



CNR-IAS, SEZIONE DI ORISTANO

Studio Modellistico Idrodinamico e di Qualita' delle Acque del Golfo di Cagliari. Parte I: Idrodinamica.

*Andrea Cucco**, *Michol Ghezzi*** e *Angelo Perilli**

**CNR-IAS, Oristano. Loc. Sa Mardini 09170, Oristano, Italia*

*** CNR-ISMAR, Venezia. Arsenale-Tesa 124, 30122, Venezia, Italia*

Rapporto Tecnico di Progetto

Ultima revisione: Anno 2022

Indirizzo: CNR-IAS, sezione di Oristano, Loc. Sa Mardini 09170, TorreGrande, Oristano, Italia

e-mail : angelo.perilli@cnr.it

Contents

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Sommario | 1 |
| 2 | Obbiettivi | 2 |
| 3 | Metodi | 3 |
| 3.1 | Il modello idrodinamico | 3 |
| 3.2 | Il modello di trasporto e diffusione | 6 |
| 3.3 | Il tempo di residenza | 6 |
| 4 | Dati iniziali e pre-processamento | 8 |
| 4.1 | Dati geo-morfologici | 8 |
| 4.2 | Dati idrologici | 14 |
| 4.3 | Dominio di calcolo | 21 |
| 5 | Analisi di stabilità, di sensitività e analisi di scala | 26 |
| 6 | Set-up simulazioni | 33 |
| 7 | Risultati | 35 |
| 7.1 | Scenari | 36 |
| 7.2 | Simulazioni annuali | 50 |

1 Sommario

Al fine di investigare i principali processi trofici che interessano la colonna d'acqua nell'ambiente marino costiero dell'area del Golfo di Cagliari sono stati utilizzati diverse tipologie di modelli numerici. Tali strumenti sono in grado di simulare: la circolazione delle acque indotta dalle principali forzanti meteo-marine, gli annessi fenomeni di trasporto e diffusione delle sostanze disciolte e disperse nella colonna d'acqua e i principali processi di trasformazione che interessano sia i nutrienti disciolti che i primi livelli della catena trofica dell'ecosistema marino costiero.

In questo rapporto tecnico sono descritti il modello idrodinamico utilizzato, la tipologia dei dati geomorfologici relativi all'area in esame e il tipo di pre-processamento applicato a tali dati per poter essere utilizzati. Sono inoltre descritti i diversi scenari investigati, e i risultati ottenuti dalle simulazioni idrodinamiche effettuate.

2 Obiettivi

Questo studio ha come obiettivo principale quello di investigare e riprodurre, mediante modelli numerici, la circolazione delle acque nel Golfo di Cagliari e l'evoluzione stagionale del carico di nutrienti e della concentrazione di fitoplancton nelle acque dell'area di indagine.

In particolare questo macroobiettivo si articola in 3 distinte fasi:

- **Fase 1** Analisi e trattamento dei dati geomorfologici, meteo-marini ed idrologici, implementazione del modello idrodinamico nell'area di indagine mediante costruzione della griglia di calcolo e acquisizione dei dati batimetrici.
- **Fase 2** Analisi di sensitività del modello idrodinamico e riproduzione della circolazione delle acque nell'area in esame in relazione ai diversi scenari meteo-marini.
- **Fase 3** Analisi e processamento dei dati ambientali al fine dell'implementazione del modello di qualità delle acque e analisi di sensitività . Confronto tra i risultati numerici e i dati sperimentali. Simulazione di diversi scenari ambientali caratterizzati dalla variazione sia dei forzanti ambientali sia degli input di energia trofica.

In questa relazione tecnica sono riportati i risultati ottenuti dall'attività concernente la realizzazione degli obiettivi preliminari della prima e seconda fase.

3 Metodi

La riproduzione della circolazione delle acque e la caratterizzazione idrologica dell'area di indagine è stata effettuata mediante l'utilizzo di un modello numerico idrodinamico e di un modello di trasporto e diffusione di seguito descritti. Mediante l'applicazione del modulo idrodinamico è possibile riprodurre la struttura della circolazione delle acque e la sua variabilità in relazione ai diversi scenari investigati, mentre, mediante l'applicazione del modulo per la simulazione del processo di trasporto e diffusione è possibile stimare quelli che sono i tempi di residenza di determinate masse d'acqua in un area di interesse. Tale variabile permette di ulteriormente caratterizzare sotto il profilo fisico le caratteristiche idrologiche di una determinata area in relazione ai diversi scenari investigati. Di seguito sono descritti i due moduli numerici utilizzati e la metodologia utilizzata per stimare i tempi di residenza delle acque.

3.1 Il modello idrodinamico

Il modello numerico SHYFEM (www.ve.ismar.cnr.it/shyfem) è un modello idrodinamico basato sul metodo degli elementi finiti. Risolve il sistema di equazioni Shallow Water con approssimazione di Boussinesq in orizzontale e approssimazione idrostatica in verticale nella loro formulazione con i livelli d'acqua e i trasporti (Umgiesser and Bergamasco, 1993; Umgiesser and Zecchetto, 1995; Umgiesser et al., 2004; Cucco and Umgiesser, 2006). Di seguito viene riportata e descritta la formulazione del modello nelle 2 dimensioni:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + RU + X = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + RV + Y = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Viene utilizzato il metodo degli elementi finiti per l'integrazione spaziale delle variabili indipendenti e un algoritmo semi implicito per l'integrazione nel tempo. I termini trattati implicitamente sono il gradiente di livello e il termine di Coriolis nelle equazioni dei momenti e il termine di divergenza nell'equazione di continuità. Il termine di frizione viene trattato come implicito, mentre tutti i rimanenti termini, come i termini baroclini, sono trattati in modo esplicito.

Nel sistema di equazioni, U e V sono le velocità nelle direzioni x e y integrate verticalmente comunemente detti trasposti barotropici,

$$U = \int_{-h}^{\zeta} u dz \quad V = \int_{-h}^{\zeta} v dz.$$

t il tempo, f il parametro di Coriolis, g l'accelerazione di gravità, e H lo spessore totale della colonna d'acqua, risultato dalla somma di h , inteso come profondità indisturbata o livello medio mare, e ζ il livello dell'acqua. Il termine di frizione R è espresso secondo la usuale formula quadratica:

$$R = c_b \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{H}$$

dove c_b rappresenta il valore di frizione al fondo calcolato secondo la formulazione di Cheazy:

$$c_b = \frac{g}{C^2}$$

dove C è il coefficiente di Cheazy che varia con il livello dell'acqua come

$$C = k_s H^{\frac{1}{6}}$$

dove k_s è il coefficiente di Strikler

Gli ultimi due termini delle equazioni dei momenti, rispettivamente X e Y , includono tutti i termini che non necessitano di essere trattati implicitamente come lo stress del vento, i termini non lineari e i gradienti baroclini. Per i dettagli della trattazione numerica si riporta a Umgiesser and Zecchetto (1995) e Umgiesser et al. (2004)

Discretizzazione nel tempo: il metodo semi-implicito. Per ottenere una efficiente discretizzazione nel tempo delle incognite, è stato utilizzato uno schema di integrazione di tipo semi-implicito. La caratteristica fondamentale di questo metodo è quella di combinare i vantaggi degli schemi di tipo implicito (incondizionata stabilità per qualsiasi passo temporale scelto), con quelli di tipo esplicito (riduzione delle dimensioni delle matrici di soluzione).

Questo svincolamento dai criteri di stabilità permette il suo utilizzo su domini spaziali suddivisi in un elevato numero di elementi e caratterizzati da elevati gradienti di profondità. Se il metodo utilizzato fosse condizionatamente stabile, tipica peculiarità degli schemi espliciti, la limitazione maggiore riguarderebbe il passo temporale utilizzabile, questo, nel caso della simulazione di onde di gravità sarebbe così limitato:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{gH}}$$

dove Δx è la estensione spaziale dell'elemento, H è la sua profondità e Δt il passo temporale massimo, determinato su tutti gli elementi costituenti il dominio spaziale. Questa condizione, se fosse applicata ad un dominio spaziale in cui il passo di griglia minimo è $\Delta x = 10$ metri con una profondità pari a $H = 1$ metri, comporterebbe un passo temporale massimo pari a 3 secondi, un valore proibitivo per simulare periodi di tempo superiori al mese.

Discretizzazione nello spazio: il metodo degli elementi finiti. I modelli numerici agli elementi finiti, per implementare l'andamento delle variabili del sistema nello spazio, necessitano di una discretizzazione del dominio spaziale indagato. La struttura comunemente utilizzata suddivide il dominio spaziale in elementi triangolari di forma e dimensioni differenti in base alla necessità di aumentare o diminuire la risoluzione del calcolo in determinate aree.

La discretizzazione nello spazio delle variabili è stata attuata con il metodo degli elementi finiti parzialmente modificato rispetto alla sua formulazione classica. Questo nuovo approccio si è rivelato necessario per evitare i fenomeni di "numerical damping" e la non conservazione della massa dovuti alla combinazione di uno schema di tipo semi-implicito per la discretizzazione nel tempo con il metodo standard degli elementi finiti, comunemente conosciuto come "Galerkin method".

La differenza fondamentale rispetto la formulazione originale consiste nel suddividere il dominio spaziale in triangoli (elementi) e nel descrivere i livelli d'acqua z e i trasporti U, V , utilizzando funzioni di forma di diverso ordine: lineari nel caso dei livelli, mentre, per i trasporti, costanti ad ogni passo spaziale. Questa combinazione di tecniche ha come risultato quello di ottenere una griglia di discretizzazione detta "staggered grid".

Dal punto di vista numerico ad ogni elemento sono associate due differenti tipologie di informazioni: ai vertici di questo (detti nodi) sono definiti i valori dei livelli d'acqua, mentre al baricentro è associata l'entità del trasporto nelle due direzioni ortogonali orizzontali e quindi la velocità dell'acqua.

3.2 Il modello di trasporto e diffusione

Il modello idrodinamico agli elementi finiti è stato accoppiato con un modulo numerico 3D per la simulazione dei processi di trasporto e diffusione di sostanze disciolte in acqua con comportamento neutro o attivo quali il sedimento in sospensione.

Il modulo di avvezione e diffusione permette di simulare la variazione della concentrazione di una sostanza disciolta nell'acqua quando soggetta al trasporto ad opera delle correnti indotte dalle forzanti meteo-marine e ai processi di tipo turbolento.

Si consideri la concentrazione S di una sostanza con comportamento attivo in un punto della griglia di calcolo nel tempo t . L'evoluzione di tale concentrazione nel tempo e nello spazio è calcolabile mediante la risoluzione della seguente equazione differenziale espressa in forma bi-dimensionale come:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = K_H \left(\frac{\partial^2 S}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 S}{\partial^2 y} \right) + Q_s + I \quad (4)$$

dove $S = \int_{-h}^{\zeta} s dz$, è la concentrazione della sostanza nella colonna d'acqua, K_H è il coefficiente di diffusione turbolenta e infine Q_s e I sono le sorgenti e i decadimenti della sostanza stessa.

Nel caso specifico, il modello considera sia i termini diffusivi e di trasporto per cui, la sostanza S è soggetta sia alla diffusione verso aree a concentrazione inferiore che al trasporto dovuto allo spostamento della massa d'acqua in cui si trova. Sotto l'aspetto numerico, tale equazione è risolta mediante uno schema di tipo TVD esplicito sia nel tempo che nello spazio.

3.3 Il tempo di residenza

In letteratura, il tempo di residenza non è definito in modo univoco, tale parametro è spesso associato a diversi significati e concetti.

In questo lavoro, il tempo di residenza è stato calcolato mediante un approccio di tipo euleriano ed è stato definito come il tempo necessario affinché, per ogni elemento dell'area di indagine, la concentrazione di un tracciante inizialmente rilasciato in soluzione nella massa d'acqua considerata venga ridotta di un fattore pari a $1/e$.

La procedura seguita si avvale dell'espressione matematica dedotta da (Takeoka,

1984b,a) nota come 'remnant function'. In particolare, per un tracciante passivo, ovvero non soggetto a processi di decadimento o aumento intrinseci della sua concentrazione, è simulato il rilascio in concentrazione unitaria e omogenea su una zona selezionata all'interno dell'area di studio.

Il tracciante è soggetto ai processi di trasporto indotti dalla circolazione delle acque e simulati dal modulo idrodinamico e di trasporto e diffusione.

Il tracciante inizialmente rilasciato in un'area di interesse viene quindi risciacquato dalle masse d'acqua esterne che defluendo ne riducono la concentrazione iniziale.

Questo porta ad un decadimento della concentrazione del tracciante nel tempo, che può essere calcolato, come rapporto $r(x, y, t) = C(x, y, t)/C_0(x, y)$ dove $C(x, y, t)$ è la concentrazione al tempo t nel punto x, y e $C_0(x, y) = C(x, y, t = 0)$ corrisponde al valore iniziale. Integrando nel tempo questo rapporto noto appunto come remnant function si ottiene, per ogni punto di interesse x, y , il valore del tempo di residenza $\tau(x, y)$ del tracciante.

$$\tau(x, y) = \int_0^{\infty} r(x, y, t) dt. \quad (5)$$

Nel caso in cui il decadimento della concentrazione C avvenga in modo esponenziale

$$C(t) = C_0 e^{-\alpha t} \quad (6)$$

allora dall'(5) risulta che $\tau = 1/\alpha$, ovvero il tempo affinché la concentrazione iniziale del tracciante decada di un valore pari a $1/e$.

4 Dati iniziali e pre-processamento

Al fine di implementare e applicare all'area di indagine i diversi modelli numerici previsti, è necessario avere a disposizione diversi set di dati sperimentali. In particolare è possibile suddividere tali dati sperimentali in:

- Dati geo-morfologici: dati batimetrici e dati relativi alle linee di costa
- Dati idro-meteo-marini: dati meteorologici, mareografici e idrologici

In particolare, il primo set di dati risulta necessario per l'inizializzazione dei diversi modelli utilizzati, mentre, il secondo set di dati costituisce le forzanti dei diversi modelli. Di seguito sono descritti i diversi set di dati.

4.1 Dati geo-morfologici

Per poter simulare la circolazione delle acque e le caratteristiche idrodinamiche nella zona di indagine risulta necessaria la conoscenza delle caratteristiche morfologiche dell'area stessa.

In particolare, per la riproduzione del campo di moto indotto dalle forzanti meteo-marine, è necessario avere a disposizione dati batimetrici e linea di costa dell'area in esame.

Per quanto riguarda la linea di costa dell'area di cui si vogliono investigare i processi in questione, questa è stata ricavata dalle carte tecniche regionali.

In Fig. 91 è riportata la linea di costa relativa al Golfo di Cagliari ed ai tratti di costa ad esso adiacenti considerati ai fini dello studio in questione. Come si vede dalla Fig. 2, che rappresenta solo una parte dell'area considerata, la linea di costa ricostruisce in modo dettagliato le caratteristiche geometriche dell'area portuale della città di Cagliari.



Figure 1. Linea di costa dell'area considerata ai fini dello studio modellistico.

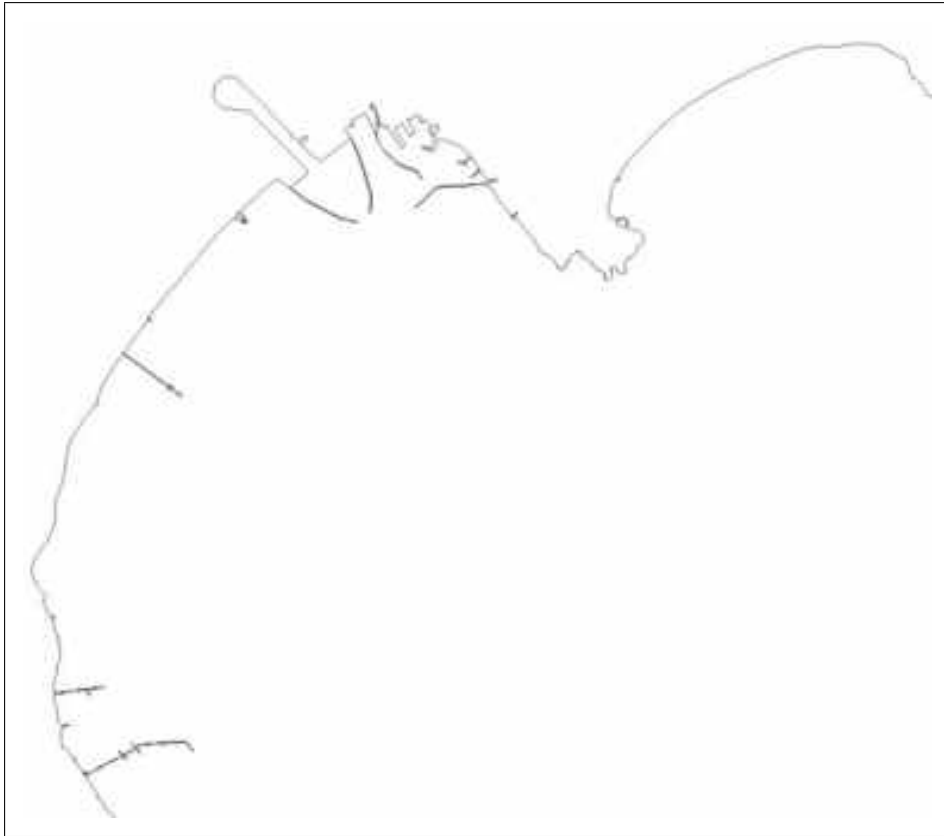


Figure 2. Linea di costa dell'area portuale della città di Cagliari.

Per quanto riguarda i dati batimetrici, sono stati forniti 2 diversi set di dati caratterizzati dalla diversa copertura e risoluzione. In entrambi i casi i dati sono stati ottenuti dalle carte tecniche regionali.

Al primo gruppo appartengono dati batimetrici costituiti dalle linee isobate interpolate dai dati batimetrici rilevati per la costruzione della carta tecnica e corrispondenti rispettivamente alle isobate dei 10, 20, 30, 50, 100 metri. In Fig. 3 è riportata la distribuzione spaziale delle isobate nell'area considerata.

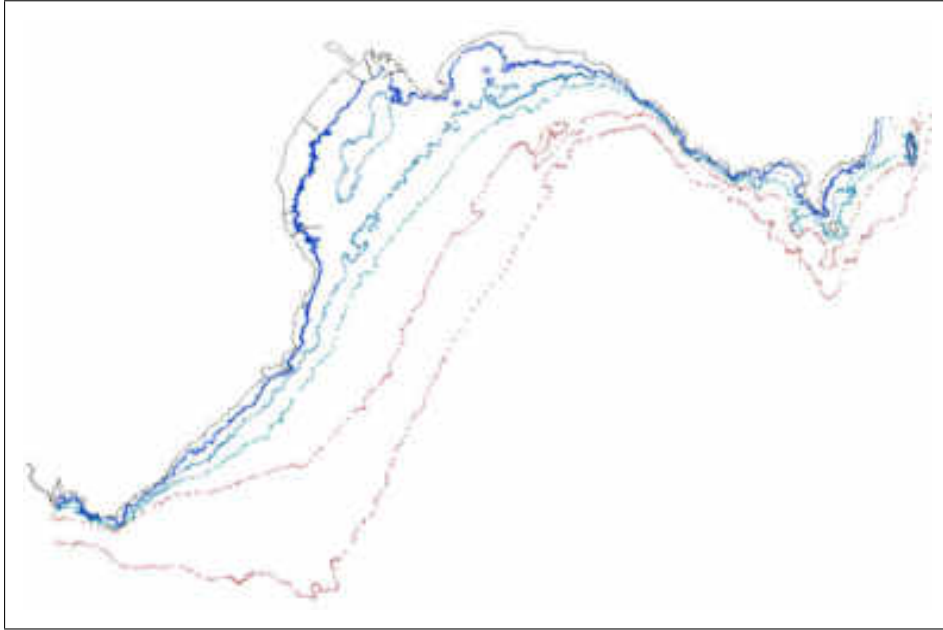


Figure 3. Linea di costa e distribuzione spaziale delle isobate tra i 10 e i 100 metri

Al secondo gruppo appartengono i dati batimetrici costituiti dai punti di rilevamento effettuati per la costruzione della carta tecnica. In Fig. 4 è riportata la distribuzione spaziale dei punti nell'area considerata.

Tali dati presentano una risoluzione spaziale variabile da alcuni km, aree esterne, a poche centinaia di metri, aree antistanti il porto canale. La copertura permette di ricostruire, se pur in modo poco accurato le caratteristiche geomorfologiche delle aree più esterne del Golfo caratterizzate da profondità superiori anche ai 1200 metri.

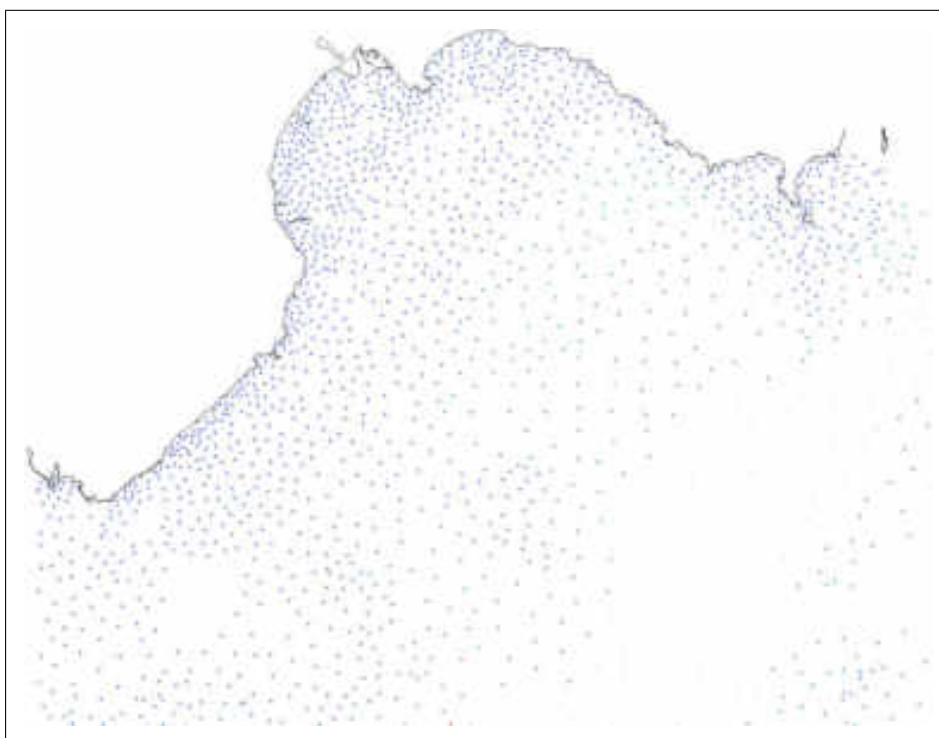


Figure 4. Linea di costa e distribuzione spaziale dei dati di profondità nell'area di interesse

Al fine di ottenere dai 2 set di dati sopra descritti una batimetria dell'intera area è stato necessario effettuare tra i 2 set di dati accorpati (Fig. 5), un'interpolazione basata sul metodo kriging ottenendo quindi una matrice regolare di dati batimetrici con risoluzione di circa 30 metri. Tale risoluzione spaziale è stata adottata in funzione dell'elevata accuratezza necessaria per riprodurre le caratteristiche geometriche dell'area portuale della città di Cagliari. In particolare tale range rappresenta il passo spaziale minimo tra gli elementi di calcolo della griglia numerica del modello idrodinamico.

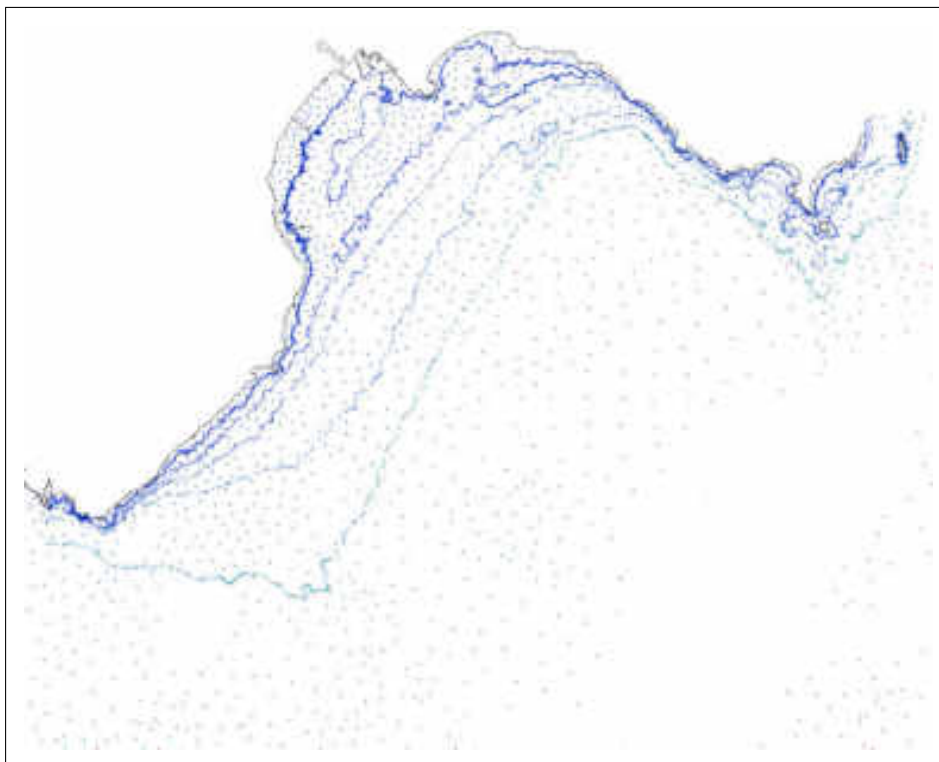


Figure 5. Copertura dei dati batimetrici ottenuta dall'aggregazione dei data set a disposizione

4.2 Dati idrologici

Al fine di riprodurre la circolazione delle acque nell'area di interesse sono state raccolte diverse tipologie di dati idrologici.

I diversi set di dati catalogati e processati sono relativi alle principali forzanti meteo-marine dell'area in esame. In particolare, questi possono essere suddivisi in:

- dati meteorologici;
- dati mareografici;
- dati oceanografici;

Per quanto riguarda i dati meteorologici sono stati considerati due diversi dataset, rispettivamente i dati relativi alle misurazioni effettuate presso due stazioni di monitoraggio a terra e i dati meteorologici generati dai modelli atmosferici previsionali per l'area in esame.

Nel primo caso, sono state considerate due diverse centraline meteorologiche posizionate rispettivamente a Macchiareddu (CENAS6) e a Sarroch (CENSH1). I dati misurati dalle centraline sono l'intensità e la direzione del vento espresse in m/s e gradi rispetto il Nord geografico in senso orario, le precipitazioni espresse in mm, la pressione atmosferica espressa in mb, la radianza superficiale espressa in W/m^2 , la temperatura dell'aria a terra espressa in gradi C e l'umidità relativa. In questa prima fase, i dati meteorologici utilizzati consistono nella direzione e intensità del vento.

Le misurazioni effettuate dalle due centraline sono state analizzate al fine di individuare quale, tra i due dataset, potesse essere utilizzato ai fini dell'indagine modellistica. Da un'analisi delle serie temporali dell'intensità del vento (Fig. 6), è emerso come, per la stazione CENAS6, le misurazioni effettuate siano caratterizzate da un numero elevato di valori inferiori ai 0.3 m/s (circa per il 20% delle misurazioni) alternato ad eventi con valori di intensità del vento mediamente elevati. Tale andamento tipicamente a "raffiche" caratterizza la maggior parte degli eventi di scirocco e rende il dataset non utilizzabile ai fini dell'indagine modellistica.

Nonostante quindi la stazione CENAS6, rispetto alla stazione CENSH1 sia localizzata in un punto maggiormente rappresentativo dell'area di indagine, in quanto la qualità dei dati da essa misurati non risulta sufficientemente adeguata, in tale studio sono stati utilizzati i soli dati meteorologici misurati dalla stazione CENSH1 (Fig. 7).

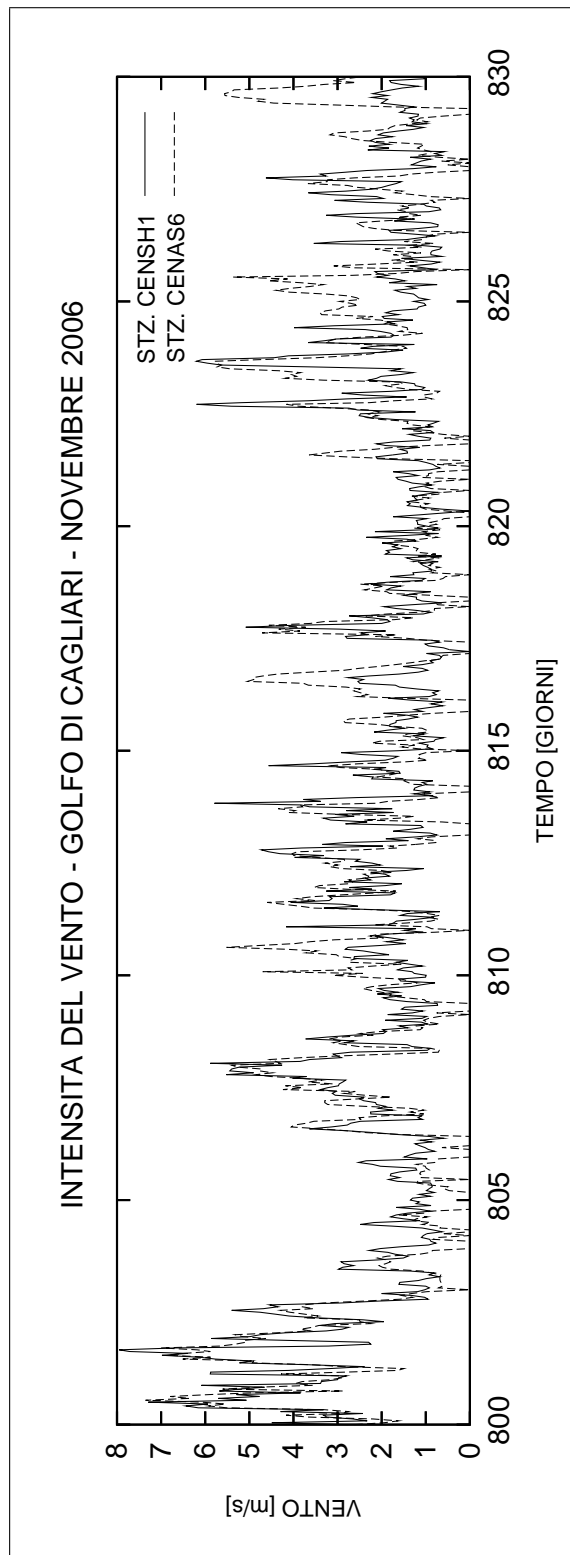


Figure 6. Andamento dell'intensità del vento misurato dalle stazioni meteorologiche CENAS6 e CENSH1 nel mese di Novembre 2006

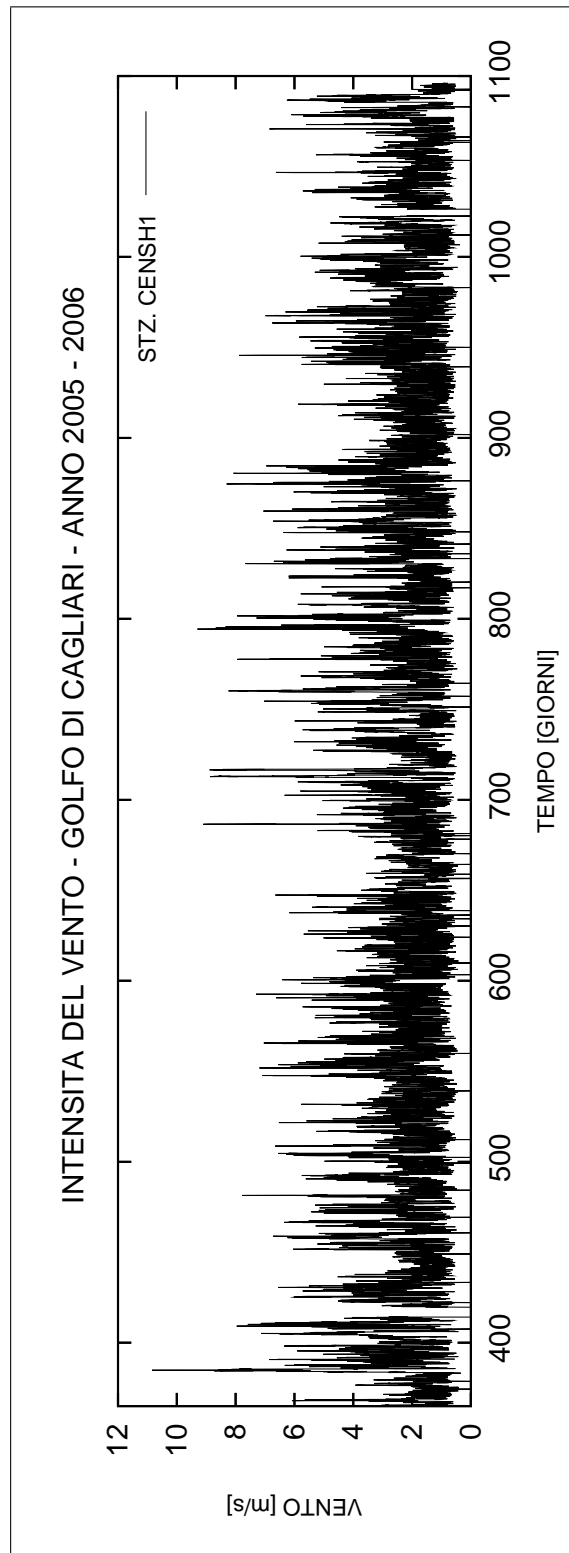


Figure 7. Andamento dell'intensità del vento misurato dalla stazione meteorologica CENSH1 per gli anni 2005 e 2006

L'altra tipologia di dati meteorologici utilizzati sono i campi di vento derivanti dai modelli previsionali atmosferici. Tali dati sono caratterizzati dall'essere stati generati ai fini previsionali senza essere stati sottoposti ad alcun procedimento di processamento o confronto con dati sperimentali. In particolare, sono stati considerati i dataset generati dal modello atmosferico SKYRON che, nell'area in esame, presenta una risoluzione spaziale di circa 11 km

Tali dati sono stati utilizzati per stimare la variabilità spaziale dell'intensità e della direzione del vento all'interno dell'area di indagine. In particolare, mediante analisi statistica di tipo circolare è stata stimata la varianza dell'intensità e della direzione di provenienza dei campi di vento nell'area antistante il porto di Cagliari. In Fig. 8 è riportato il campo di vento previsto dal modello per un evento di maestrale con indicata l'area considerata per il calcolo della varianza. Tale analisi è stata effettuata considerando circa 1 mese di dati previsti.

I risultati ottenuti rivelano che, per quanto riguarda l'intensità del vento, la varianza nell'area di indagine risulta essere pari a circa 1.7 m/s mentre, per quanto riguarda la direzione di provenienza questa risulta essere pari a circa 8 gradi.

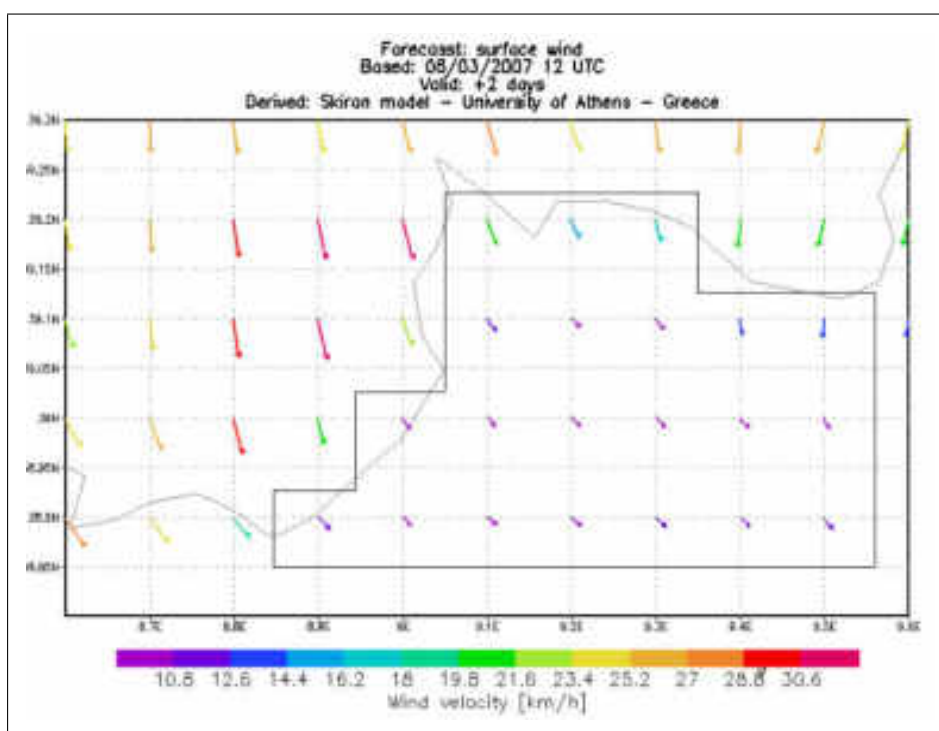


Figure 8. Distribuzione spaziale dell'intensità e della direzione di provenienza del vento nell'area di indagine

I risultati ottenuti mettono in evidenza una relativa omogeneità dei campi di vento nell'area di indagine, tale da poter giustificare l'utilizzo di un solo valore di intensità e direzione del vento come rappresentativo per l'intera area di indagine. Considerando quindi l'omogeneità del campi di vento e la mancanza di informazioni precise relative all'accuratezza dei dati generati in fase di previsione dal modello atmosferico, in quanto non soggetti a processi di analisi, è stato deciso di utilizzare come forzante meteorologica per il modello idrodinamico, i soli dati misurati dalla stazione meteorologica CENSH1.

Per quanto riguarda la forzante mareale, la mancanza di dati relativi a misurazioni mareografiche nell'area di indagine non ha reso possibile l'utilizzo di serie temporali di livello misurato da utilizzare come condizione al contorno del dominio di calcolo del modello idrodinamico. Al fine tuttavia di riprodurre il segnale di marea, sono stati utilizzati i dati relativi alle costanti armoniche delle principali componenti mareali dell'area in esame (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1 e S1) fornite dall'Istituto idrografico della Marina (Tab. 1). Dalle costanti armoniche è stata ricostruita la serie temporale di livello indotto dalla sola componente astronomica della marea da utilizzare come condizione forzante il modello idrodinamico. Come si evince dalla tabella e dalla Fig. 9, anche sommando linearmente e in fase le ampiezze delle singole armoniche, l'escursione massima risulta sempre inferiore ai 30 cm.

| <i>ARMONICA</i> | <i>AMPIEZZA</i> | <i>FASE</i> |
|-----------------|-----------------|-------------|
| <i>M2</i> | 8.10 | 265 |
| <i>S2</i> | 2.95 | 287 |
| <i>N2</i> | 1.85 | 243 |
| <i>K2</i> | 0.80 | 287 |
| <i>K1</i> | 3.00 | 198 |
| <i>O1</i> | 1.60 | 114 |
| <i>P1</i> | 1.00 | 198 |
| <i>S1</i> | 0 | 0 |

Table 1. Valori di ampiezza e fase delle singole componenti armoniche, espresse in metri e gradi (fase sys. G), del segnale di marea astronomica calcolate per il Porto di Cagliari.

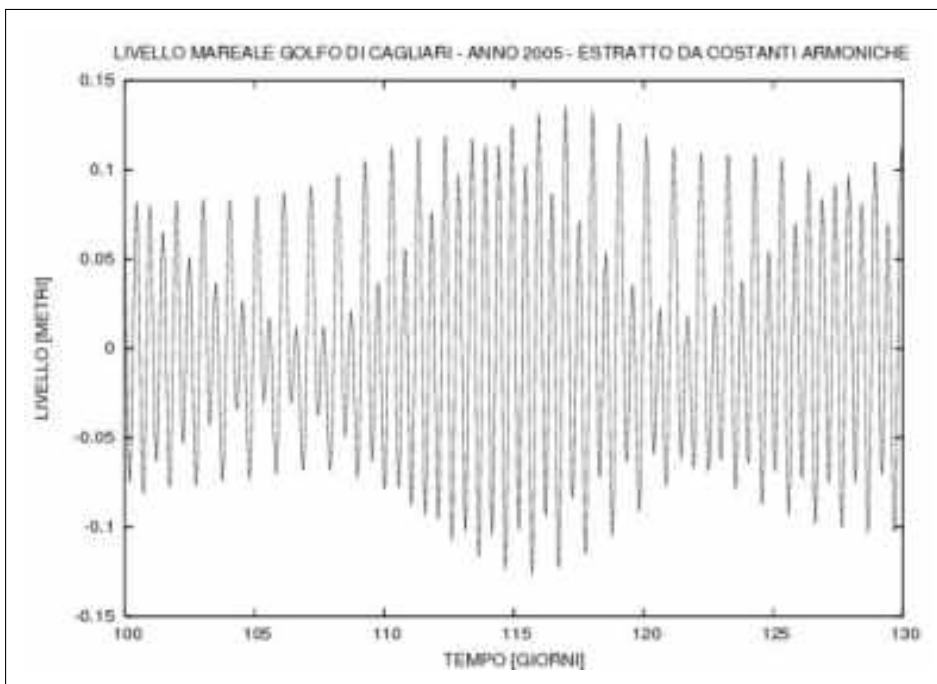


Figure 9. Serie temporale del livello generato dalle principali costituenti armoniche della marea astronomica nell'area del Golfo di Cagliari

Per quanto riguarda i dati oceanografici, necessari a simulare gli eventuali effetti sulla circolazione locale indotti dalla circolazione baroclina a grande scala, sono stati utilizzati dei dati correntometrici e anemometrici risultanti dai modelli operativi POM e SKIRON (www.imc-it.org).

In particolare, tali dati consistono in: velocità orizzontale della corrente mediata sull'intera colonna d'acqua calcolati dal modello operativo POM nel punto di lon. 9.2 e lat. 38.8 con frequenza tri-oraria e in dati di intensità e direzione del vento corrispondenti calcolati dal modello meteorologico SKIRON e utilizzati dal modello oceanografico.

4.3 Dominio di calcolo

Per applicare il modello idrodinamico è stato necessario implementare una griglia di calcolo per la discretizzazione del dominio di indagine rappresentato in Fig. 10 .



Figure 10. Estensione del dominio di calcolo del modello idrodinamico

Tale griglia è costituita da elementi prismatici a base triangolare di varie dimensioni e forma. La costruzione della griglia è avvenuta mediante idonei softwares di generazione. In Fig. 11 è riportata la griglia di calcolo agli elementi finiti dell'area in esame. Tale struttura è costituita da un numero di elementi pari a 30230 e un numero di nodi pari a 14560. Come si può notare, la griglia descrive nel dettaglio le caratteristiche geometriche dell'area costiera con una risoluzione variabile tra i 50 metri, nelle aree antistanti il porto (Fig. 11 e Fig. 12) e i 10 km ai limiti dell'area di interesse. L'utilizzo di elementi di forma e dimensione diversa permette la riproduzione delle geometrie più complesse della linea di costa quali: i moli foranei e i porti. Per queste aree, ad un aumentato numero di elementi, corrisponde un aumento dell'accuratezza di calcolo del modello. In particolare, per l'area del Porto di Cagliari e il litorale adiacente, la risoluzione della griglia di calcolo è tale da permettere la riproduzione dei moli foranei del Proto Canale e le strutture a marea della banchina del porto stesso.

Per la riproduzione delle caratteristiche batimetriche dell'area in esame, è stato utilizzato il set di dati batimetrici descritto nel precedente paragrafo. Al fine

di ricostruire la batimetria dell'area in esame mediante la griglia di calcolo, è stato necessario pre-processare il set di dati batimetrici a disposizione. In particolare, essendo costituiti, come precedentemente descritto da una serie di diversi set di dati batimetrici, presentano una distribuzione del tutto irregolare con aree a maggior e minor copertura. Al fine quindi di ottenere una superficie del fondale realistica è stata applicata un'interpolazione nell'area in esame di tutti i dati a disposizione su una griglia regolare con risoluzione inferiore ai 10 metri utilizzando l'algoritmo di interpolazione Natural Neighbour (Sibson, 1981). Successivamente, mediante un algoritmo di interpolazione di tipo lineare sono stati associati, ad ogni elemento della griglia di calcolo agli elementi finiti il corrispettivo valore di profondità.

Nelle Fig. 13 e Fig. 14 è rappresentata la batimetria nell'area di indagine così come ricostruita dalla griglia agli elementi finiti. Per l'area a maggior risoluzione, corrispondente al Porto di Cagliari e al tratto di costa ad esso adiacente, la riproduzione delle caratteristiche batimetriche è maggiormente accurata (Fig. 14).

Il dominio di calcolo come rappresentato in Fig. 11 presenta 1 solo bordo aperto corrispondenti ai 3 lati della griglia Sud, Est e Ovest. Questo delimita il dominio di calcolo verso il mare aperto ed è soggetto all'imposizione di condizioni forzanti quali la marea e i flussi indotti dalla circolazione a grande

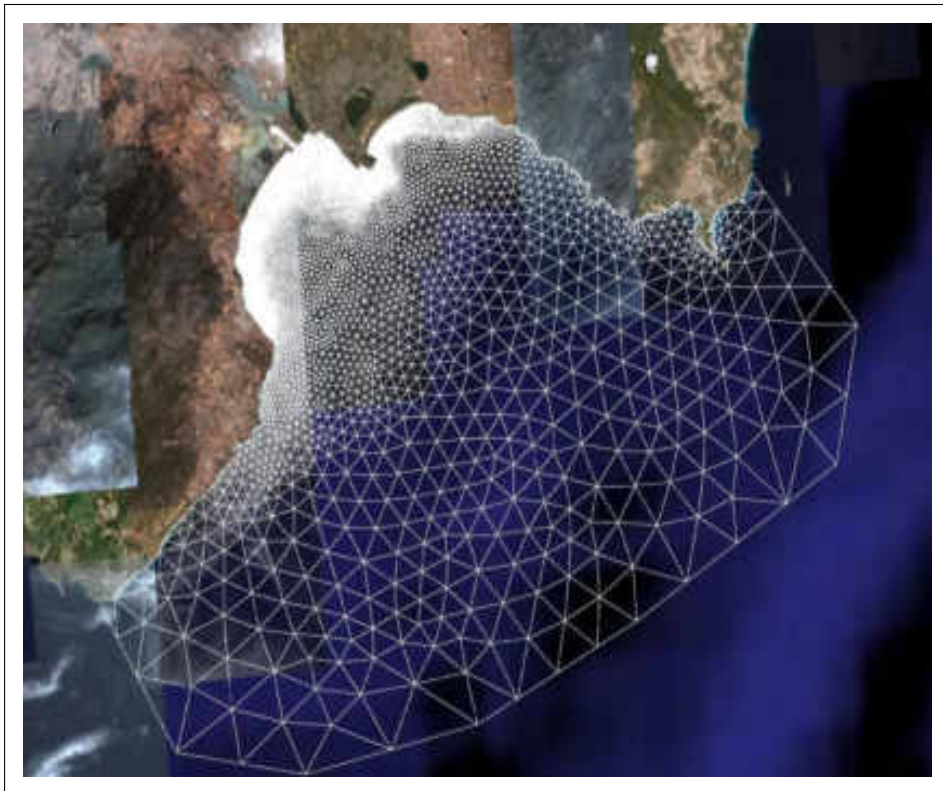


Figure 11. Griglia di calcolo agli elementi finiti dell'area in esame

scala nel canale di Sardegna. Il perimetro della costa è considerato come bordo chiuso. Per ogni nodo della griglia di calcolo il modello idrodinamico e di trasporto diffusione è in grado di fornire i valori della variazione del livello e della velocità della corrente, nelle 2 direzioni e i valori della concentrazione dei traccianti utilizzati nelle simulazioni.

