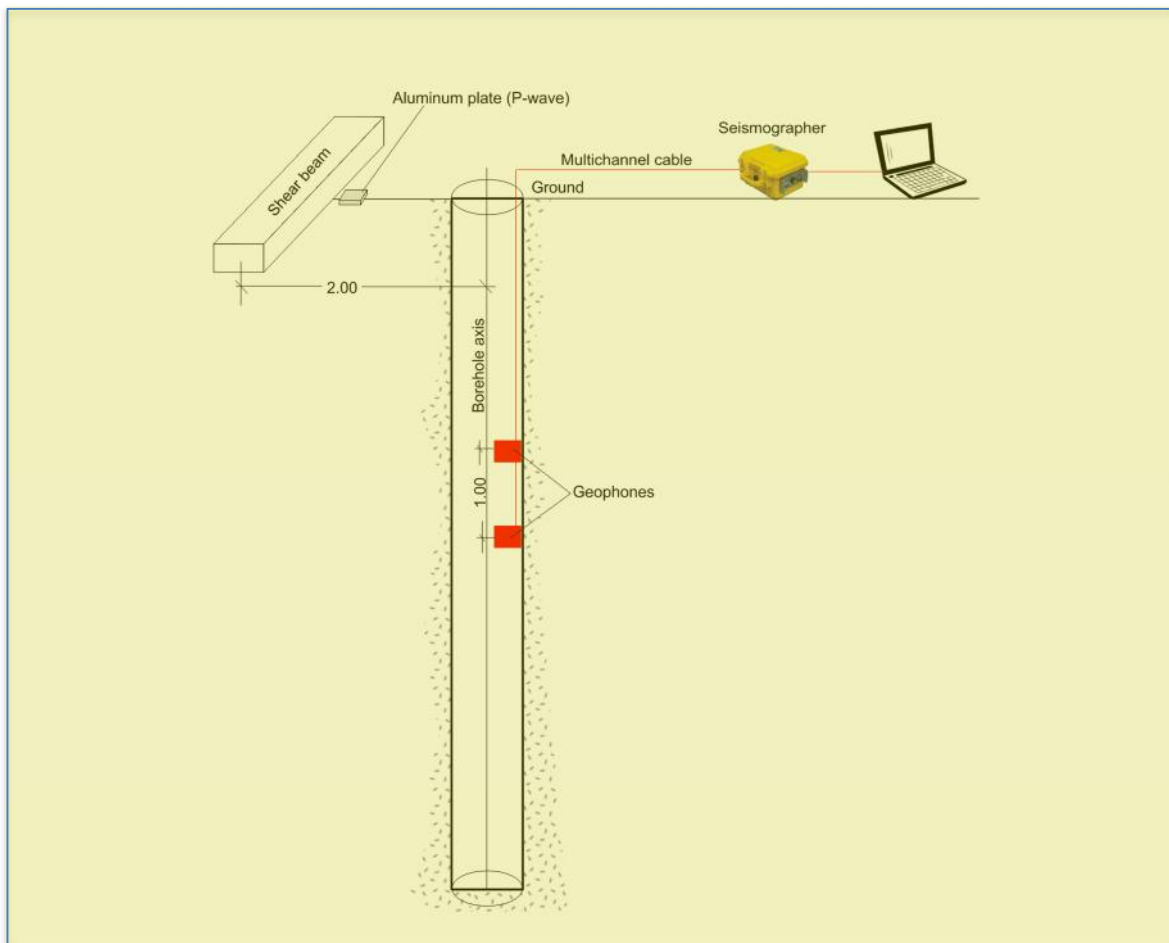




# TERREMOTO ITALIA CENTRALE 2016

## MICROZONAZIONE SISMICA

### ACQUISIZIONI DATI GEOFISICI DOWN-HOLE



A cura di:

**Michele Iavarone<sup>1</sup>, Giuseppe Cavuoto<sup>2</sup>, Nicola Pelosi<sup>2</sup>, Michele Punzo<sup>2</sup>, Daniela Tarallo<sup>2</sup>, Rodolfo Baculo<sup>1</sup>, Barbara Bianchi<sup>1</sup>, Vincenzo Di Fiore<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ISMAR - CNR (Istituto di Scienze Marine, Napoli)

<sup>2</sup>ISPC - CNR (Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale, Napoli)



