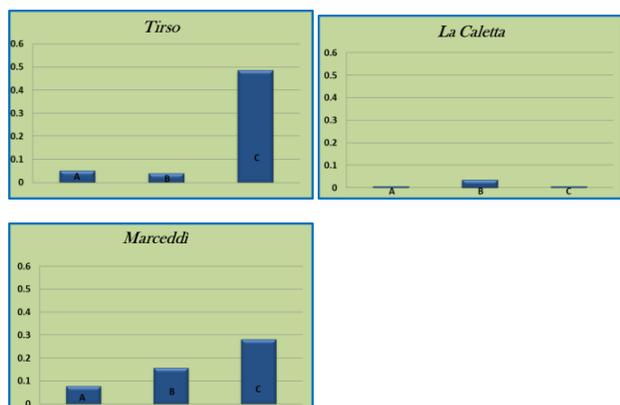


Fig.13. Siti interni al Golfo di Oristano (n.items) – Siti IGO²



Fig.14. Siti esterni al Golfo di Oristano (n.items) – Siti EGO²

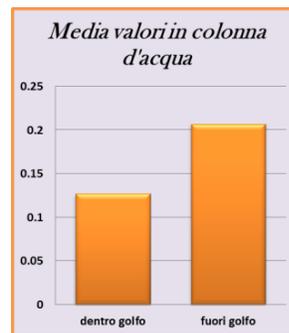


Fig.15. Media n. items/m³ siti interni/esterni golfo Oristano

F. Interazioni tra ML e *Caretta caretta*

Nel mare di Sardegna la *Caretta caretta* è molto presente con vari siti di nidificazione; in particolare in questa sezione si prendono in considerazione i dati di esemplari monitorati in Sardegna per analizzare l'eventuale presenza e tipologia di ML nel tratto digerente.

I dati sono stati raccolti dal *CReS - Centro di Recupero del Sinis* delle tartarughe e dei mammiferi marini che ha la finalità di programmare e attuare le attività di recupero, soccorso, affidamento e gestione delle tartarughe e dei cetacei ai fini della loro riabilitazione e per la manipolazione e rilascio degli stessi a scopo di conservazione e scientifici, in ottemperanza alle vigenti disposizioni regionali, nazionali e comunitarie in materia. La distribuzione di *C. caretta* monitorata in Sardegna (Fig.16) mostra gli individui ritrovati con presenza di plastica ingerita e quelli con assenza, su un totale di 121 individui, di cui il 27% circa presenta ingestione di plastica. Il grafico riporta (Fig.17) il numero di campioni plastici divisi per categoria per singolo esemplare: le categorie maggiormente occorrenti sono gli *sheet* e *fragments*, buste e frammenti in plastica. Le tartarughe quando si trovano nei pressi della costa, con fondali relativamente bassi si cibano soprattutto di crostacei, invece in mare aperto si cibano in particolare di meduse, rischiando spesso di ingerire buste di plastica scambiate per esse [11]. Anche in termini di peso espresso in g, il grafico (Fig.18) conferma che queste due categorie *fragments* e *sheet* sono ancora una volta le più rinvenute.

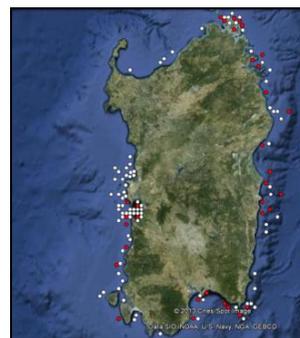


Fig.16. Distribuzione di *C. caretta* monitorata in Sardegna
 ● Presenza di plastiche ingerite (N=33; %=27,27)
 ○ Assenza di plastiche ingerite (N=88; %= 72,73)

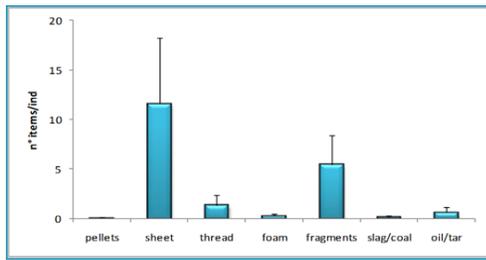


Fig.17. numero di campioni plastici divisi per categoria per singolo individuo

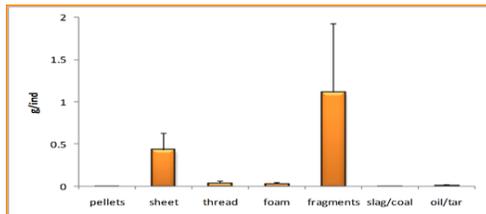


Fig.18. peso espresso in g delle varie categorie per individuo

III. CONCLUSIONI

Le plastiche in mare seguono diverse modalità di accumulo e sedimentazione a seconda della loro densità e capacità al galleggiamento. Dai dati dello spiaggiato possiamo concludere che le spiagge più esposte ai venti predominanti risultano avere un maggior accumulo di ML in termini di numero di *items* censiti.