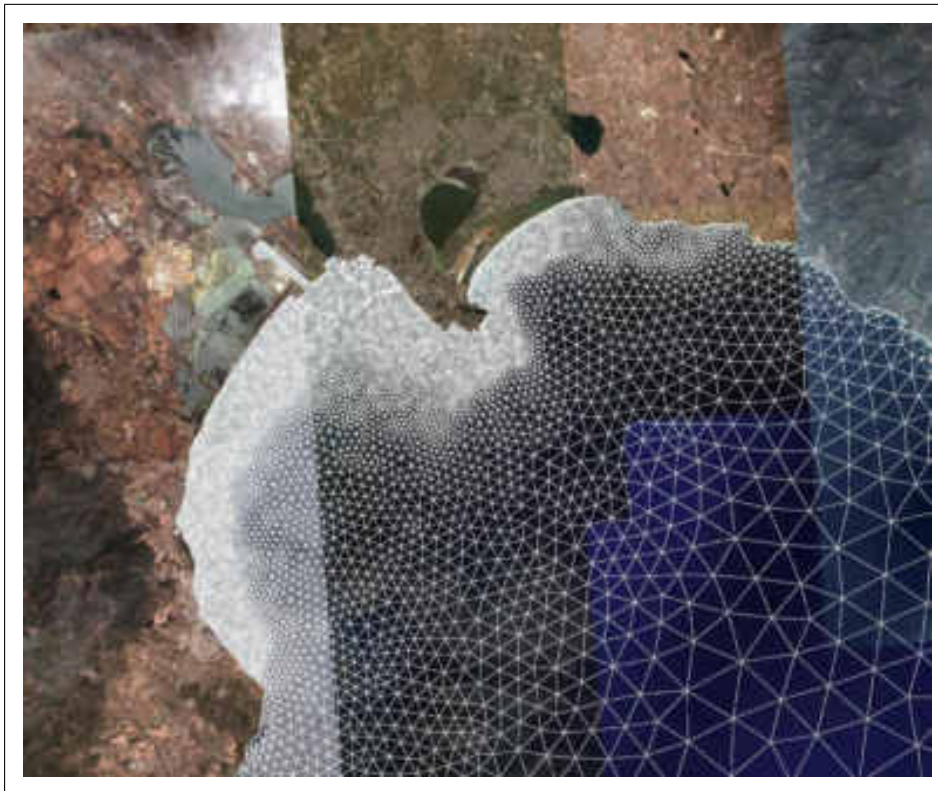


Figure 12. Particolare della griglia di calcolo relativo al tratto costiero nelle vicinanze del Porto di Cagliari

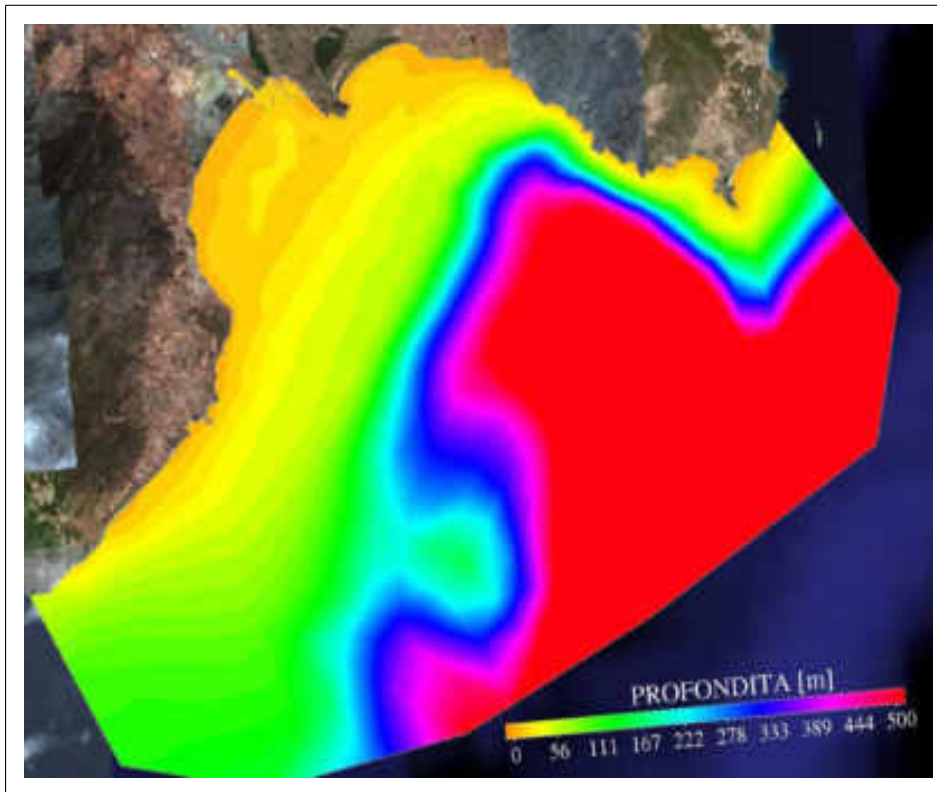


Figure 13. Batimetria dell'area in esame come ricostruita dalla griglia di calcolo agli elementi finiti

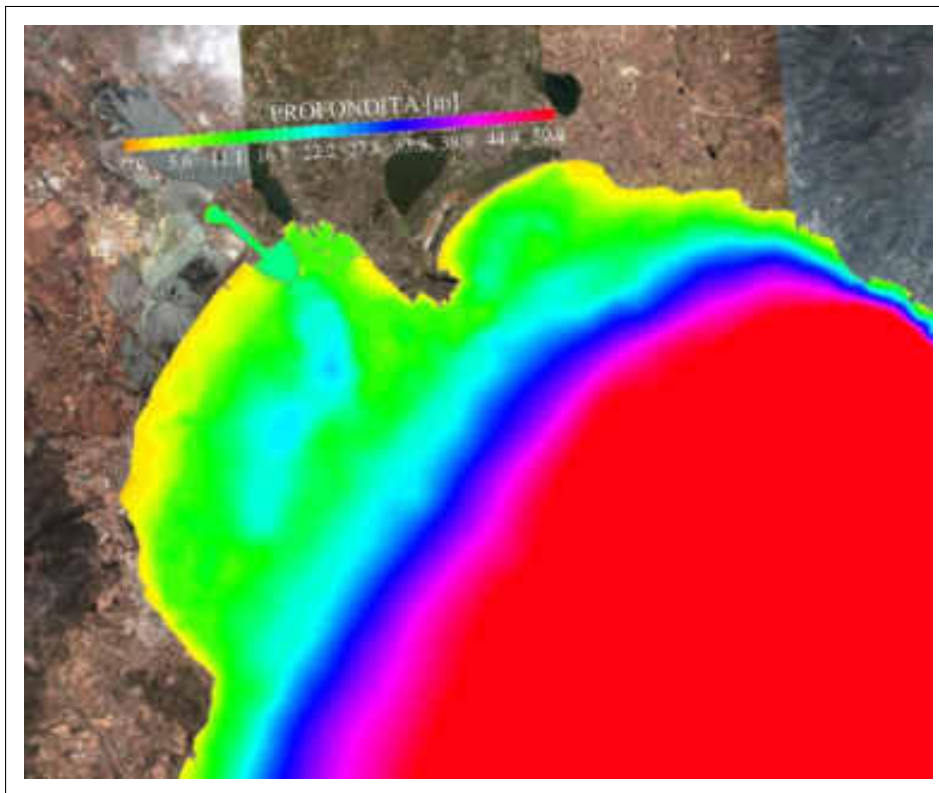


Figure 14. Particolare della batimetria nel tratto di costa in vicinanza del Porto di Cagliari

5 Analisi di stabilità, di sensitività e analisi di scala

Al fine di valutare come i parametri dei diversi modelli influenzino la variabilità dei risultati e, al fine di stimare le caratteristiche computazionali delle griglie di calcolo, è stata effettuata un'analisi di sensitività.

Tale analisi consiste, innanzitutto, nel valutare l'efficienza della griglia di calcolo utilizzata. In particolare, l'estensione della griglia di calcolo è stata selezionata in relazione alla estensione dell'unità fisiografica di cui l'area di interesse fa parte.

Questa scelta, è stata effettuata per comodità geometrica, in modo da avere come limiti del dominio di indagine, dei riferimenti geografici noti.

Inoltre, la distanza dell'area di interesse dai bordi aperti della griglia, permette di trascurare, con una certa sicurezza, gli eventuali effetti generati dall'imposizione delle condizioni al contorno quali la forzante mareale.

Inoltre, nonostante l'estensione della griglia di calcolo sia ragguardevole, se confrontata con l'estensione dell'area di interesse del Golfo di Cagliari, il metodo degli elementi finiti permette un alleggerimento del numero di elementi per unità di superficie diminuendo la risoluzione della griglia in vicinanza delle aree di bordo.

In particolare, al fine di quantificare l'aumento del numero di elementi in funzione dell'estensione della griglia e quindi valutare la qualità della griglia di calcolo, è stata calcolata la densità di elementi di calcolo in funzione della distanza dall'area di interesse (Fig. 15). Come si vede dalla Fig. 15, il 80% circa degli elementi di calcolo ricade in un raggio di 15 km dal Porto di Cagliari mentre la rimanente area della griglia di calcolo è coperta dal rimanente 20% di elementi. Ne risulta che, ad una riduzione dell'estensione del dominio di calcolo, non corrisponderebbe una rimarchevole diminuzione del tempo di calcolo e introdurrebbe, inoltre, eventuali inaccurately nel calcolo generate dalla maggiore vicinanza dei bordi aperti all'area di interesse.

L'analisi di sensitività, è stata effettuata al fine di definire gli estremi di applicabilità del modello in relazione alle diverse forzanti considerate ovvero nel simulare condizioni dinamiche estreme per valutare la stabilità del modello e le caratteristiche computazionali.

Per quanto riguarda le forzanti, sono stati fatti 3 diversi test che hanno verificato la stabilità del modello a condizioni estreme di vento proveniente dai 3 principali quadranti di Maestrale, Scirocco e Libeccio.

Tali test sono stati effettuati considerando come forzante del modello idrodinamico venti costanti nel tempo e nello spazio proveniente dai diversi settori considerati con intensità di 40 m/s.

I risultati mettono in luce come il modello idrodinamico e il modulo di avvezione e diffusione risultino stabili, e in grado di riprodurre una struttura di circolazione e una distribuzione del tracciante passivo realistica (Fig. 16)

Per quanto riguarda i flussi, è stata effettuata una simulazione in cui, in assenza di vento è stato riprodotto un evento caratterizzato da una portata del canale di connessione Laguna Mare pari a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. Per tale scenario è stata riprodotta la circolazione delle acque e l'avvezione e diffusione di un tracciante passivo identificante il volume fuoriuscente dal canale di connessione Laguna Mare.

I risultati mettono in luce come il modello idrodinamico e il modulo di avvezione e diffusione risultino stabili. Infatti, il modello è in grado di riprodurre in modo

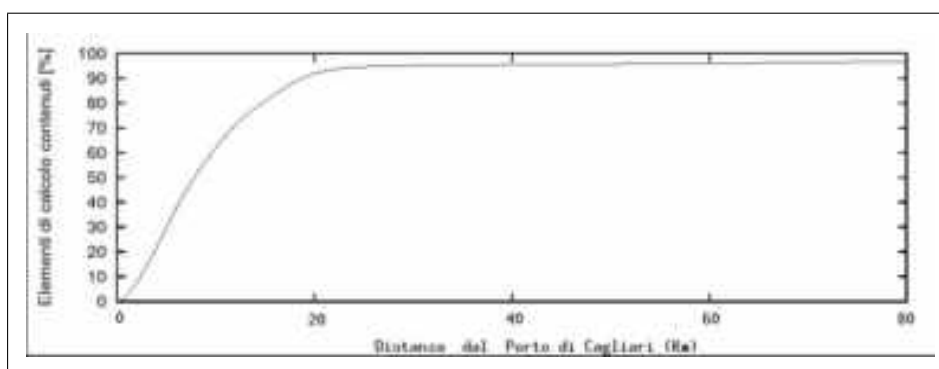


Figure 15. Variazione del numero di elementi della griglia di calcolo contenuti entro una certa distanza dal Porto di Cagliari e dalla linea di costa al variare della distanza stessa

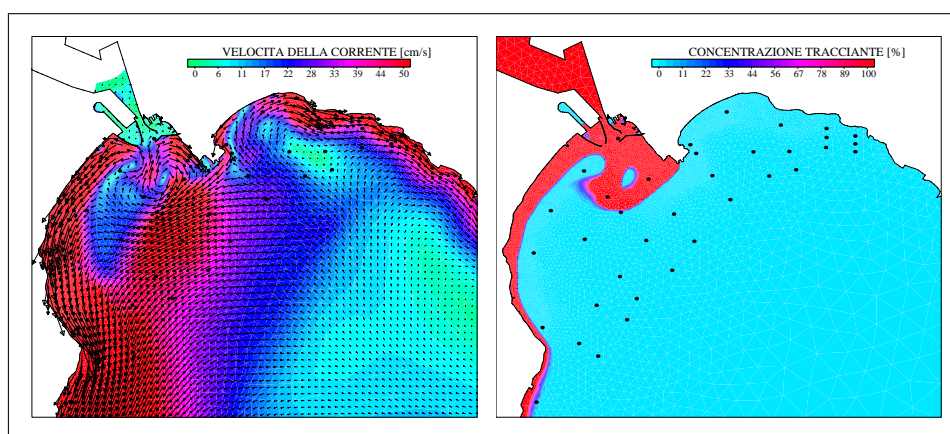


Figure 16. Circolazione delle acque indotta da un vento di intensità pari a 40 m/s proveniente dal settore di Maestrale nell'area del Porto di Cagliari: campo di moto e distribuzione del tracciante passivo dopo 48 ore dall'inizio della simulazione

stabile sia sotto l'aspetto idrodinamico che di distribuzione del tracciante passivo (Fig. 17) il jet e le forme inerziali da esso create all'uscita del canale di connessione Laguna Mare.

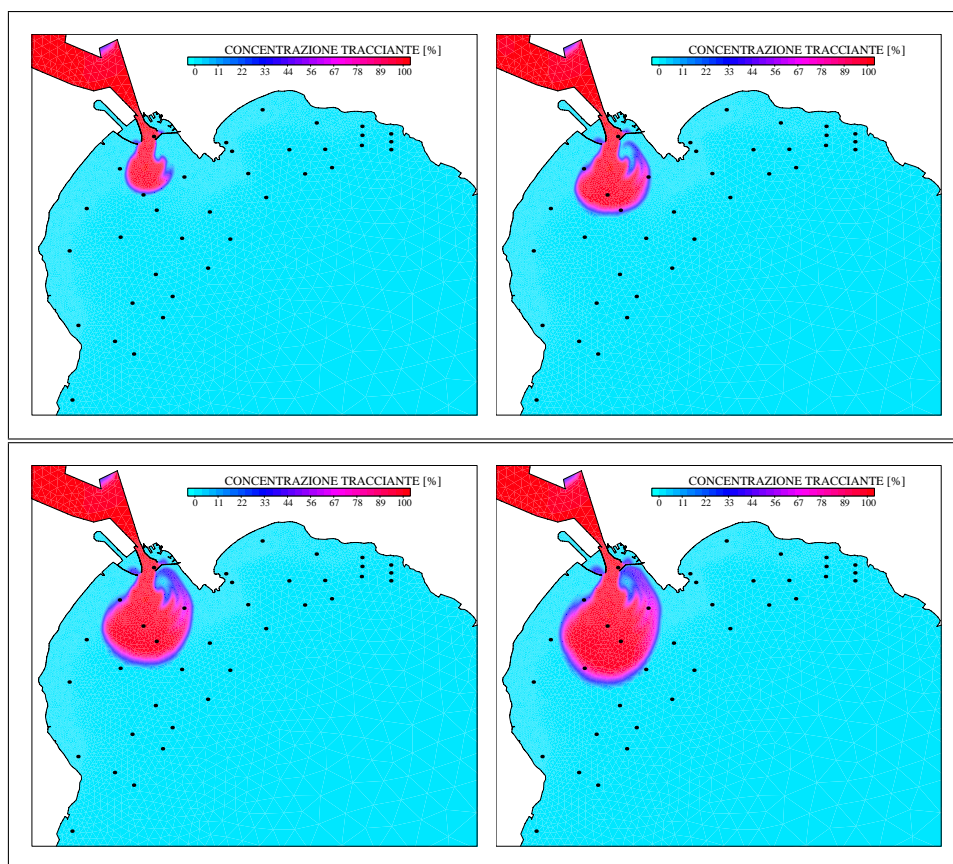


Figure 17. Simulazione di un evento caratterizzato da una portata del canale di connessione Laguna Mare pari a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ in assenza di vento: distribuzione del tracciante passivo dopo 24, 36, 48 e 72 ore dal suo rilascio.

Per tutti i test precedentemente descritti, sono state effettuate ulteriori verifiche sui limiti estremi di stabilità del modello al variare del passo di integrazione temporale. In particolare, è stato stimato come la parte avvertiva del modello, risulti del tutto stabile per passi di integrazione superiori a $100 \times \text{Courant}$. Infatti, sono state effettuate simulazioni nelle quali, velocità superiori ai 10 m/s sono state riprodotte all'uscita del canale di connessione tra Laguna e Mare su elementi con dimensione di ordine di grandezza pari a 50 metri con passi di integrazione superiori ai 600 secondi.

Ulteriori test sono stati effettuati modificando, a parità di condizioni forzanti, la formulazione per il calcolo del coefficiente dello stress superficiale indotto dal vento e i valori dei coefficienti di attrito al fondo.

In particolare, per quanto riguarda la formulazione del coefficiente di stress indotto dal vento, sono state utilizzate sia formulazioni costanti del coefficiente

di Drag sia formulazioni quali quella di Smith and Banke:

$$C_D = (0.630 + 0.066|u^w|)10^{-3} \quad (7)$$

per cui, il coefficiente di Drag è funzione dell'intensità del vento stesso.

Sono state effettuate delle simulazioni in cui, a parità di vento forzante, sono state adottate le diverse formulazioni: in un caso utilizzando un coefficiente di Drag costante pari a $2.5 * 10^{-3}$, nell'altro caso utilizzando Smith and Banke.

I risultati ottenuti hanno messo in evidenza come, per valori bassi dell'intensità del vento, 5-6 m/s, l'intensità dello stress risultato da Smith and Banke risulta pari alla metà di quello ottenuto con CD costante. Questa differenza diminuisce all'aumentare dell'intensità del vento.

Per quanto riguarda il coefficiente di attrito al fondo, questo è stato considerato costante ed è stato variato, a parità di condizioni forzanti entro il range standard compreso tra 10^{-2} e 10^{-3} . I risultati di tali test hanno messo in evidenza come l'utilizzo di diverse formulazioni del coefficiente di attrito al fondo siano poco influenzanti la struttura della circolazione e l'intensità delle correnti in relazione ad eventi forzanti estremi.

In questo lavoro, è stato scelto, in mancanza di dati sperimentali per il confronto, di formulare il coefficiente di stress superficiale come una costante di valore pari a 2.5×10^{-3} e mantenere analogo valore per il coefficiente di attrito al fondo. Tale scelta risulta del tutto in linea con precedenti lavori effettuati con il modello SHYFEM.

Ulteriore analisi è stata effettuata al fine di valutare la necessità o meno di tenere in considerazione le componenti barocline della circolazione a grande scala come agente forzante la circolazione locale nell'area antistante il Porto di Cagliari.

A tale scopo, sono stati analizzati, in modo comparato, i dati di vento e corrente forniti dai modelli operativi di circolazione meteo-marina del Mare di Sardegna.

I dati di corrente sono misurazioni puntuali della velocità integrata sulla colonna d'acqua. Il punto presenta una profondità di circa 50 metri e si trova nell'area centrale del Golfo di Cagliari. Al fine di stimare l'entità degli effetti sulla circolazione delle componenti barocline e di paragonarle agli effetti legati all'azione locale dei venti e della marea, è stata innanzitutto estratta la componente mareale dal segnale originale e sul residuo sono state effettuate le seguenti analisi: innanzitutto sono stati individuati 2 principali quadranti di direzione della corrente: quarto quadrante, corrente verso Sud-Est e terzo quadrante, corrente verso Sud-Ovest.

Dal segnale residuo, sono stati quindi separati le singole "misurazioni" di corrente e di vento in 3 gruppi: correnti di direzione verso Sud-Est solidale a direzione del vento Sud-Est e Nord-Est, correnti di direzione verso Sud-Ovest solidale a direzione del vento verso Sud-Ovest e Nord Ovest, correnti di direzione non solidale con la direzione dei vento.

Per ogni gruppo di dati sono stati confrontati i valori di intensità della corrente con i valori dell'intensità del vento corrispondente mediante diagrammi di dispersione (Fig. 18, Fig. 19 e Fig. 20)

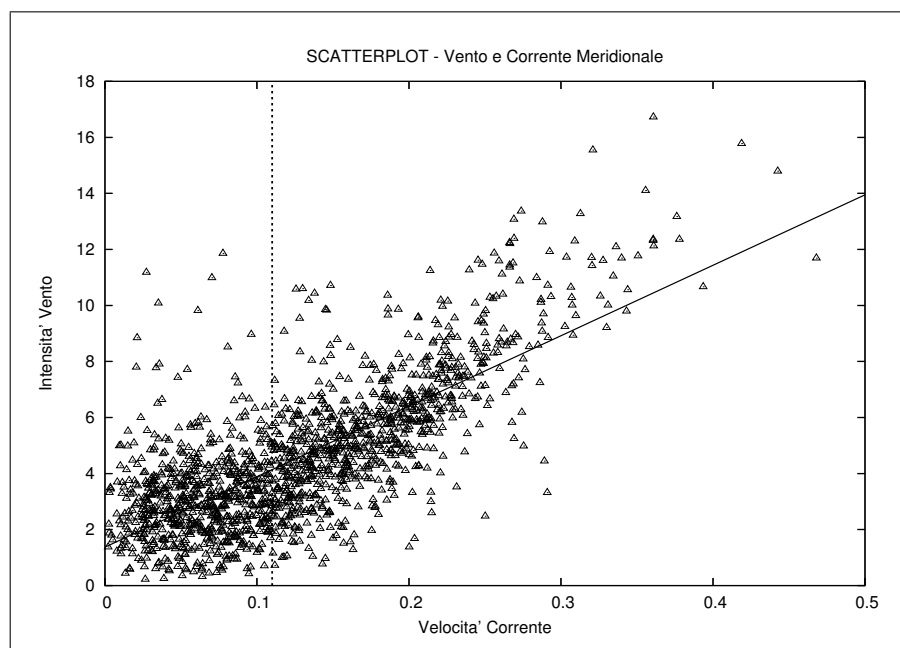


Figure 18. Diagramma di dispersione: intensità della corrente e intensità del vento, casi corrispondenti a corrente diretti verso il quadrante Sud-Est e vento diretti verso il quadrante Sud-Est e Nord-Est

Per quanto riguarda il primo gruppo di dati, questo rappresenta circa il 60 % delle "misurazioni" effettuate. Come si vede dal diagramma di Fig. 18, da un punto di vista qualitativo, per valori uguali o superiori alla media della corrente esiste una forte correlazione con l'intensità del vento, mentre, per quanto riguarda i valori molto bassi, la correlazione risulta assente o minore.

Analoga considerazione pu' essere fatta per il secondo set di dati (Fig. 19), correnti e vento diretti verso Sud-Ovest. Anche in questo caso, sotto l'aspetto qualitativo, esiste una forte correlazione tra intensità dei venti e intensità delle correnti.

Per quanto riguarda infine, il terzo set di dati: direzione delle correnti e direzioni dei venti non concordi non esiste nessuna correlazione tra intensità dei venti ed intensità delle correnti.

Concludendo, sembra evidente la predominanza dell'effetto locale dei venti sulla generazione delle correnti nell'area di studio, questa è dimostrata dalla forte correlazione tra intensità delle correnti e intensità dei venti nei set di dati di direzioni solidali vento-corrente.

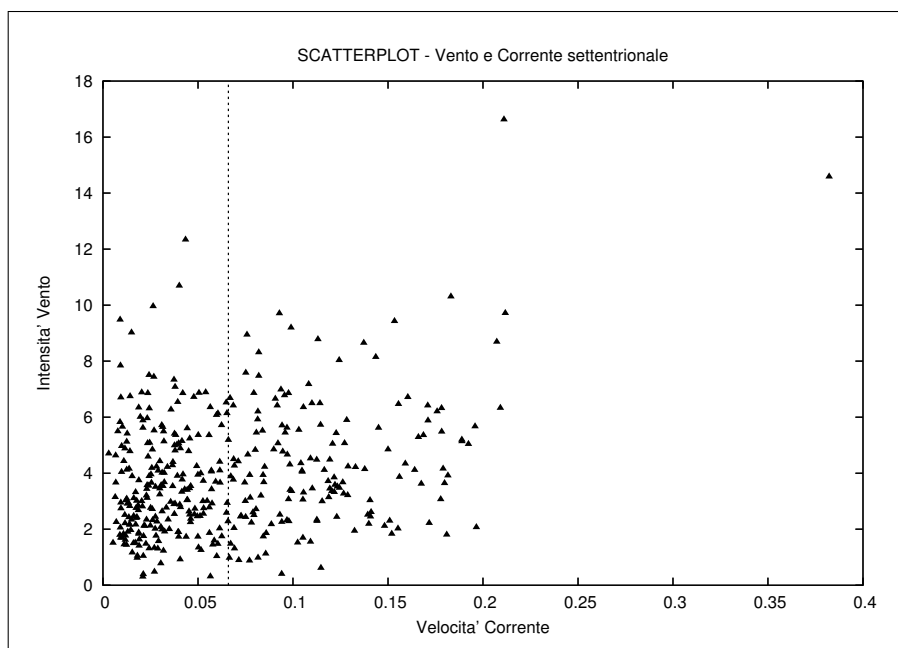


Figure 19. Diagramma di dispersione: intensità della corrente e intensità del vento, casi corrispondenti a corrente diretto verso il quadrante Sud-Ovest e vento diretti verso il quadrante Sud-Ovest e Nord-Ovest

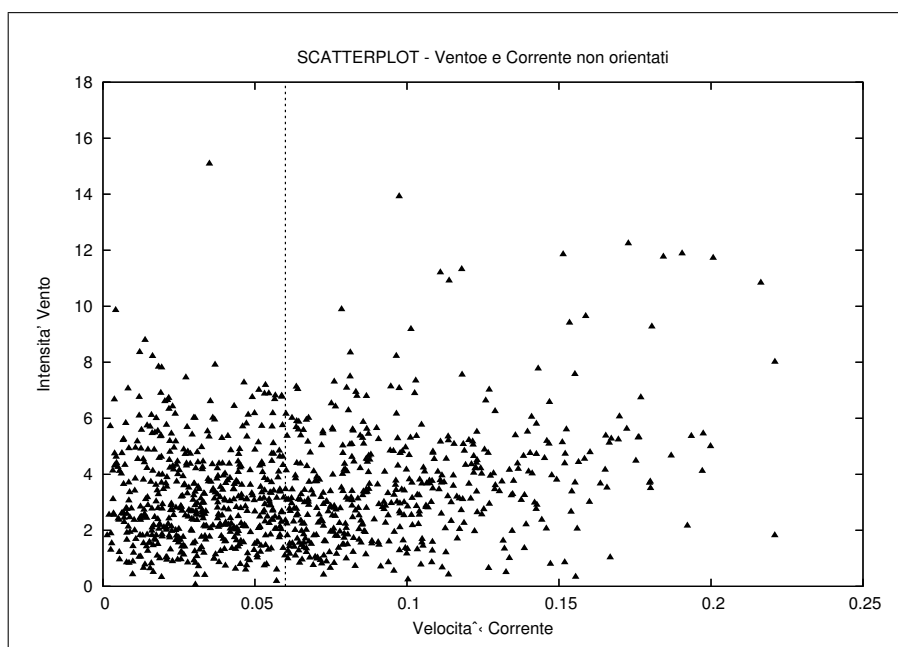


Figure 20. Diagramma di dispersione: intensità della corrente e intensità del vento, casi corrispondenti a corrente e vento con direzione non omogenea

Si può quindi concludere che, l'influenza dei termini baroclini sulla circolazione nell'area di indagine comporta la generazione di correnti di intensità del tutto trascurabili se paragonate a quelle indotte dal vento, anche per valori bassi di quest'ultimo. Quindi, visto lo scopo del presente lavoro, può essere esclusa, come termine forzante la circolazione baroclinica a grande scala.

6 Set-up simulazioni

• Scenari

Per caratterizzare, sotto l'aspetto idrodinamico l'area costiera in esame, si procede applicando i modelli precedentemente descritti sia secondo un'analisi per scenari sia effettuando simulazioni annuali con forzanti realistiche.

La scelta degli scenari da simulare dipende da diversi fattori sia meteo-marini sia idrologici. In particolare, le principali forzanti che influenzano la scelta degli scenari possibili sono:

- Intensità del vento (VI)
- Direzione del vento (VD)
- Marea (T)

In base alle caratteristiche meteo-marine dell'area, e da una prima analisi dei venti prevalenti, sono stati identificati 4 diversi scenari. In Tab. 2 sono riportate le caratteristiche delle forzanti che qualificano gli scenari considerati.

| <i>SCENARIO</i> | <i>VI</i> | <i>VD</i> | <i>T</i> |
|-----------------|-----------|-----------|----------|
| <i>MA</i> | - | - | SI |
| <i>MS</i> | 10 | 315 | SI |
| <i>LB</i> | 9 | 45 | SI |
| <i>SC</i> | 8 | 135 | SI |

Table 2. Scenari e caratterizzazione delle forzanti in essi considerate (VI=intensità del vento, VD = direzione del vento secondo sistema cartesiano, T = marea)

In particolare, lo scenario MA è caratterizzato da unica condizione forzante, marea astronomica, lo scenario MS da marea astronomica e da vento di Maesatrel di intensità pari a 10 m/s, lo scenario LB, da marea astronomica e da vento di Libeccio di 9 m/s e lo scenario SC da marea astronomica e da vento di Scirocco pari a 8 m/s. I valori di intensità utilizzati si riferiscono ai valori massimi misurati dalla stazione meteorologica.

Per quanto riguarda le simulazioni annuali (S5 e S6) è stato scelto di simulare la circolazione delle acque indotta dalle forzanti meteo marine misurate durante gli anni 2005 e 2006. Come precedentemente descritto sono stati utilizzati i dati di vento misurati presso la stazione meteorologica CENSH1.

Per ognuno di questi scenari e per le simulazioni annuali, mediante l'applicazione del modello numerico integrato, è stata analizzata, per l'area di interesse, la circolazione delle acque indotta dalle forzanti considerate.

- **Set-up**

Per tutte le simulazioni è stato utilizzato un time step variabile limitato ad un valore pari a 5 volte Courant.

È stato considerato un tempo di spin-up pari a circa 5 giorni, al fine di raggiungere, a parità di condizione forzante un risultato del modello stazionario. Tale scelta è stata effettuata al fine di eliminare ogni influenza sulla soluzione finale delle condizioni iniziali. Il valore del tempo di spin-up è stato ottenuto confrontando le variazioni della velocità massima della corrente calcolato per tutto il dominio spaziale con il procedere della simulazione. Il valore finale è stato individuato come limite oltre cui le variazioni della velocità massima della corrente in tutto il dominio sono risultate inferiori al 1%.

Per quanto riguarda la scelta dei coefficienti di stress superficiale e al fondo, come precedentemente anticipato, in questo lavoro è stato scelto un valore pari a $2.5 * 10^{-3}$ sia per il coefficiente di Drag che per il coefficiente Chezy. Infine i coefficienti di eddy viscosity e eddy diffusivity sono stati calcolati dal modello mediante la formula di Smagorinskj.

La marea è stata imposta come serie temporale di variazione dei livelli in modo omogeneo lungo il bordo aperto, L'intensità e la direzione della forzante vento è stata considerata omogenea nello spazio su tutta la griglia per tutte le simulazioni effettuate e nel tempo per tutta la durata delle simulazioni nel caso degli scenari MA, MS, LB e SC, mentre variabile nel tempo nel caso delle simulazioni annuali S5 e S6.

7 Risultati

In questo paragrafo sono riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche del modello idrodinamico SHYFEM accoppiato al modello di trasporto e diffusione finalizzati alla riproduzione della circolazione delle acque indotta dalle forzanti meteomarine dei diversi scenari previsti.

I risultati sono stati suddivisi in funzione delle 2 macroaree caratterizzate dai 4 scenari MA, MS, LB e SC e dalle 2 simulazioni annuali S5 e S6 rispettivamente.

7.1 Scenari

In questa sezione sono riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni degli scenari MA, MS, LB e SC.

Al fine di simulare la circolazione delle acque indotta dalla sola marea astronomica e dalla marea astronomica e dai principali regimi di vento, il modello idrodinamico è stato forzato con la serie temporale di elevazione superficiale lungo i 3 bordi aperti della griglia di calcolo e con i valori di intensità e direzione del venti riportati in Tab. 2.

I dati ottenuti sono stati processati al fine di ottenere diverse tipologie di risultati. In particolare dalle simulazioni per scenario sono stati calcolati, per ogni elemento della griglia di calcolo sia i valori delle intensità e direzione della velocità istantanea della corrente sia i valori mediati nell'arco di un ciclo completo di marea astronomica (circa 28 giorni).

Per quanto riguarda i valori mediati sono state calcolate sia le medie temporali dei valori assoluti (RMS) sia le medie dei valori istantanei della corrente (RES), ottenendo quindi sia campi scalari (RMS) che vettoriali (RES) in grado di descrivere il regime idrodinamico medio caratteristico di un dato scenario.

• Scenario MA

Per quanto riguarda i risultati ottenuti per lo scenario MA, sola marea astronomica, in Fig. 21 è riportata la distribuzione del campo di moto prodotto dal modello durante la fase decrescente e crescente della marea.

Dai risultati non si riscontrano variazioni della fase dei livelli simulati in tutto il dominio investigato. La superficie libera co-oscilla con le imposte variazioni di livello al contorno.

I massimi valori di velocità della corrente simulati dal modello sono riscontrati all'interno della bocca di connessione tra Stagno e Mare. Tali valori non superano i 26 cm/s. Tralasciando l'area interna e antistante al canale, la velocità massima simulata è pari a pochi cm/s. In particolare, in aree non influenzabili dal flusso di fuoriuscita dal canale i valori di velocità della corrente massima simulata scendono ulteriormente a valori prossimi allo zero.

Come si può notare, dalla Fig. 22 la distribuzione della RMS conferma la struttura della circolazione precedentemente illustrata con valori mediamente maggiori all'interno del canale di connessione e nell'area ad esso antistante.

Dal calcolo delle correnti residue (Fig. 22), non emergono strutture di circolazione particolarmente intense. In particolare, i valori massimi calcolati non

superano il valore soglia del 1 cm/s ed inoltre, ne risulta quindi che l'azione della marea nell'area di indagine non è in grado di generare alcuna circolazione residuale.

Questo è confermato dall'analisi della distribuzione del tracciante utilizzato per simulare la dinamica di interscambio Stagno-Mare. In particolare, al fine di meglio evidenziare la traiettoria della massa d'acqua fuoriuscita dal canale di connessione, è stata simulata l'avvezione e la diffusione di un tracciante passivo rappresentante è l'acqua dello Stagno. Lo studio effettuato è di carattere qualitativo e ha lo scopo di poter comparare, per le diverse simulazioni, quali aree del dominio sono interessate dal flusso d'acqua fuoriuscente dallo Stagno a parità di intervallo di tempo dal rilascio.

Tale studio preliminare, sulla dispersione delle acque dello Stagno non tiene in considerazione le forzanti barocline e i processi di galleggiamento delle masse d'acqua dolci o salmastre, necessarie per poter ottenere risultati più realistici.

In Fig. 23 è riportata una sequenza di immagini relative alla distribuzione spaziale del tracciante fuoriuscito dal canale a diverse distanze temporali dal momento del rilascio. In particolare, si può notare come, dopo un tempo pari a 96 ore, il tracciante è per lo più concentrato nell'area antistante il canale di connessione con lo Stagno.

La geometria della distribuzione evidenzia infatti come la maggior parte del tracciante anche dopo un tempo considerevole non risulta influenzato da alcun flusso residuale in grado di trasportarlo verso le aree centrali del Golfo.

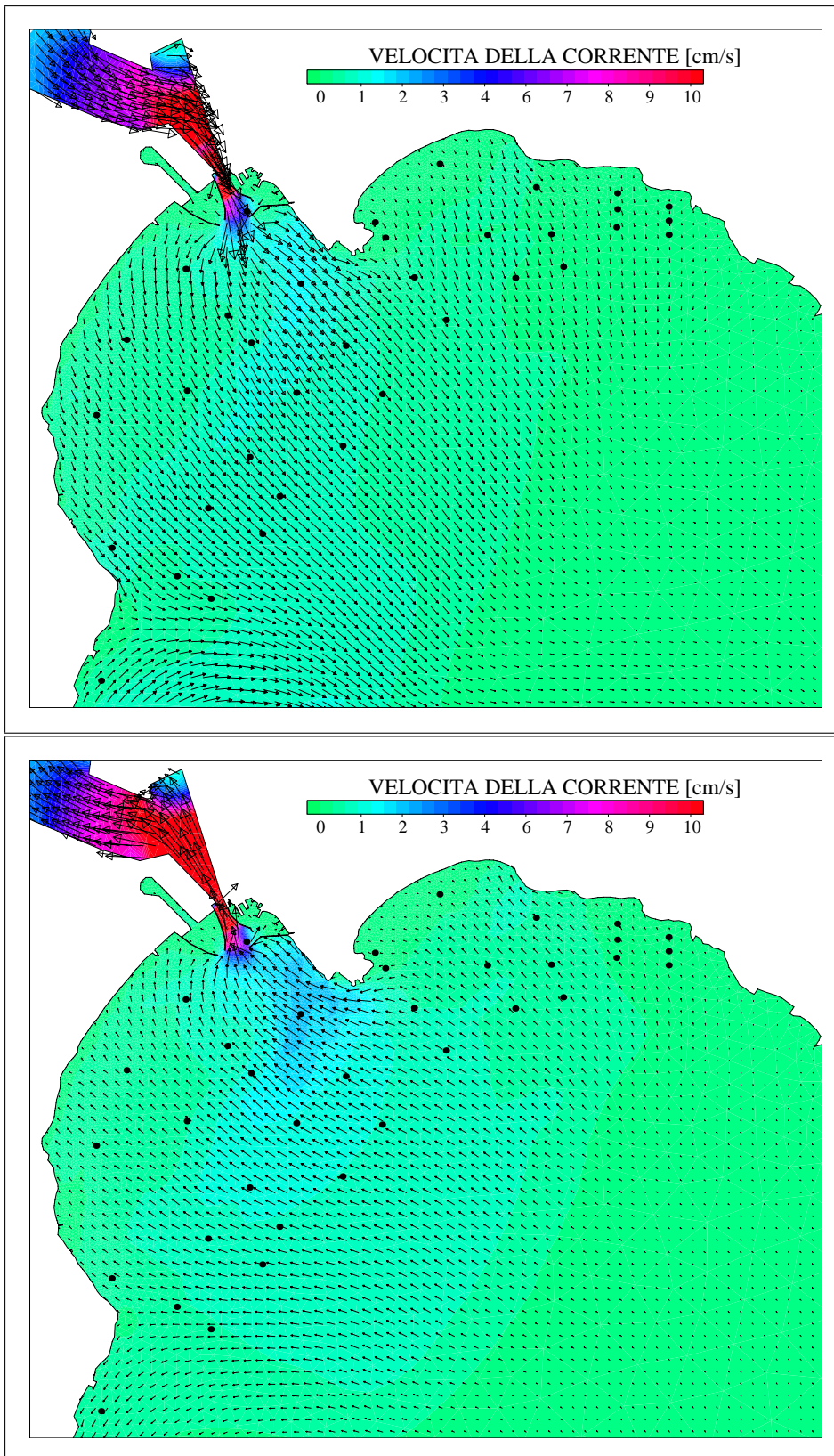


Figure 21. Scenario MA: circolazione delle acque nell'area del Porto di Cagliari durante le fasi di flessa della marea decrescente e crescente.

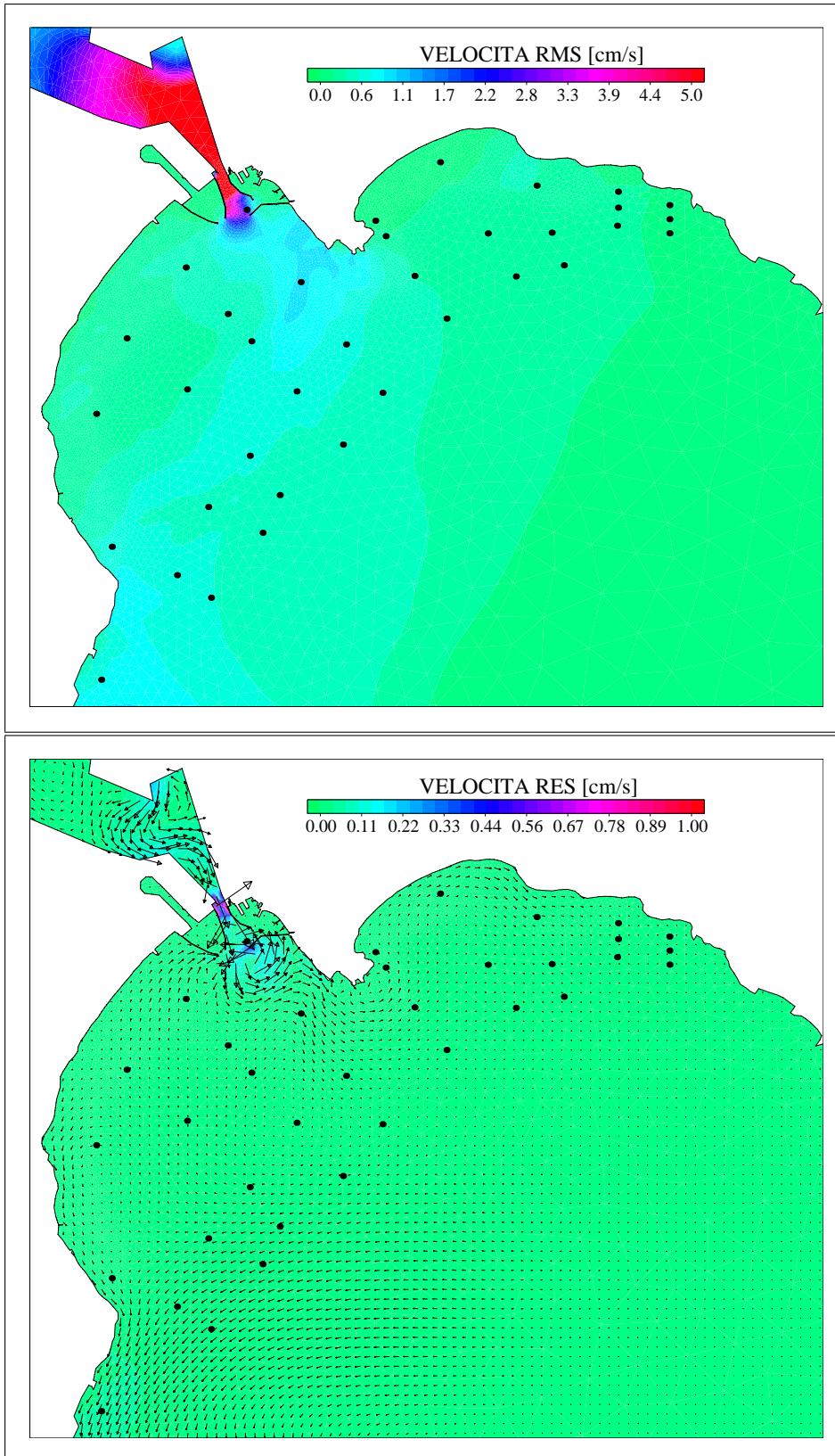


Figure 22. Scenario MA: distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES nell'area del Porto di Cagliari

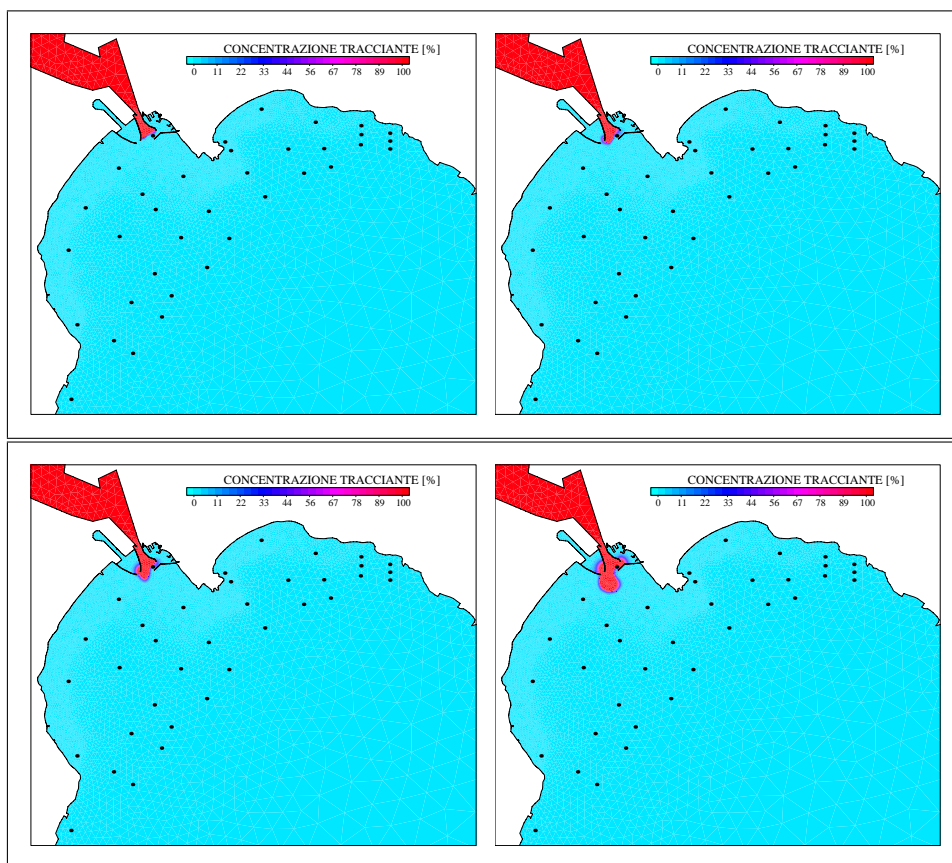


Figure 23. Scenario MA: distribuzione del tracciante passivo nell'area di indagine usato per simulare l'acqua fuoriuscente dalla Laguna; da sinistra a destra in verso orario: dopo 24, 48, 72 e 96 ore dal momento del rilascio

• Scenario MS

Il secondo scenario investigato è lo scenario MS caratterizzato da forzante mareale e vento di maestrale di intensità pari a 10 m/s.