## **INDICE**

<b>1. Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2. Gruppo di lavoro</b>	<b>6</b>
<b>3. Procedure di esecuzione Down-hole</b>	<b>7</b>
<b>4. Indagine in foro Down-hole</b>	<b>8</b>
<b>5. Considerazioni</b>	<b>12</b>
<b>6. MACROAREA MARCHE 2</b>	
6.1 Sito: Macerata	<b>13</b>
6.2 Dati Geofisici	
6.2.1 Picking	<b>14</b>
6.2.2 Correzione dei tempi di primo arrivo	<b>14</b>
6.2.3 Risultati	<b>16</b>
<b>7. MACROAREA MARCHE 3</b>	
7.1 Sito: Ascoli Piceno	<b>17</b>
7.2 Dati Geofisici	
7.2.1 Picking	<b>18</b>
6.2.2 Correzione dei tempi di primo arrivo	<b>18</b>
6.2.3 Risultati	<b>20</b>
<b>8. MACROAREA UMBRIA</b>	
8.1 Sito: Spoleto	<b>21</b>
8.2 Dati Geofisici	
8.2.1 Picking	<b>22</b>
8.2.2 Correzione dei tempi di primo arrivo	<b>22</b>
8.2.3 Risultati	<b>24</b>
<b>Conclusioni</b>	<b>25</b>



## 1. INTRODUZIONE

In riferimento alla Ripartizione delle Attività e competenze tra CNR-IGAG e CNR-IAMC nell'ambito della convenzione stipulata tra il Commissario Straordinario del Governo per la Ricostruzione Sisma 2016 e l'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria del Consiglio Nazionale delle Ricerche (per il Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni), il Gruppo di Geofisica dell'ISMAR (precedentemente IAMC, afferente al Centro per la Microzonazione Sismica e sue applicazioni ed attualmente ISPC) è stato incaricato per l'esecuzione di indagini geofisiche di tipo Down-Hole (DH) ai fini di studi di Microzonazione Sismica (MS) di livello 3.

In termini generali, lo studio di MS di livello 3 è finalizzato a quantificare la pericolosità sismica locale di microzone, con particolare riferimento alle aree stabili, alle aree stabili suscettibili di amplificazione e alle aree instabili.

Il gruppo di lavoro ha eseguito indagini DH nelle Macroaree: Marche 2, Marche 3 e Umbria. In totale sono state effettuate 71 prove. Tali prove sono state utilizzate per definire il profilo di rigidità dei terreni che, accoppiato al profilo stratigrafico derivante dalla perforazione del foro, fornisce un modello geotecnico completo del sottosuolo.

La tabella seguente riassume il numero delle indagini effettuate per ogni Macroarea.

<b>MACROAREA</b>	<b>NUMERO DH</b>
Marche 2	35
Marche 3	20
Umbria	16

**Tabella 1.** Numero delle indagini geofisiche effettuate

Di seguito sono elencati i singoli comuni dove sono state eseguite le prove DH.

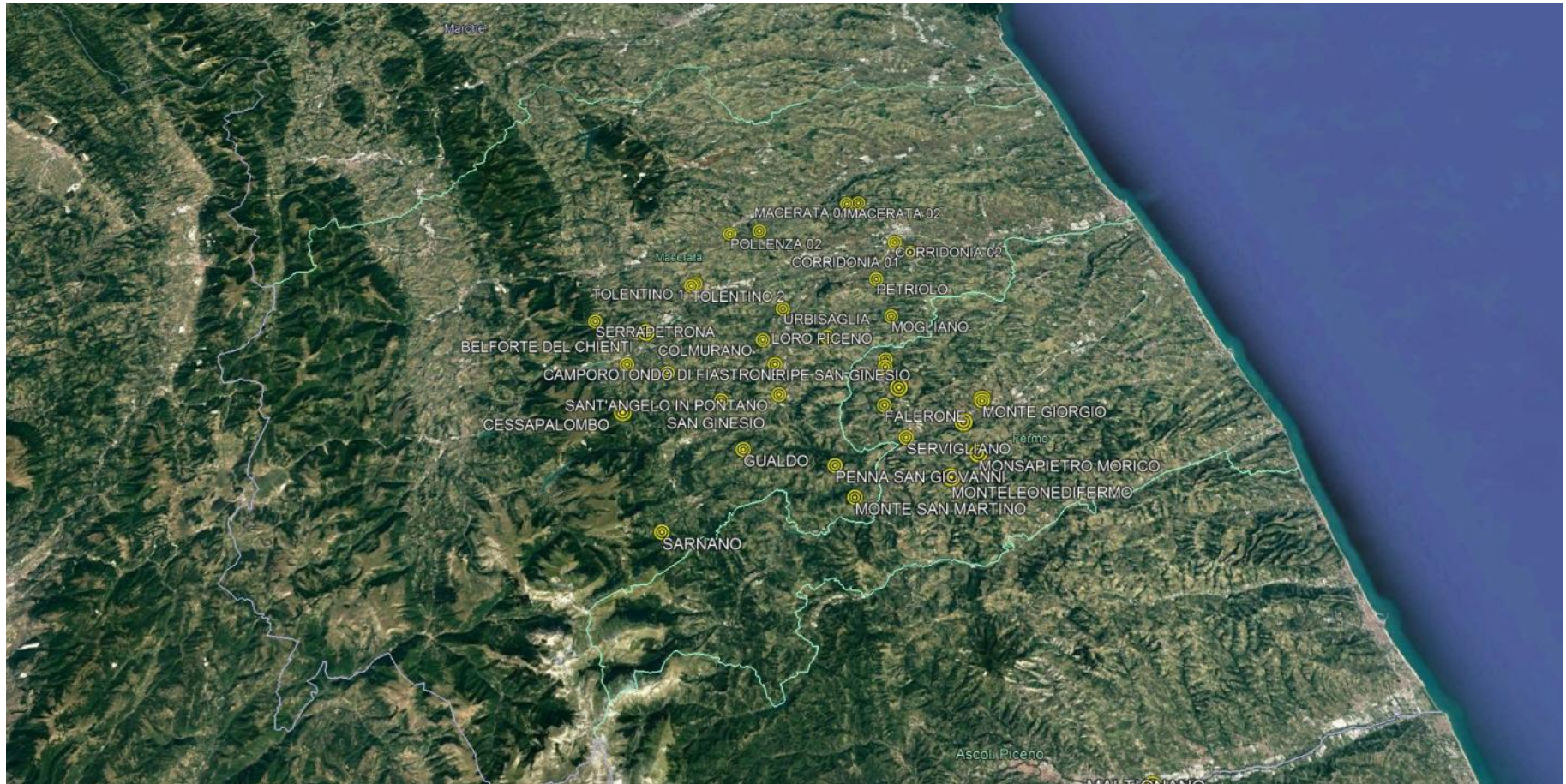
MARCHE 2 (figura 01): Belforte del Chienti, Belmonte Piceno, Caldarola, Camporotondo di Fiadrone, Cessapalombo, Colmurano, Corridonia01, Corridonia02, Falerone, Gualdo, Loro Piceno, Macerata01, Macerata02, Massa Fermana, Mogliano, Monsapietro Morico,