Il fenomeno che più influenza l'accumulo è la frangenza d'onda che è direttamente proporzionale all'intensità del vento; quindi una maggiore esposizione della spiaggia ai venti predominanti comporta una maggiore energia dissipata dalle onde che apporta un maggiore accumulo rispetto a spiagge più ridossate e protette. Le categorie di ML maggiormente ritrovate, in termini di numero di *items*, sono frammenti plastici, *pellet* e polistirolo. Dai dati in colonna d'acqua possiamo dire che a differenza dello spiaggiato, il *micro-litter* in colonna d'acqua non ha questa marcata differenziazione tra zone interne ed esterne al Golfo, perché in questo ambiente le modalità di distribuzione sono diverse; i percorsi delle microplastiche sono influenzati da una combinazione di caratteristiche fisiche come correnti e maree, le quali sono causate da molteplici fattori fisico-chimici e non sono solo legate ai venti di superficie. Infine, le categorie di *macro-litter* rinvenute in *Caretta caretta* sono in particolare buste e frammenti plastici, questo probabilmente perché vengono scambiati dalle tartarughe come risorsa trofica, in particolare meduse. In generale possiamo dire che le categorie di ML più frequenti sono risultate essere frammenti plastici, *pellet* e polistirolo mentre quelle più dannose per la *Caretta caretta*: *sheetlike* e articoli da pesca (ami e lenze) di dimensioni *macro*.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato supportato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013, Progetto "Sviluppo di Tecnologie per la 'Situational Sea Awareness' – TESSA.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] PG. Ryan, CJ. Moore, 2009; "Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment". Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 364.1526 (2009): 1999-2012
- [2] UNEP 2005; "Marine Litter: An analytical overview". Nairobi
- [3] DIRECTIVE 2008/56 / EC THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 17 June 2008; Strategy Framework Directive for the marine environment, the Official Journal of the European Union.
- [4] OSPAR Commission, 2010. "Marine Litter Regional Action Plan" 2015 No. 643978-1-906840-86-0
- [5] A. L. Andrady, 2009; "Microplastics in the marine environment". Marine Pollution Bulletin 62 (2011) 2588-2597
- [6] S. Aliani, A. Griffa, A. Molcard, 2003; "Floating debris in the Ligurian Sea, north-western Mediterranean". Marine Pollution Bulletin 46 (2003) 1142-1149
- [7] D. K. A. Barnes, F. Galgani, R. C. Thompson, M. Barlaz Barnes, 2009; "Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments". D. K. A. Barnes, F. Galgani, R. C. Thompson, M. Barlaz Barnes, 2009; "Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments". Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 364.1526 (2009): 1985-1998.
- [8] J.C. Antunes, J.G.L. Frias, A.C. Micaelo, P. Sobral, 2013; "Resin pellets from beaches of the Portuguese coast and adsorbed persistent organic pollutants". Estuarine, Coastal and Shelf Science 130 (2013) 62e69
- [9] E. L. Teuten, J. M. Saquing, D. R. U. Knappe, M. A. Barlaz, S. Jonsson, A. Björn, S. J. Rowland, Richard C. Thompson, Tamara S. Galloway, R. Yamashita, D. Ochi, Y. Watanuki, C. Moore, P. Viet, Touch Seang Tana, M. Prudente, R. Boonyatumanond, Mohamad P. Zakaria, K. Akkhavong, Y. Ogata, H. Hirai, S. Iwasa, K. Mizukawa, Y. Hagino, A. Imamura, M. Saha and H. Takada, 2009; "Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife". Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 364.1526 (2009): 2027-2045.
- [10] J. Tomas, R. Guitart, R. Mateo, J.A. Raga, 2001; "Marine debris ingestion in loggerhead sea turtles, *Caretta caretta*, from the Western Mediterranean". Marine Pollution Bulletin 44 (2002) 211-216
- [11] N. Mrosovsky, G.D. Ryan, M.C. James, 2009; "Leatherback turtles: The menace of plastic". Marine Pollution Bulletin 58 (2009) 287-289