In Fig. 24 è riportata la struttura della circolazione delle acque come risultato dalla simulazione numerica durante la fase decrescente e crescente della marea. Rispetto al caso precedente, in cui la sola marea astronomica influenza la circolazione del bacino, è evidente l'effetto di trasporto del vento che genera due correnti costiere meridionali rispettivamente ad Est e ad Ovest dell'area portuale. In particolare, l'azione di trasporto indotta dai due flussi costieri genera un'area di divergenza in prossimità del promontorio di Sant'Elia che convoglia le acque dalle aree centrali del Golfo verso costa.

Le velocità massime della corrente sono state riscontrate lungo la costa ad Ovest del Porto Canale, con valori superiori ai 60 cm/s.

Sotto l'aspetto qualitativo, la struttura della circolazione presenta una forte componente inerziale nell'area a ridosso dell'apertura del canale di connessione con lo Stagno dove, il flusso diretto verso Ovest generato dall'azione del vento, subisce una separazione della linea fluida con conseguente formazione di un vortice inerziale.

In questo scenario, l'influenza della marea sulla circolazione delle acque è del tutto trascurabile, solo in corrispondenza dell'area portuale in prossimità del canale di connessione tra Stagno e Mare si riscontrano variazioni nella struttura della corrente al variare delle fasi della marea.

Data la trascurabile influenza della forzante mareale sulla circolazione indotta dal vento, la distribuzione della RMS e RES non risulta significativamente diversa dalla distribuzione delle velocità istantanea.

Analizzando la distribuzione del tracciante, (Fig. 25) si può notare come, a differenza del precedente scenario, la presenza del vento fa sì che il tracciante venga velocemente trasportato al di fuori del canale di connessione generando un'area di ristagno in corrispondenza alla cella di circolazione inerziale e lambendo il tratto costiero a ridosso del Porto Canale in direzione Ovest.

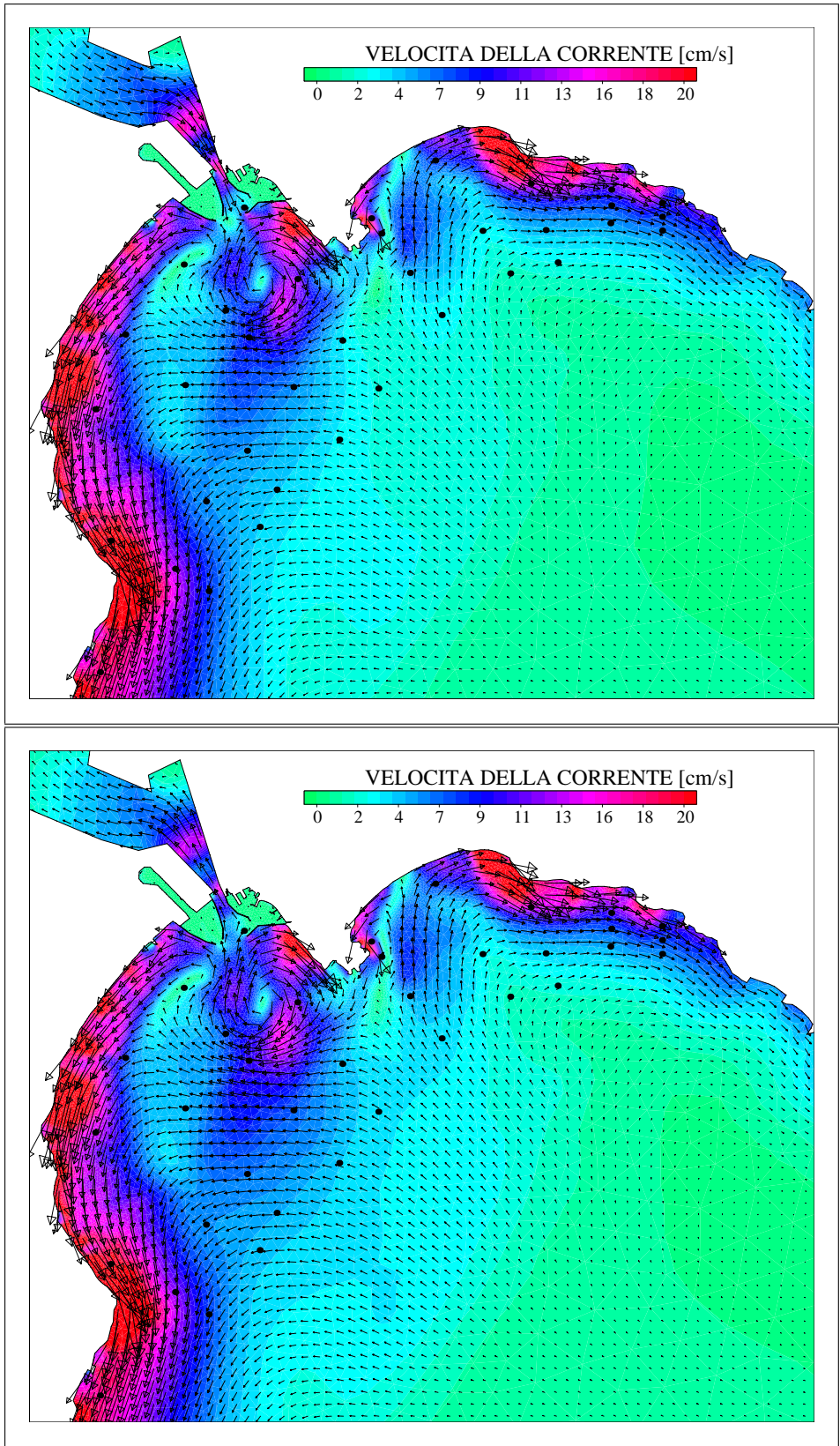


Figure 24. Scenario MS: circolazione delle acque nell'area del Porto di Cagliari durante le fasi di flessa della marea decrescente e crescente.

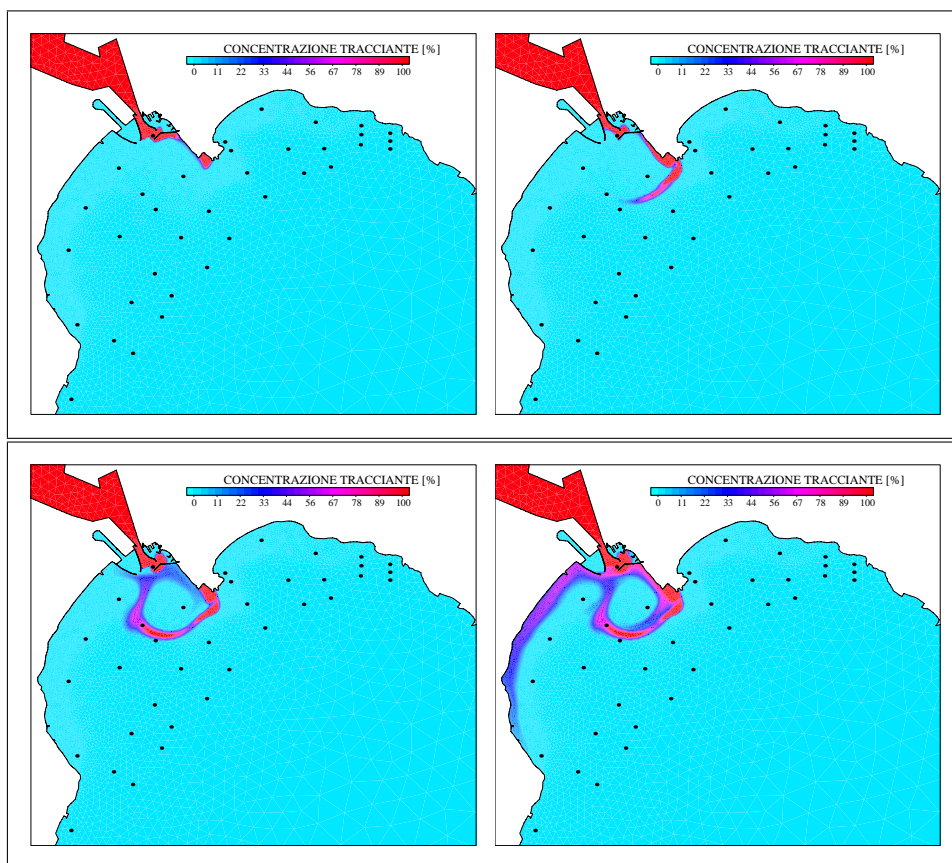


Figure 25. Scenario MS: distribuzione del tracciante passivo nell'area di indagine usato per simulare l'acqua fuoriuscente dallo Stagno; da sinistra a destra in verso orario: dopo 24, 48, 72 e 96 ore dal momento del rilascio

• Scenario LB

Il successivo scenario investigato è lo scenario LB. In questo caso, le condizioni forzanti meteo-marine sono caratterizzate da marea astronomica e da un vento costante di Libeccio di intensità pari a 9 m/s.

In Fig. 26 è riportata la struttura della circolazione delle acque durante la fase decrescente e crescente della marea come risultato dalla simulazione numerica. Le velocità massime della corrente sono state simulate nell'area antistante il tratto di costa ad Ovest del Porto Canale con valori pari a 0.65 m/s.

In questo caso, l'azione del vento di Libeccio genera una circolazione omogenea in direzione Est caratterizzata da intensificazioni del flusso medio in corrispondenza delle aree litoranee ad Ovest del Porto Canale e delle aree ad esso antistanti.

Come per il caso precedente, la circolazione è dominata dall'azione del vento, l'effetto della marea risulta del tutto trascurabile, in particolare, in questo scenario, si riscontra un'inversione del flusso a seguito del cambiamento di fase della marea unicamente all'interno del canale di connessione tra Stagno e Mare.

Anche per questo scenario, data la trascurabile influenza della forzante mareale sulla circolazione indotta dal vento, la distribuzione della RMS e RES non risulta significativamente diversa dalla distribuzione delle velocità istantanea.

Rispetto al caso precedente, la direzione del vento di Libeccio, quasi parallela alla linea di costa, rende maggiormente efficace il processo di trasporto delle acque costiere. Questo è confermato dall'analisi della distribuzione del tracciante (Fig. 27), dalla quale è evidente come l'azione del vento di Libeccio, generando un'intensa corrente costiera, sia in grado di trasportare velocemente le acque lagunari verso Est, senza generare alcuna area di ristagno o intrappolamento delle masse d'acqua che fuoriescono dal canale di connessione.

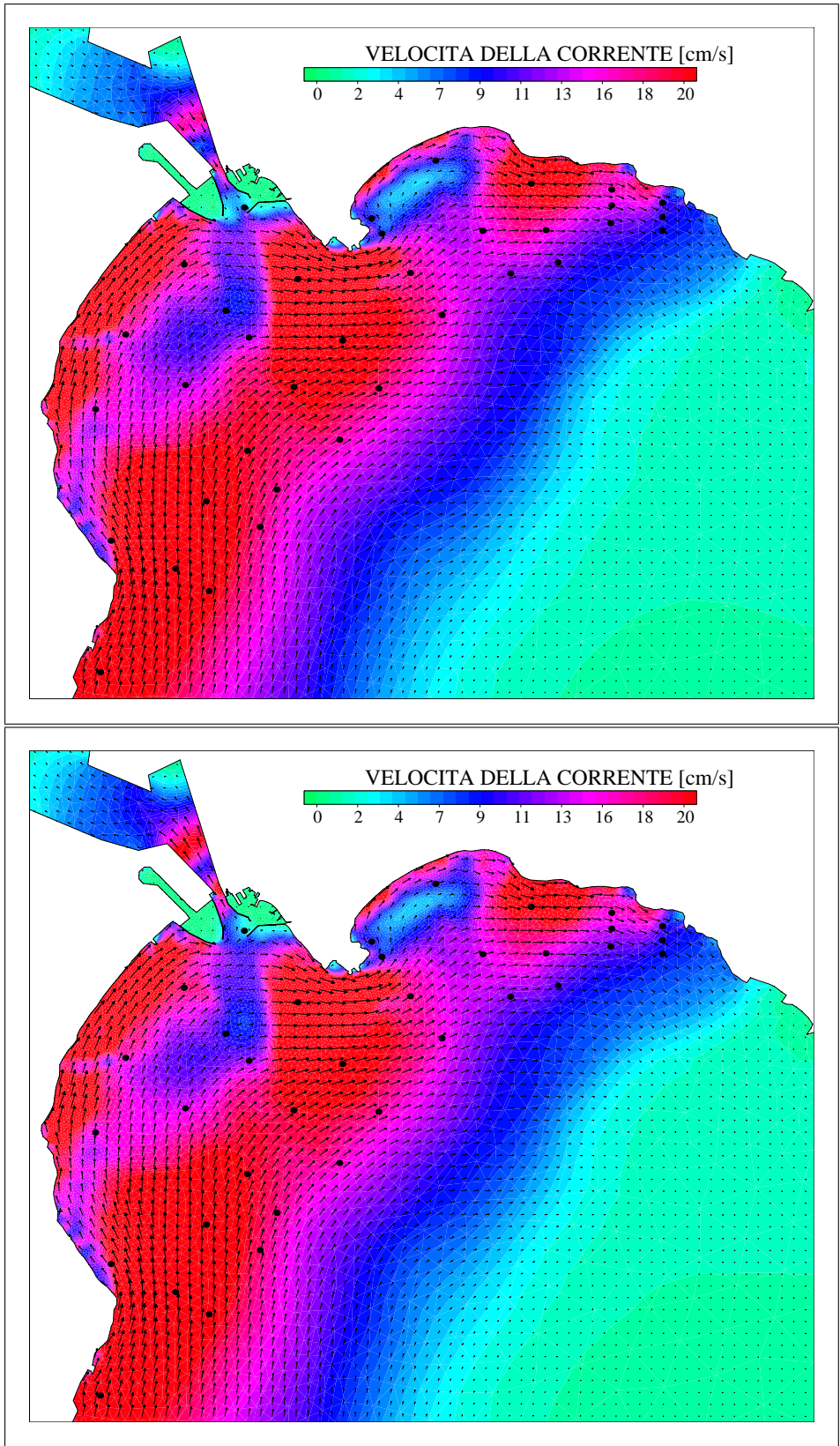


Figure 26. Scenario LB: circolazione delle acque nell'area del Porto di Cagliari durante le fasi di flesso della marea decrescente e crescente.

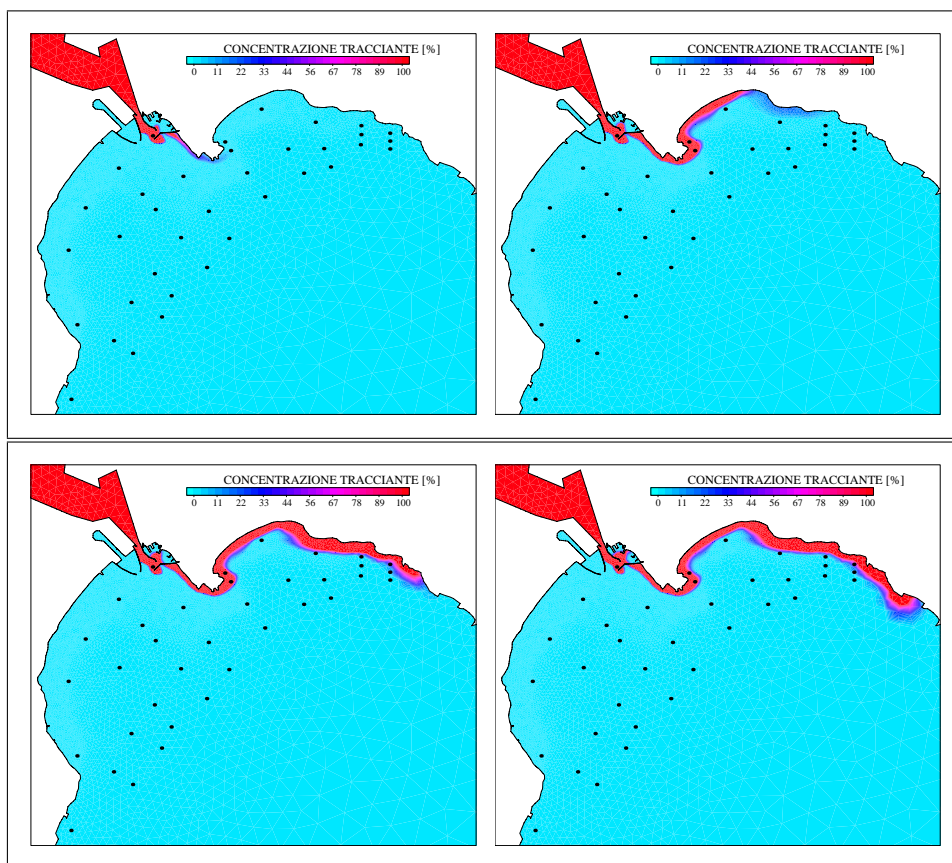


Figure 27. Scenario LB: distribuzione del tracciante passivo nell'area di indagine usato per simulare l'acqua fuoriuscente dallo Stagno; da sinistra a destra in verso orario: dopo 24, 48, 72 e 96 ore dal momento del rilascio

• Scenario SC

L'ultimo scenario investigato, scenario SC, è caratterizzato da forzanti meteorologiche quali la marea astronomica e un vento di scirocco pari 8 m/s.

In Fig. 28 è riportata la struttura della circolazione delle acque durante la fase di marea decrescente e crescente. L'azione del vento di scirocco genera, due correnti costiere settentrionali che formano un'area di convergenza a ridosso del Porto Canale. Come si può notare, le aree caratterizzate da elevati valori della corrente sono localizzate lungo i tratti costieri a Est della località Poetto e ad Ovest del Porto Canale. I valori massimi della corrente simulati sono rispettivamente pari a 0.48 m/s.

La presenza del promontorio di Sant'Elia e la convergenza delle due correnti litoranee, generano diverse strutture inerziali rispettivamente tra la zona di convergenza e la costa ad Ovest del Porto Canale e tra questa e la corrente costiera più occidentale.

L'azione del vento di scirocco, accumula le masse d'acqua in corrispondenza dell'area portuale da cui fuoriescono verso la parte centrale del Golfo ad opera del flusso di convergenza delle due correnti litoranee. Questa struttura risulta abbastanza analoga a quella generata dal vento di Maestrale se non per la inversione dei flussi a seguito della opposta direzione dei due venti forzanti.

Anche in questo caso, data la bassa intensità della forzante mareale, la circolazione delle acque risulta del tutto dominata dall'azione del vento. In particolare, una lieve intensificazione media della corrente si misura durante le fasi crescenti della marea che generano una corrente omogenea rispetto la corrente media generata dal vento. Come per i casi precedenti, la distribuzione della RMS e RES non risulta diversa rispetto alla distribuzione della velocità istantanea.

In particolare, essendo la direzione del vento di Scirocco opposta alla direzione del flusso uscente dallo Stagno, l'effetto di tale forzante risulta in un intrappolamento delle acque dello Stagno all'interno del bacino.

Dall'analisi della distribuzione del tracciante (Fig. 29) si può notare infatti come anche dopo 96 ore dal rilascio del tracciante, non si rileva alcuna concentrazione nelle acque del Golfo. Questo è dovuto sia all'azione frenante esercitata dall'azione del vento sulle acque dello Stagno sia all'efficace rinnovo ad opera della flusso convergente che tende a trasportare le masse d'acqua costiere verso le aree centrali del Golfo

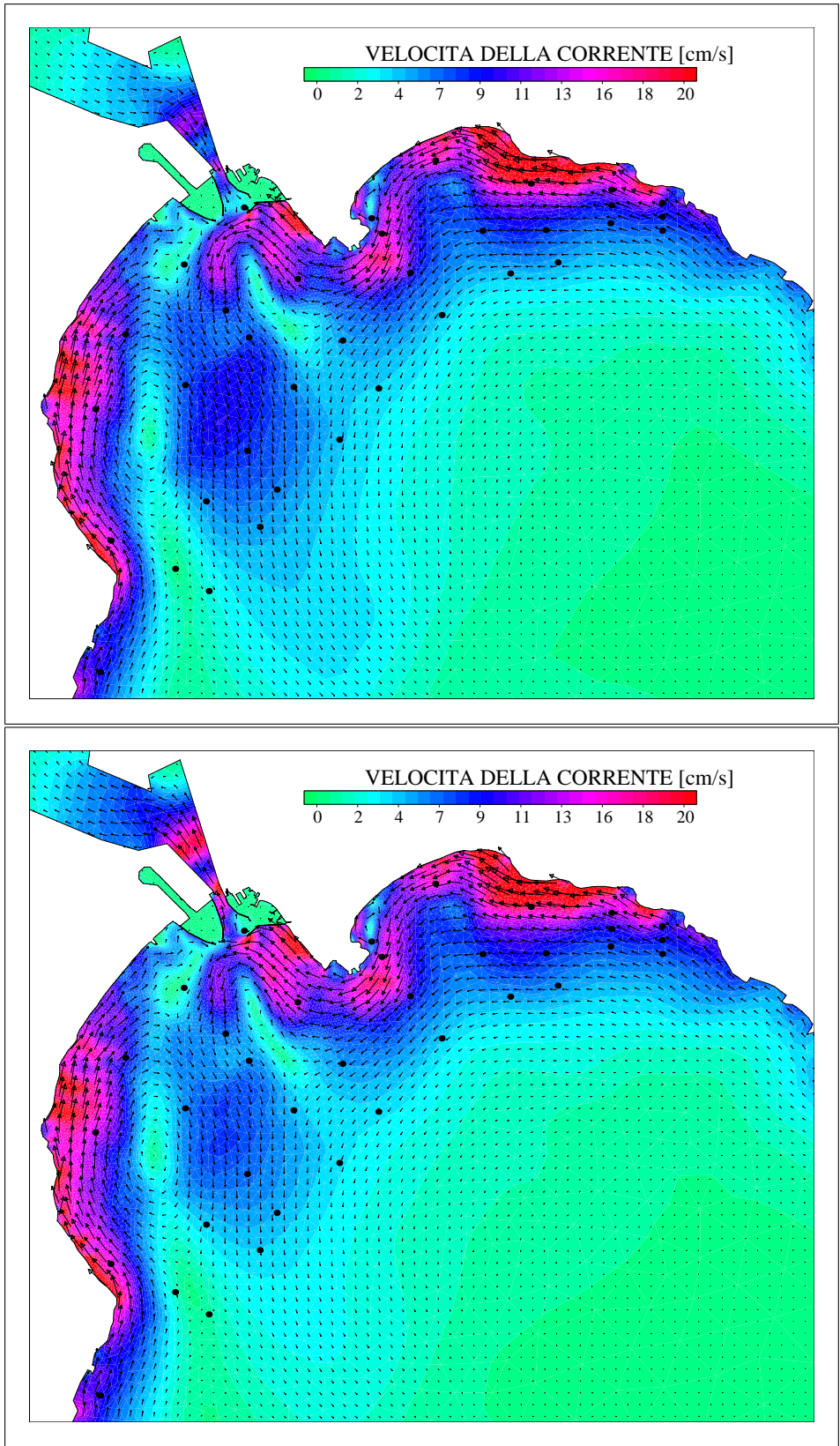


Figure 28. Scenario SC: circolazione delle acque nell'area del Porto di Cagliari durante le fasi di flesso della marea decrescente e crescente.

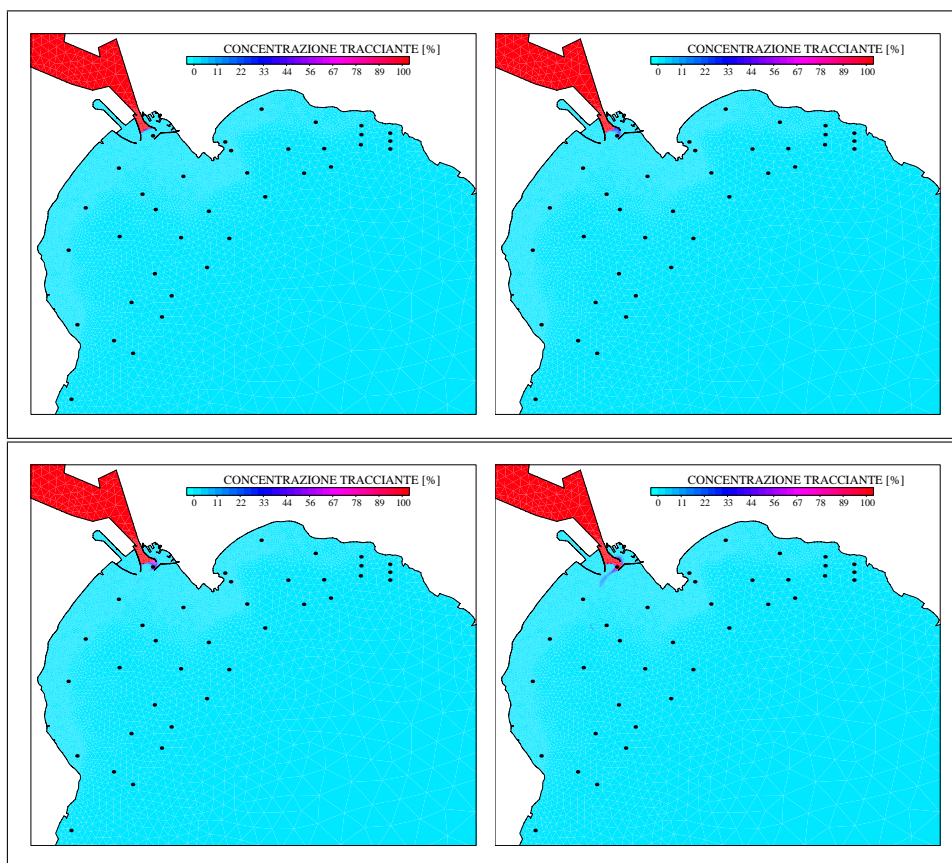


Figure 29. Scenario SC: distribuzione del tracciante passivo nell'area di indagine usato per simulare l'acqua fuoriuscente dallo Stagno; da sinistra a destra in verso orario: dopo 24, 48, 72 e 96 ore dal momento del rilascio

7.2 Simulazioni annuali

In questa sezione sono riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni annuali S5 e S6. In particolare, al fine di poter definire le caratteristiche idrologiche dei periodi investigati, sono stati calcolati per ogni singolo mese, le distribuzioni della velocità media quadratica RMS e della velocità media residuale RES.

Inoltre, per ogni periodo mese sono stati calcolati le distribuzioni di frequenza delle direzioni dei venti, e le intensità medie e massime dei venti in relazione ai diversi settori.

Sono state estese le precedenti indagini ai risultati ottenuti per l'intero biennio 2005 - 2006. In Fig. 30 sono riportati i risultati delle indagini statistiche sui venti per il periodo di interesse. Come si può notare dalla distribuzione di frequenza, la maggior parte degli eventi sono costituiti da venti con direzione 3, 4 e 2 settore, che nel sistema di riferimento utilizzato costituiscono venti di tramontana, scirocco e maestrale. Dall'analisi dell'andamento medio e massimo dell'intensità del vento non risultano favoriti particolari regimi eccezione fatta per un'evidenza di maggiore intensità dei valori medi dei venti provenienti dai quadranti Nord e dello scirocco.

Dall'analisi dei risultati di RMS ottenuti per l'intero biennio (Fig32) si nota come le velocità medie RMS maggiori si registrano lungo le aree litoranee sia ad Ovest che ad Est dell'area portuale con valori massimi in corrispondenza del tratto di costa ad Ovest del Porto Canale pari a pochi cm/s.

Per quanto riguarda la circolazione residuale indotta dalle forzanti meteorologiche, questa presenta valori mediamente molto bassi, con valori massimi dell'ordine di pochi cm/s in corrispondenza dei tratti litoranei e nell'area portuale. La struttura della circolazione mette in evidenza la presenza della cella inerziale a ridosso del promontorio di Sant'Elia in corrispondenza della bocca del canale di connessione Stagno-Mare.

In particolare, sotto l'aspetto qualitativo la struttura della circolazione residua biennale è tipicamente rappresentativa di un evento di maestrale o di vento proveniente dai settori settentrionali. La circolazione è infatti caratterizzata dalle due correnti costiere meridionali e dal flusso di divergenza nelle aree più esterne. Questo è confermato dall'analisi statistica dei venti da cui, il vento di provenienza Nord, risulta essere il più frequente.

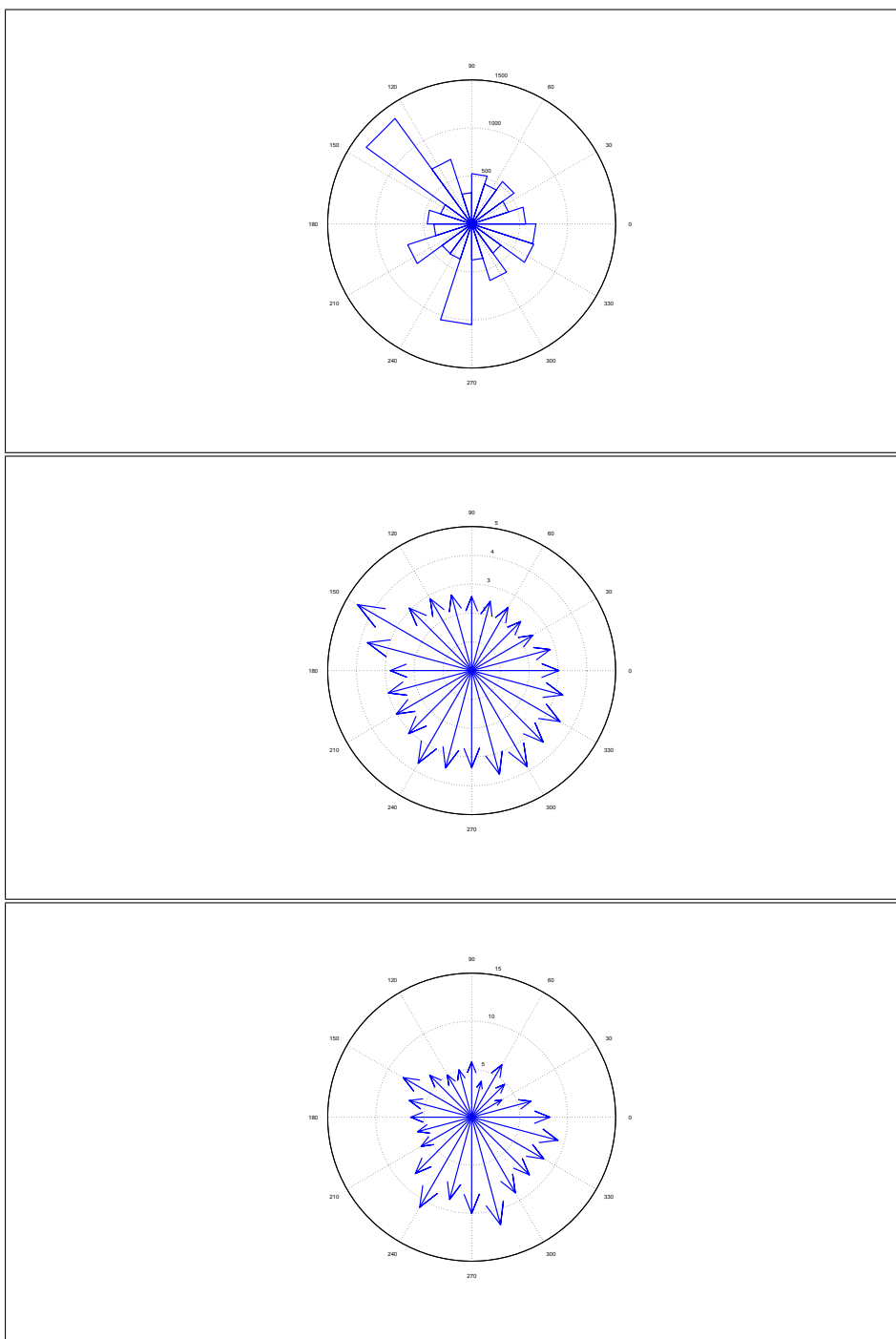


Figure 30. Statistiche dati anemometrici per il biennio 2005 - 2006: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

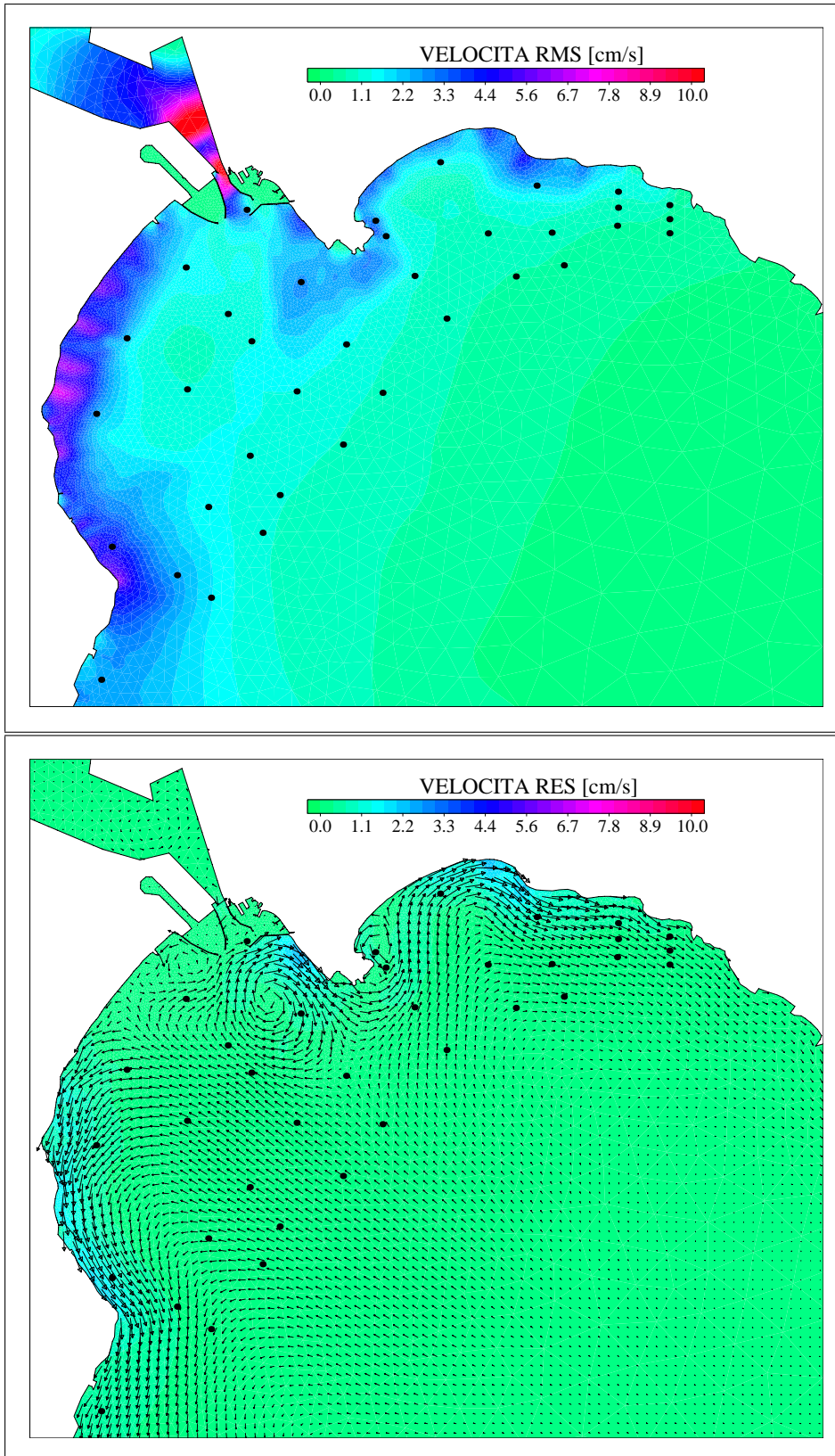


Figure 31. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il biennio 2005 - 2006

• Anno 2005 - S5

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni e analisi statistiche dei dati anemometrici relative al periodo Gennaio 2005 Dicembre 2005.

Al fine di rendere maggiormente intuibile l'andamento mensile della circolazione delle acque nel periodo considerato sono state relazionate tra loro le mappe di RMS e RES ottenute per i vari mesi e accorpate, nel caso fosse possibile, i risultati in relazione al loro livello di similitudine.

Inoltre, data difficoltà di fornire delle correlazioni tra grandezze medie e statistiche di tipo anemometrico e grandezze medie di tipo idrologico non sono state effettuate alcune indagini quantitative e considerazioni se non di tipo qualitativo in relazione a dinamiche di tipo causa-effetto. Nonostante questo sono riportati, per ogni mese, i risultati delle indagini statistiche dei dati anemometrici.

I risultati ottenuti per i mesi di Gennaio e Febbraio 2005 sono caratterizzati da una distribuzione spaziale della RMS (Fig. 33 e Fig. 35) del tutto analoga a quella ottenuta dalle indagini biennali, ovvero elevati valori di RMS in corrispondenza delle aree costiere e in prossimità del promontorio di Sant'Elia. I valori massimi misurati non superano comunque i 5 cm/s.

Per quanto riguarda le correnti residue RES indotte dal vento e dalla marea (Fig. 33 e Fig. 35), per entrambi i mesi, sono caratterizzate da una corrente costiera diretta verso Ovest che interessa la maggior parte del tratto costiero del Golfo e da una cella inerziale in prossimità del Promontorio di Sant'Elia.

Il mese di Marzo 2005 (Fig. 37) è caratterizzato da una distribuzione della velocità media RMS qualitativamente analoga a quella dei periodi precedenti ma con valori mediamente meno intensi. D'altra parte la distribuzione della velocità residua RES risulta molto diversa da quella calcolata per i periodi precedenti.

Analizzando i risultati ottenuti infatti si nota come pur rimanendo la struttura della cella di circolazione inerziale in prossimità del promontorio di Sant'Elia e il tratto Occidentale della corrente costiera, la struttura della circolazione è del tutto analoga a quella ottenuta per lo scenario MS caratterizzato dal vento di Maestrale. Infatti sono presenti i due bracci costieri della corrente meridionale e la zona di divergenza in corrispondenza dell'area portuale.

I mesi di Aprile e Maggio 2005 sono caratterizzati da analoghi andamenti della circolazione residua RES e media RMS (Fig. 39 e Fig. 41). In particolare, come anche per i casi precedenti la distribuzione della RMS risulta del tutto analoga all'andamento ottenuto per il periodo 2005 - 2006, con valori intensi in prossimità delle aree costiere e nelle aree antistanti il promontorio di Sant'Elia.

Per quanto riguarda la circolazione residuale RES si può notare, in entrambi i casi come sia sempre presente la cella di circolazione inerziale nell'area antistante il Porto di Cagliari e la corrente diretta verso Ovest che interessa la maggior parte del tratto costiero di interesse. La differenza rispetto al caso precedente può essere individuata nella posizione della corrente convergente che trasporta acqua dall'esterno verso le aree costiere che, in questo caso risulta spostata in località Poetto. Inoltre rispetto allo scenario precedente, in tale area si nota la presenza di una cella di circolazione in verso orario, che comunque non è in grado di dar luogo ad una corrente litoranea definita.

Il mese di Giugno 2005 (Fig. 43) è caratterizzato da una distribuzione della velocità media RMS qualitativamente analoga a quella dei periodi precedenti ma con valori mediamente meno intensi.

Per quanto riguarda la struttura della circolazione residua RES si nota che i valori risultano mediamente molto bassi o quasi nulli e che non si ha la formazione di alcuna cella di circolazione inerziale in prossimità del promontorio di Sant'Elia. In tal caso, infatti, si ha la formazione di 2 correnti costiere localizzate ad Est del promontorio di Sant'Elia e ad Ovest del Porto Canale che convergono a formare una cella inerziale di dimensioni ragguardevoli che occupa tutta l'area compresa tra il promontorio di Sant'Elia e il promontorio di Pula.

Il mese di Luglio 2005 (Fig. 45) è caratterizzato da una distribuzione della velocità media RMS qualitativamente analoga a quella dei periodi precedenti ma con valori mediamente più intensi.

La distribuzione della corrente residua RES presenta valori mediamente dell'ordine dei 4-5 cm/s ed è caratterizzata da una corrente litoranea che interessa tutto il tratto di costa considerato diretta verso Ovest. In tale scenario non si ha la formazione di alcuna cella di circolazione stazionaria a ridosso del promontorio di Sant'Elia.

Il mese di Agosto 2005 (Fig. 47) è caratterizzato sia sotto l'aspetto della RMS che della RES da una distribuzione del tutto analoga a quella simulata per i mesi di Aprile e Maggio 2005.

I mesi di Settembre, Ottobre e Novembre 2005 sono caratterizzati da analoghi andamenti della circolazione residua RES e media RMS (Fig. 49, Fig. 51 e Fig. 53). In particolare, sotto l'aspetto qualitativo la distribuzione della RMS risulta del tutto analoga all'andamento ottenuto per i casi precedenti, con valori intensi in prossimità delle aree costiere e nelle aree antistanti il promontorio di Sant'Elia.

Per quanto riguarda la struttura della circolazione residua, i risultati ottenuti mettono in evidenza un'evoluzione del campo di moto da uno stato media-

mente caotico e caratterizzato da diverse celle di circolazione, mese di Settembre 2005 (Fig. 49), verso una struttura maggiormente lineare e caratterizzata da un flusso costiero diretto verso Est, Novembre 2005 (Fig. 53). In tutti e tre i casi l'intensità media della corrente residua RES risulta molto bassa, quasi nulla.

Il mese di Dicembre 2005 (Fig. 55) é caratterizzato sia sotto l'aspetto della RMS che della RES da una distribuzione del tutto simile a quella simulata per i mesi di Gennaio e Febbraio 2005. Tale distribuzione rivela in particolare la prevalenza dell'azione dei venti provenienti da Nord che generano una circolazione residua tipicamente simile a quella simulata nello scenario MS, indotta dal vento di Maestrale.