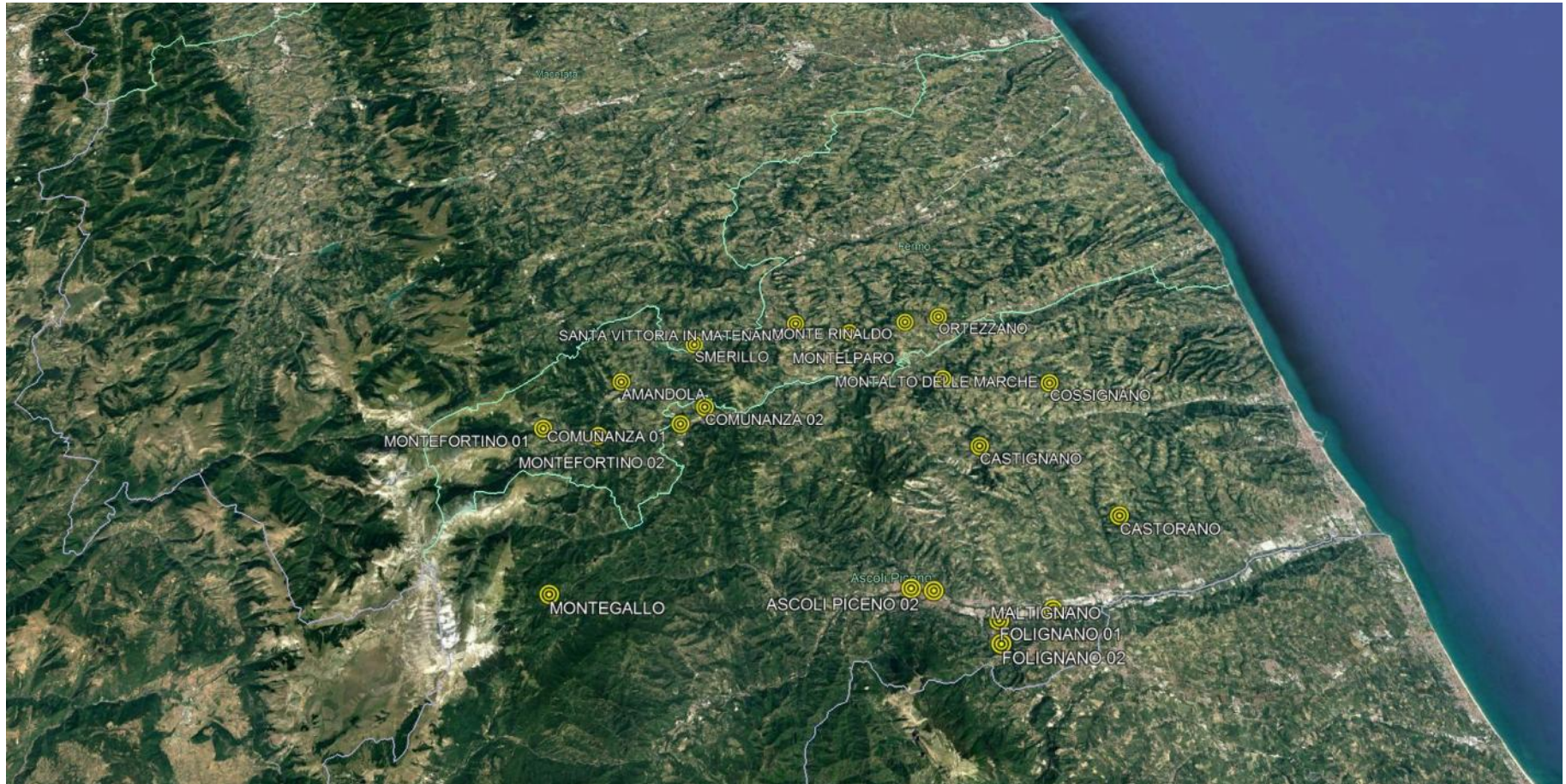
Montappone, Monte San Martino, Monte Vidon Corrado, Montegiorgio01, Montegiorgio02, Monteleone, Penna San Giovanni, Petriolo, Pollenza01, Pollenza02, Ripe San Ginesio, San Ginesio, Sant'Angelo in Pontano, Sarnano, Serrapetrona, Servigliano, Tolentino01, Tolentino02, Urbisaglia.