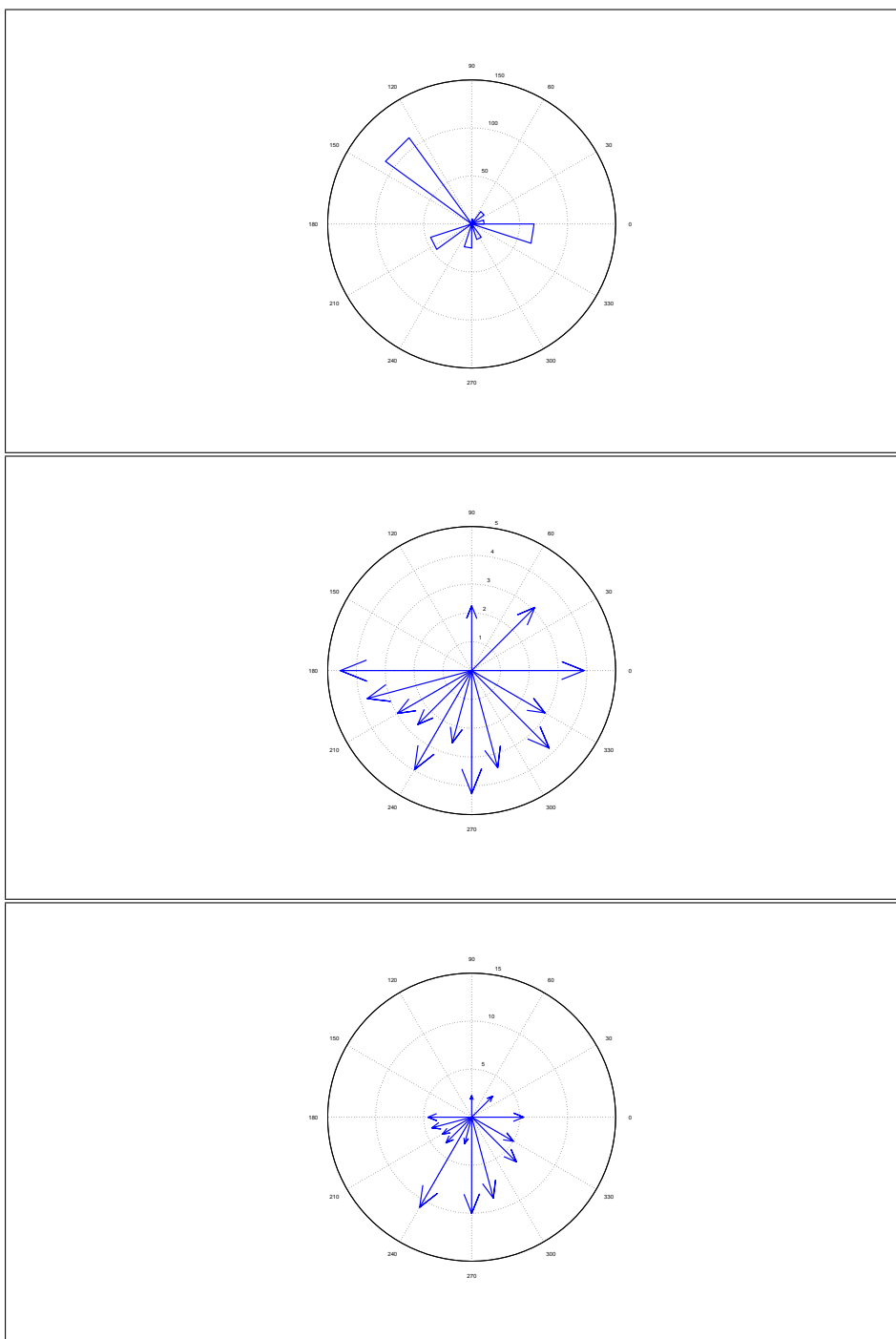


Figure 32. Statistiche dati anemometrici per il mese di Gennaio 2005: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

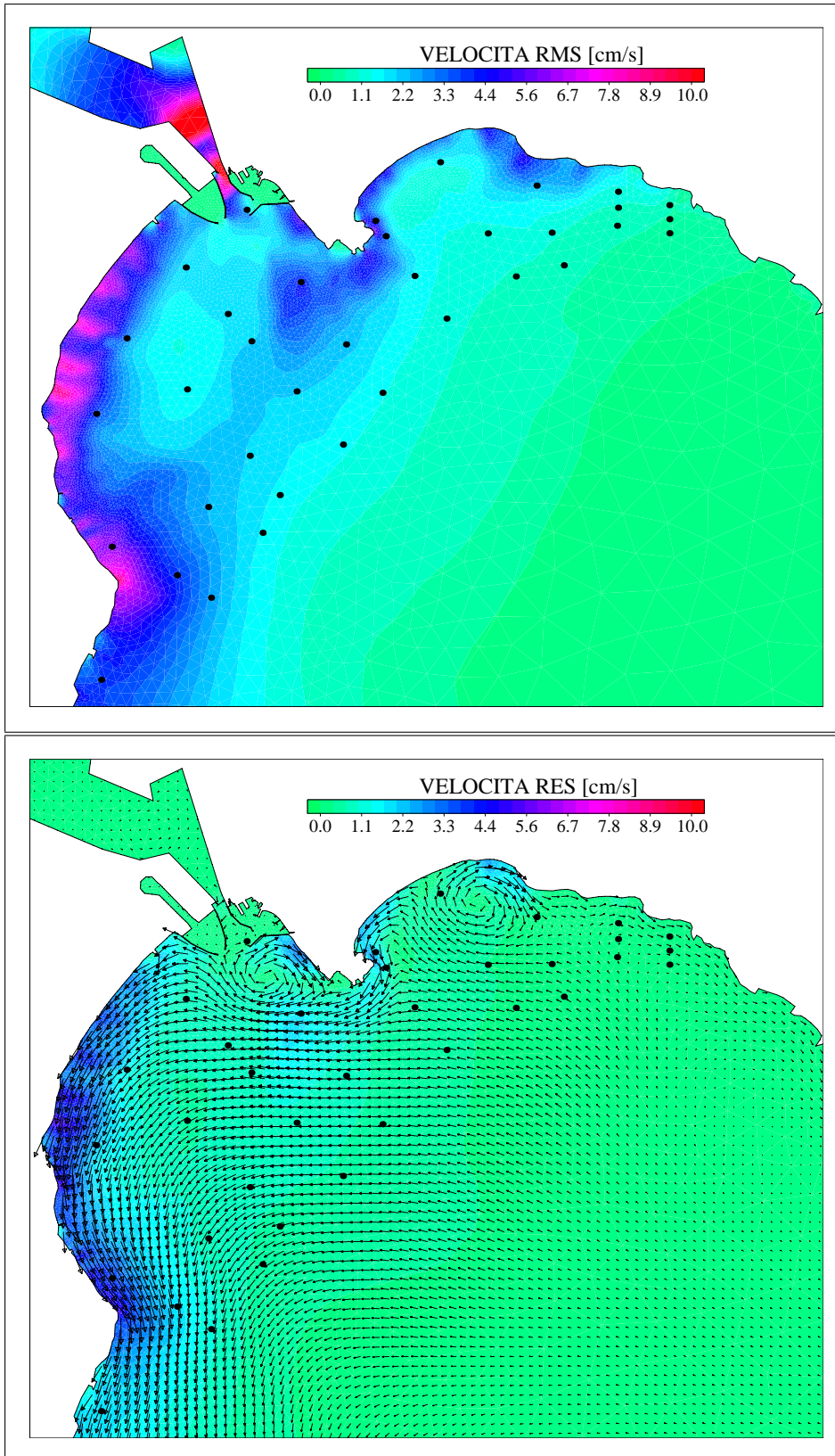


Figure 33. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Gennaio 2005

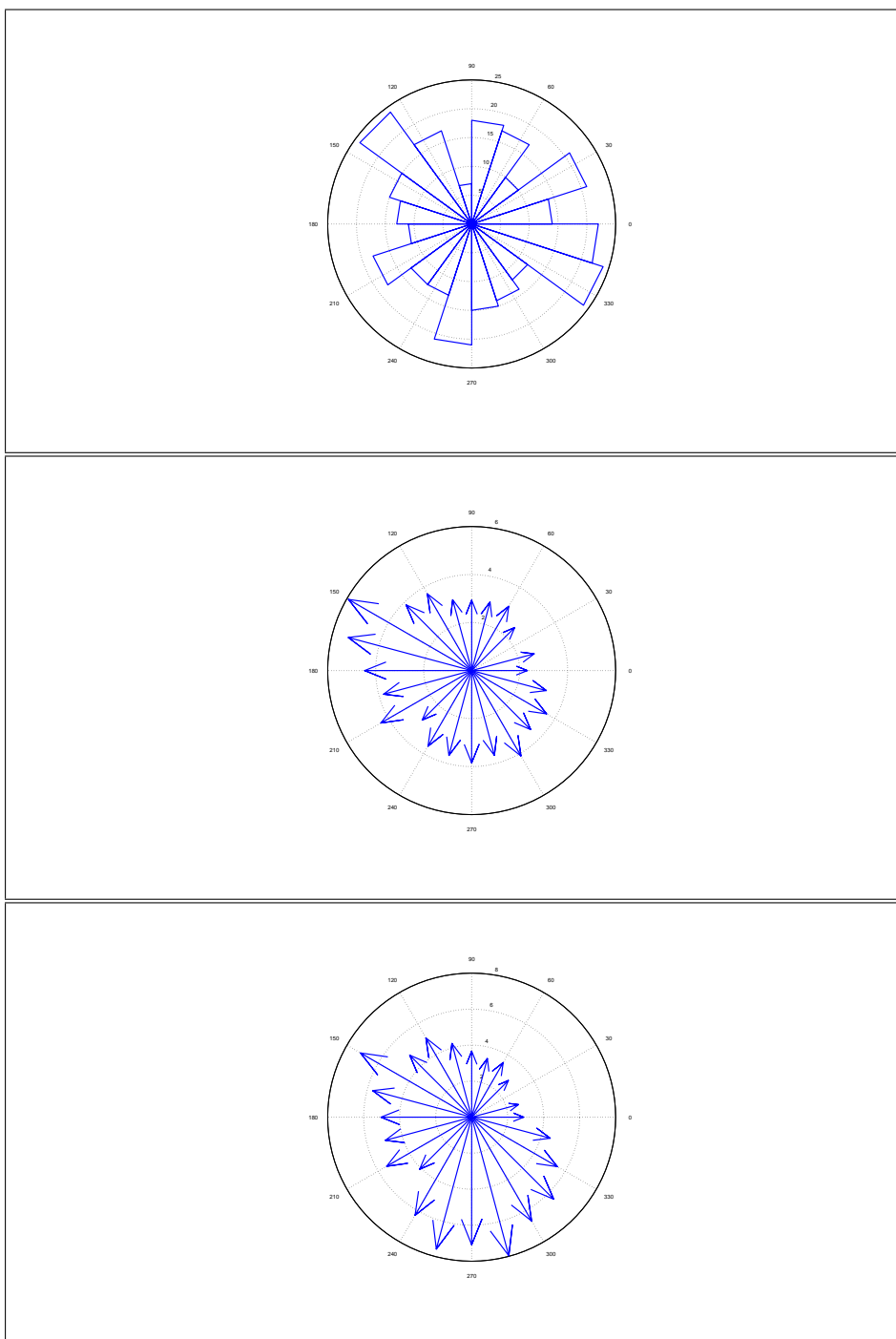


Figure 34. Statistiche dati anemometrici per il mese di Febbraio 2005: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

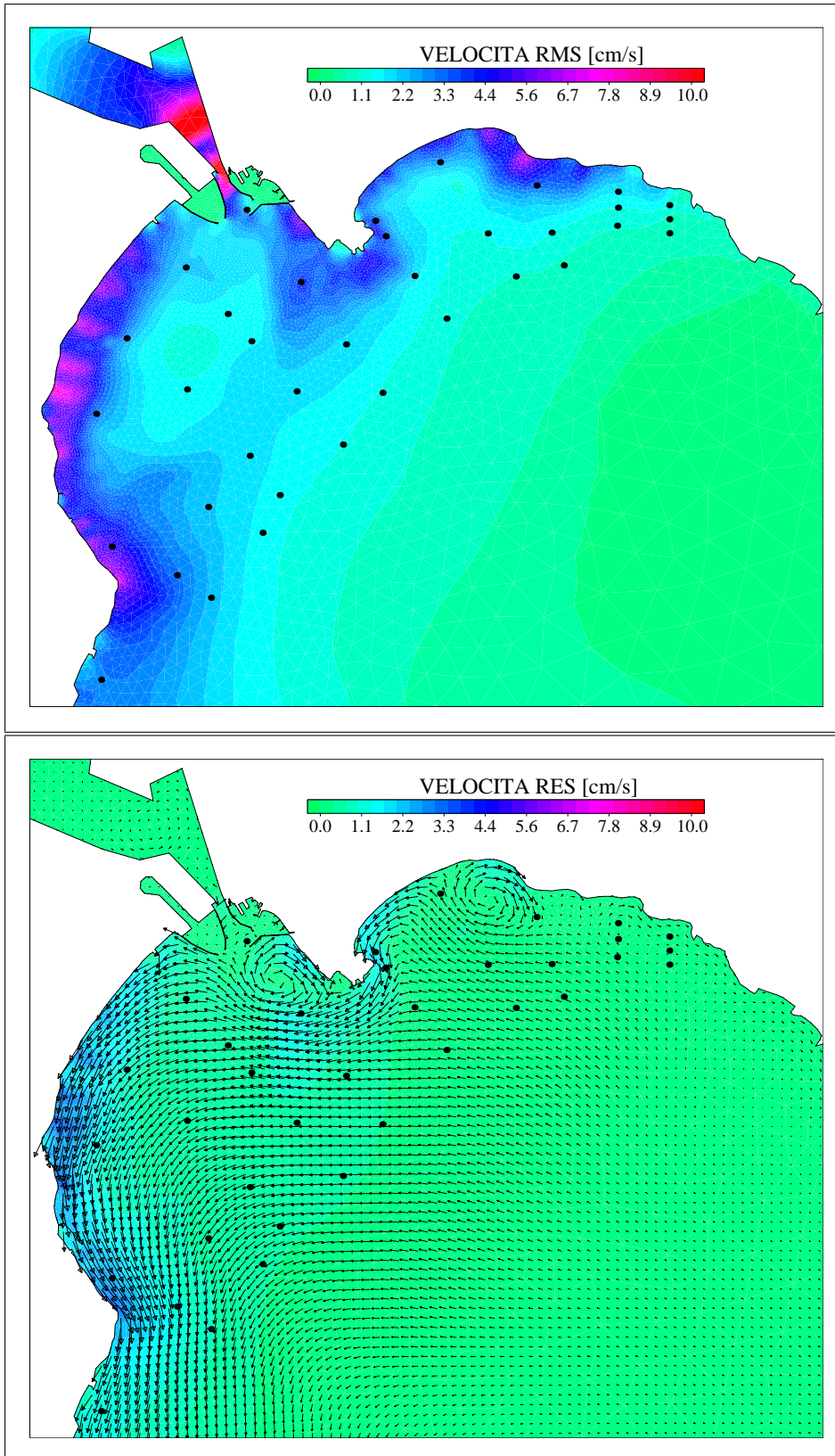


Figure 35. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Febbraio 2005

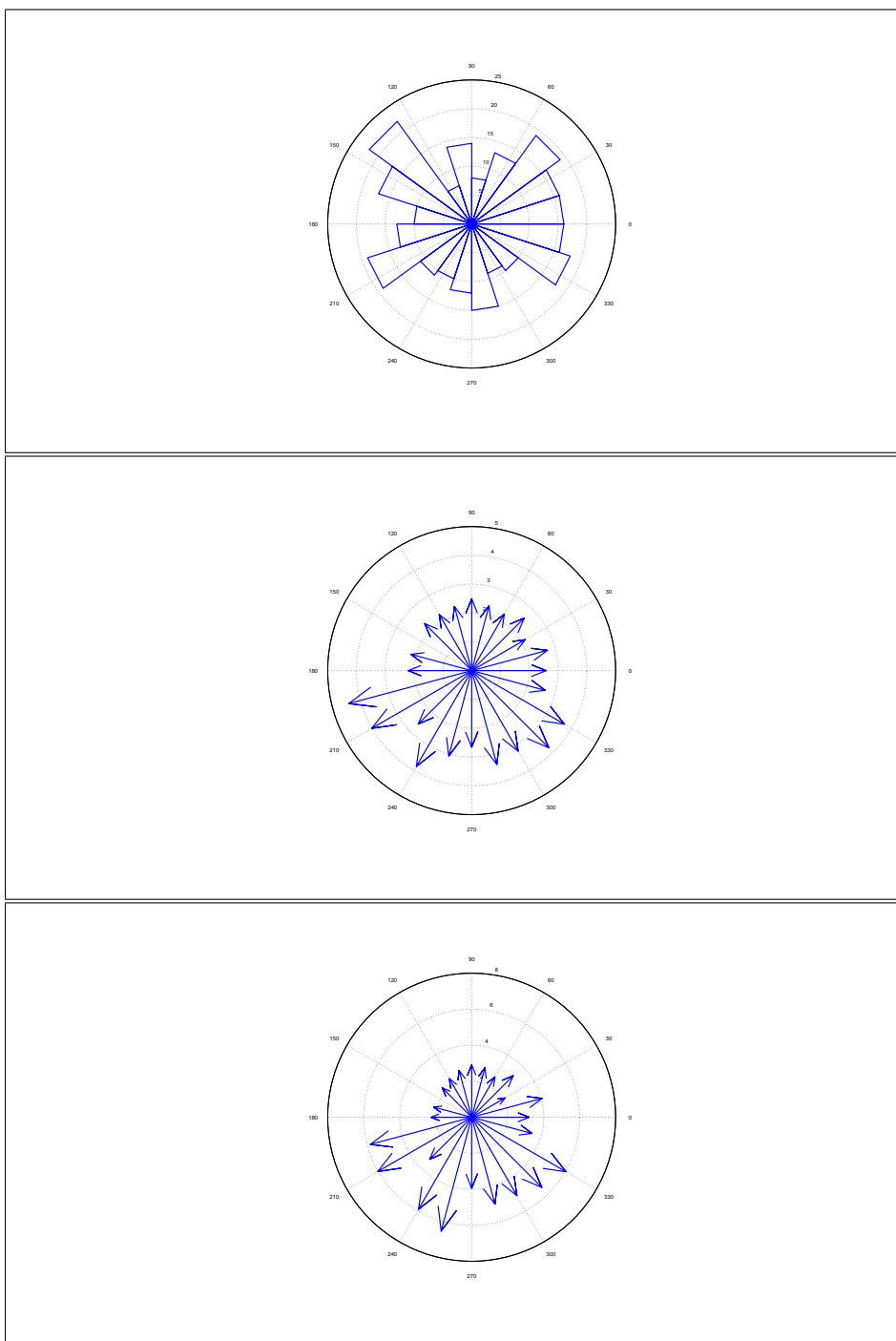


Figure 36. Statistiche dati anemometrici per il mese di Marzo 2005: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

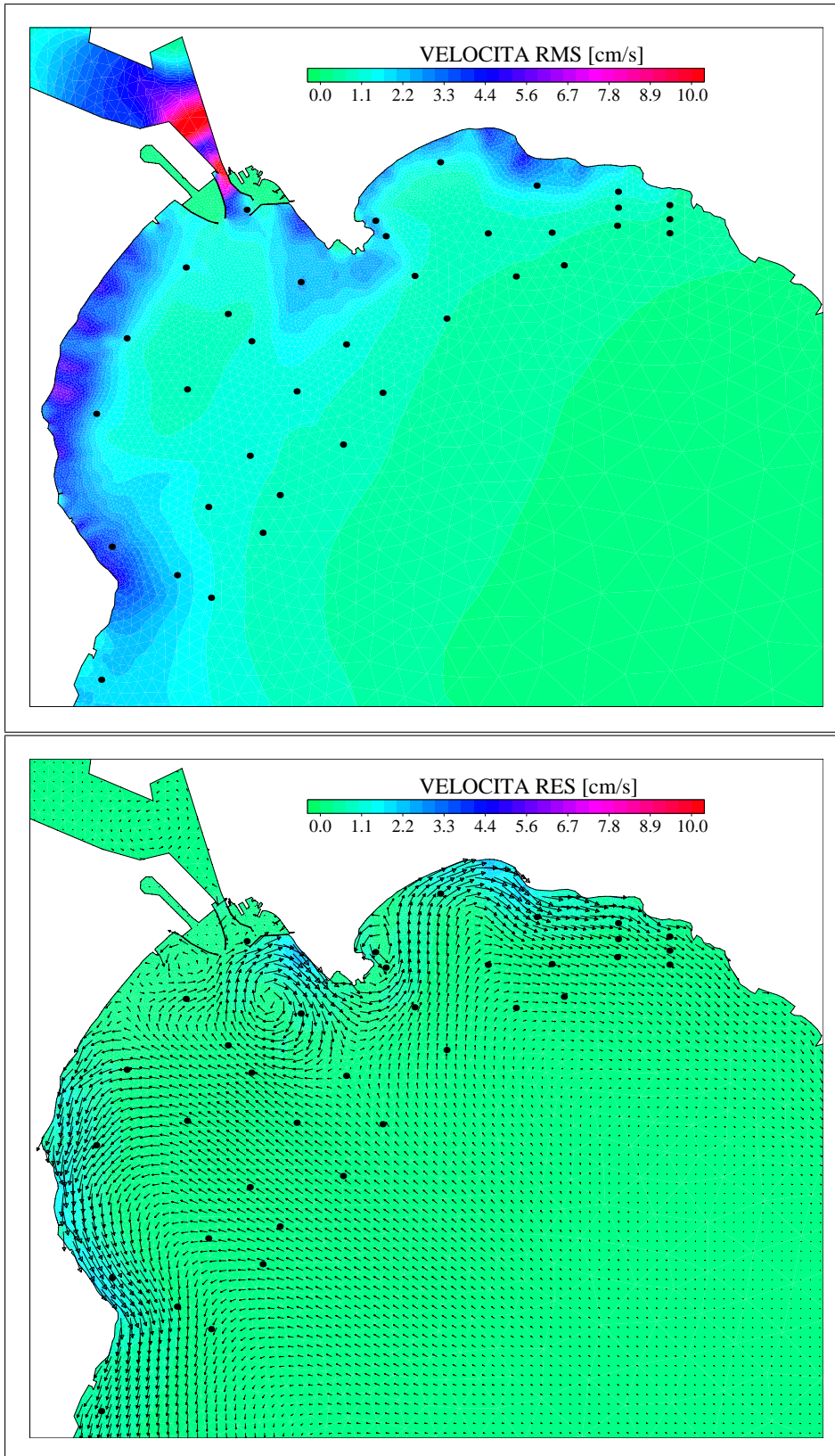


Figure 37. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Marzo 2005

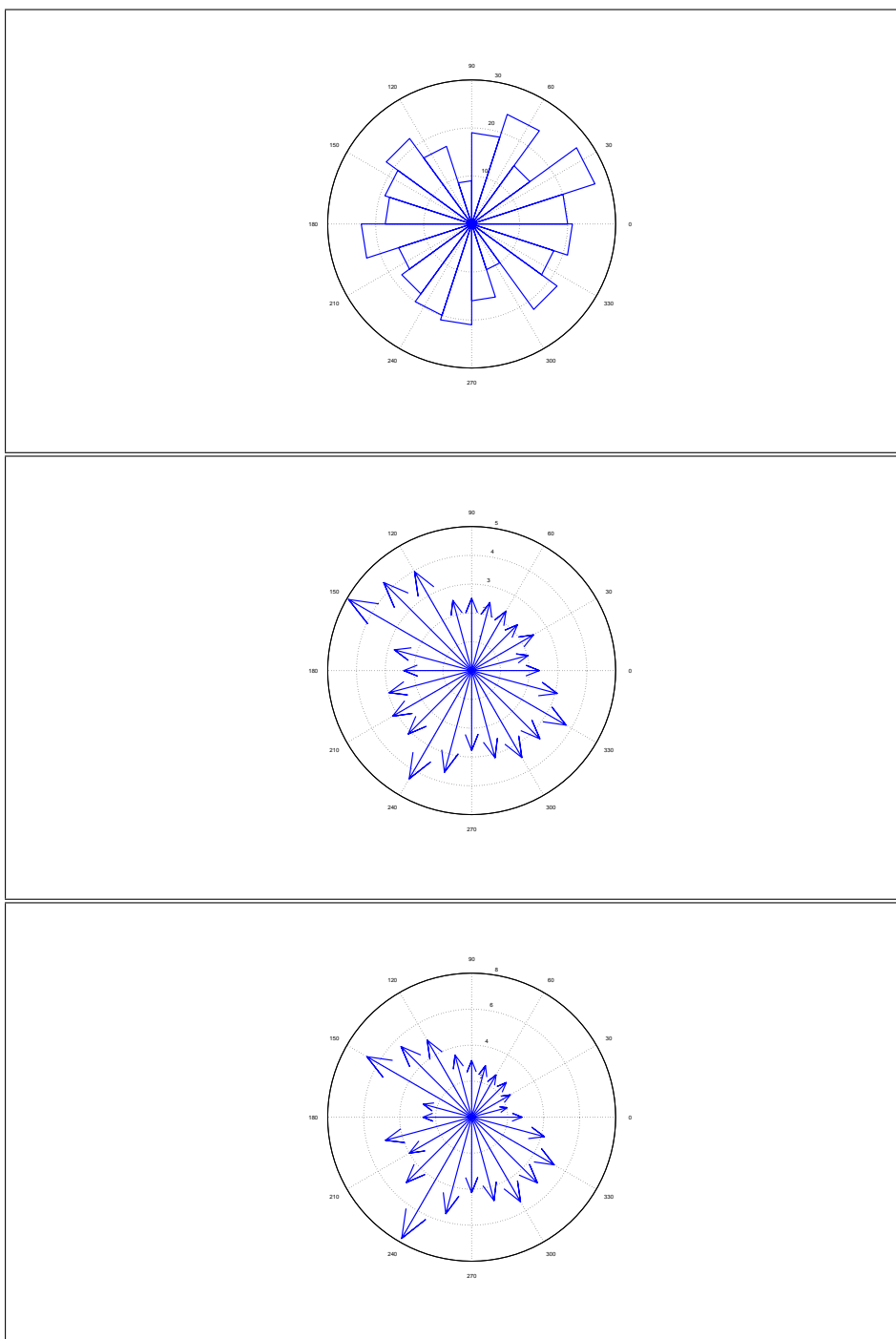


Figure 38. Statistiche dati anemometrici per il mese di Aprile 2005: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

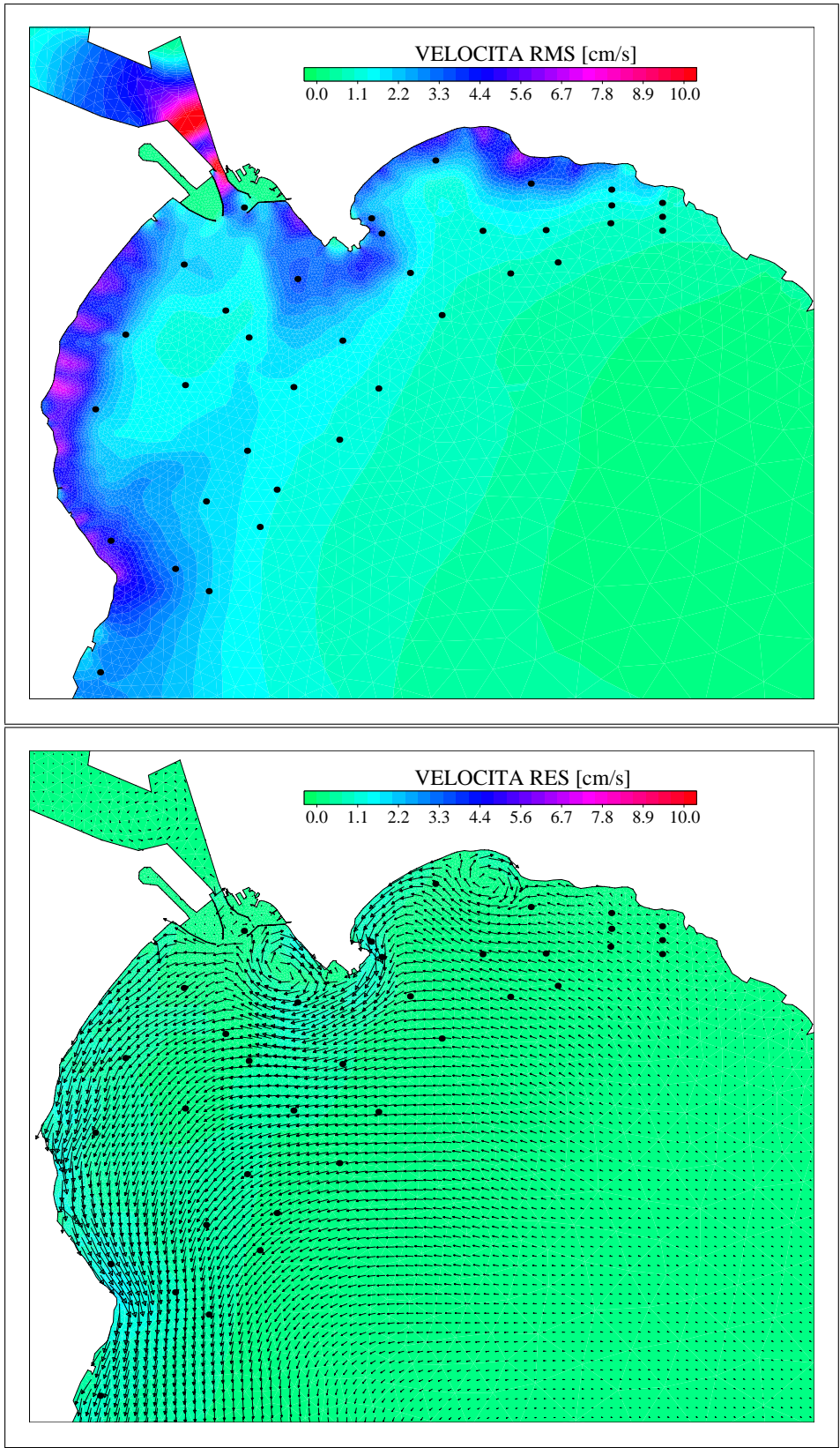


Figure 39. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Aprile 2005

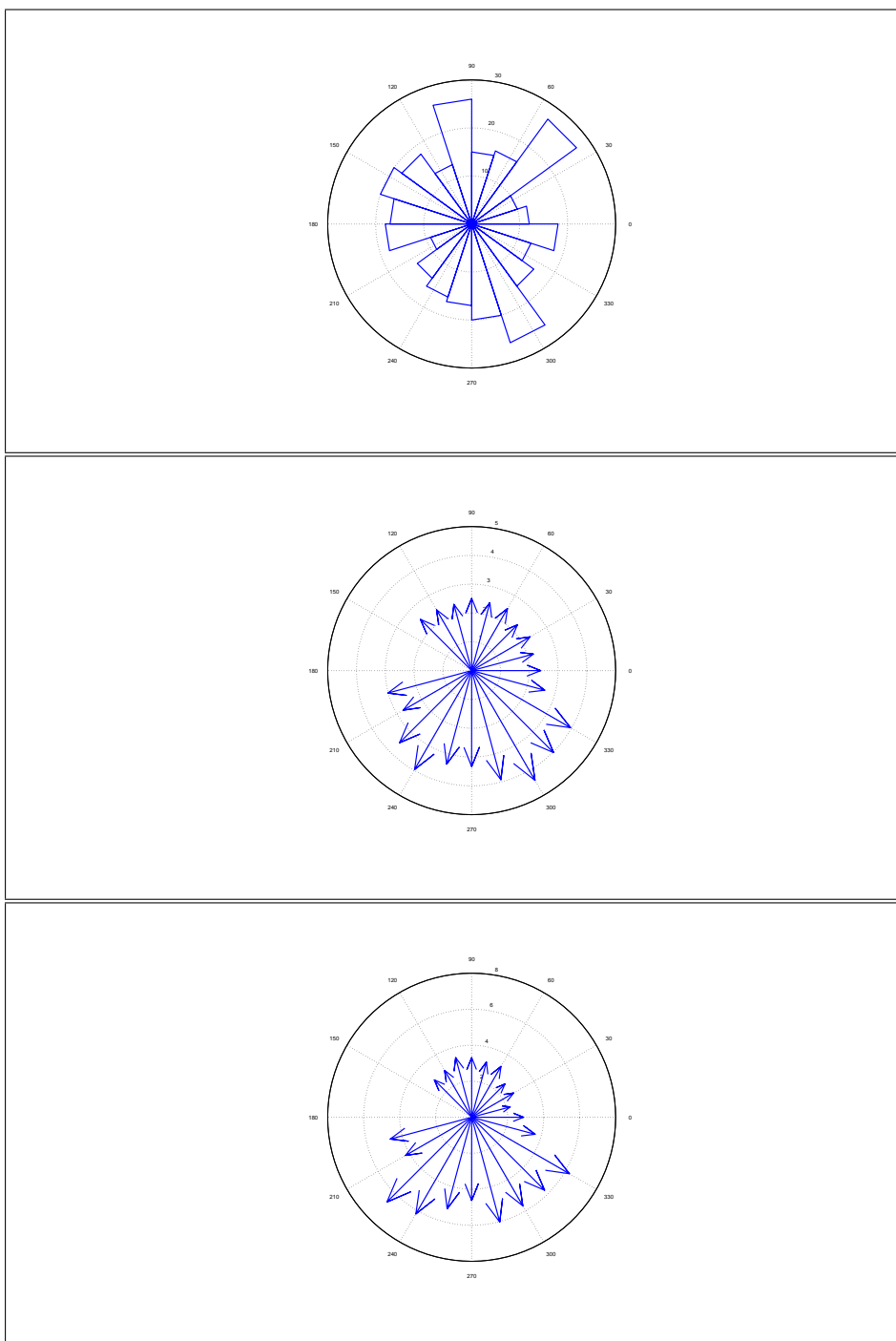


Figure 40. Statistiche dati anemometrici per il mese di Maggio 2005: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

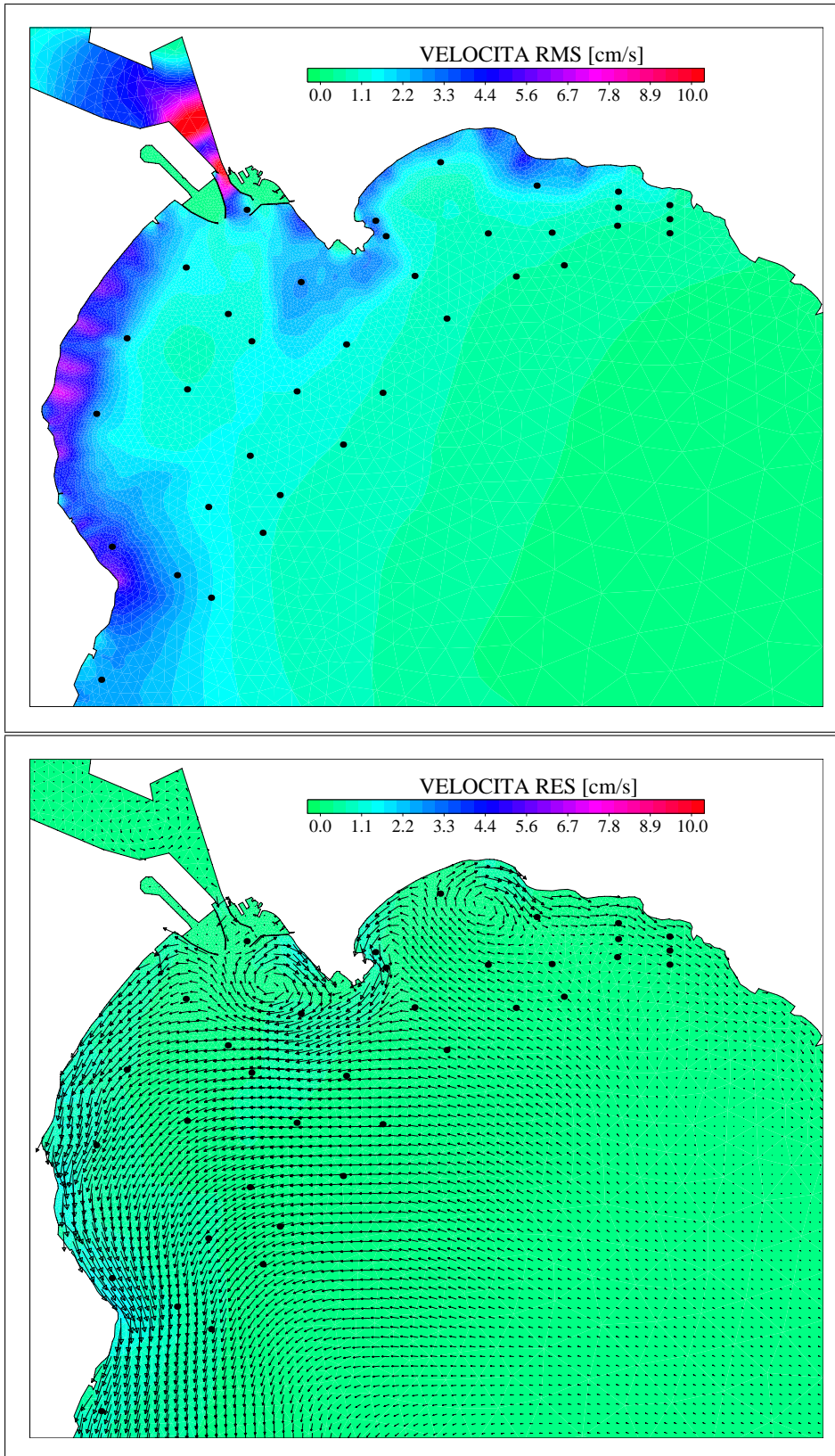


Figure 41. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Maggio 2005

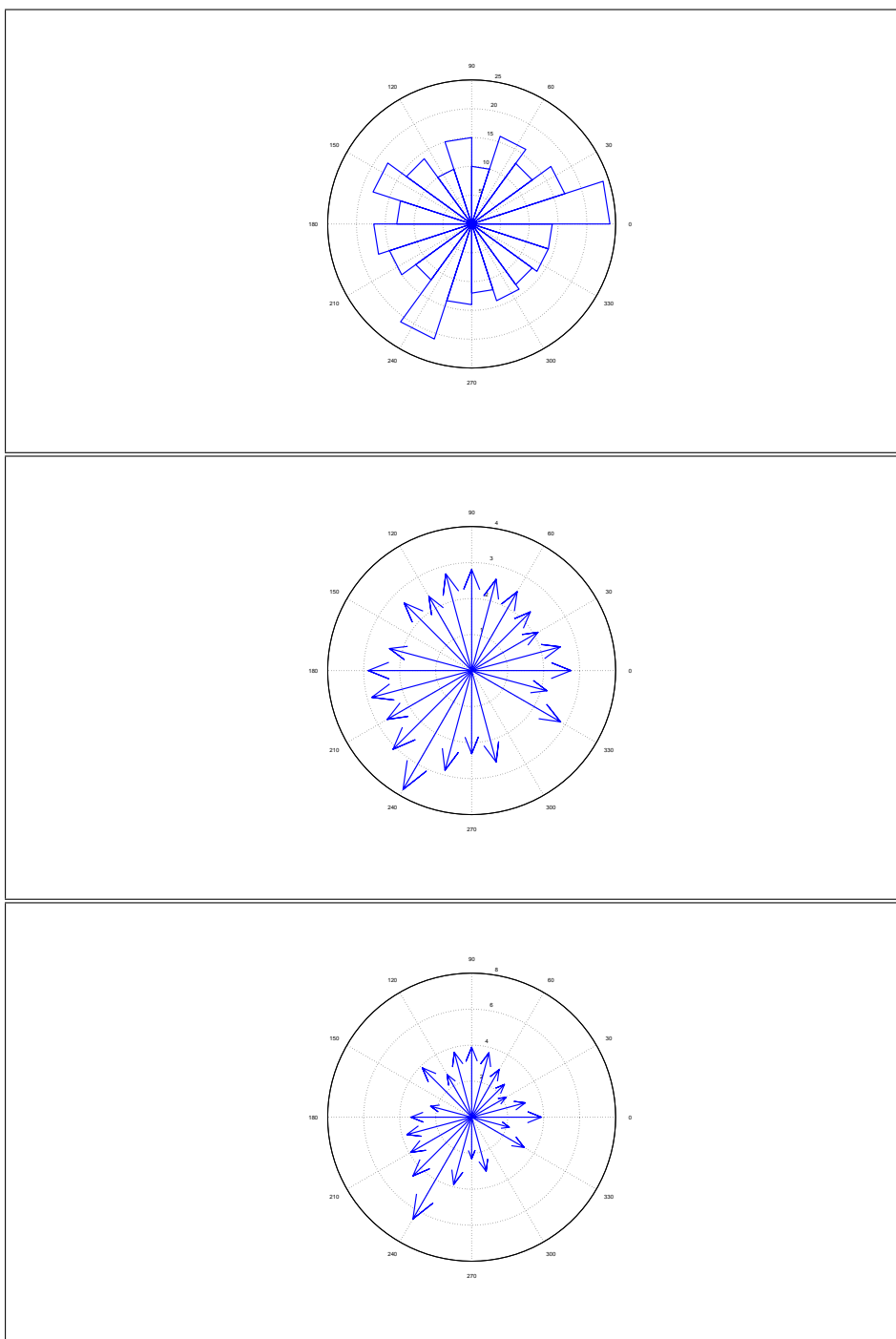


Figure 42. Statistiche dati anemometrici per il mese di Giugno 2005: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

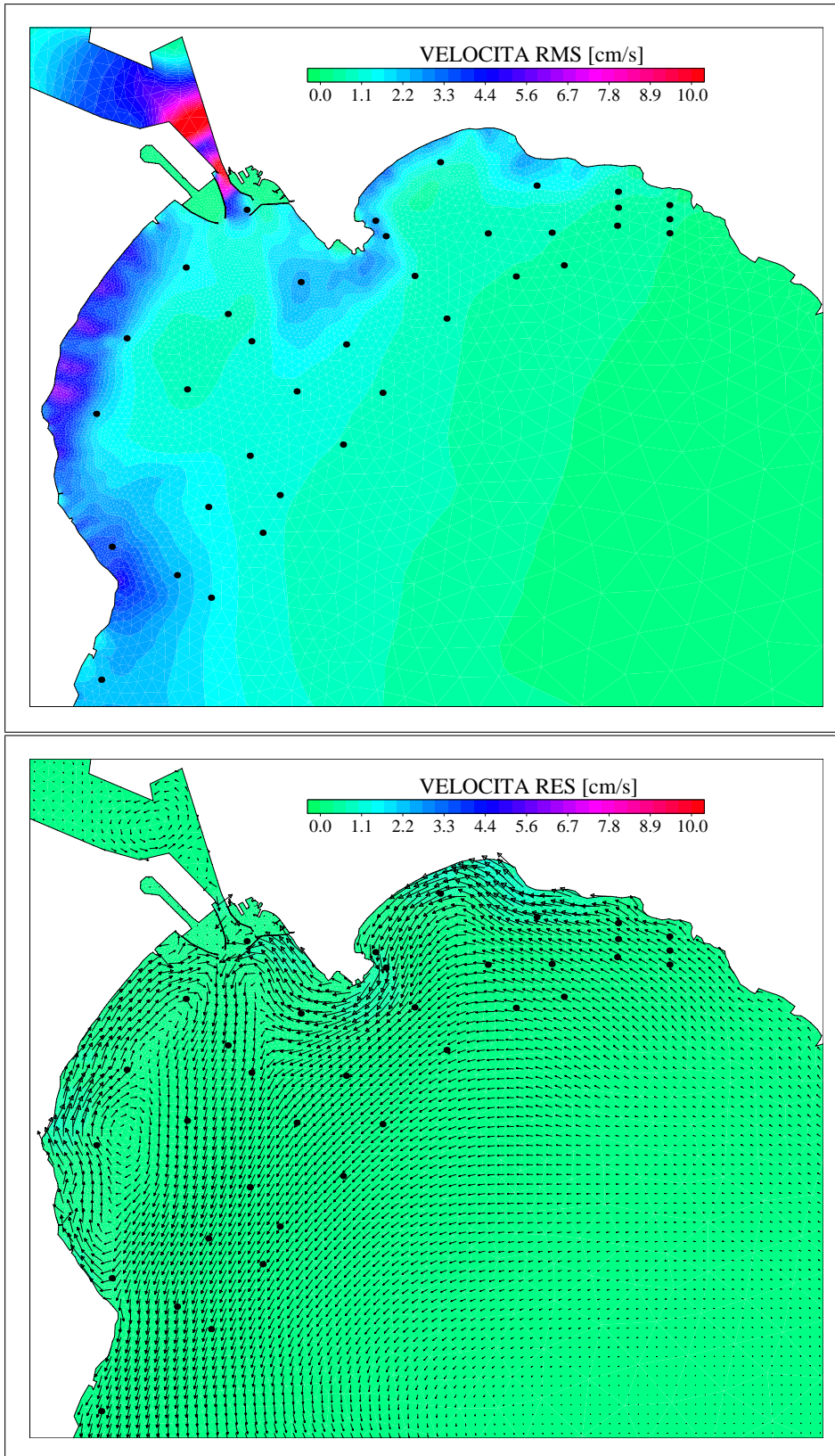


Figure 43. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Giugno 2005

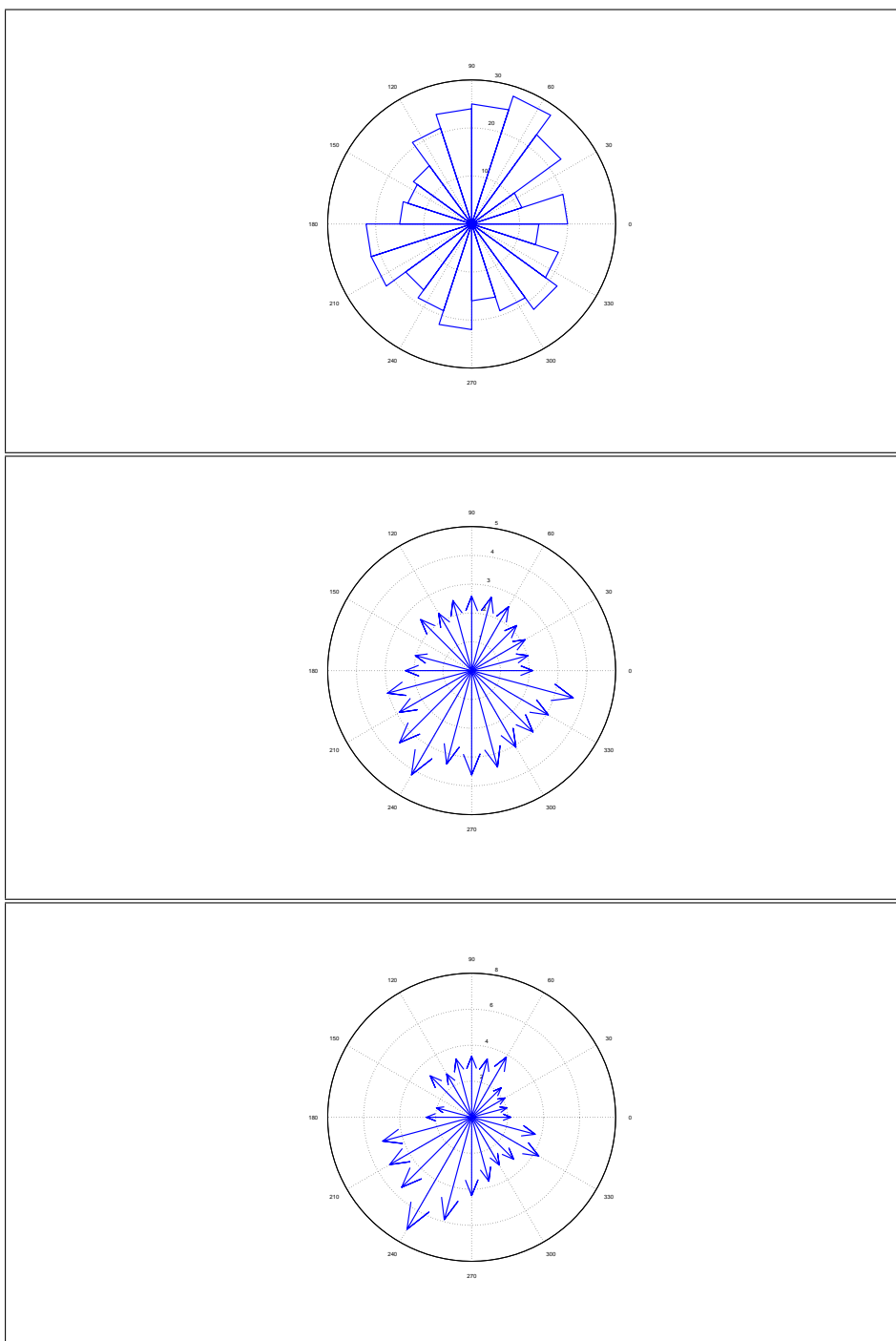


Figure 44. Statistiche dati anemometrici per il mese di Luglio 2005: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