MARCHE 3 (figura 02): Amandola, Ascoli Piceno 01, Ascoli Piceno 02, Castignano, Castorano, Comunanza01, Comunanza02, Cossignano, Folignano01, Folignano02, Maltignano, Montalto delle Marche, Monte Rinaldo, Monte Fortino, Montegallo, Montelparo, Ortezzano, Santa Vittoria in Matenano, Smerillo.

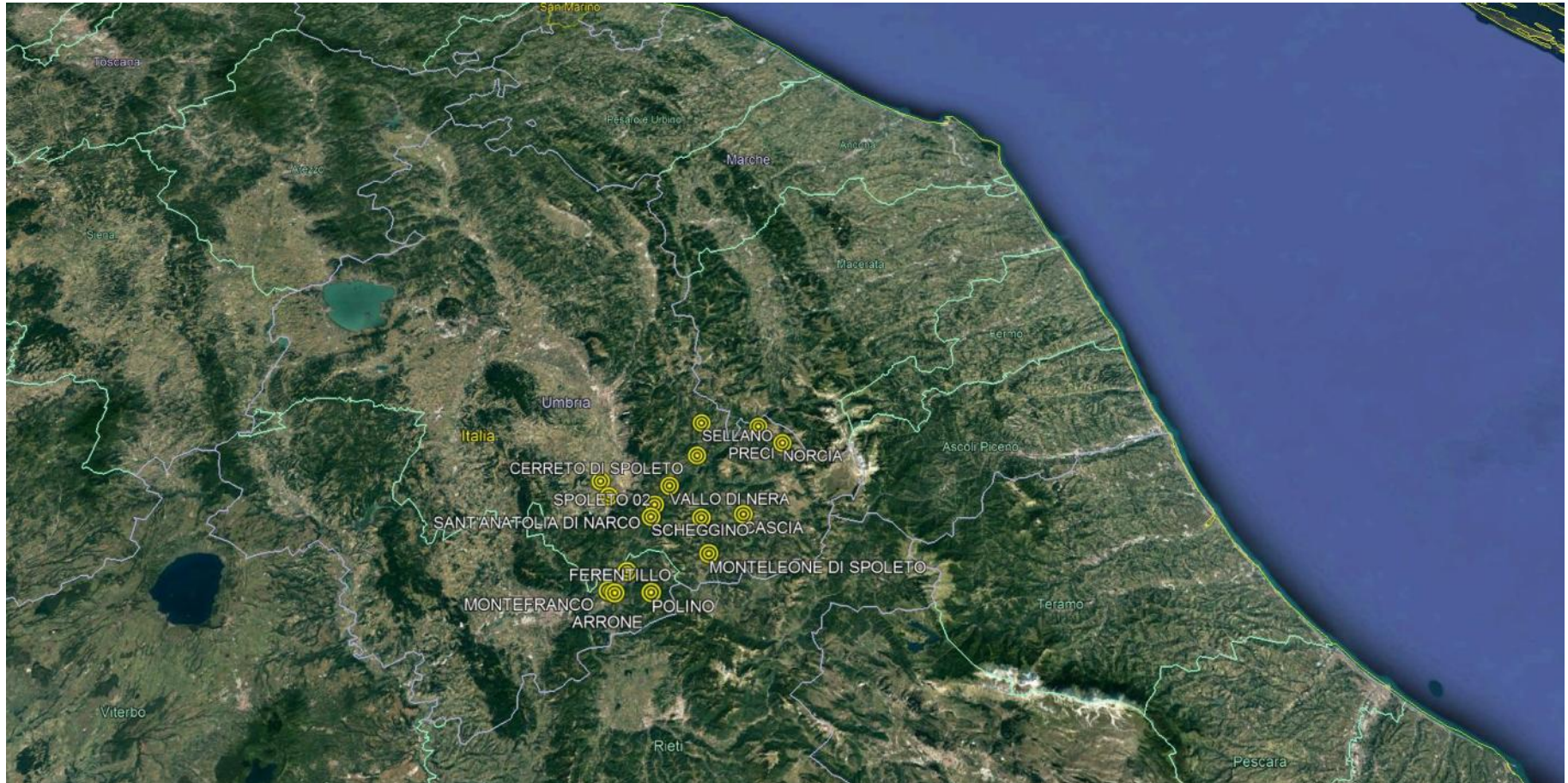
UMBRIA (figura 03): Arrone, Cascia, Cerreto di Spoleto, Ferentillo, Montefranco, Monteleone di Spoleto, Norcia, Poggiodomo, Polino, Preci, Sant'Anatolia di Narco, Scheggino, Sellano, Spoleto01, Spoleto02, Vallo di Nera.



**Figura 1.** Localizzazione delle prove DH eseguite nella macroarea Marche 2



**Figura 2.** Localizzazione delle prove DH eseguite nella macroarea Marche 3.



**Figura 3.** Localizzazione delle prove DH eseguite nella macroarea Umbria.



## 2. GRUPPO DI LAVORO

Si riporta nella tabella 2 l'elenco del personale scientifico, tecnico ed amministrativo impegnato nelle attività di questa campagna:

<b>PERSONALE</b>	<b>QUALIFICA</b>	<b>COMPETENZE</b>
Vincenzo Di Fiore	Ricercatore - Responsabile progetto	Geofisico
Giuseppe Cavuoto	Tecnologo	Rilievo geologico
Nicola Pelosi	Ricercatore	Geofisico
Michele Punzo	Tecnologo	Geofisico
Daniela Tarallo	Tecnologo	Geofisico
Michele Iavarone	Operatore Tecnico	Tecnico
Rodolfo Baculo	Operatore Tecnico	Tecnico
Barbara Bianchi	Collaboratore di amministrazione	Gestione amministrativa

**Tabella 2.** Elenco del personale.





### 3. PROCEDURE DI ESECUZIONE DOWN-HOLE

Le prove Down-Hole presentano potenziali elementi di criticità negli aspetti esecutivi della tecnica sperimentale e sono individuabili: nella sorgente di onde SH, nella corretta esecuzione dei fori di sondaggio (con riferimento alla necessità di controllare l'esecuzione e la maturazione della cementazione) e nell'orientamento dei geofoni orizzontali. Altre criticità coinvolgono aspetti legati all'interpretazione delle tracce.

Una delle più importanti fasi per effettuare una prova in foro è il condizionamento del foro stesso. Per condizionamento di un foro si intende un processo di opere necessario per garantire il giusto accoppiamento tra il tubo di rivestimento ed il profilo verticale di terreno incassante. Per effettuare una prova sismica in foro, in generale, nel foro dove vanno alloggiati i sensori o le sorgenti non distruttive, è necessario predisporre il foro di sondaggio verticale eseguendo un rivestimento del perforo con tubazione ad alta impedenza alle vibrazioni (PVC o alluminio). Se non è stata realizzata una buona cementazione (problema particolarmente sentito, ad esempio, se si opera in terreni granulari) durante la prova DH le registrazioni risulteranno ricche di alte frequenze. Nello spazio anulare in corrispondenza tra le pareti del foro ed il tubo di rivestimento, va effettuata una cementazione dal basso fino al rifluimento della miscela cementizia in superficie, utilizzando valvola di fondo foro e qualora non sia possibile, utilizzando un tubo calato nell'intercapedine fino a fondo foro. Deve essere sempre garantita la perfetta aderenza tra tubo e terreno, in modo che le onde sismiche possano trasmettersi ad ogni profondità dal terreno al tubo e quindi ai geofoni. Per eseguire una cementazione efficace è buona regola eseguirla dal basso, mediante tubi che iniettano la malta in pressione nell'intercapedine, piuttosto che per gravità. Ovviamente è necessario accertarsi che la cementazione occupi tutto lo spazio disponibile e che la prova venga eseguita dopo non meno di 25-30 giorni di stagionatura della miscela di cemento. L'elaborazione dei dati, per la determinazione delle velocità delle onde P ed S, deve essere condotta o con il metodo delle dromocrone o quello delle velocità medie per intervallo di profondità, a partire dall'analisi visuale e dallo studio dei correlogrammi nei casi di più difficile interpretazione. Per ogni registrazione si dovrebbero compiere un minimo tre battute per ciascuna



profondità e per ciascun tipo di energizzazione, e questo sia per aumentare il rapporto segnale/rumore ma anche per minimizzare eventuale errore di localizzazione dei primi arrivi.