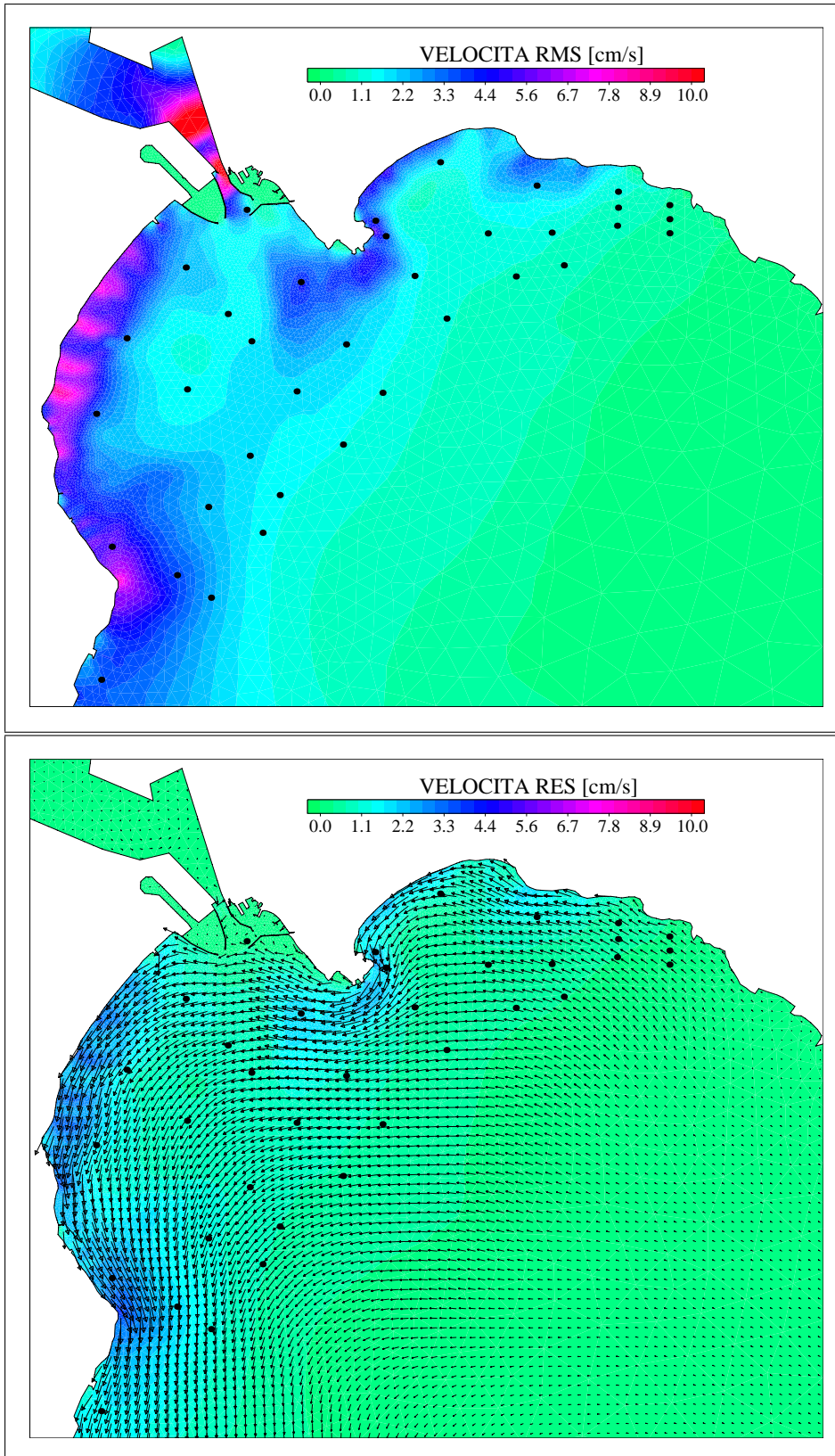


Figure 45. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Luglio 2005

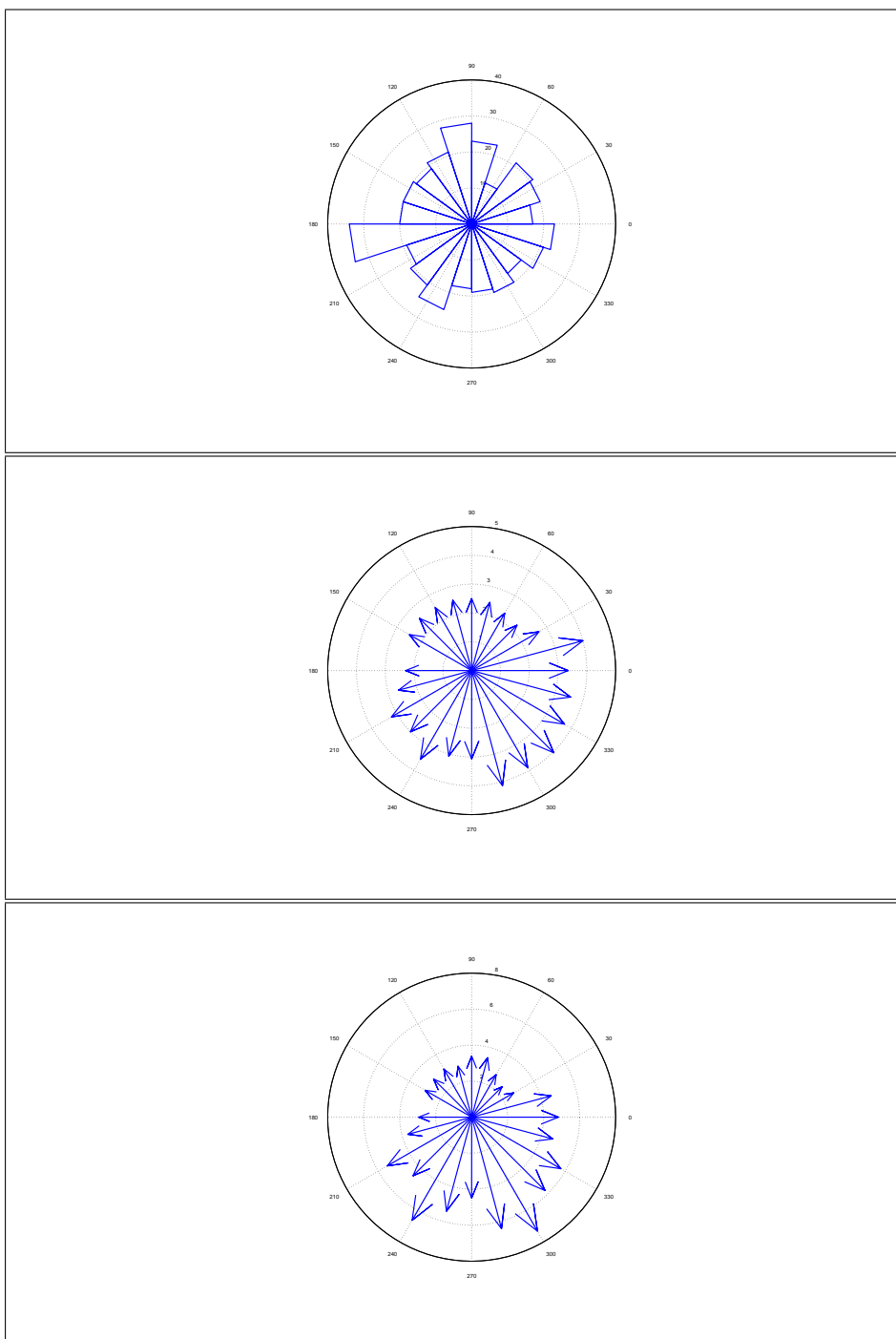


Figure 46. Statistiche dati anemometrici per il mese di Agosto 2005: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

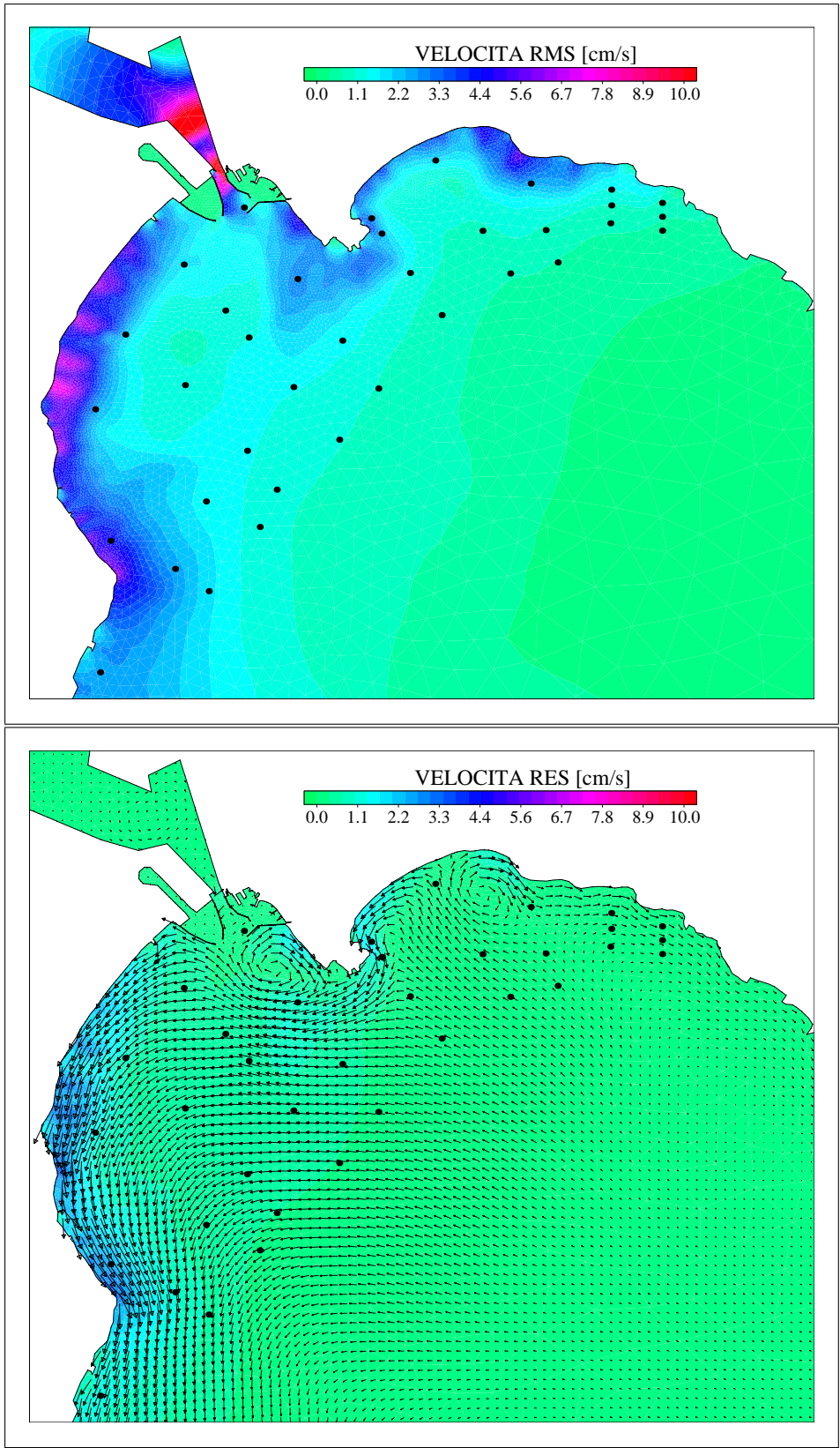


Figure 47. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Agosto 2005

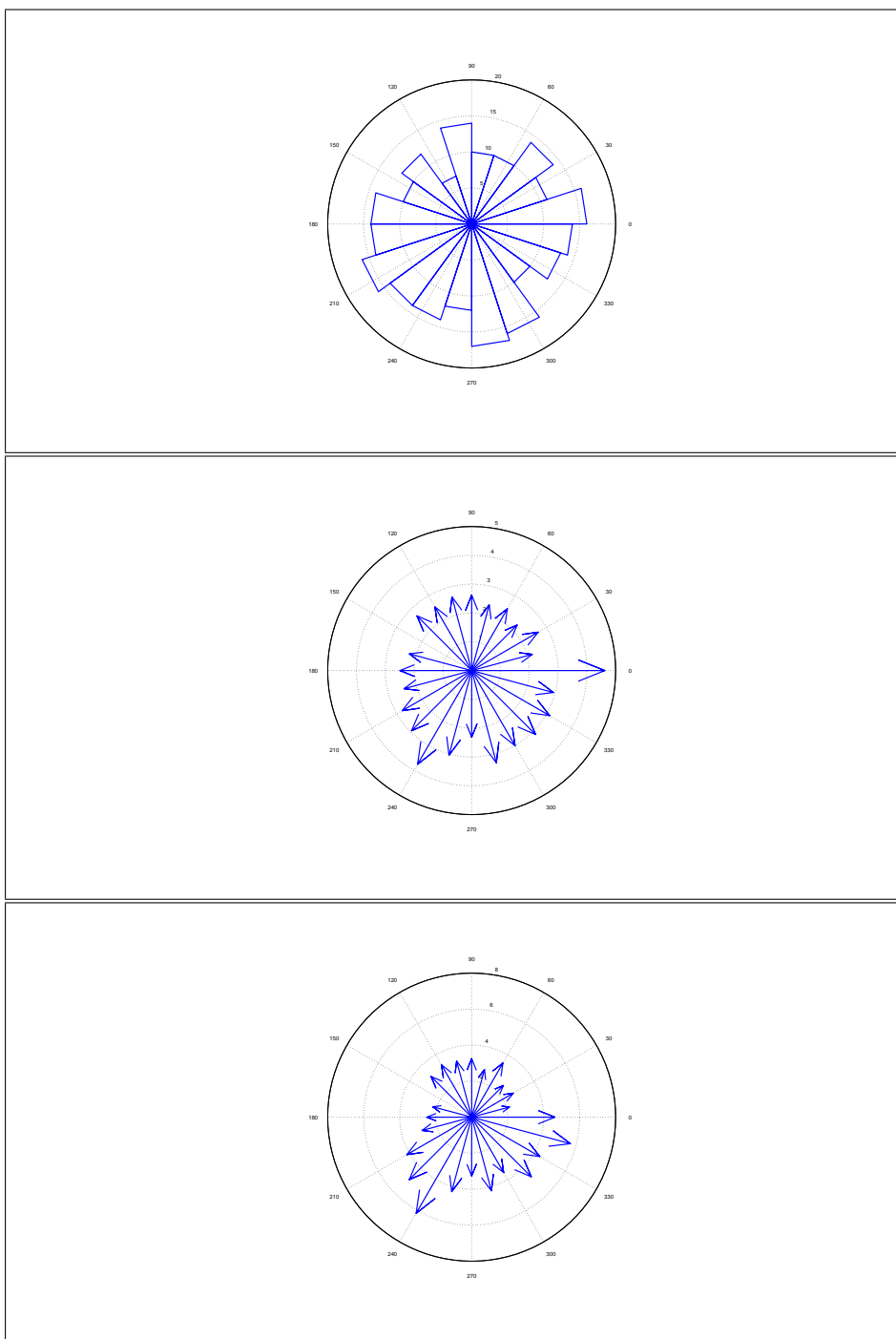


Figure 48. Statistiche dati anemometrici per il mese di Settembre 2005: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

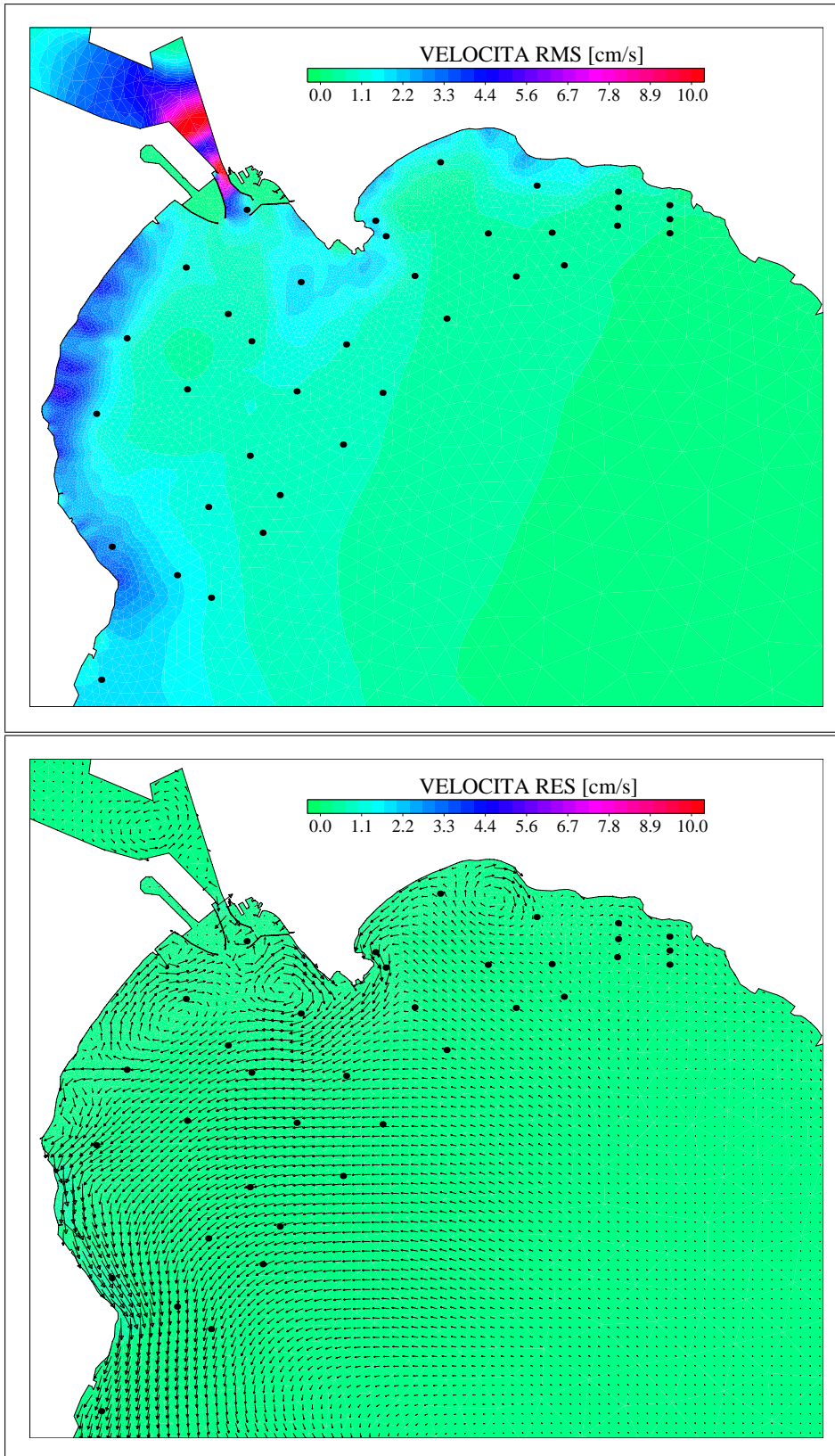


Figure 49. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Settembre 2005

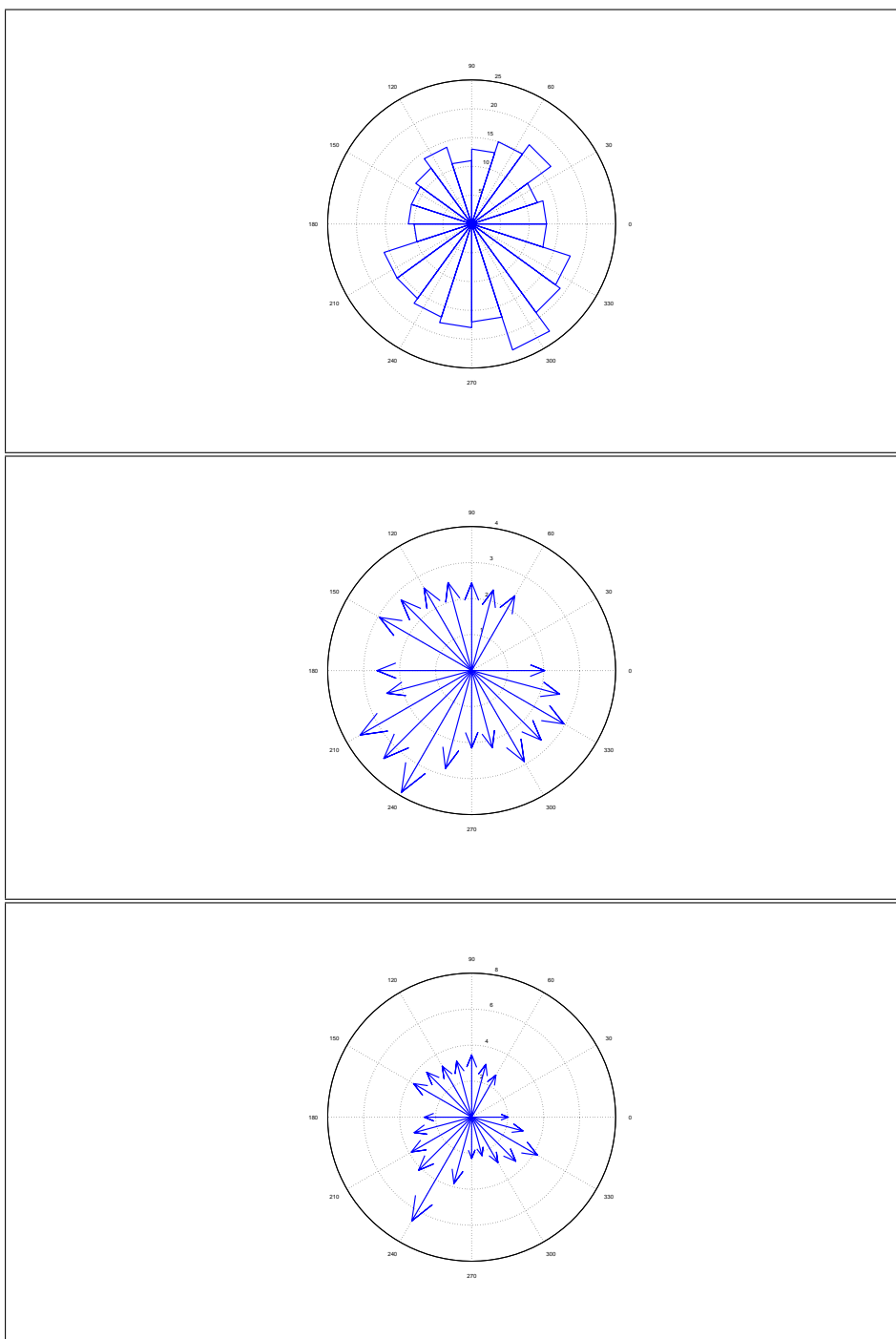


Figure 50. Statistiche dati anemometrici per il mese di Ottobre 2005: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

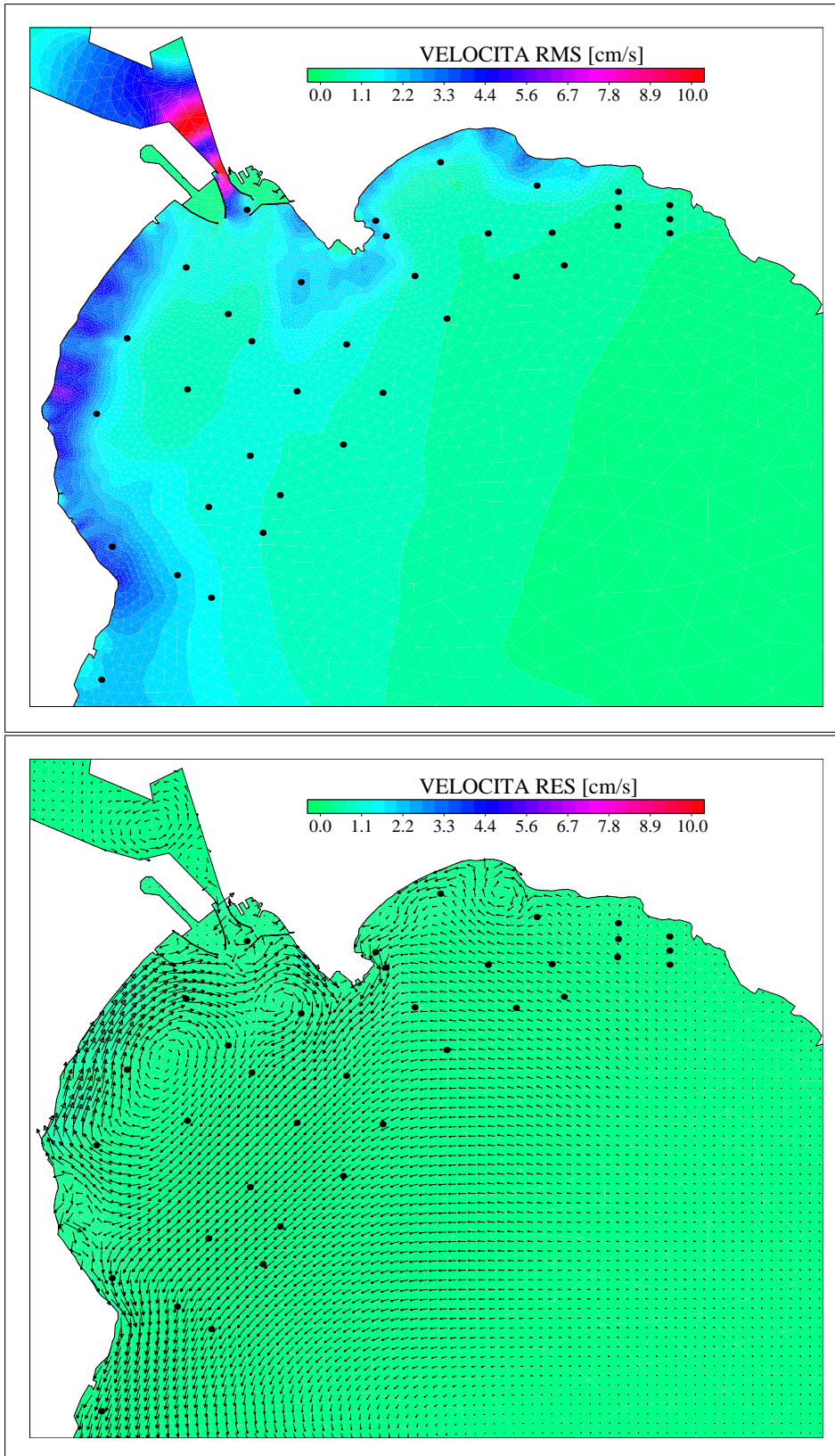


Figure 51. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Ottobre 2005

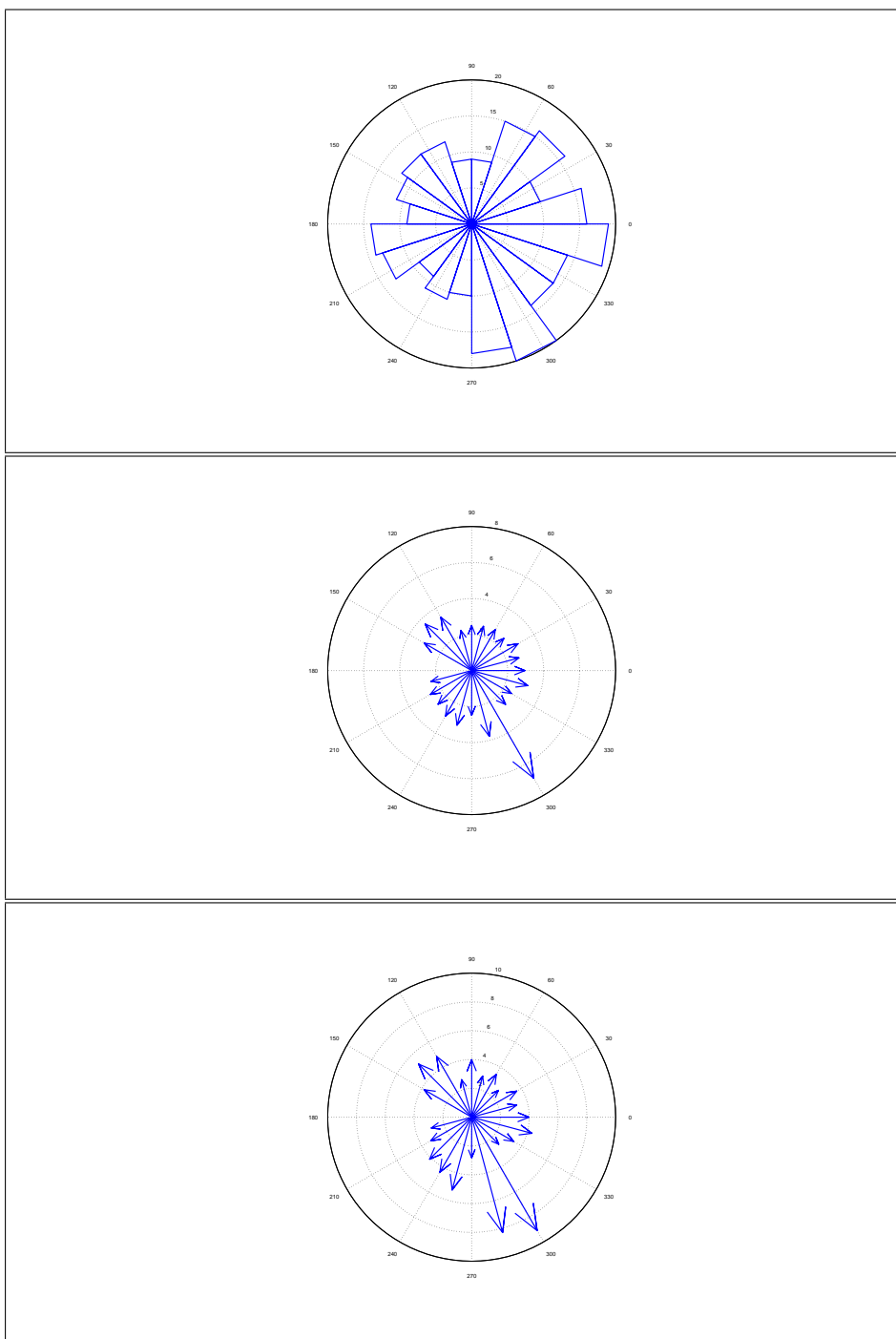


Figure 52. Statistiche dati anemometrici per il mese di Novembre 2005: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

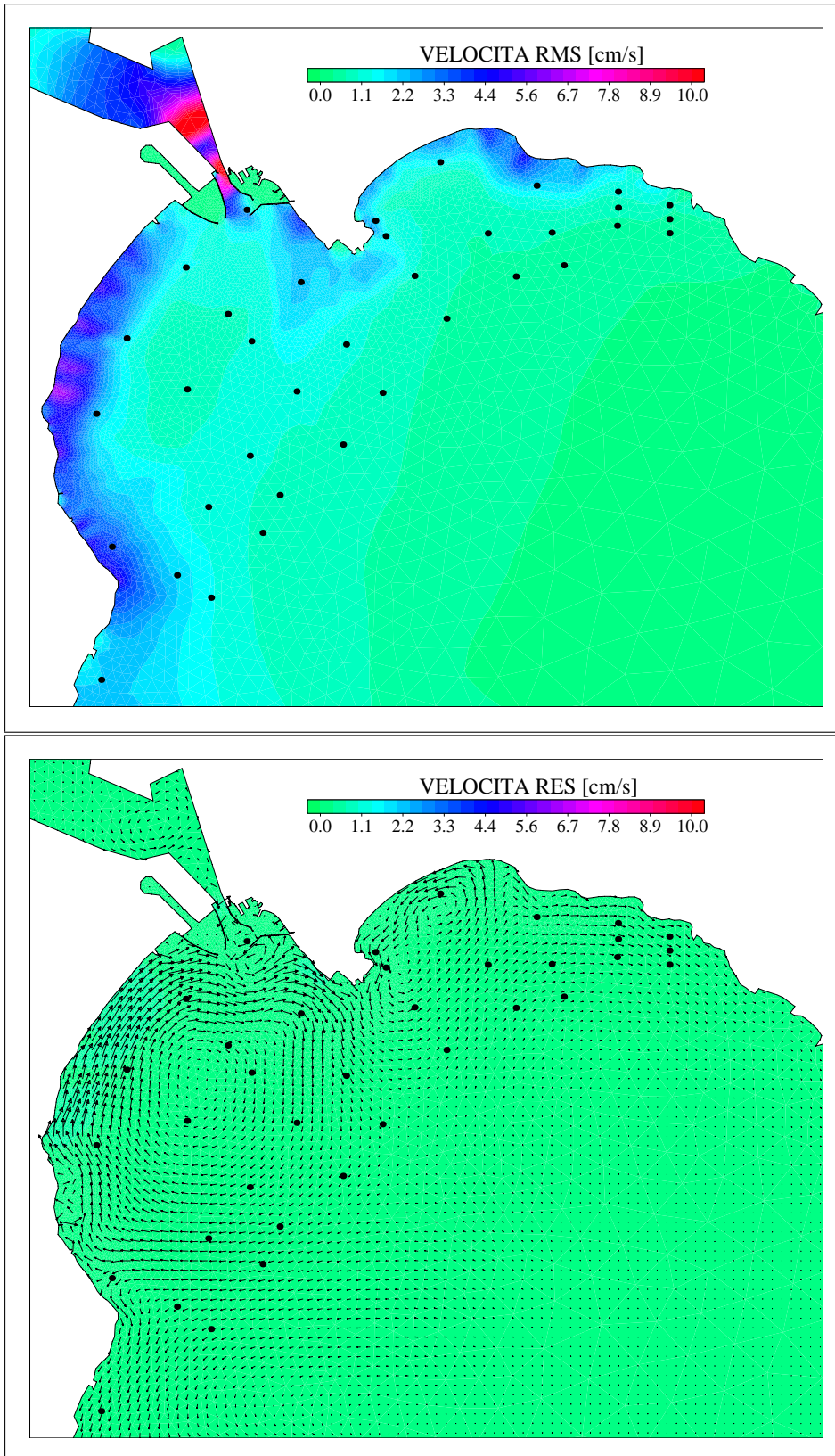


Figure 53. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Novembre 2005

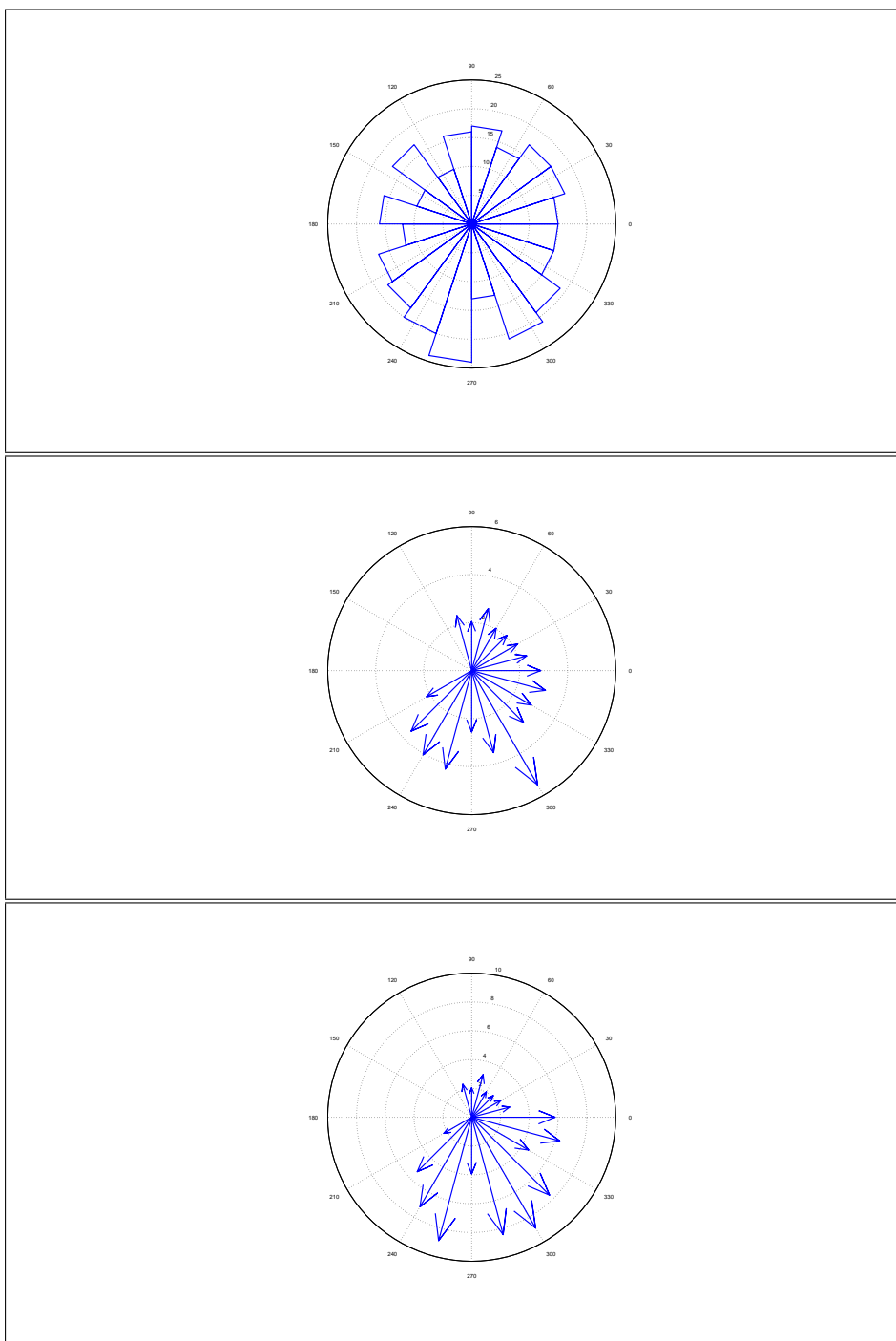


Figure 54. Statistiche dati anemometrici per il mese di Dicembre 2005: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

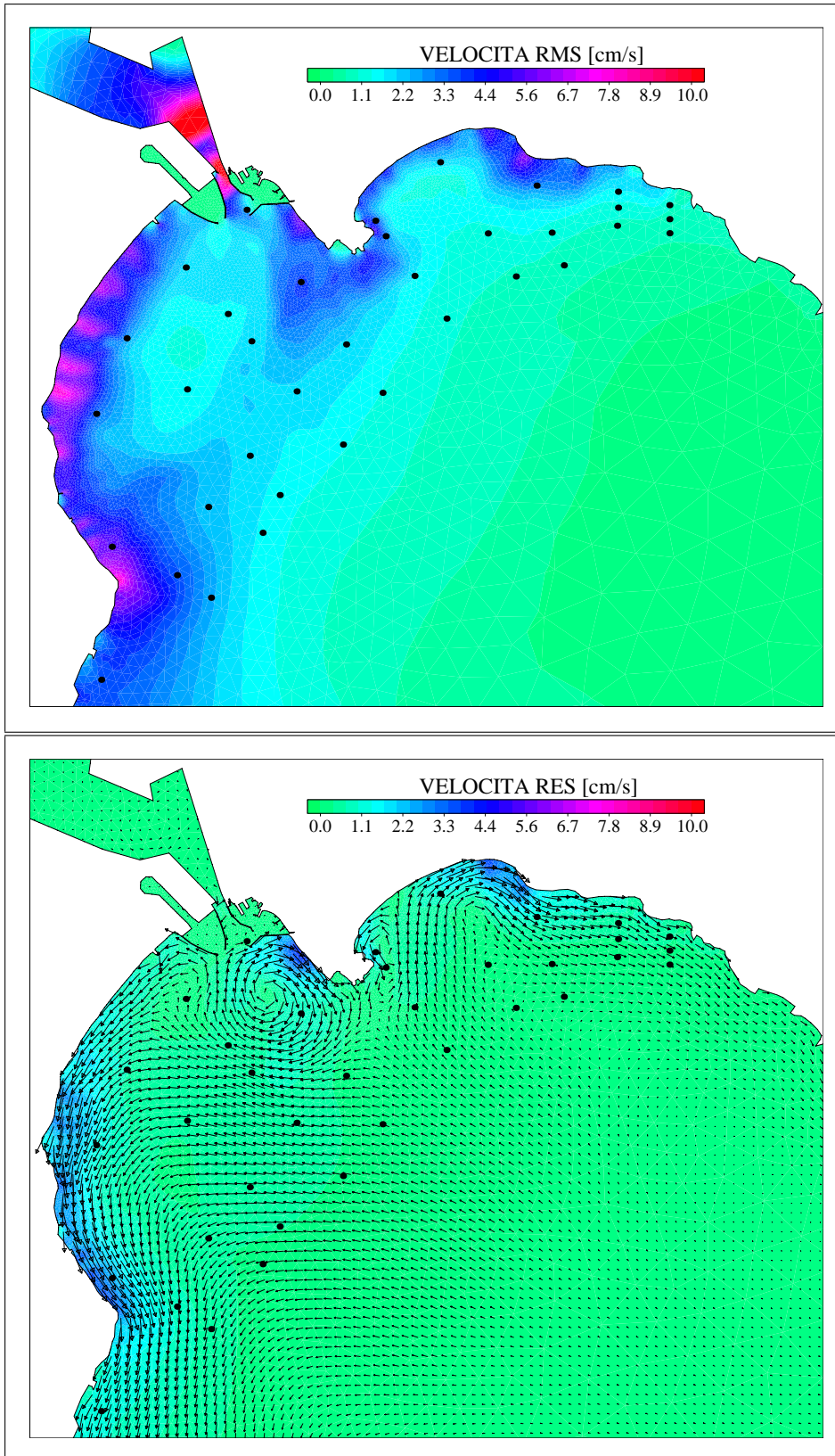


Figure 55. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Dicembre 2005

• Anno 2006 S6

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni e analisi statistiche dei dati anemometrici relative al periodo Gennaio 2006 Dicembre 2006.

Il mese di Gennaio 2006 (Fig. 57) é caratterizzato da una distribuzione della velocità media RMS qualitativamente analoga a quella ottenuta per l'intervallo di tempo 2005-2006, ovvero con valori mediamente elevati lungo le aree costiere e a ridosso del promontorio di Sant'Elia. Per quanto riguarda la circolazione residua RES, questa é caratterizzata da una corrente litoranea che interessa tutto il tratto di costa considerato diretta verso Ovest. In tale scenario non si ha la formazione di alcuna cella di circolazione stazionaria a ridosso del promontorio di Sant'Elia.

I mesi di Febbraio e Marzo 2006 sono caratterizzati da analoghi andamenti della circolazione residua RES e media RMS (Fig. 59 e Fig. 61). In particolare, la distribuzione della RMS risulta del tutto analoga all'andamento ottenuto per il periodo 2005 - 2006. La circolazione residua RES indotta dalle forzanti meteo-marine per gli intervalli di tempo considerati é del tutto simile alla circolazione indotta dal vento di maestrale ottenuta dalla simulazione dello scenario MS. In particolare, si possono individuare le due correnti costiere meridionali, la cella di circolazione inerziale e la corrente di divergenza che tende a trasportare le masse d'acqua dalle aree esterne verso le aree costiere. Tali strutture si ritrovano anche negli analoghi periodi dell'anno 2005 eccezione fatta per la cella di circolazione inerziale che risulta stabile solo per i periodi dell'anno 2006.

Il mese di Aprile 2006 (Fig. 63) presenta caratteristiche analoghe ai risultati precedentemente descritti per quanto riguarda la distribuzione della velocità media RMS. Per quanto concerne la circolazione residua RES, si riscontra una analogia con quella calcolata per il mese di Dicembre 2005. In particolare, si nota la cella di circolazione inerziale nell'area antistante il Porto di Cagliari e la corrente diretta verso Ovest che interessa la maggior parte del tratto costiero di interesse.

Il mese di Maggio 2006 (Fig. 65) é caratterizzato da una distribuzione della velocità media RMS analoga alle precedenti, mentre la circolazione residua RES risulta del tutto simile a quella calcolata per il periodo di Gennaio 2006 ovvero caratterizzata da una corrente costiera diretta verso Ovest che lambisce l'intera area di interesse. A differenza con il precedente caso, non si ha la formazione di nessuna cella di circolazione inerziale a ridosso del promontorio di Sant'Elia.

I mesi di Giugno e Luglio 2006 sono caratterizzati dall'analogia e ripetuta struttura di circolazione media RMS (Fig. 67 e Fig. 69), inoltre presentano similitudini di tipo quantitativo per quanto concerne la circolazione residua

RES. In particolare, in entrambi i casi, i valori di corrente residua sono molto bassi o quasi nulli. Per quanto riguarda il mese di Giugno si può notare la formazione di una cella di circolazione che interessa tutta l'area ad Ovest del promontorio di Sant'Elia con intensificazioni lungo i tratti litoranei. Nel caso di Luglio si ha un'evoluzione della precedente struttura inerziale che tende ad avvicinarsi verso costa a seguito della formazione di una corrente esterna diretta verso Ovest che interessa, per estensione tutta l'area di interesse.

Il mese di Agosto 2006 (Fig. 71) presenta la stessa distribuzione della velocità media RMS, precedentemente descritta. Per quanto riguarda la circolazione residua RES questa risulta del tutto analoga a quella descritta per il mese di Aprile 2006, ovvero caratterizzata dalla cella di circolazione inerziale a ridosso del promontorio di Sant'Elia, dalla corrente costiera diretta verso Ovest che interessa la maggior parte dell'area di interesse.

Il mese di Settembre 2006 (Fig. 73) caratterizzato dalla già descritta distribuzione di intensità media della corrente RMS, presenta una circolazione residua costituita da una corrente prevalentemente diretta verso Est con intensificazioni lungo i tratti costieri.

I mesi di Ottobre e Novembre 2006 sono caratterizzati dall'analoga e ripetuta struttura di circolazione media RMS (Fig. 75 e Fig. 77), e da analogie di tipo quantitativo per quanto concerne la circolazione residua RES. In particolare, in entrambi i casi l'intensità media della circolazione residua RES risulta molto bassa e spesso nulla. Per quanto concerne la struttura della circolazione, nel caso del mese di Settembre 2006 si nota la presenza di una corrente esterna monotona diretta verso Ovest che genera lungo il tratto litoraneo ad Ovest del Porto Canale instabilità che danno luogo a celle di circolazione instabili e poco definite. Nel mese di Novembre 2006, la corrente costiera viene interrotta in particolar modo nell'area antistante porto industriale da una serie di celle di circolazione che tendono ad allontanare il flusso principale dalla linea di riva.

Infine il mese di Dicembre 2006 (Fig. 79), sempre caratterizzato dalla già descritta distribuzione di intensità media della corrente RMS, presenta una circolazione residua RES analoga a quella descritta per il mese di Gennaio 2006 ovvero caratterizzata dalla corrente costiera diretta verso Ovest e dalla cella di circolazione in prossimità del promontorio di Sant'Elia.