Bisogna poi effettuare dei test per verificare gli eventuali ritardi o anticipi indotti dal sistema trigger (causati da un'impresione di chiusura dello starter nel sistema trigger) durante le fasi di energizzazione sulle fasi P ed S, e per tale motivo è utile inserire durante l'acquisizione dati dei geofoni esterni, di cui uno a componente verticale ed uno a componente orizzontale.

Per quanto riguarda l'attendibilità e l'affidabilità dei risultati si evidenzia la necessità di attribuire un margine di incertezza anche a questo tipo di prove, generalmente considerate come 'ground truth'. È quindi necessaria una valutazione esplicita delle incertezze che possono derivare sia da errori di misura, sia da aspetti interpretativi. Per il tipo di prova, è fondamentale l'importanza del controllo di qualità delle tracce temporali acquisite.

Per l'indagine DH è critica la valutazione dell'influenza del modello stratigrafico usato nell'interpretazione. Ad esempio, la scelta delle interfacce nell'interpretazione dei tempi di primo arrivo mediante dromocrone o inversione, può giustificare in parte le differenze esemplificate. Nei casi di particolare incertezza è pertanto opportuno ricorrere a diverse tecniche di interpretazione dello stesso dato sperimentale.

#### **4. INDAGINE IN FORO DOWN-HOLE**

Il metodo sismico Down-Hole è utilizzato per misurare le velocità delle onde elastiche di compressione e di taglio, che si propagano nel terreno in seguito ad una energizzazione superficiale realizzata, di norma, mediante una massa battente. A differenza della metodologia classica della sismica a rifrazione è possibile individuare anche degli strati lenti; non bisogna assumere, per questa metodologia di prospezione, che la velocità aumenti con la profondità.

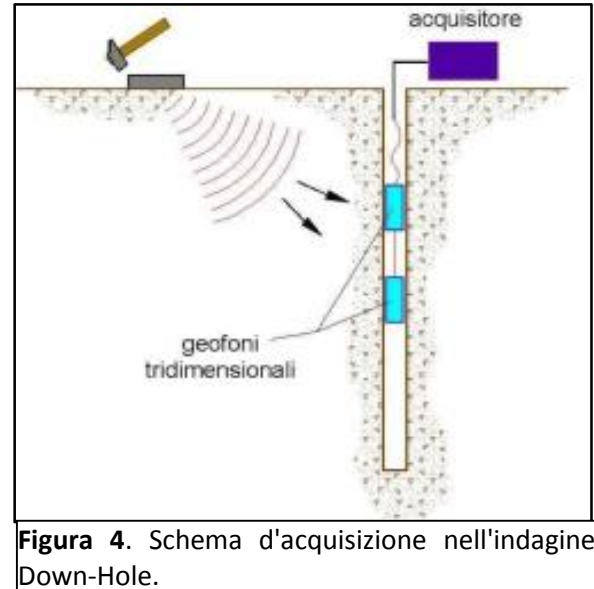
Nella tecnica di indagine Down-Hole si installa in superficie una sorgente ad impulsi verticali e/o orizzontali e nel foro di misura vengono calati uno o più ricevitori a distanza nota ed opportunamente orientati (figura 4).

Difatti, nella prova down-hole si misurano i tempi di arrivo delle varie fasi P od S man mano che queste penetrano negli strati più profondi: possono essere facilmente identificate ed



interpretate anche inversioni di velocità. La stima di queste velocità è eseguita attraverso le misure dei tempi di propagazione delle onde elastiche longitudinali (P) e trasversali polarizzate (SH).

L'impulso alla sorgente produce lungo la direzione di propagazione verticale prevalentemente onde longitudinali P se la battuta è effettuata verticalmente sulla piastra mentre produce impulsi prevalentemente orizzontali e quindi onde di taglio polarizzate orizzontalmente (le cosiddette onde SH) se vengono effettuate battute parallele al terreno di



**Figura 4.** Schema d'acquisizione nell'indagine Down-Hole.

superficie. L'arrivo è registrato dai geofoni, alle diverse profondità in cui sono posizionati. I geofoni vengono bloccati nel foro mediante sistemi ad aria compressa o idraulici. Nel perforo, viene calata la sonda determinando, per intervalli di profondità fino a fondo foro, i tempi di propagazione delle onde elastiche.

Per l'esecuzione delle prove si è scelto di eseguire un passo pari a 1 metro con la sorgente posta ad una distanza di 2,00 metri dal boccaforo.

La prova sismica down-hole richiede, quindi, un perforo adeguatamente condizionato, una sorgente energizzante, dei geofoni opportunamente assemblati ed un'unità di registrazione.

L'attrezzatura impiegata per le indagini ed i parametri di acquisizione utilizzati per le prove eseguite nei diversi siti sono:

- n.2 geofoni 3D (figura 5) (una componente verticale, due componenti orizzontali) con frequenza naturale di 14 Hz con dispositivo di bloccaggio al foro mediante pistoni ad aria compressa. Ogni geofono registra una componente verticale sensibile alla ricezione dei tempi di arrivo delle onde P e due componenti orizzontali che, disposti a 90° tra loro, sono sensibili alla ricezione dei tempi di arrivo delle onde S.



**Figura 5.** Ricevitore da foro triassiale. Il sensore è dotato di pistoni di ancoraggio comandati dalla superficie mediante un sistema pneumatico che consente di ottenere un perfetto accoppiamento tra i sensori e le pareti interne del rivestimento del foro alle varie profondità di misura.

- Sismografo: 24 canali a 24 bit per canale;
- Sorgente: massa di 10 Kg battente su una trave di legno rivestita, alle due estremità, con una piastra in acciaio;
- Intervallo di campionamento: variabile 0.125 ms;
- Finestra temporale di acquisizione: 1 s;
- Distanza intergeofonica: 1 m;
- Distanza bocca pozzo: 2 m;
- Stack: variabile da 3-5 (per aumentare il rapporto S/N ma anche per minimizzare eventuale errore di localizzazione dei primi arrivi).



Figura 6. Componenti acquisizione DH

Successivamente per stimare le velocità dei sismostrati presenti nel sottosuolo investigato viene utilizzata la procedura definita "metodo delle velocità intervallo".

I tempi di arrivo ai geofoni ( $T_{oss}$ ) vengono innanzitutto 'corretti' dell'effetto dovuto dall'eccentricità della sorgente rispetto al bocca-pozzo. Sono determinati i tempi ( $T_{corr}$ ) che impiegherebbe l'onda se si propagasse in direzione verticale, ovvero:

$$T_c = \frac{z}{r} T_o$$

dove  $z$  è la profondità del geofono nel foro;  $r$  è la distanza geofono-sorgente e  $t_{oss}$  è il tempo letto sui sismogrammi.

Per determinare la velocità ( $V_p$ ,  $V_s$ ) basterebbe dividere la distanza diretta sorgente-ricevitore per il relativo tempo di arrivo ('reale'), oppure la profondità di ciascun geofono per il rispettivo tempo di arrivo 'corretto':

$$V_x = \frac{d_i}{t_x}$$



Tale procedura, specie a profondità elevate, fornisce un valore mediato della velocità su tutti gli strati superiori senza tener conto delle differenti rigidità.

Per questo motivo si preferisce determinare la velocità relativamente al singolo tratto compreso tra due ricevitori, dividendo la distanza (nota) tra i geofoni:

$$V_x = \frac{\Delta_z}{\Delta_t}$$

## 5. CONSIDERAZIONI

La microzonazione sismica richiede numerose indagini in relazione alla complessità del modello geologico e del modello geotecnico di riferimento, nonché per i marcati fenomeni di amplificazione sismica locale e di fratturazione al suolo.

Sono state effettuate n. 71 prove sismiche in foro di tipo Down-Hole per la ricostruzione dei profili di velocità in onde  $V_p$  e  $V_s$ , la determinazione dei moduli dinamici dei materiali carotati, la determinazione del parametro  $VS_{30}$  (velocità media pesata entro 30 metri di profondità) ai sensi delle NTC 2008 e la definizione della categoria sismica del suolo di fondazione, in corrispondenza dei sondaggi opportunamente attrezzati. L'elaborazione dei dati sismici ha non solo permesso di "tipizzare" il sottosuolo investigato in sismostrati ma all'interno di ogni foro sono state eseguite prove SPT, prelevati n. 2 campioni indisturbati e n. 2 campioni disturbati (per essere sottoposte a specifiche prove di laboratorio), il tutto seguendo le indicazioni contenute nel par. 5 dei "Protocolli di acquisizione dati ed elaborazione relativi alle attività di Microzonazione di Livello III nei 140 Comuni di cui all'Ordinanza n. 24 del 12 maggio 2017 della Presidenza del Consiglio dei Ministri" forniti dal centro MS.

Si riportano, a titolo esemplificativo, per ognuna delle tre macroaree, una scheda di acquisizione della prova DH. I valori in termini di velocità sismiche longitudinali e di taglio medi dei sismostrati sono riportati unitamente ai valori intervallo ed i relativi grafici. Inoltre è stato calcolato il valore  $VS_{30}$  per definire lo spettro di risposta elastico.



## 6. MACROAREA MARCHE 2

### 6.1 Sito: Macerata

Nella zona oggetto di studio il modello di sottosuolo è caratterizzato dalla seguente presenza di sedimenti (Figura 7).

Le unità di copertura consistono in depositi continentali quaternari e terreni di riporto (Pleistocene medio-Olocene). Nel dettaglio:

- **Terreni di riporto:** Limi, limi argillosi, limi sabbiosi e sabbie con ghiaietto frammisto, laterizi e materiali di origine antropica.