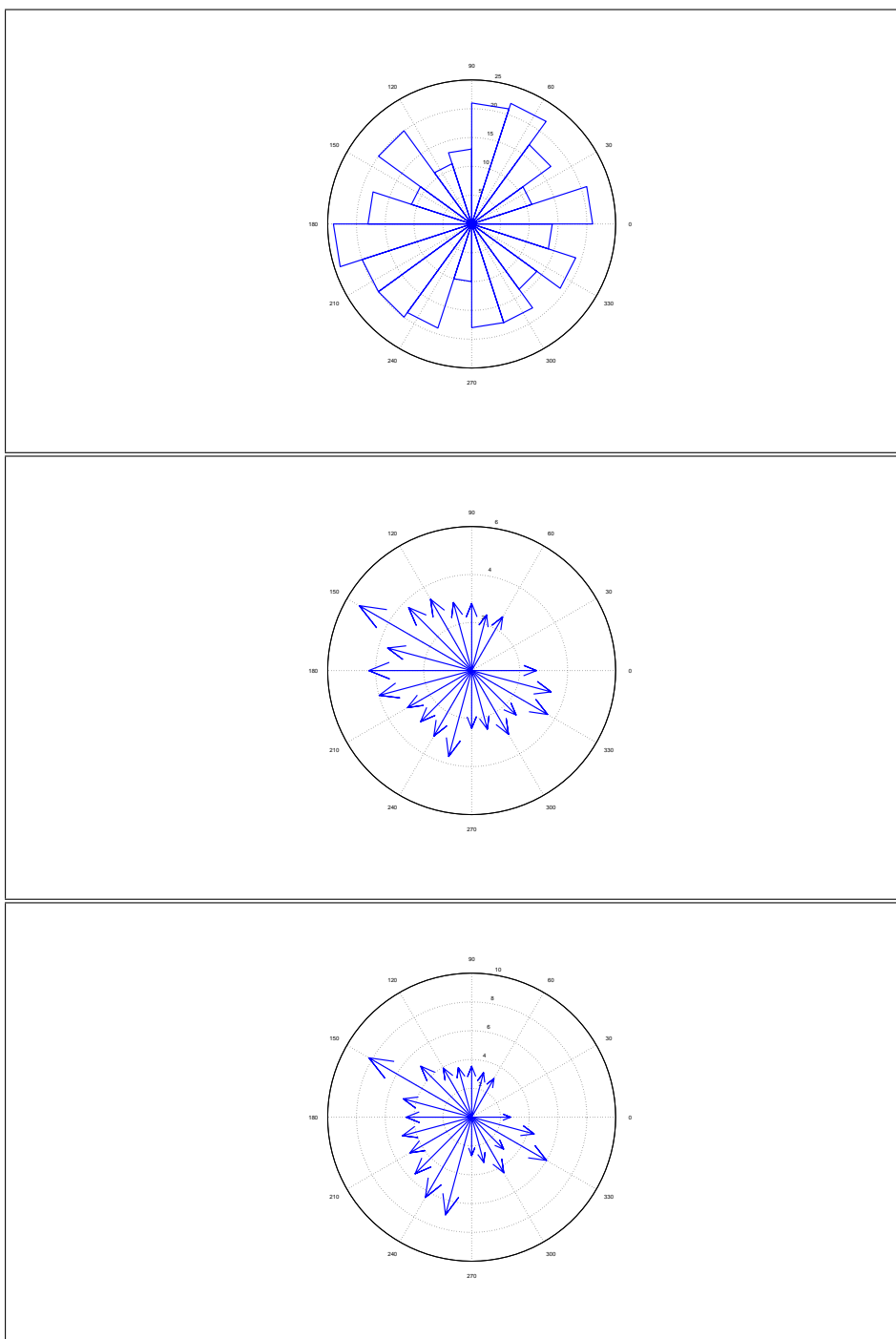


Figure 56. Statistiche dati anemometrici per il mese di Gennaio 2006: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

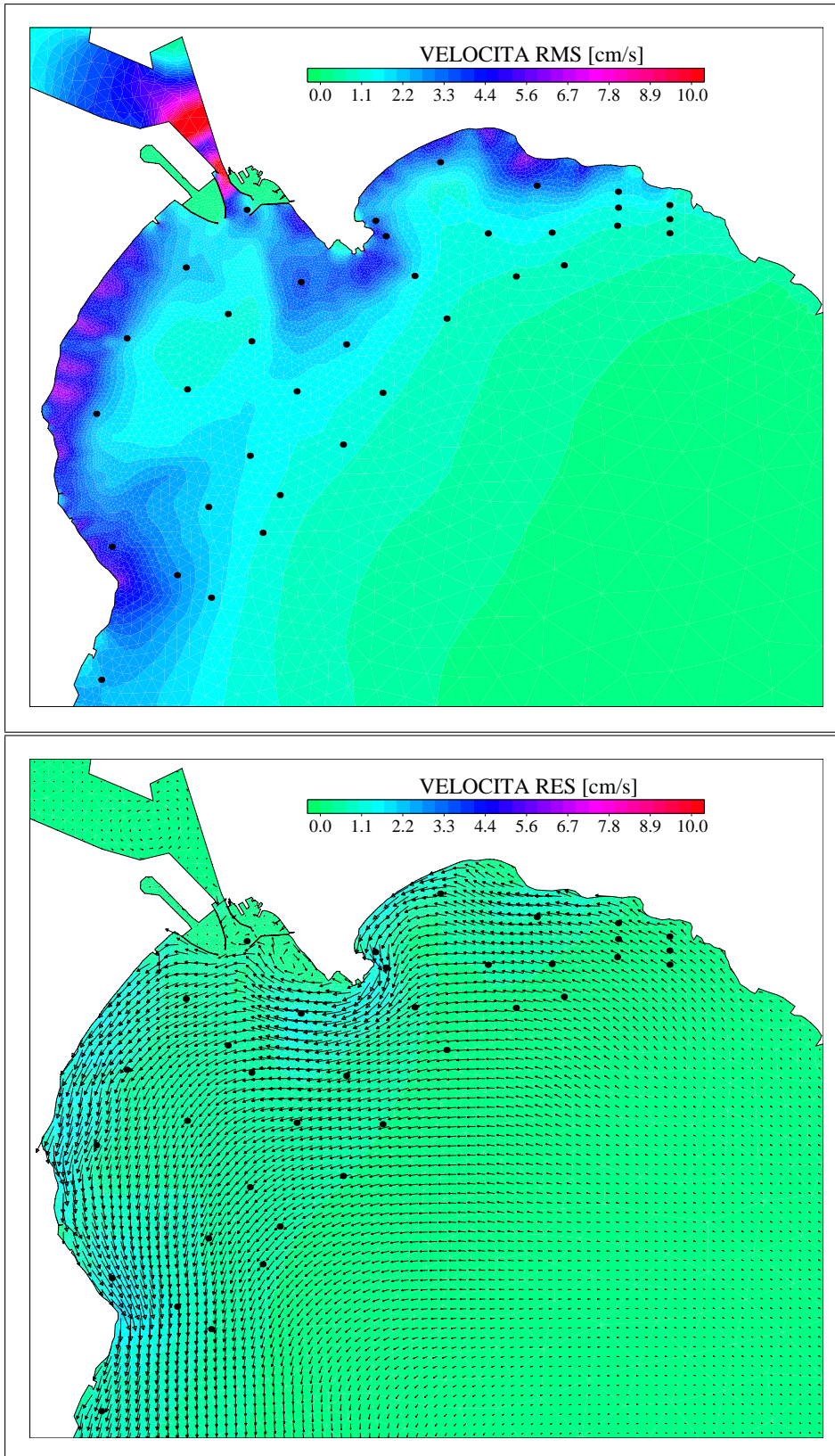


Figure 57. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Gennaio 2006

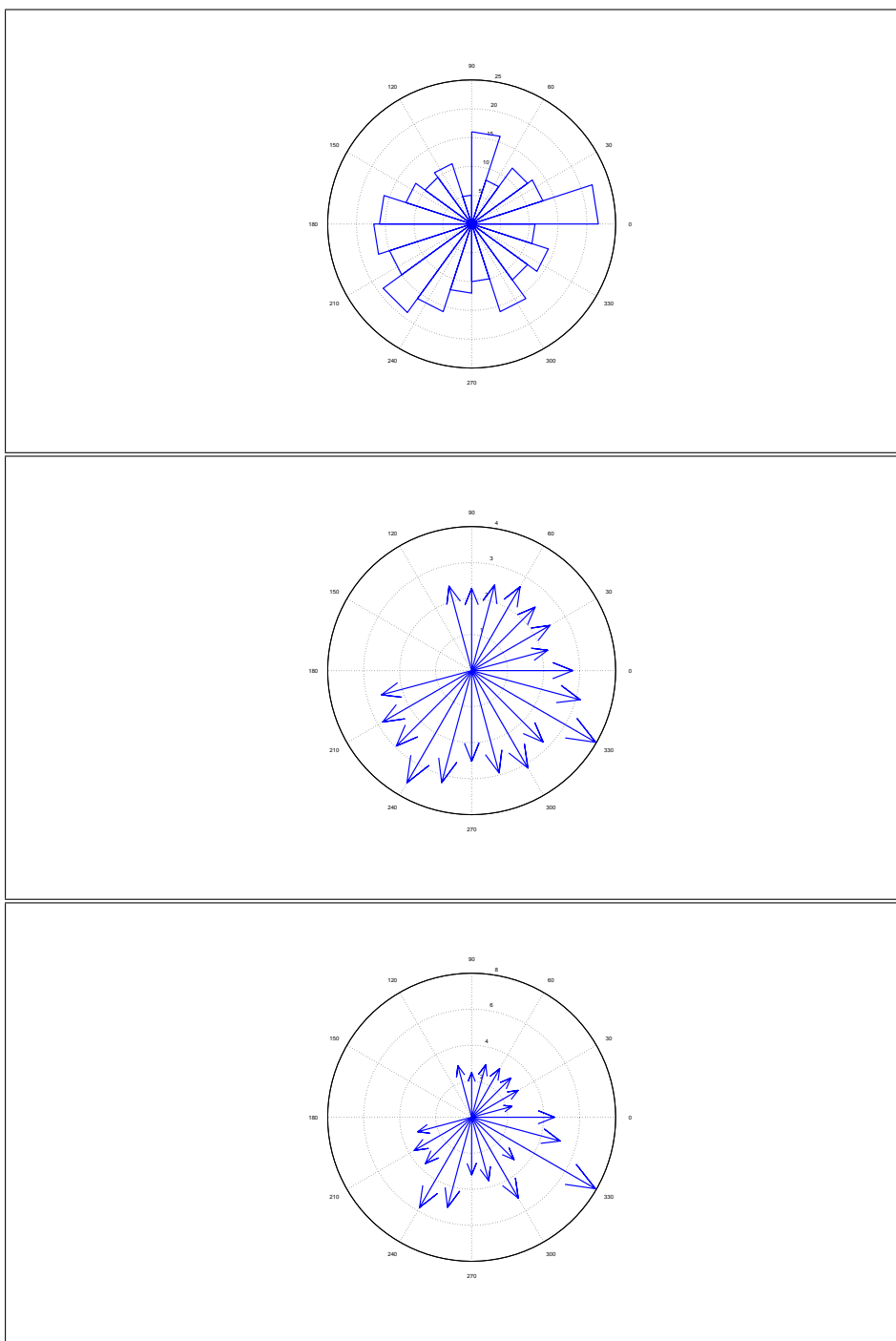


Figure 58. Statistiche dati anemometrici per il mese di Febbraio 2006: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

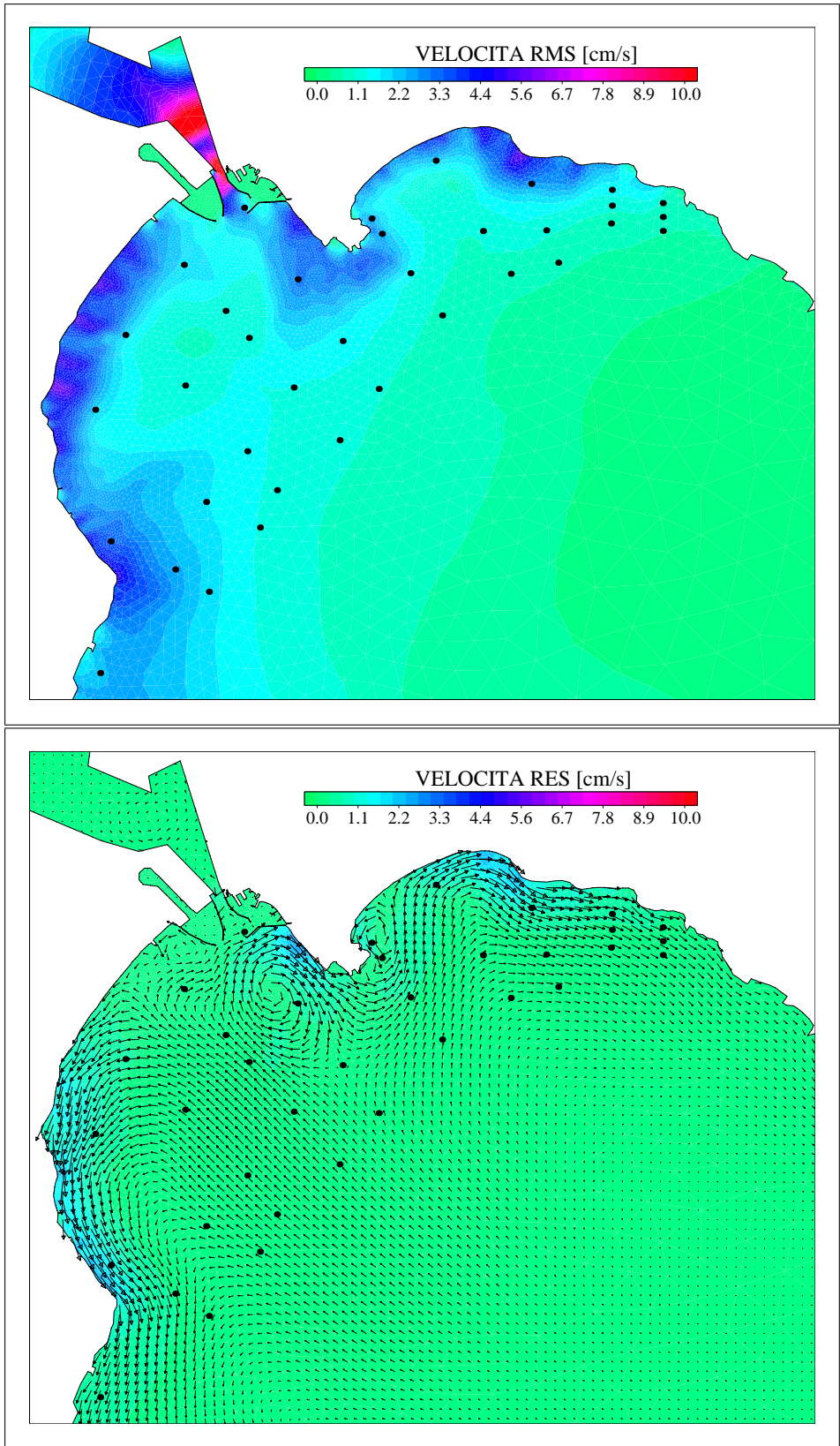


Figure 59. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Febbraio 2006

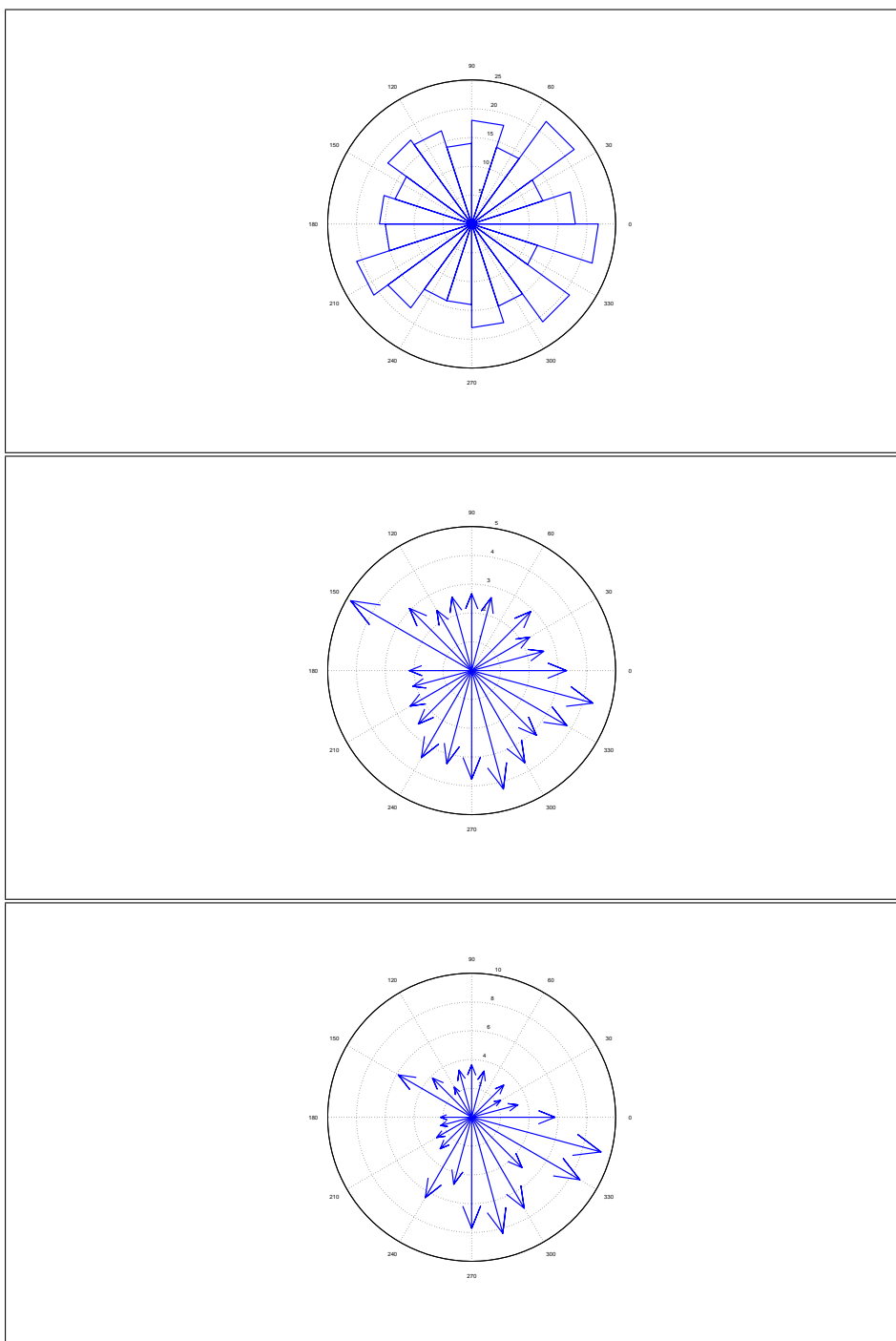


Figure 60. Statistiche dati anemometrici per il mese di Marzo 2006: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

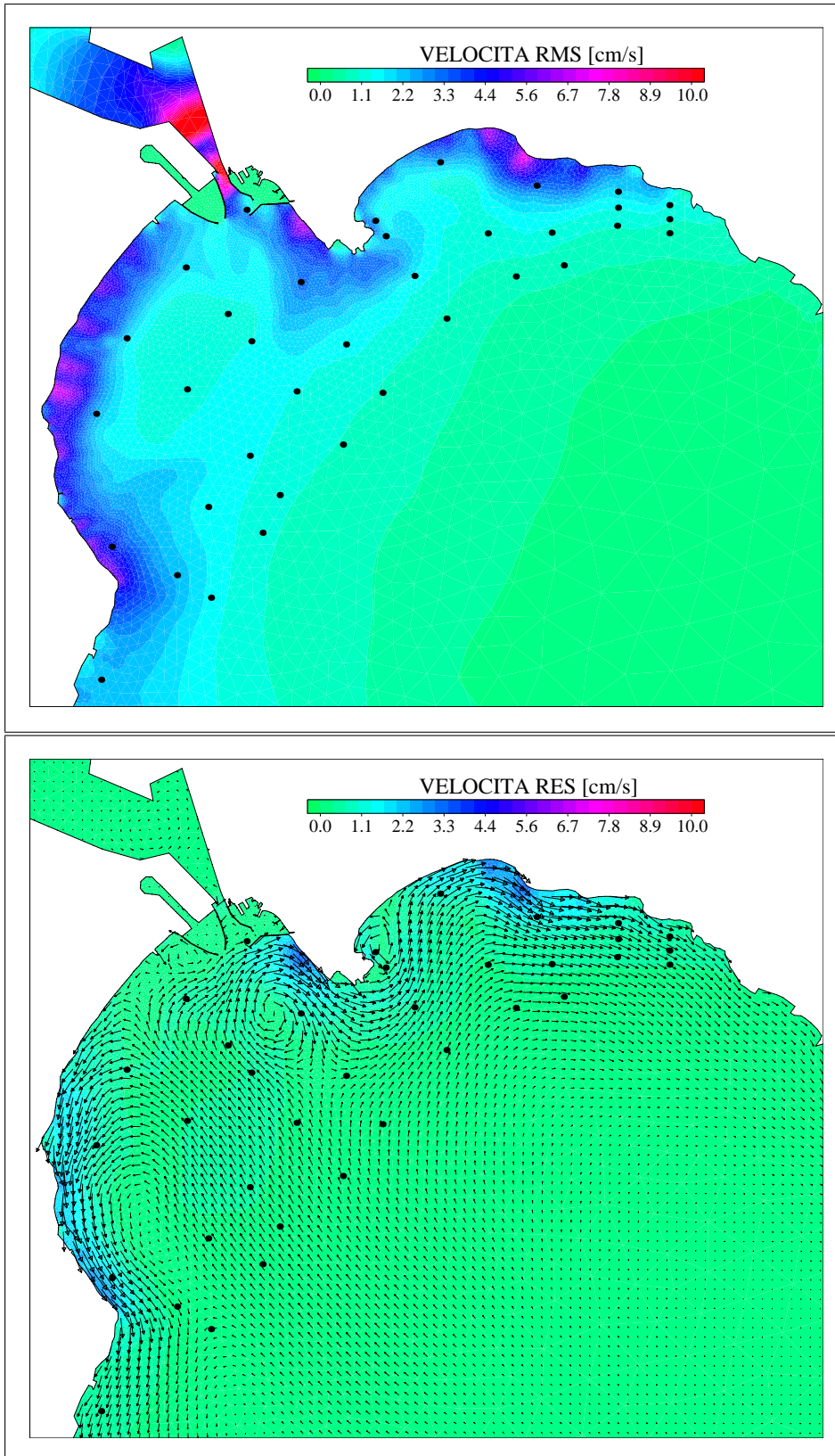


Figure 61. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Marzo 2006

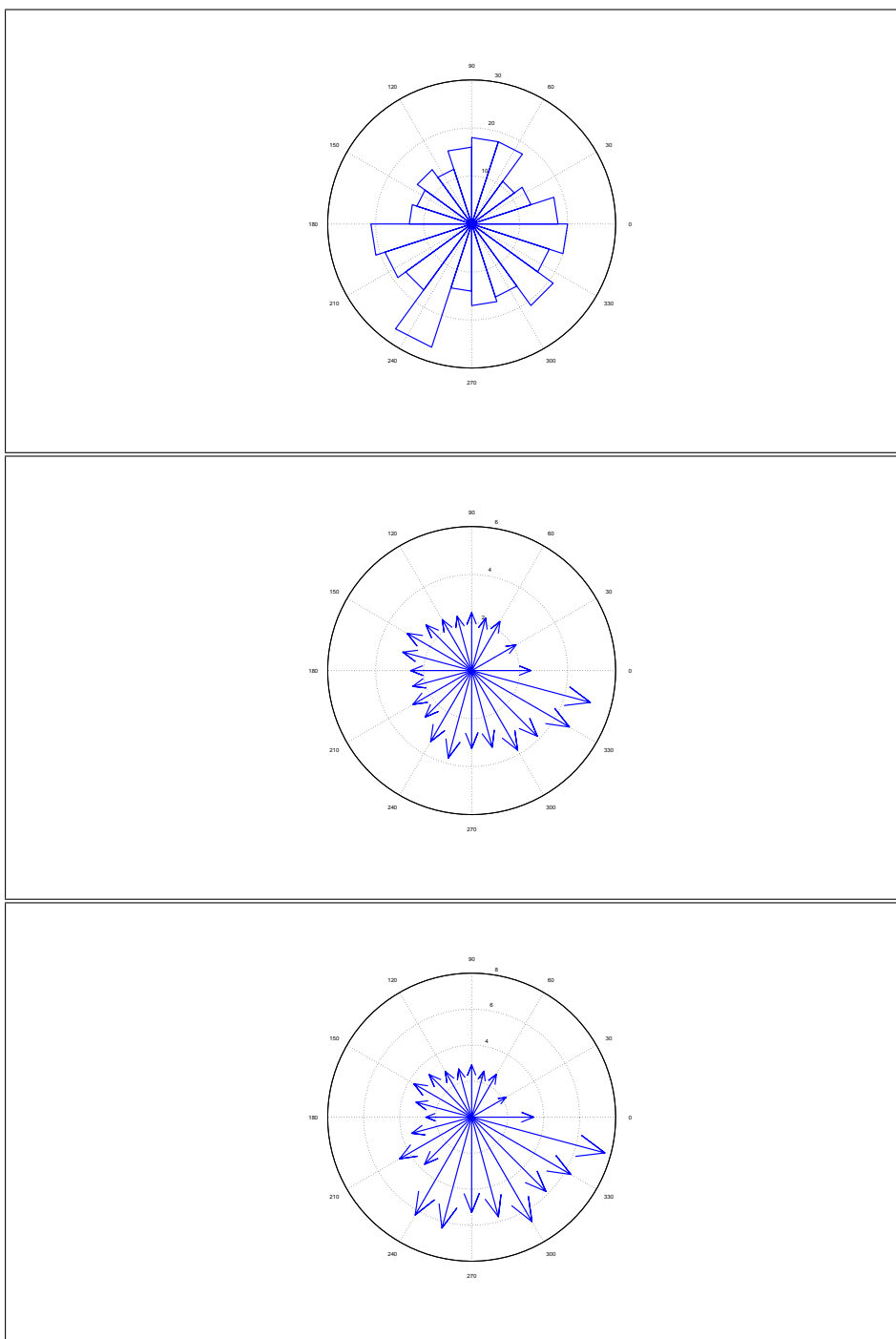


Figure 62. Statistiche dati anemometrici per il mese di Aprile 2006: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

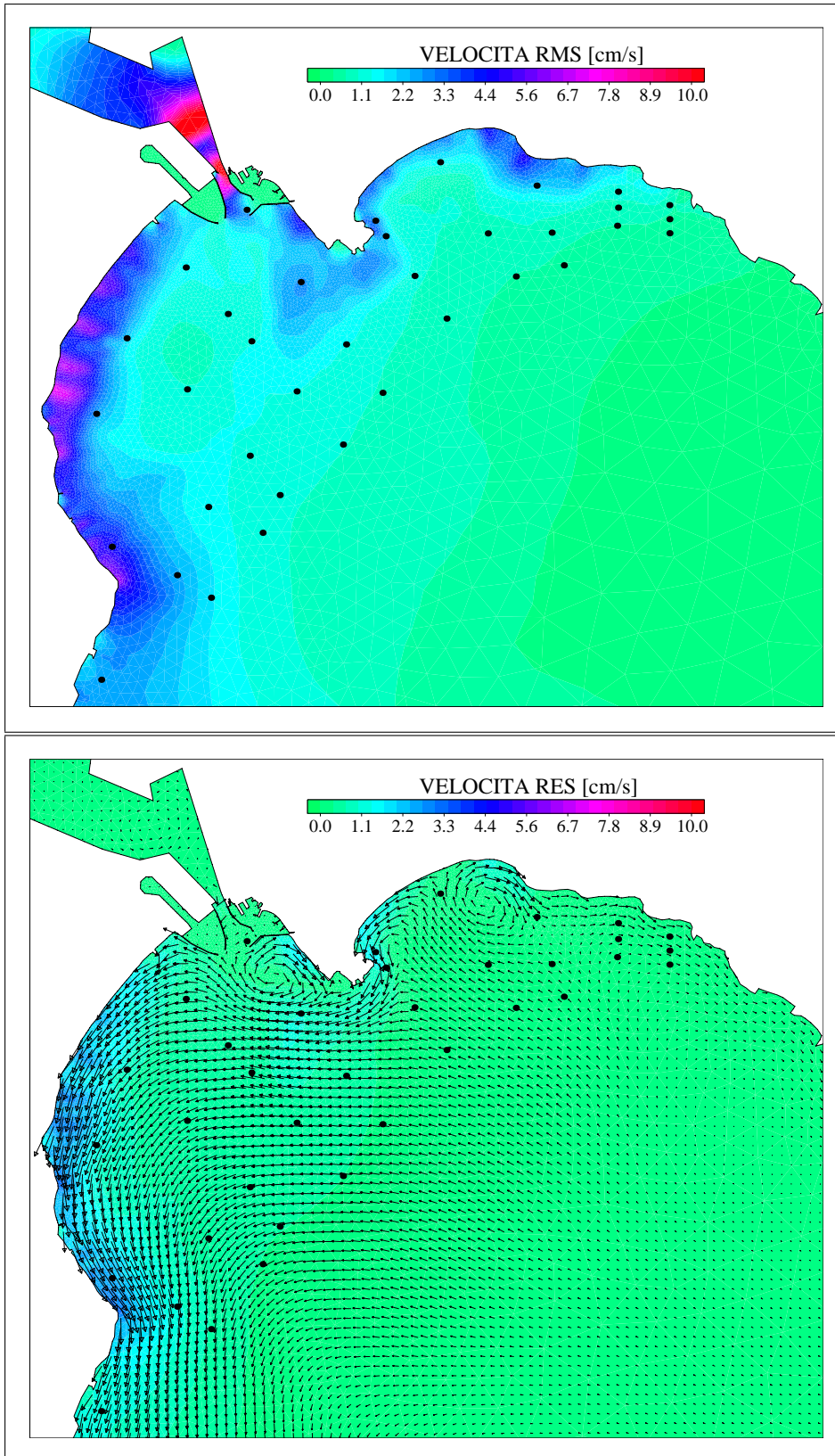


Figure 63. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Aprile 2006

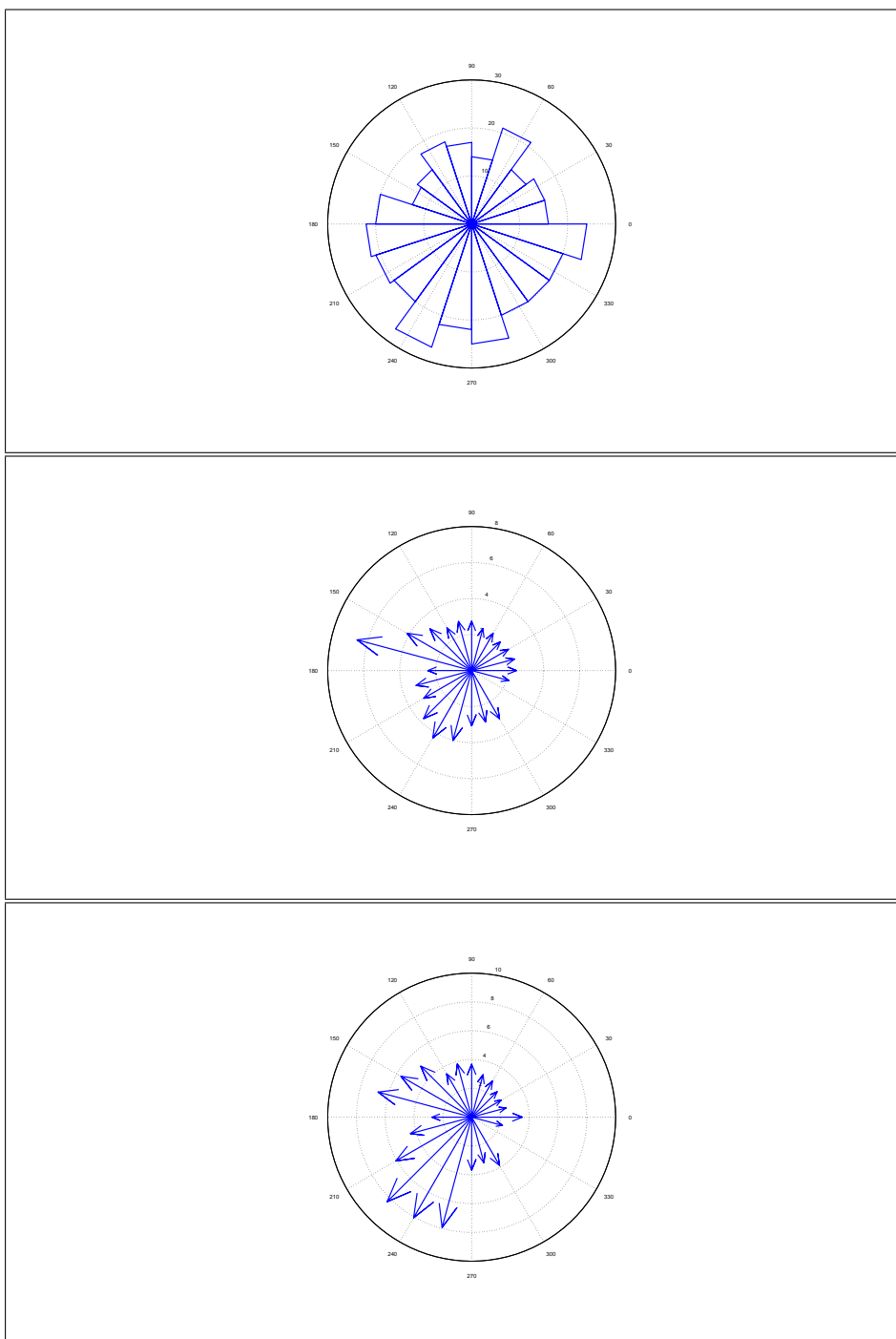


Figure 64. Statistiche dati anemometrici per il mese di Maggio 2006: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

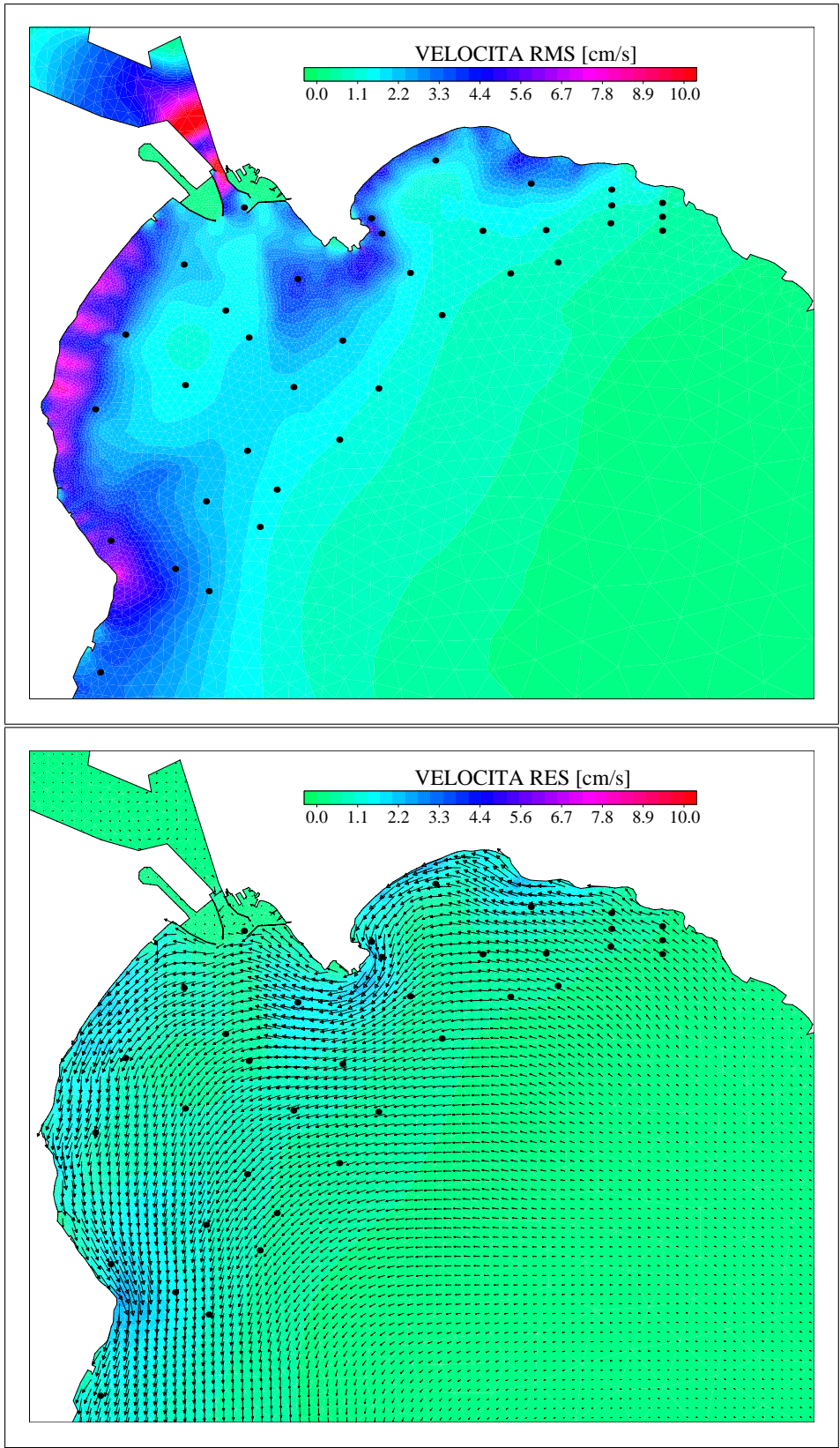


Figure 65. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Maggio 2006

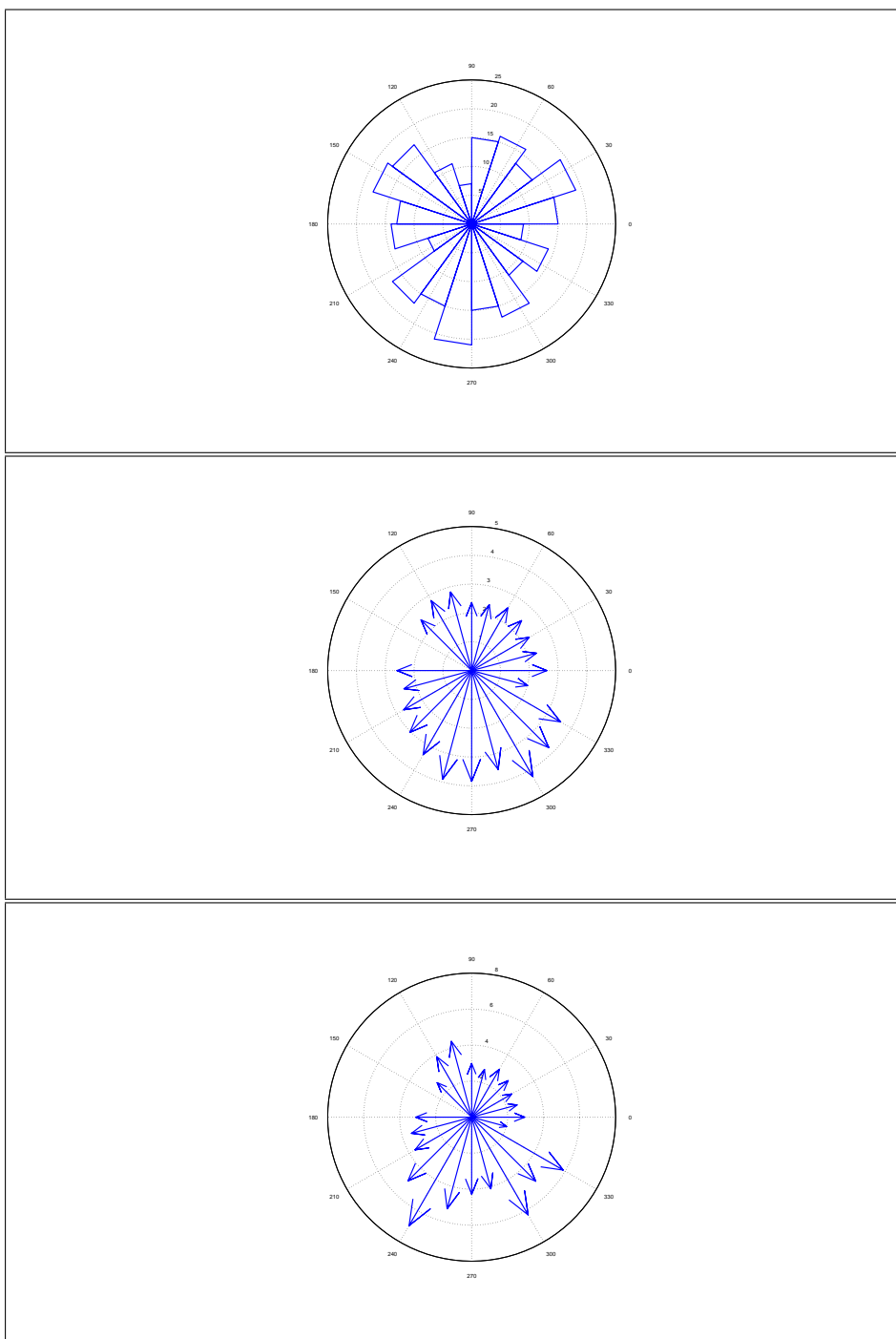


Figure 66. Statistiche dati anemometrici per il mese di Giugno 2006: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

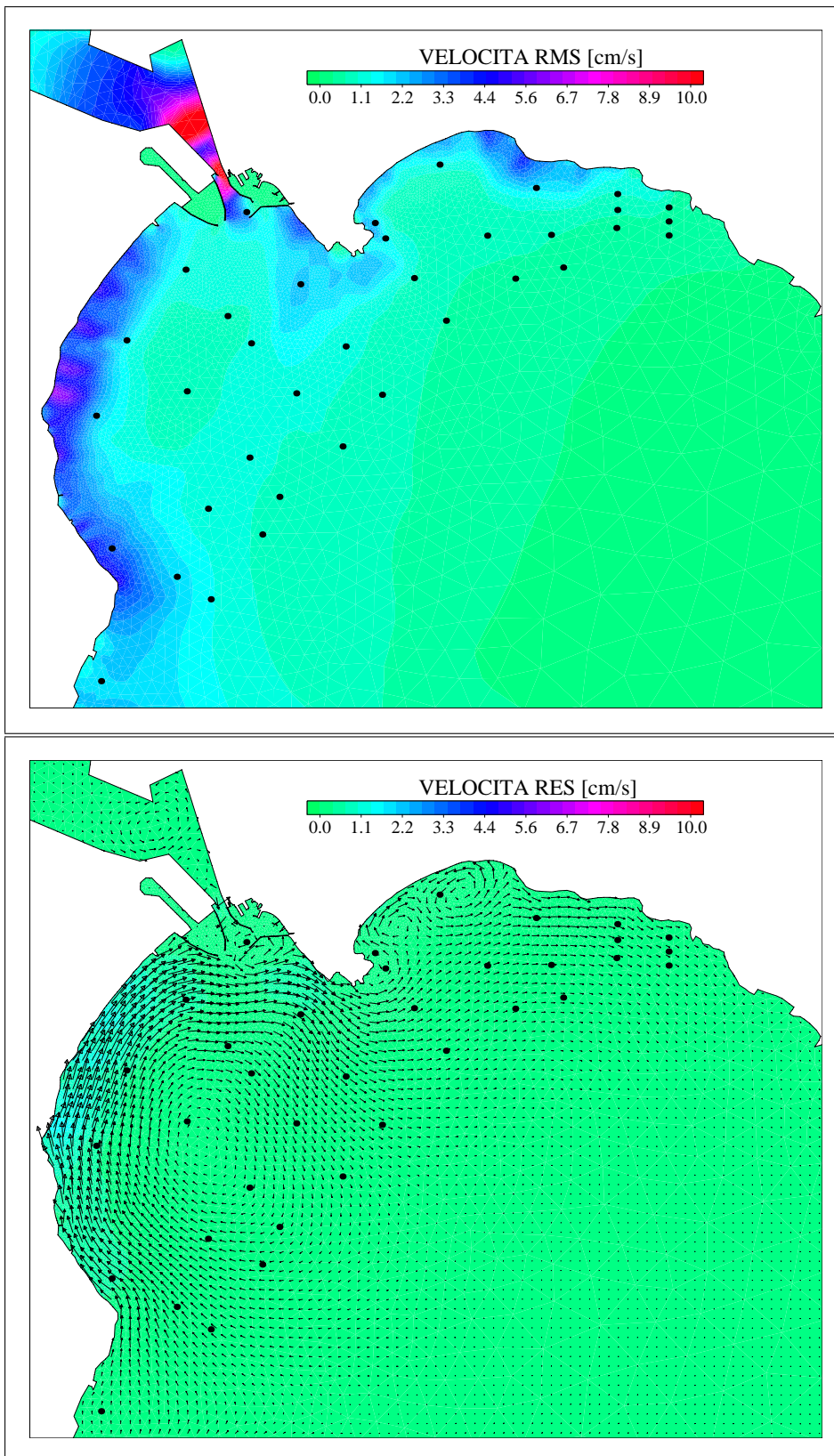


Figure 67. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Giugno 2006

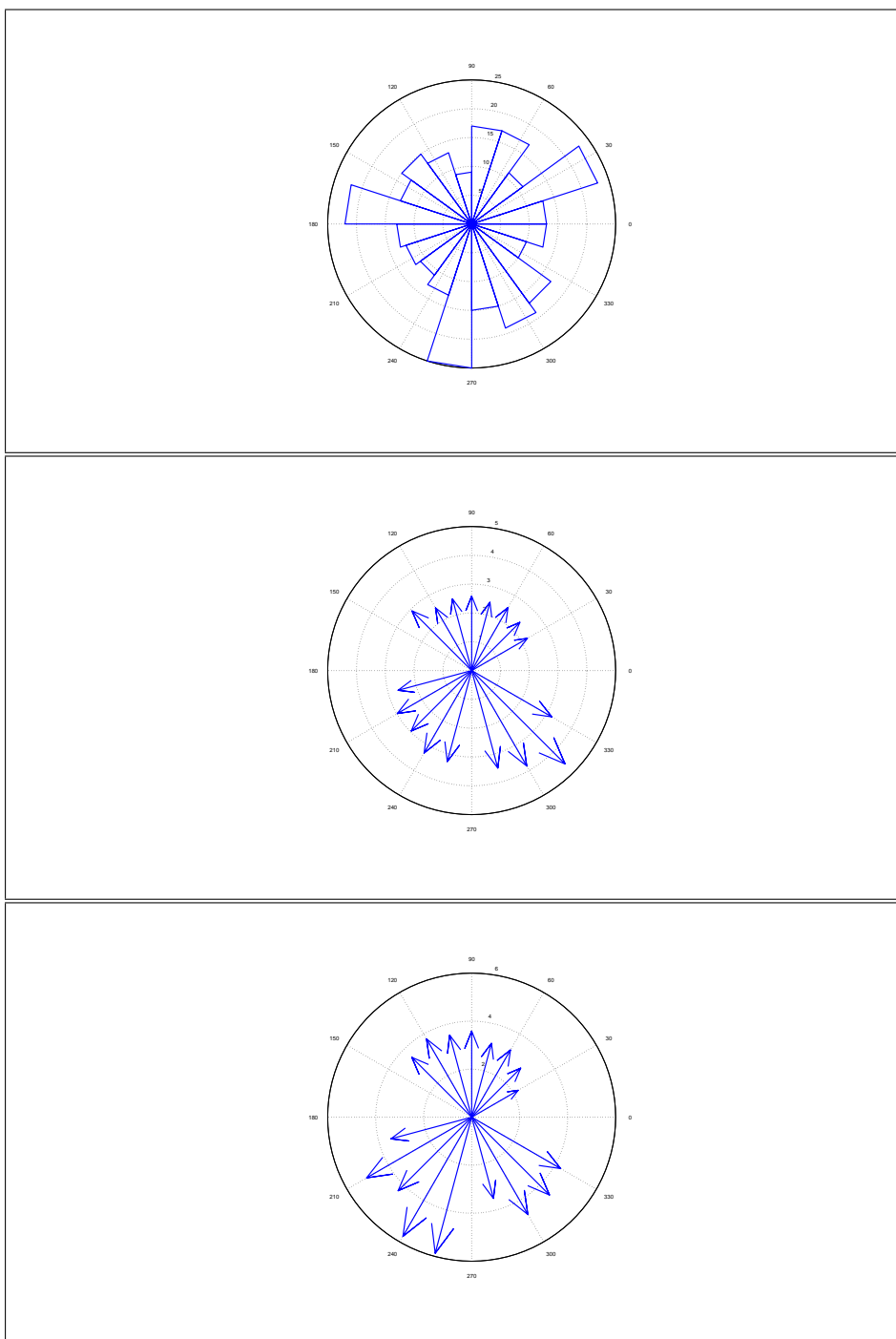


Figure 68. Statistiche dati anemometrici per il mese di Luglio 2006: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

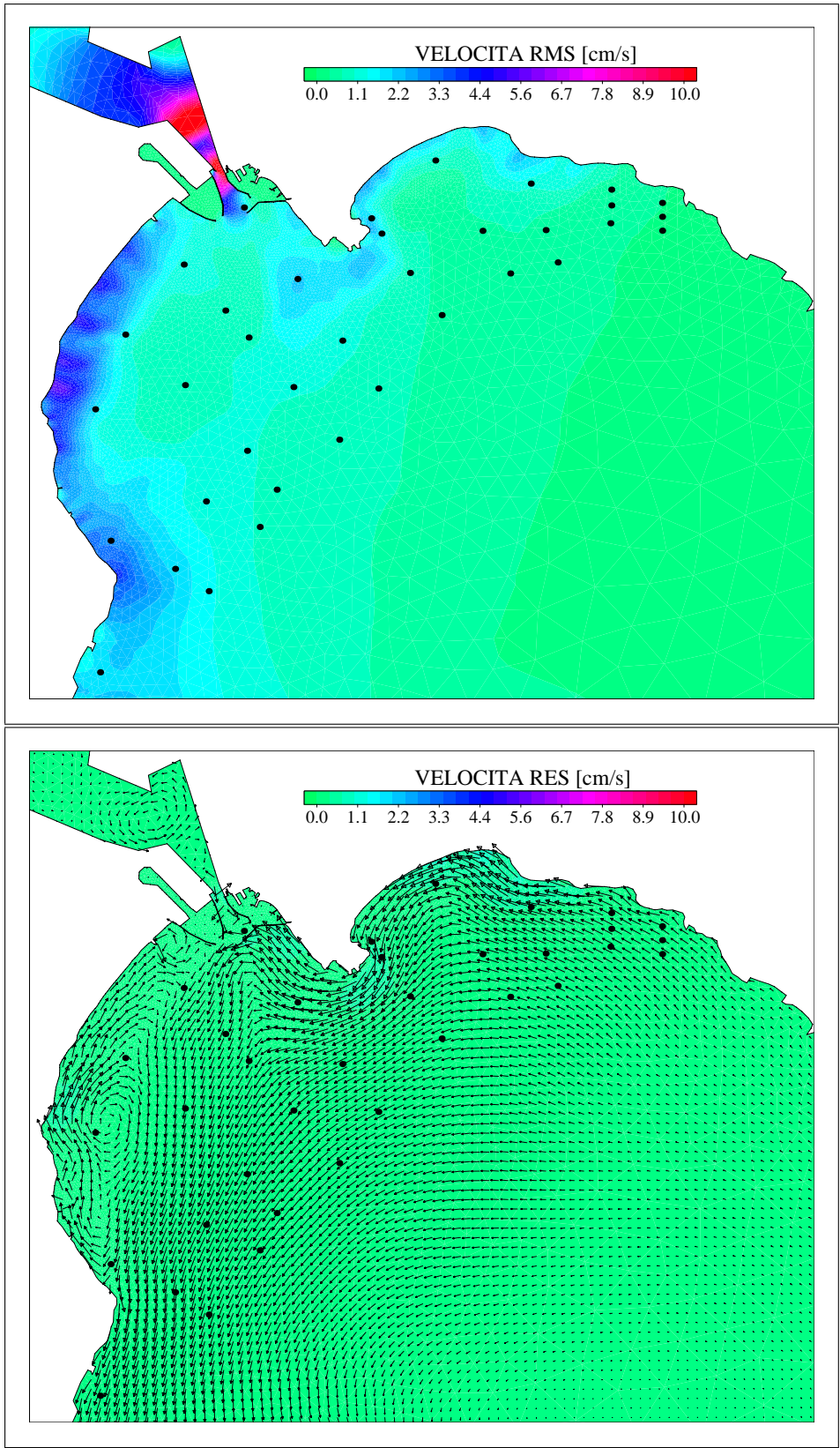


Figure 69. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Luglio 2006

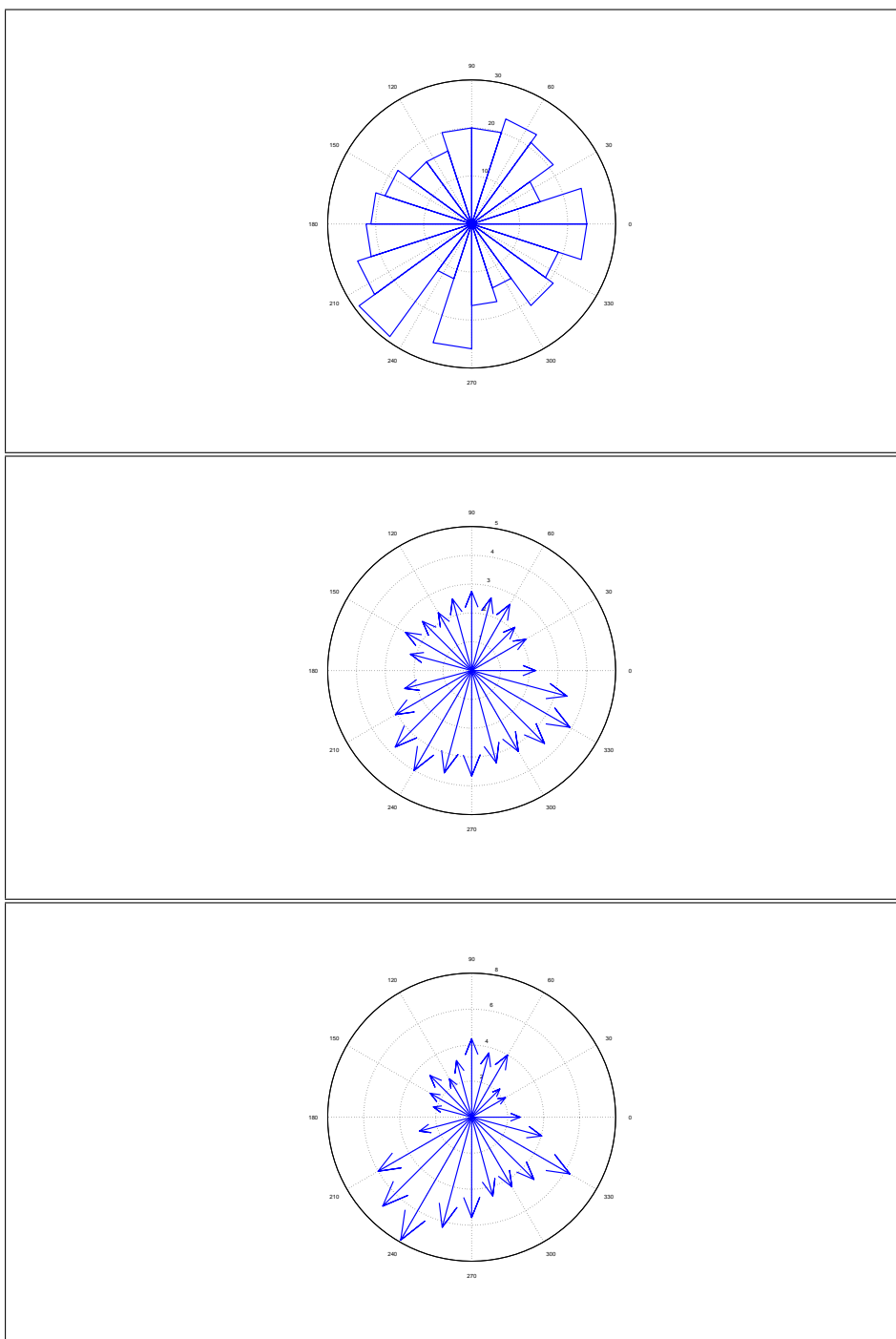


Figure 70. Statistiche dati anemometrici per il mese di Agosto 2006: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

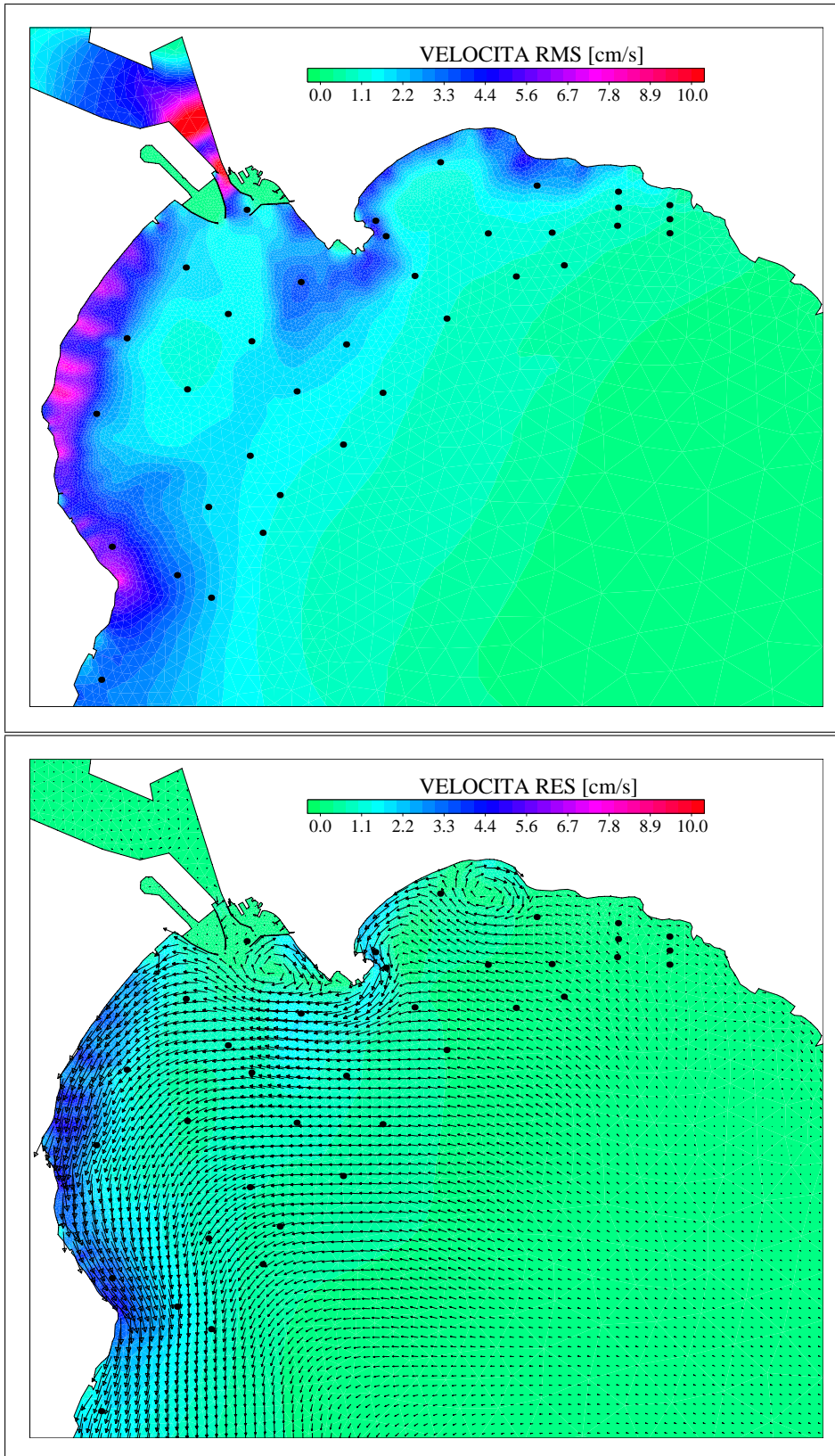


Figure 71. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Agosto 2006

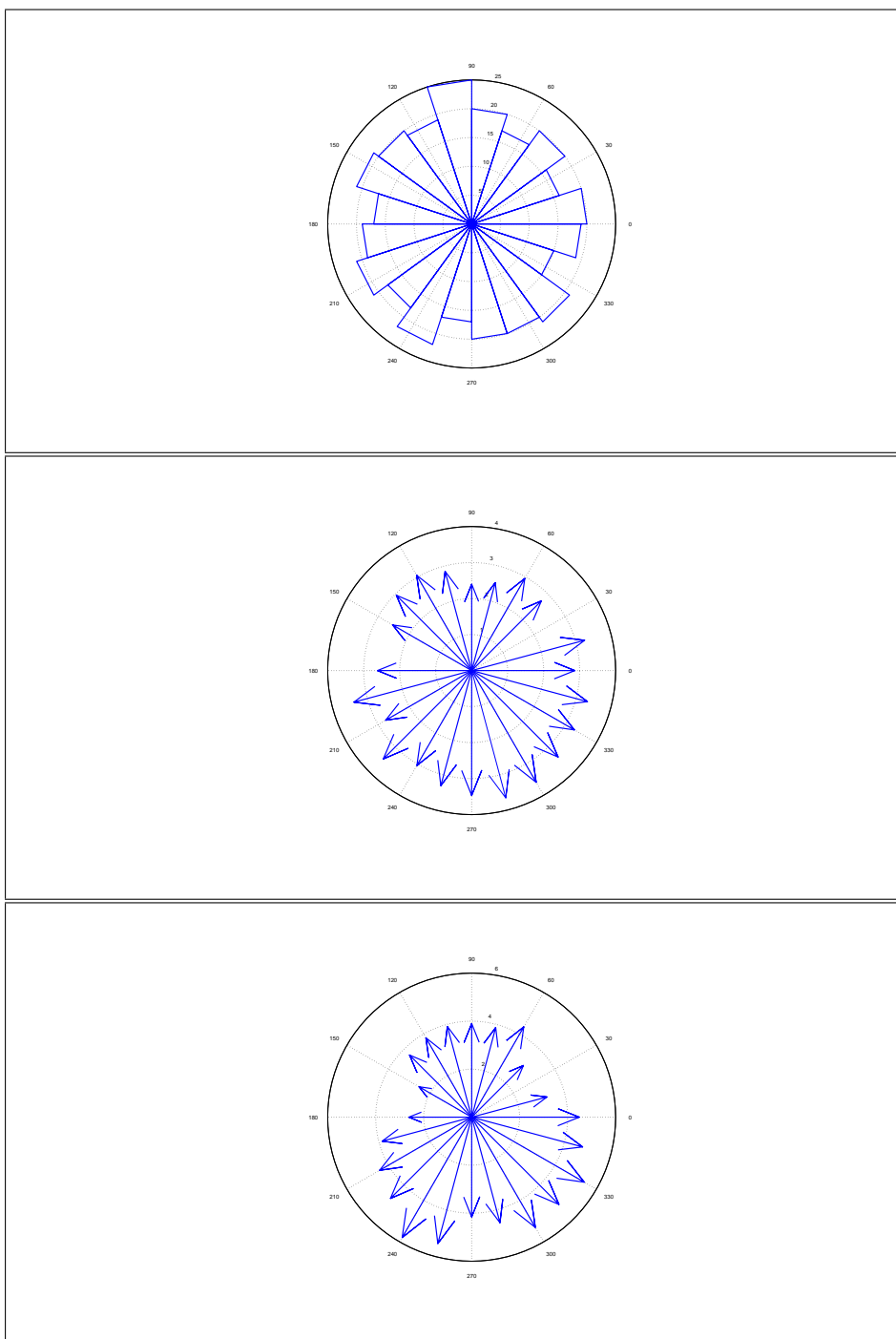


Figure 72. Statistiche dati anemometrici per il mese di Settembre 2006: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

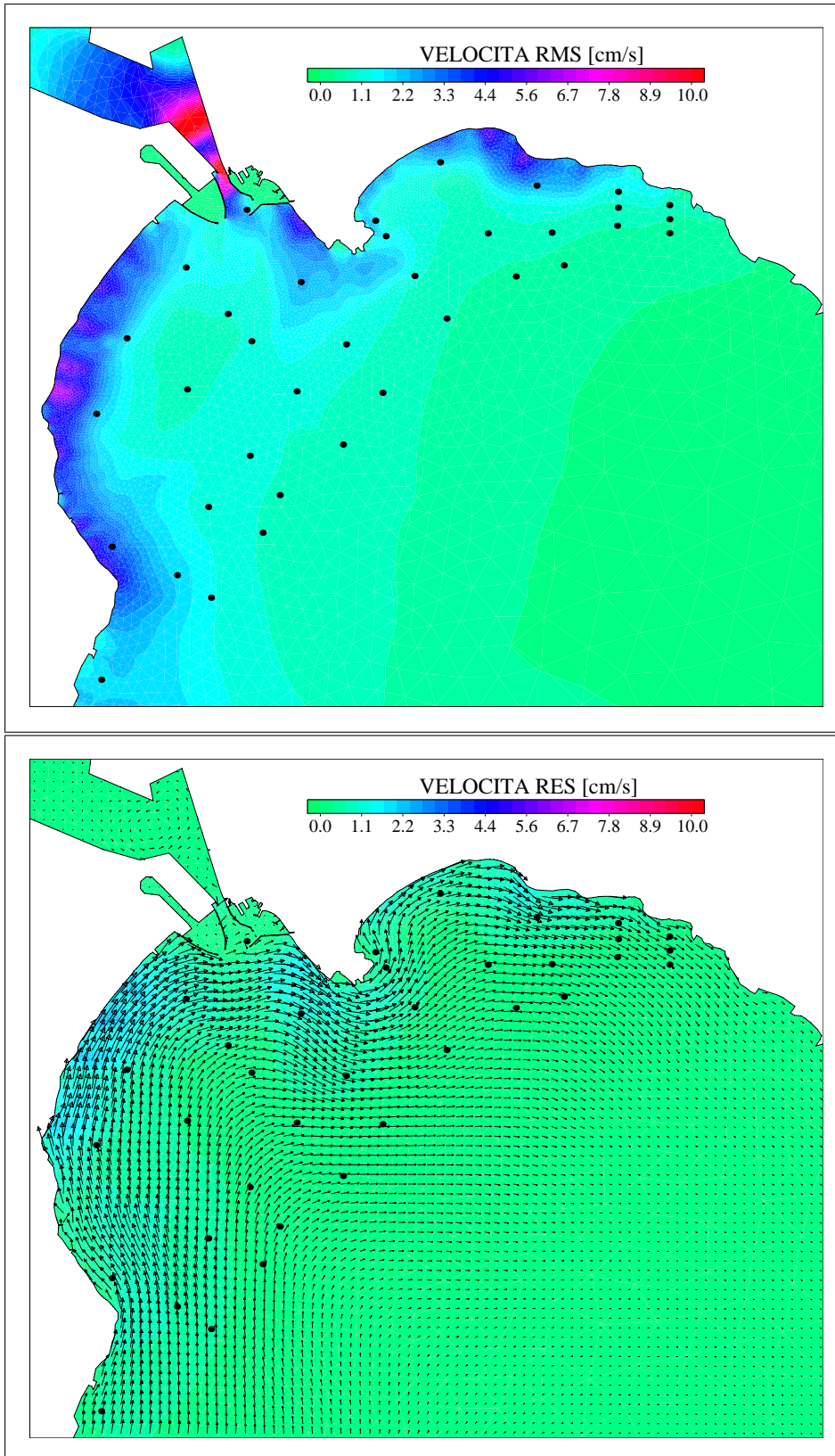


Figure 73. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Settembre 2006

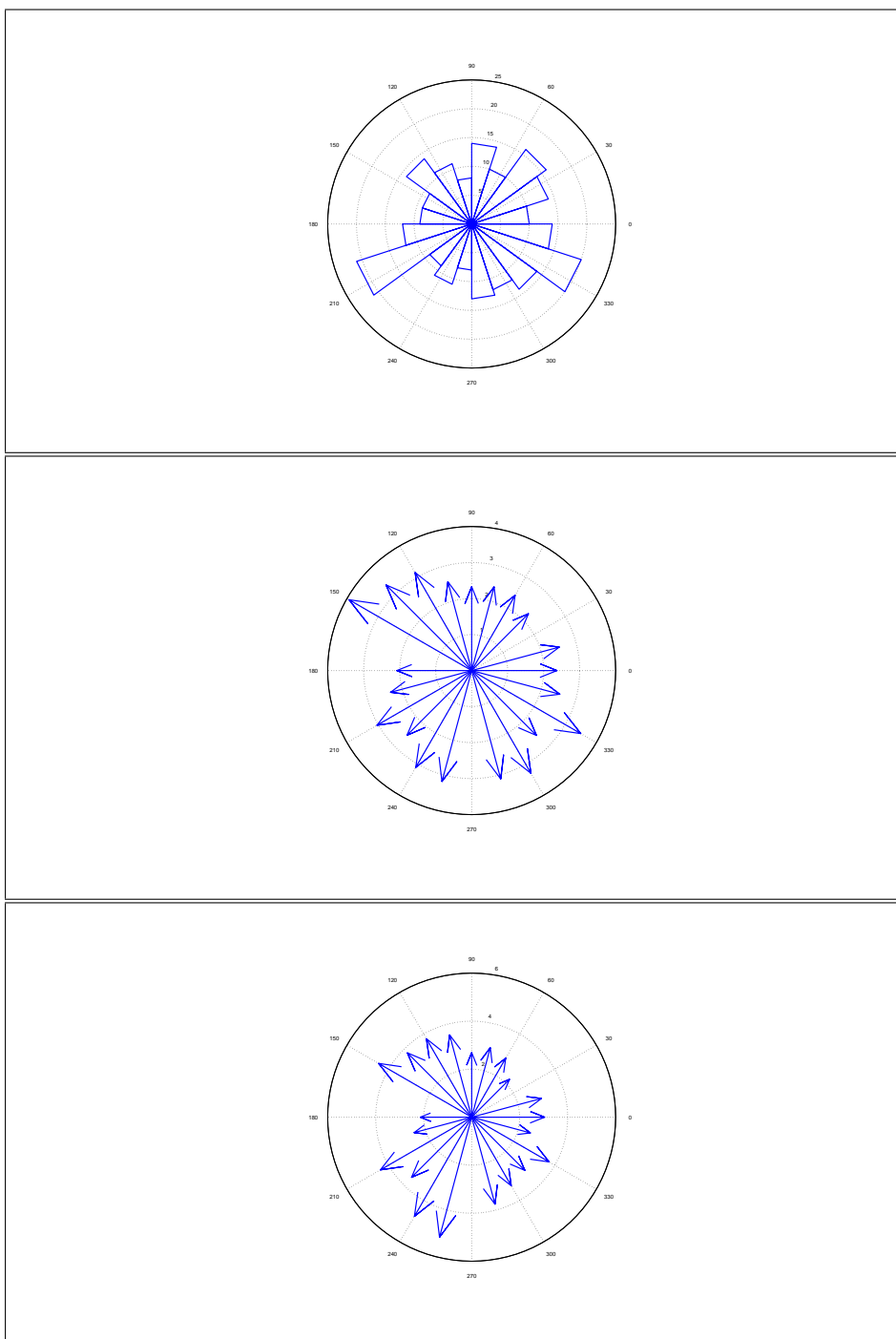


Figure 74. Statistiche dati anemometrici per il mese di Ottobre 2006: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

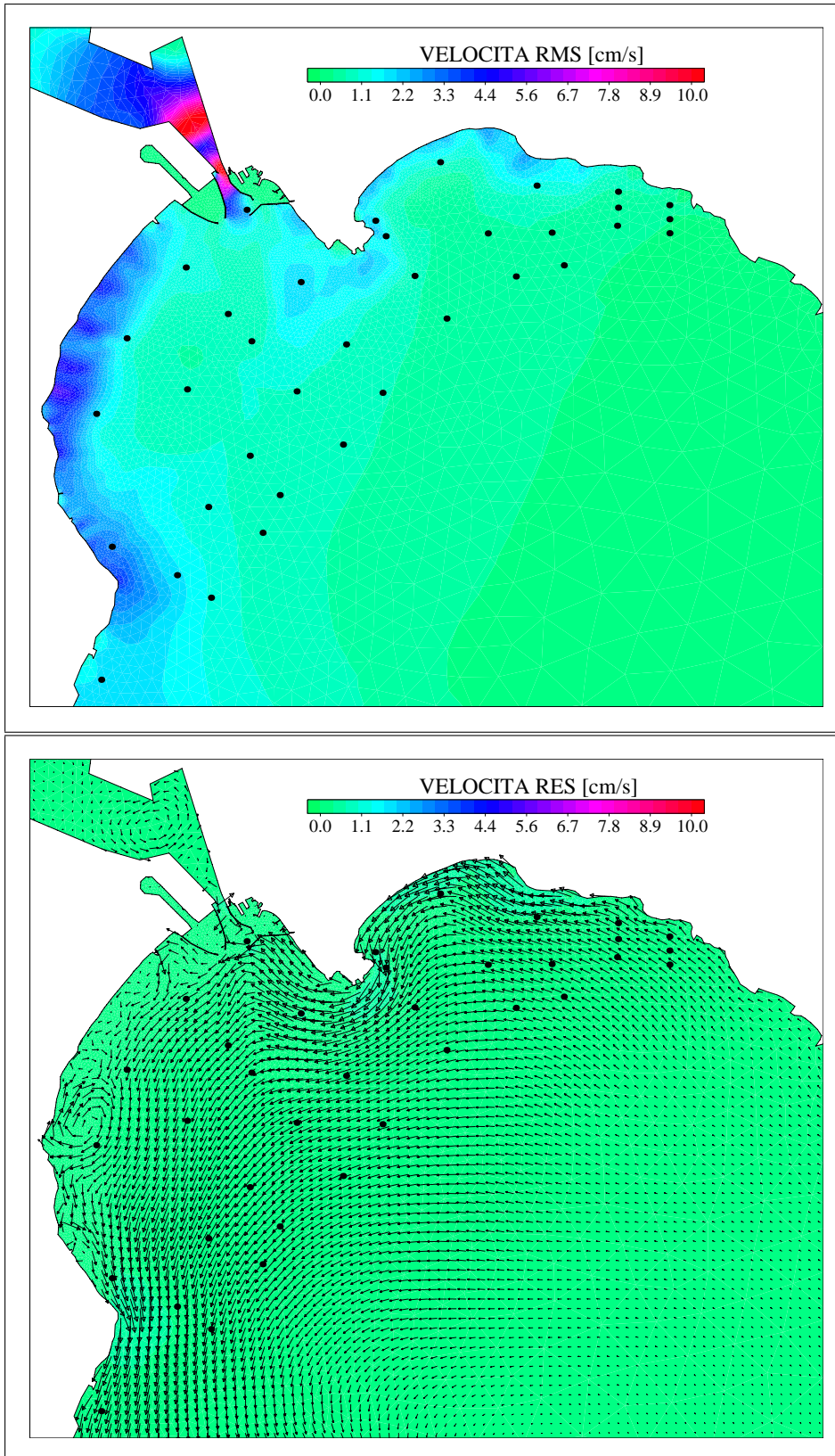


Figure 75. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Ottobre 2006

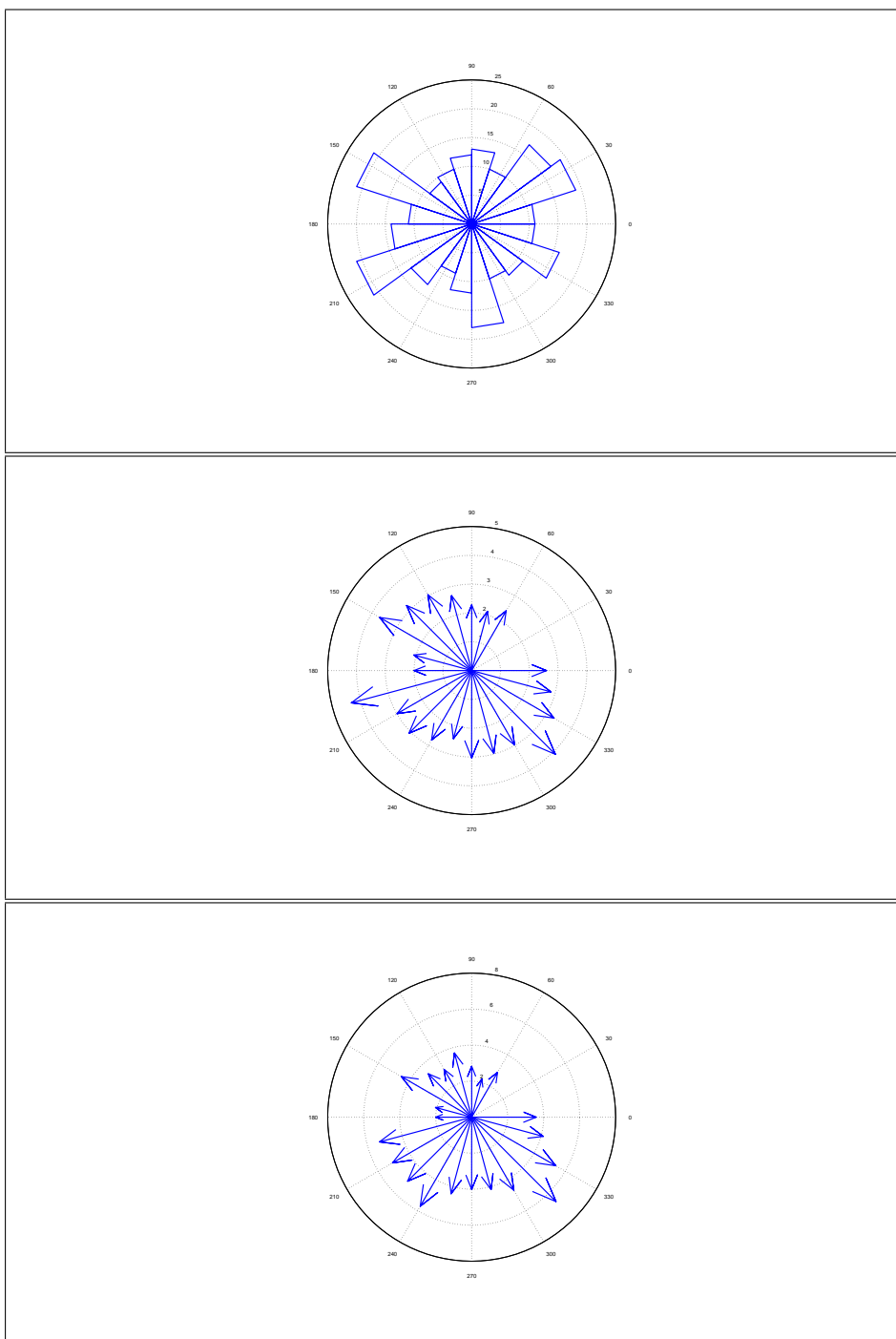


Figure 76. Statistiche dati anemometrici per il mese di Novembre 2006: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

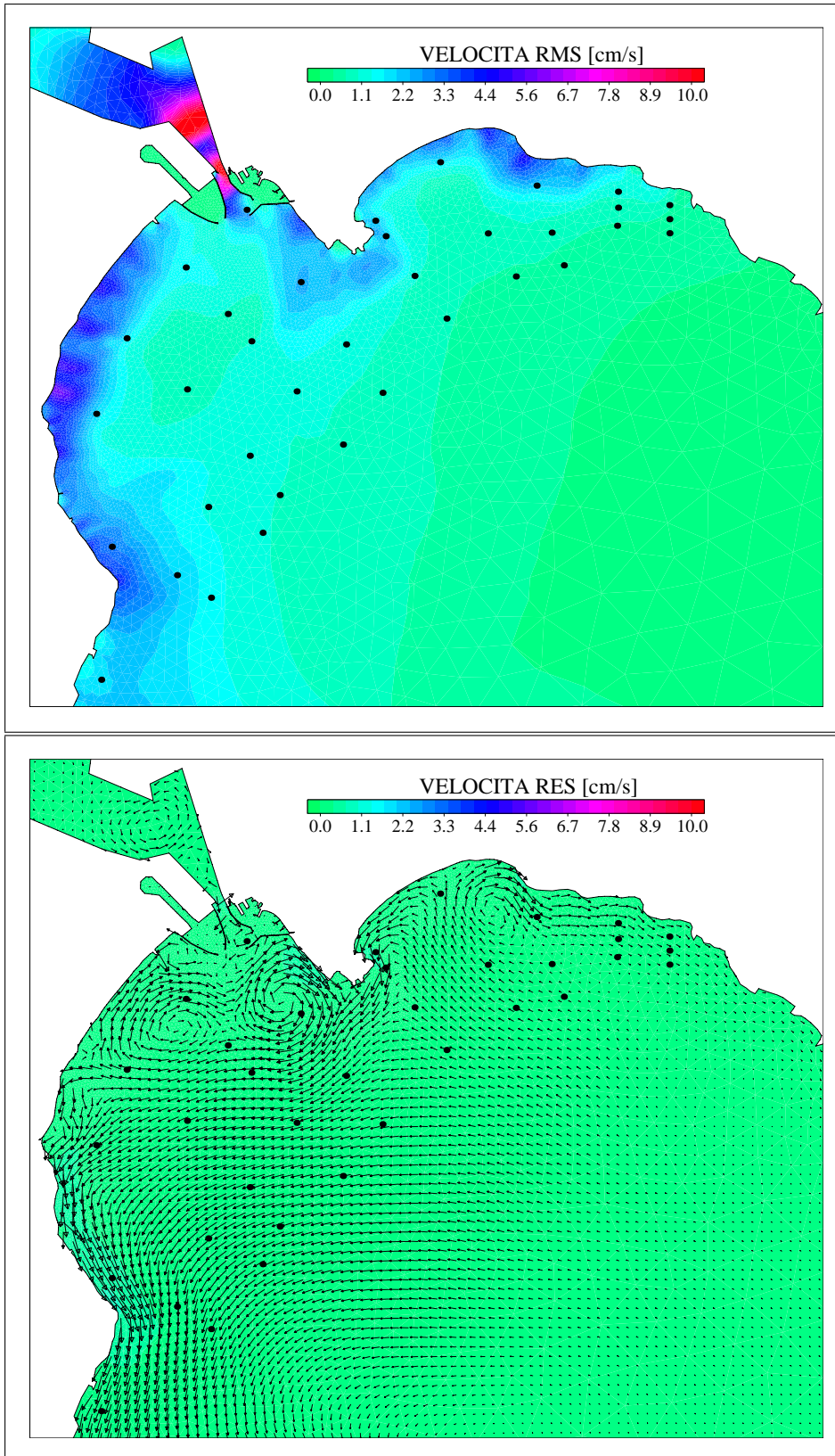


Figure 77. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Novembre 2006

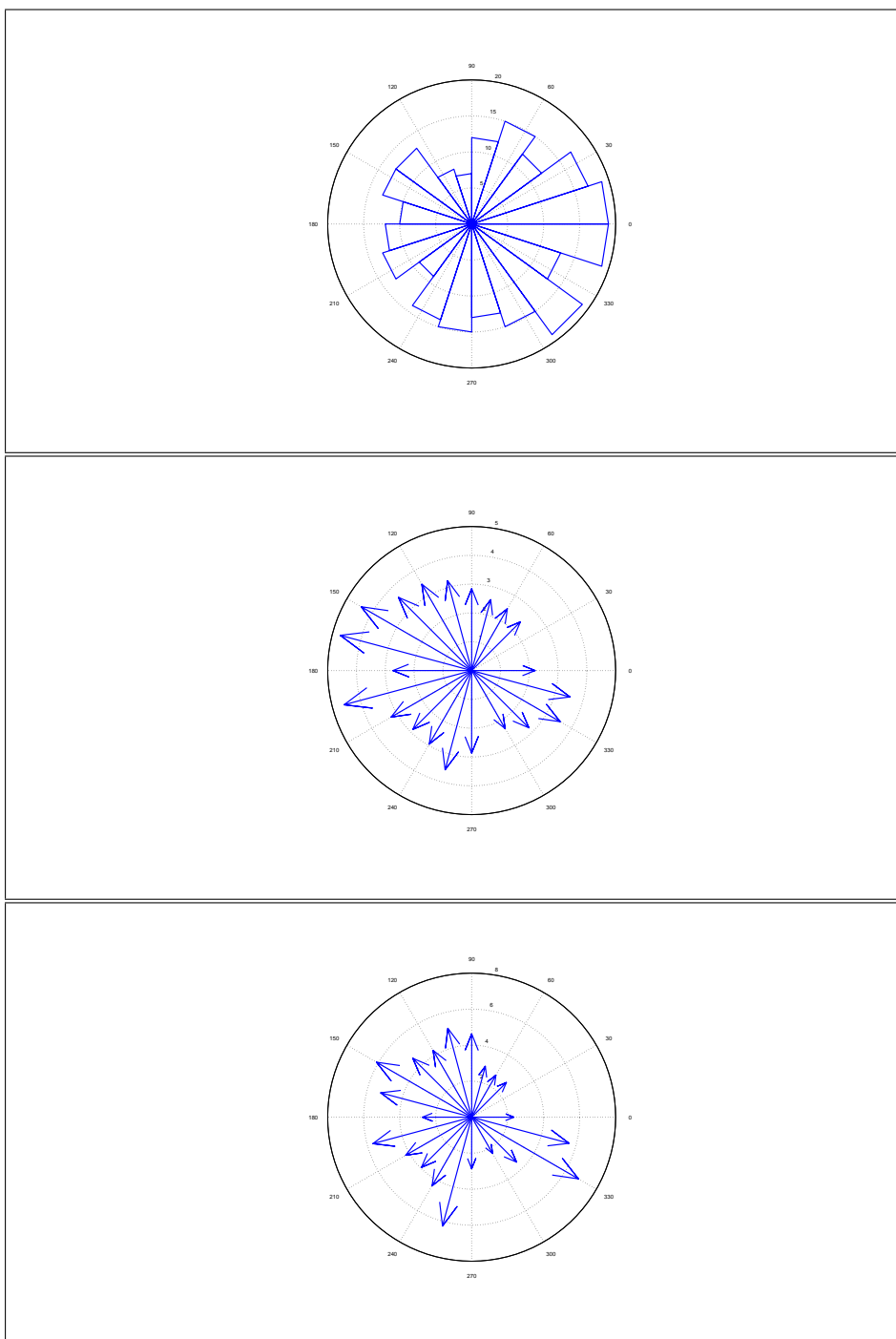


Figure 78. Statistiche dati anemometrici per il mese di Dicembre 2006: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 2 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza

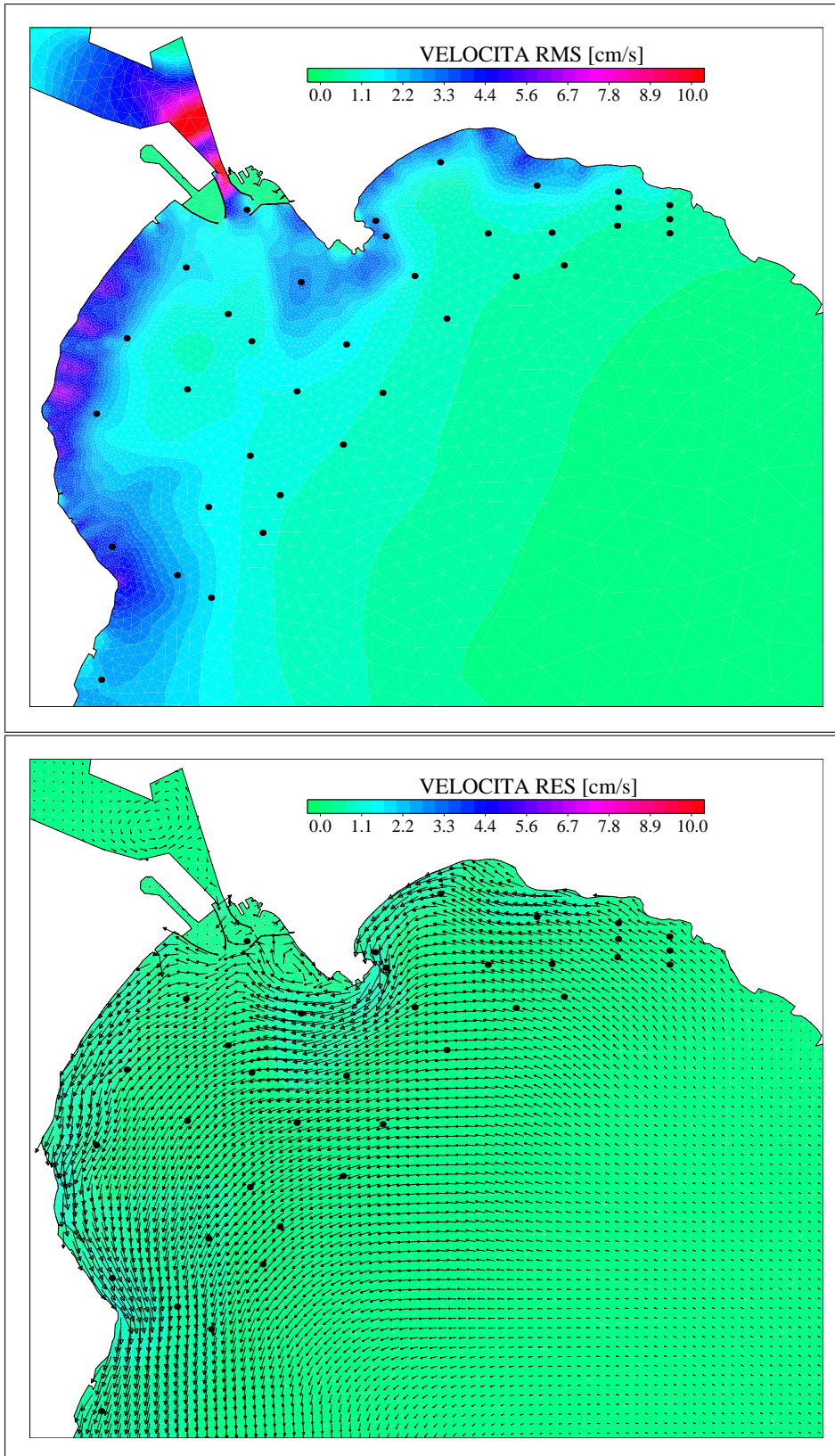


Figure 79. Distribuzione spaziale dell'intensità media della corrente RMS e del campo di moto residuale RES calcolati per il mese di Dicembre 2006

- **Tempi di residenza**

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dal calcolo dei tempi di residenza delle acque nelle aree costiere considerate, per ogni mese del biennio 2005 - 2006.

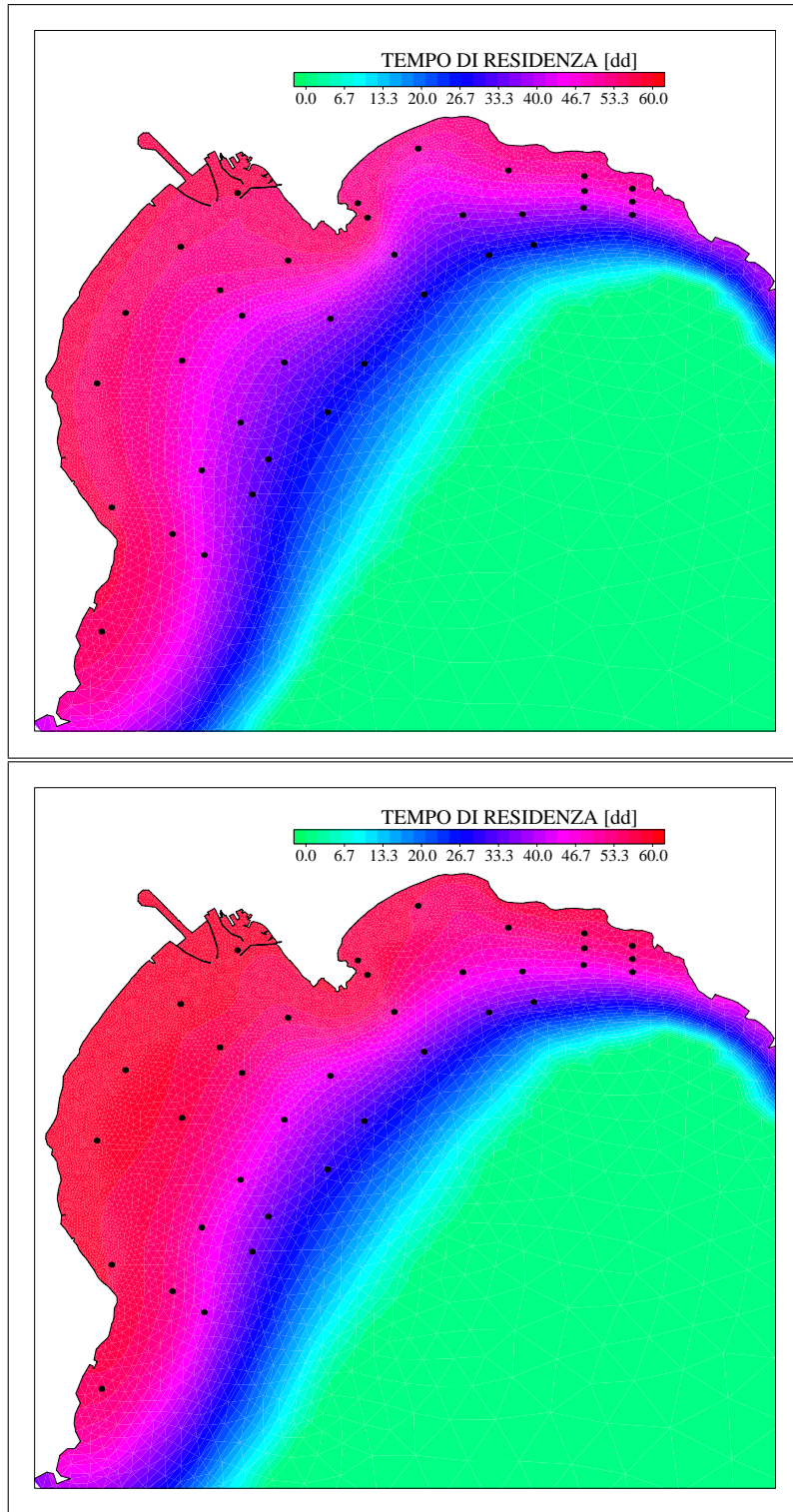


Figure 80. Distribuzione spaziale dei tempi di residenza espressi in giorni calcolati per il mese di Gennaio 2005 e Febbraio 2005

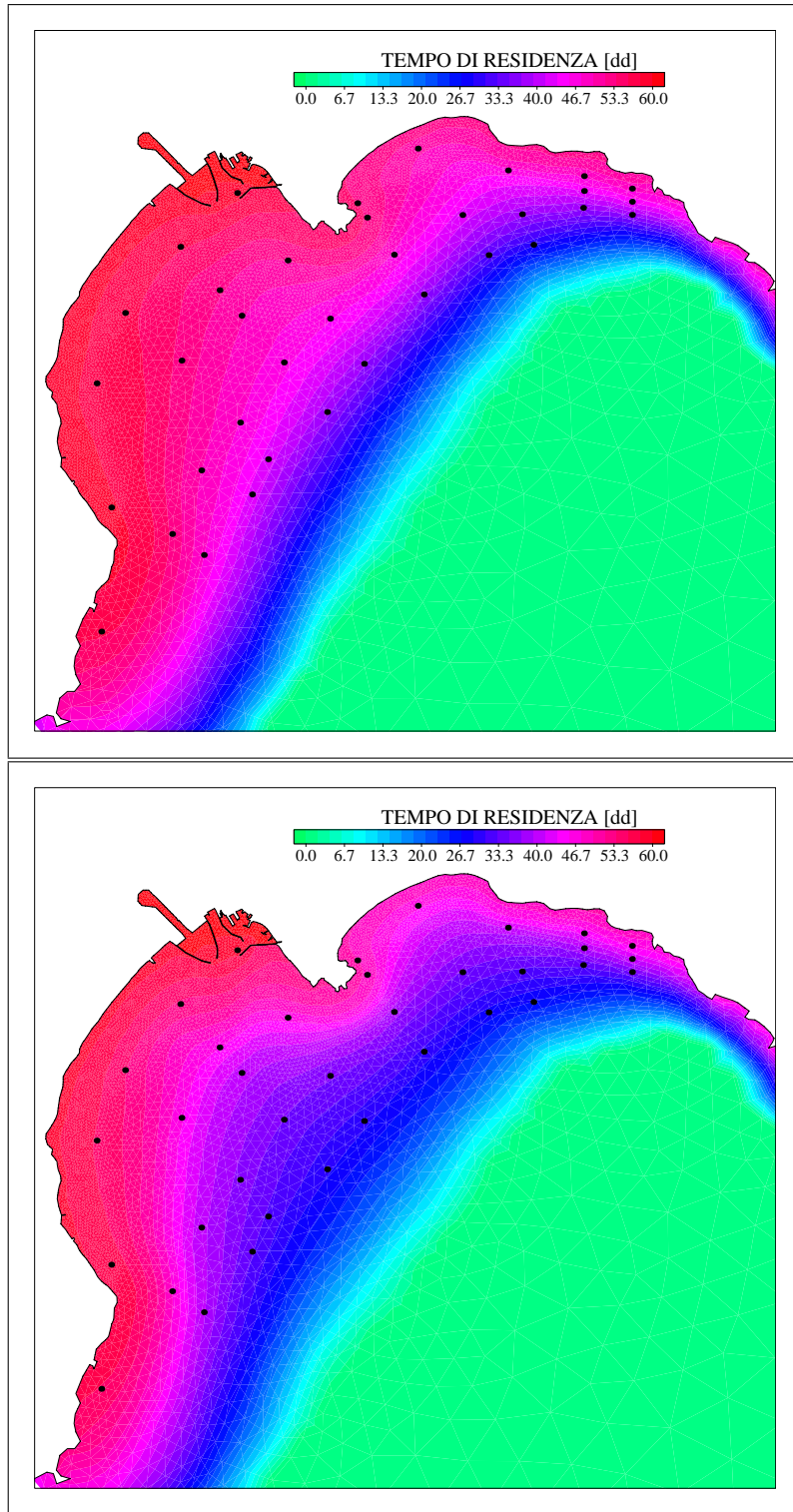


Figure 81. Distribuzione spaziale dei tempi di residenza espressi in giorni calcolati per il mese di Marzo 2005 e Aprile 2005

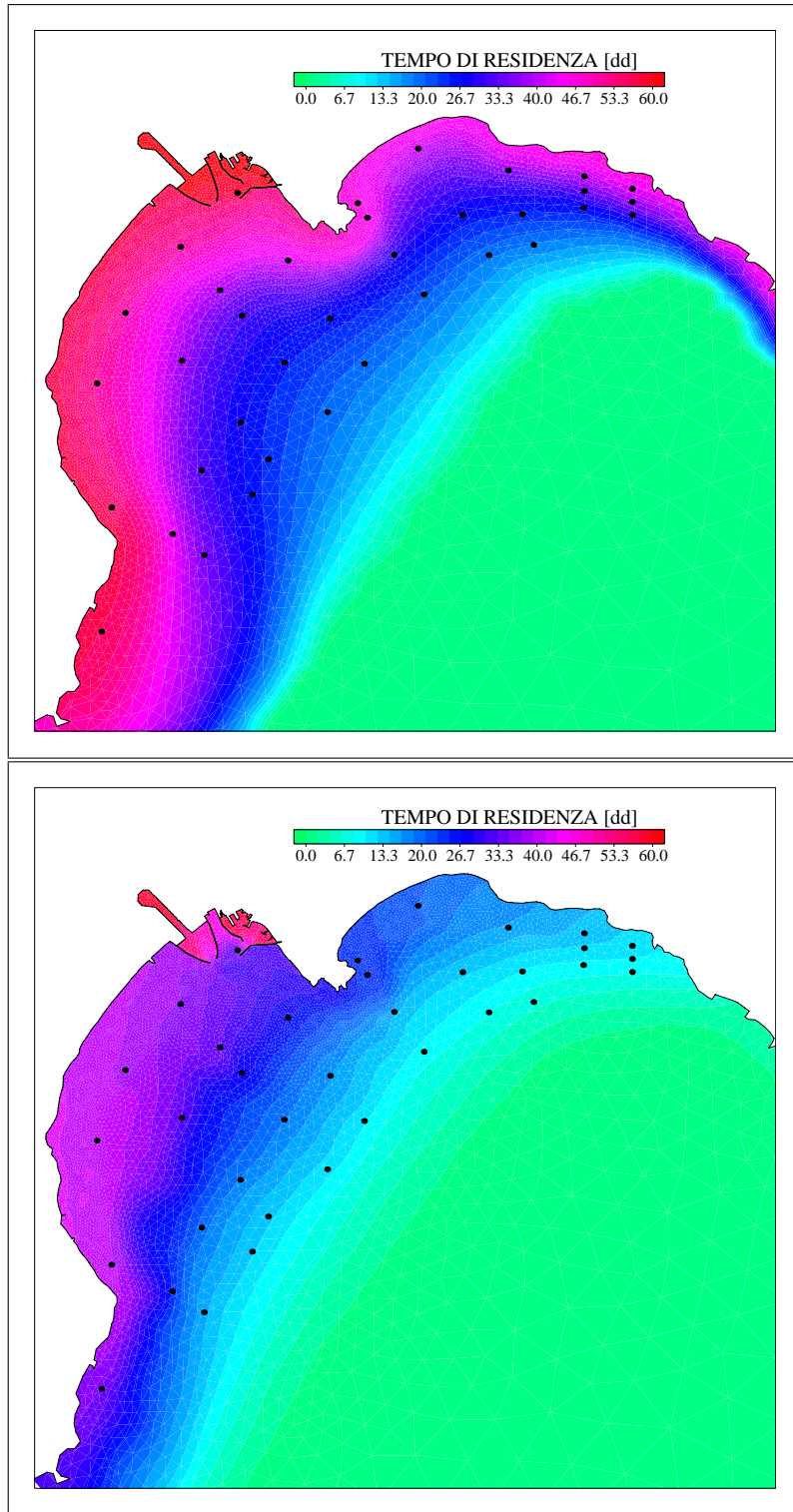


Figure 82. Distribuzione spaziale dei tempi di residenza espressi in giorni calcolati per il mese di Maggio 2005 e Giugno 2005

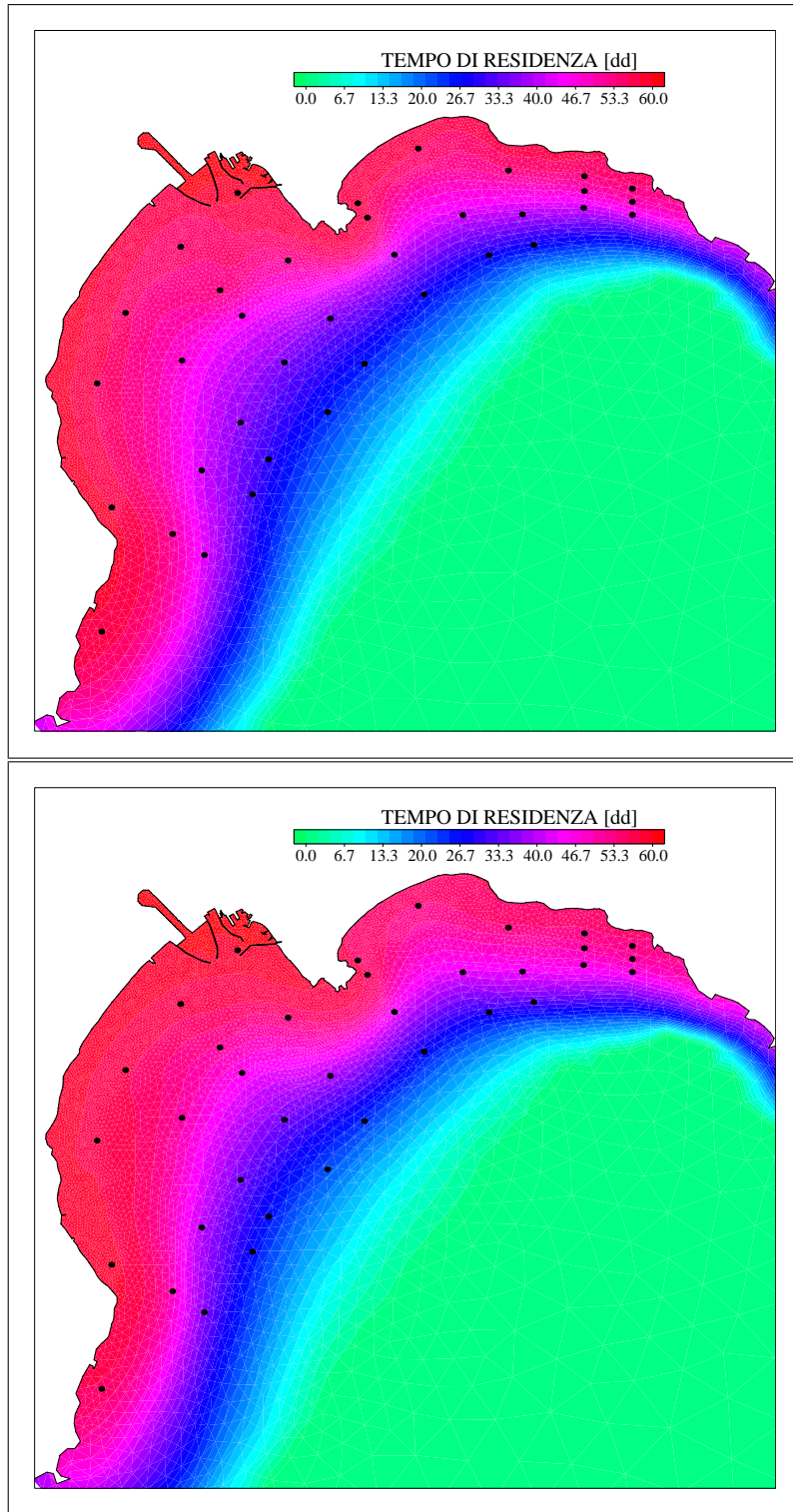


Figure 83. Distribuzione spaziale dei tempi di residenza espressi in giorni calcolati per il mese di Luglio 2005 e Agosto 2005

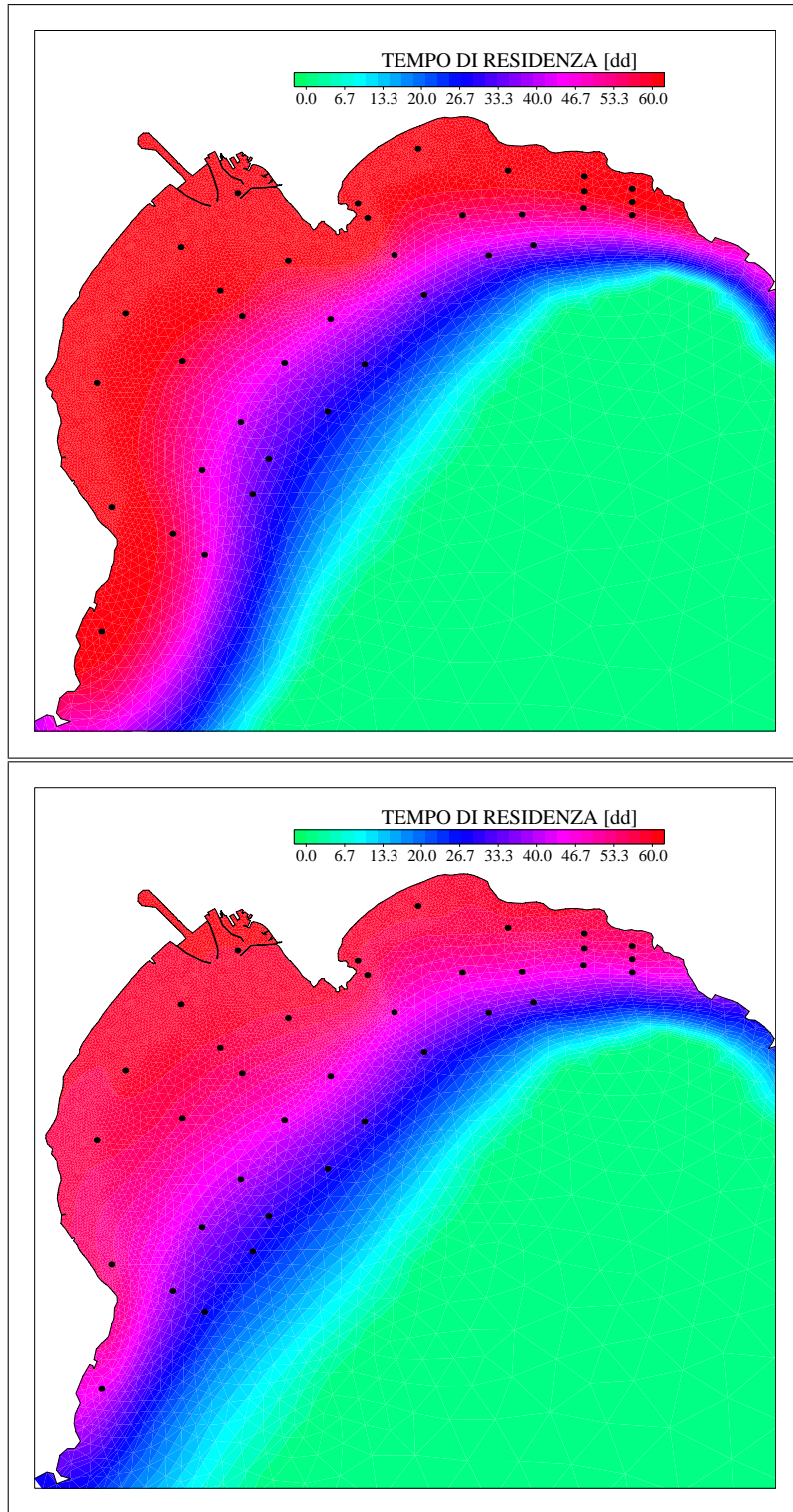


Figure 84. Distribuzione spaziale dei tempi di residenza espressi in giorni calcolati per il mese di Settembre 2005 e Ottobre 2005

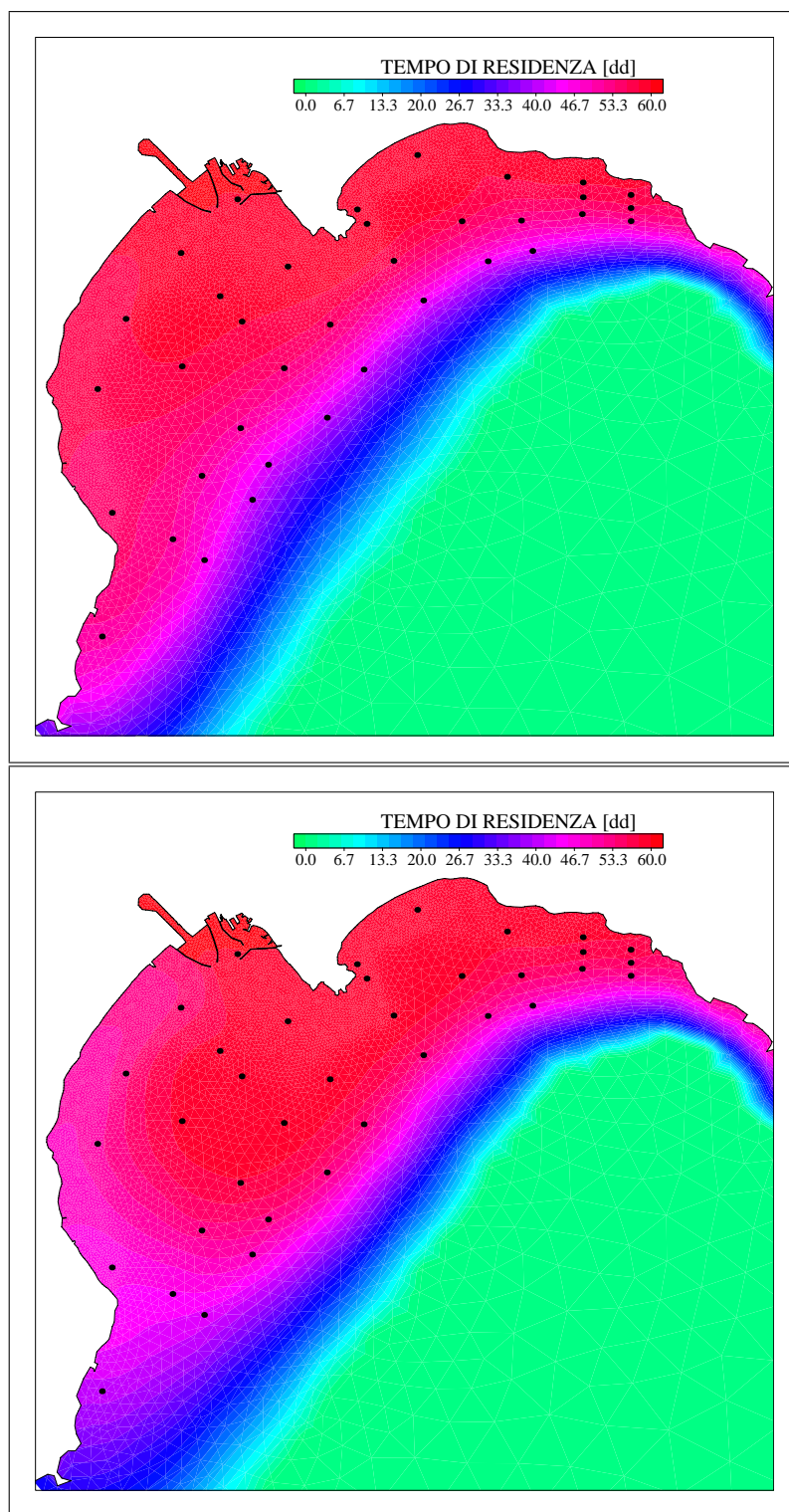


Figure 85. Distribuzione spaziale dei tempi di residenza espressi in giorni calcolati per il mese di Novembre 2005 e Dicembre 2005

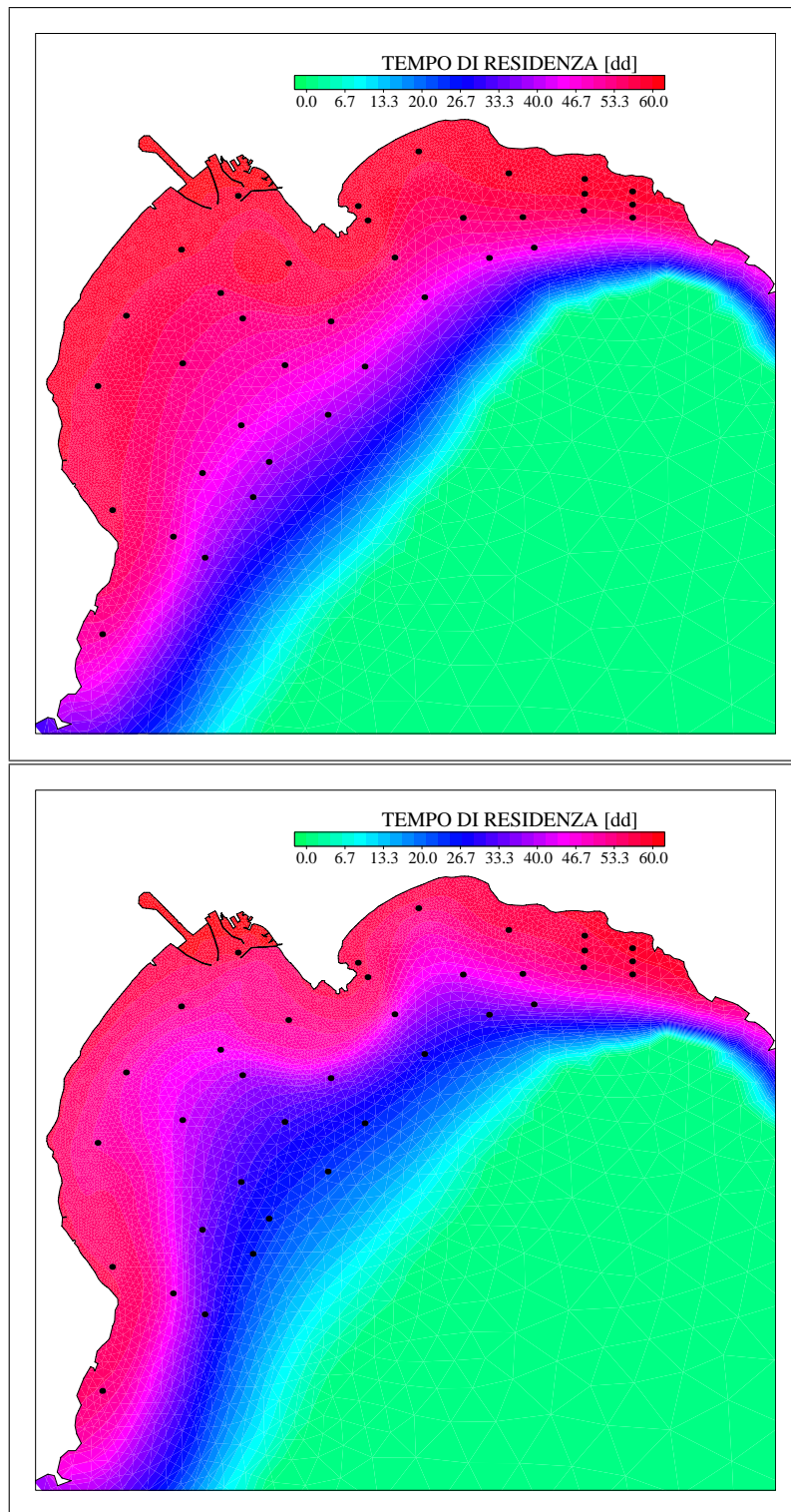


Figure 86. Distribuzione spaziale dei tempi di residenza espressi in giorni calcolati per il mese di Gennaio 2006 e Febbraio 2006

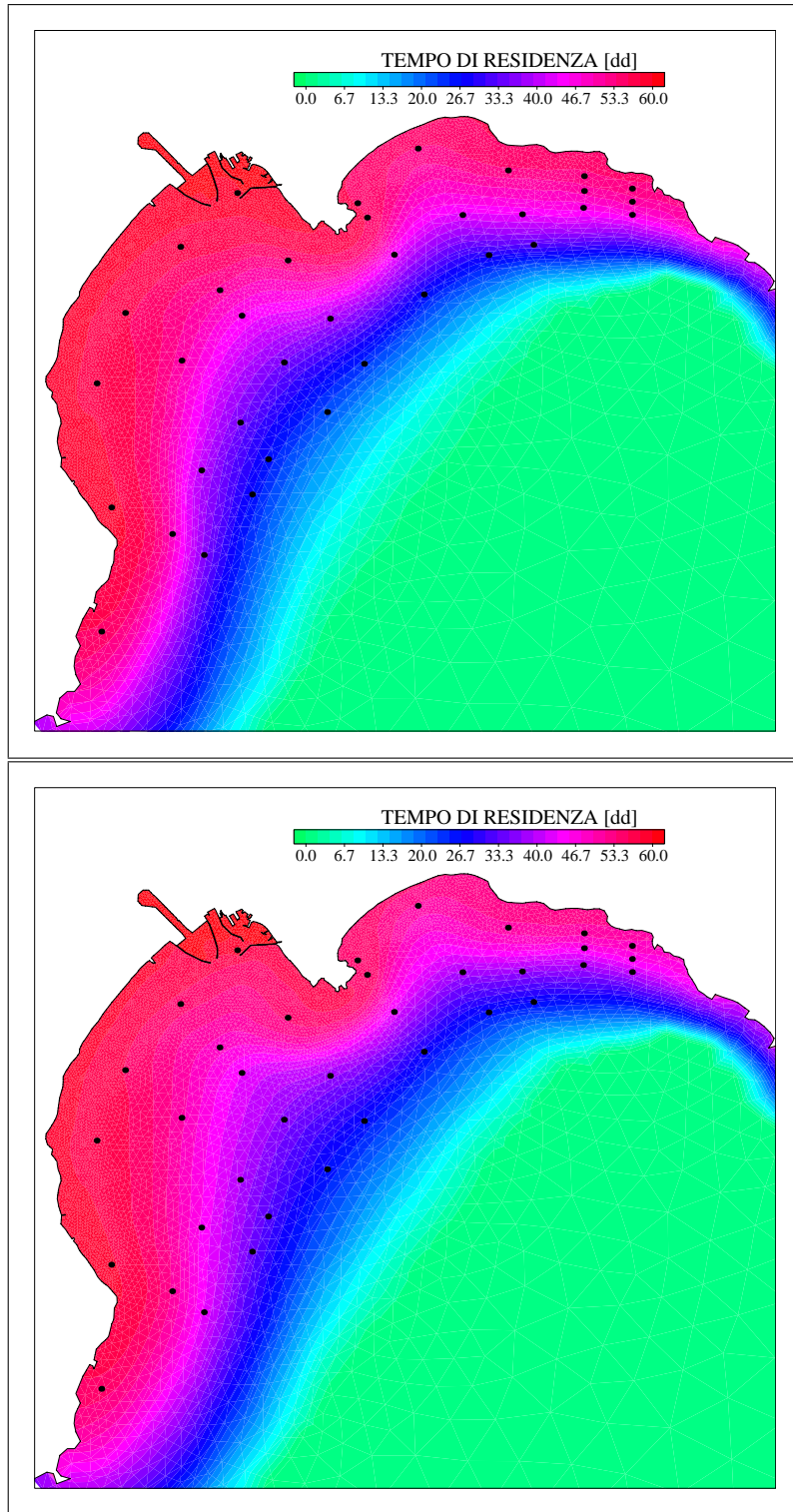


Figure 87. Distribuzione spaziale dei tempi di residenza espressi in giorni calcolati per il mese di Marzo 2006 e Aprile 2006

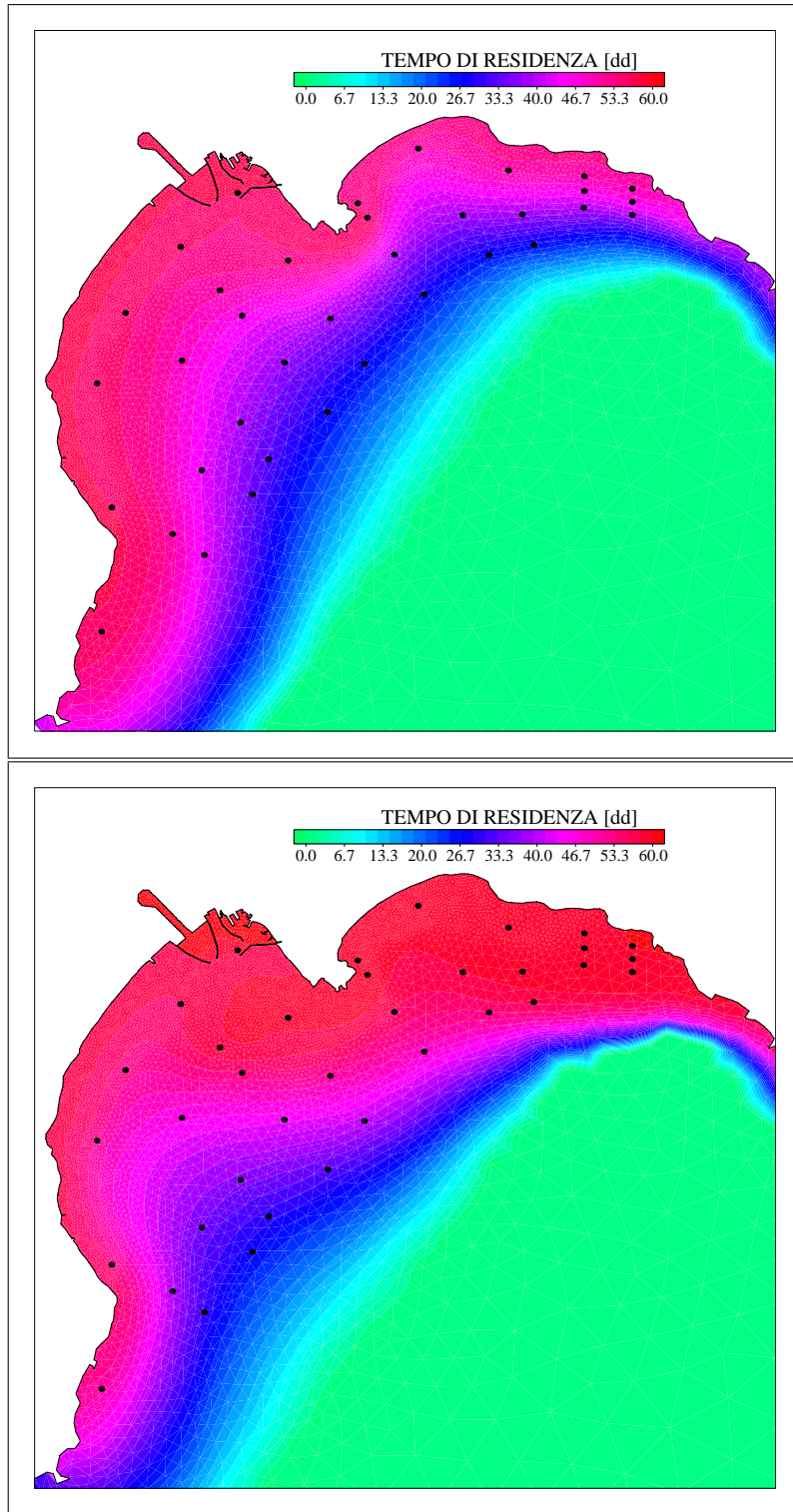


Figure 88. Distribuzione spaziale dei tempi di residenza espressi in giorni calcolati per il mese di Maggio 2006 e Giugno 2006

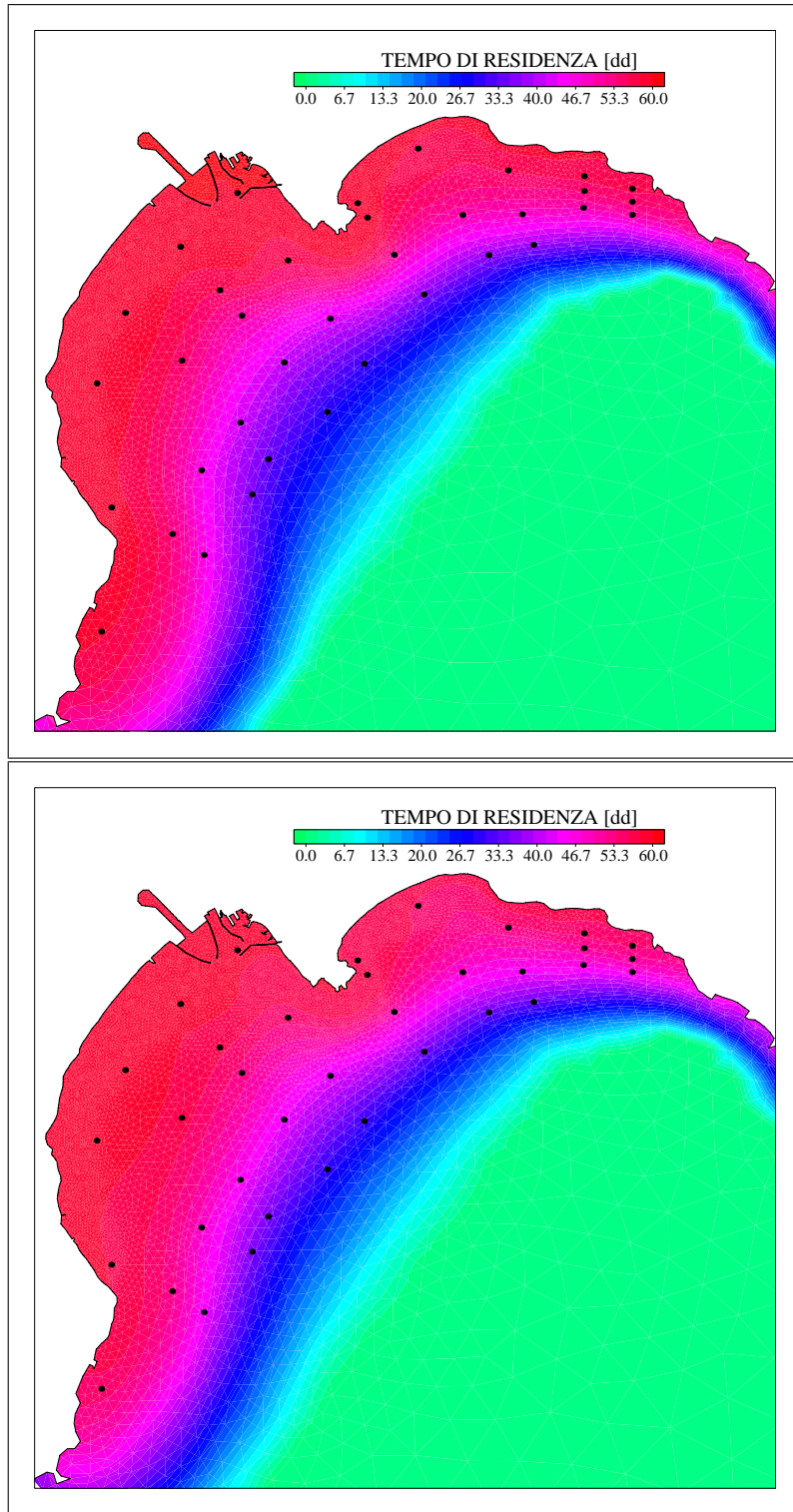


Figure 89. Distribuzione spaziale dei tempi di residenza espressi in giorni calcolati per il mese di Luglio 2006 e Agosto 2006

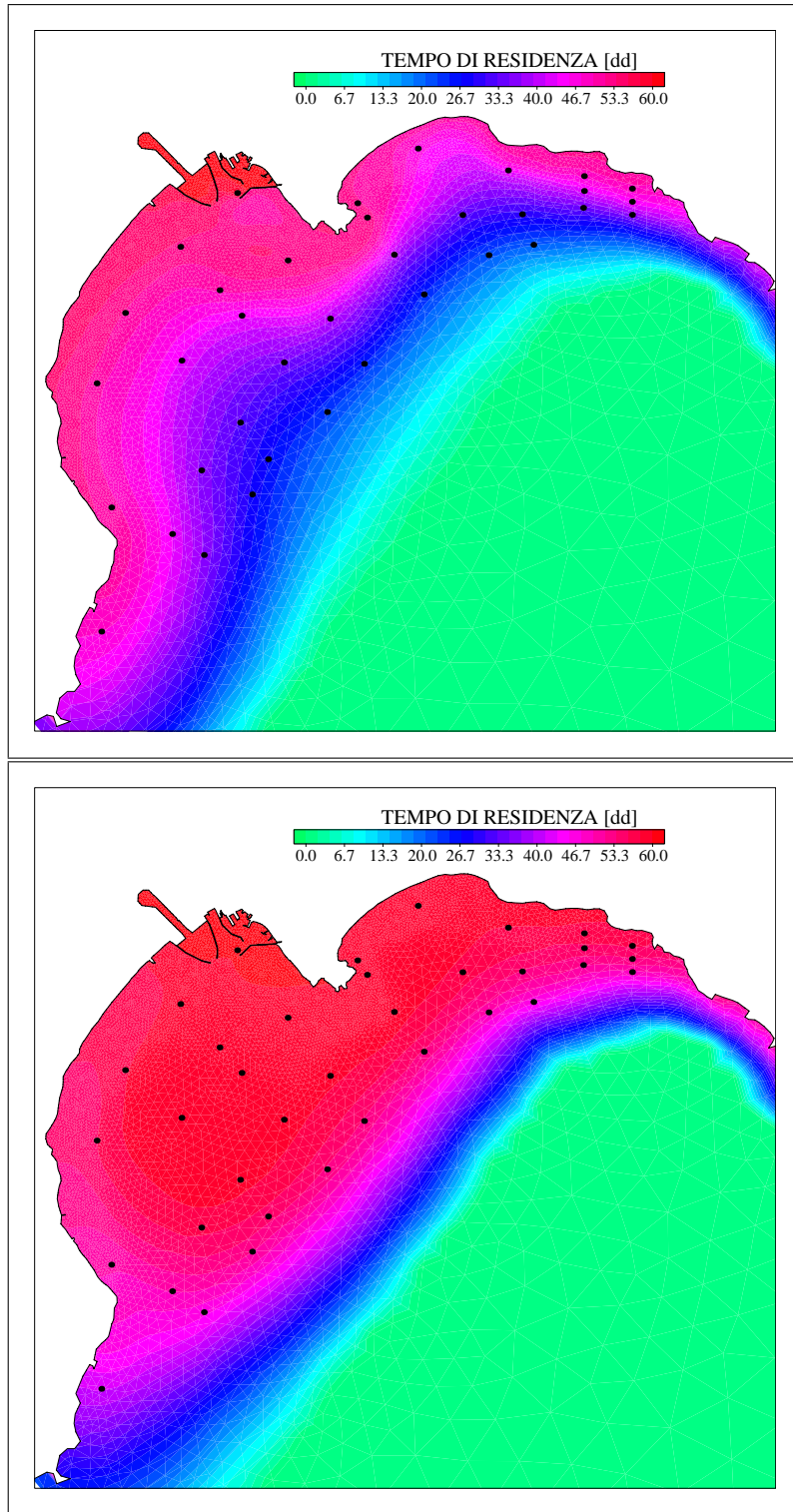


Figure 90. Distribuzione spaziale dei tempi di residenza espressi in giorni calcolati per il mese di Settembre 2006 e Ottobre 2006

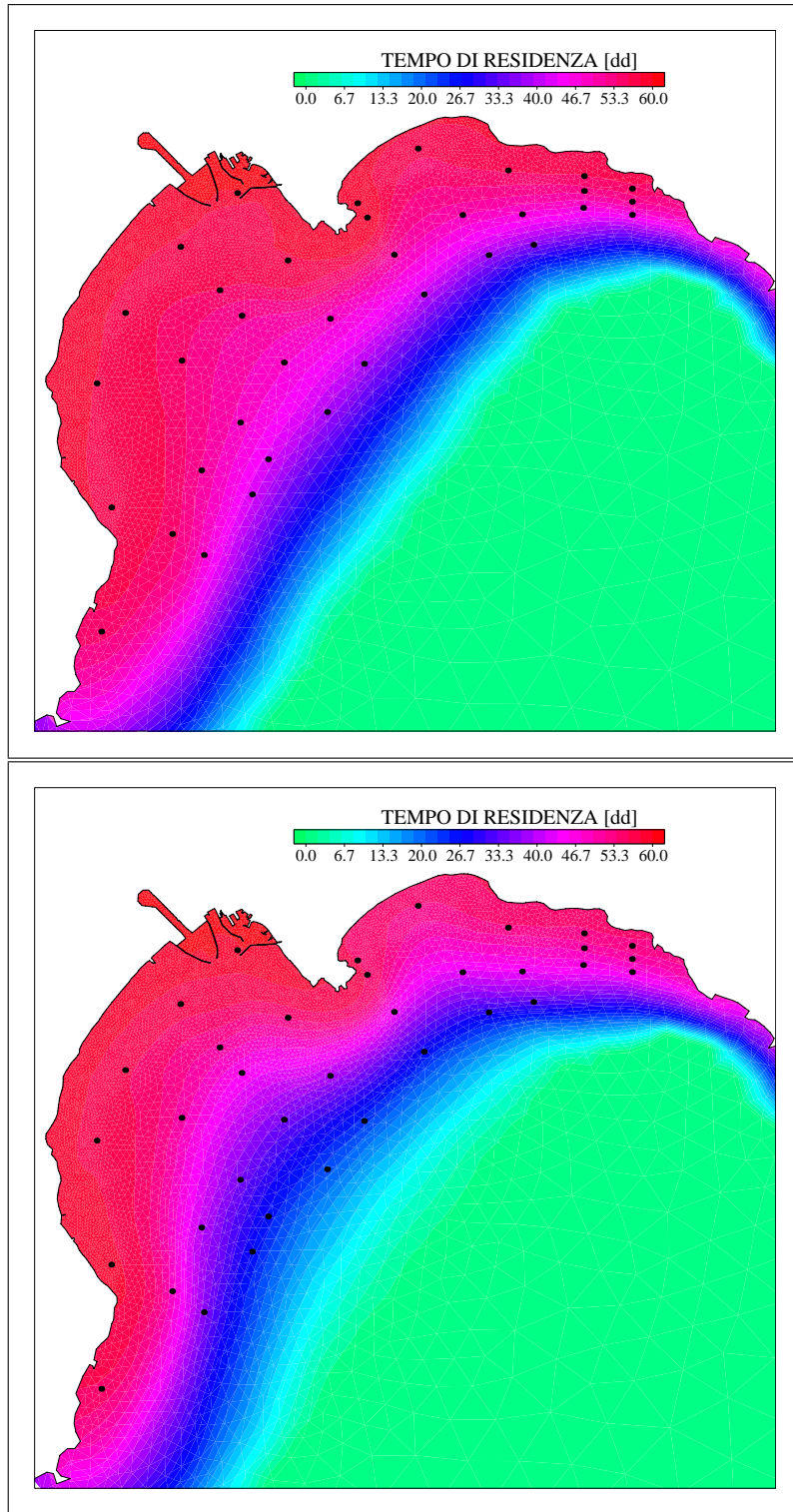


Figure 91. Distribuzione spaziale dei tempi di residenza espressi in giorni calcolati per il mese di Novembre 2006 e dicembre 2006

References

- Cucco, A., Umgiesser, G., 2006. Modeling the Venice Lagoon Water Residence Time. *Ecological Modelling* 193, 34–51.
- Sibson, R., 1981. A brief description of natural neighbour interpolation. Barnett, V., ed., *Interpreting multivariate data*: John Wiley, 21–36.
- Takeoka, H., 1984a. Exchange and transport time scales in the Seto Inland Sea 3 (4), 327–341.
- Takeoka, H., 1984b. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea 3 (3), 311–326.
- Umgiesser, G., Bergamasco, A., 1993. A staggered grid finite element model of the Venice Lagoon. In: K. Morgan, E. Ofiate, J. P., Zienkiewicz, O. C. (Eds.), *Finite Elements in Fluids*. Pineridge Press, pp. 659–668.
- Umgiesser, G., Canu, D. M., Cucco, A., Solidoro, C., 2004. A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation. *Journal of Marine Systems* 51 (1-4), 123–145.
- Umgiesser, G., Zecchetto, S., 1995. The influence of the wind on the water levels in the Venice Lagoon. In: et al., M. M. C. (Ed.), *Finite Elements in Fluids — New Trends and Applications*. Pineridge Press, Venice, Italy.