- **Depositi eluvio-colluviali:** Argille, argille sabbiose, argille limose. Limi, limi argillosi, limi argillosi sabbiosi, sabbie fini limose o argillose.

- **Depositi alluvionali:** Limi, limi argillosi, limi argillosi sabbiosi, sabbie fini limose o argillose.

Le unità del substrato fanno parte della formazione delle Argille azzurre (Zancleano p.p. – Santerniano). In particolare la litofacies arenaceo-pelitica consiste in alternanze di strati di arenarie e sabbie con intercalazioni argilloso-limose.

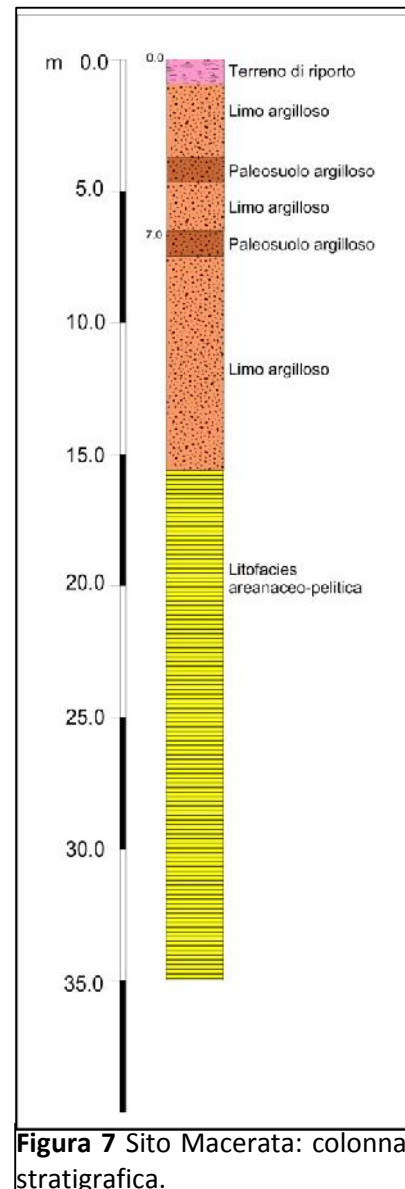


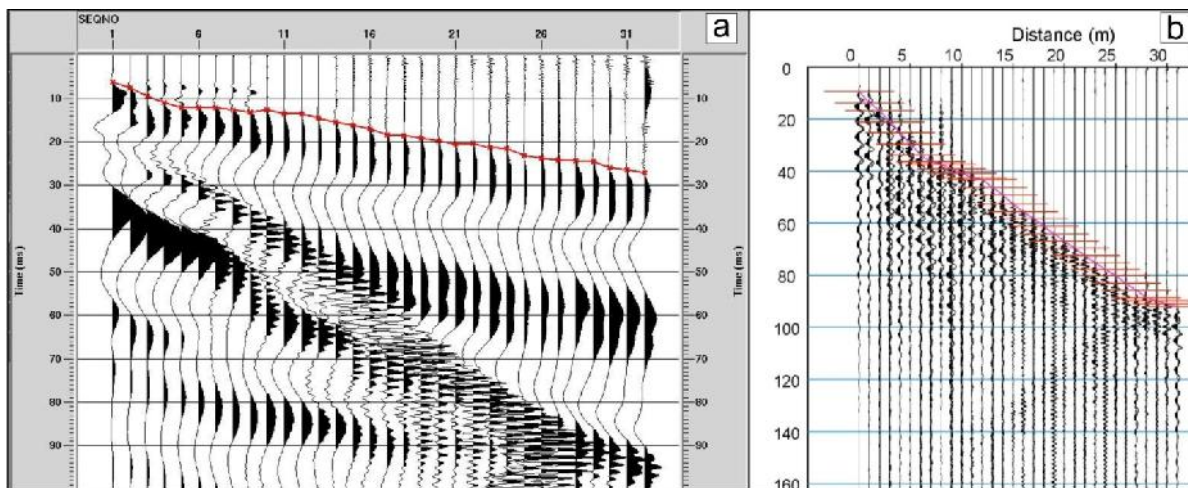
Figura 7 Sito Macerata: colonna stratigrafica.



## 6.2 Dati geofisici

### 6.2.1 Picking

La valutazione dei tempi dei primi arrivi (figura 8), sia nel campo delle onde P che delle onde SH, è stato effettuato eseguendo sia un'analisi dei segnali così come rilevati in campagna sia di procedere a filtri (es. Filtri High Pass e Band Reject), amplificazioni (es. AGC) e sovrapposizioni dei segnali stessi. È importante sottolineare come, nel caso delle onde SH, i segnali sono stati sovrapposti in opposizione di fase così da rendere più evidente gli arrivi del primo impulso polarizzato orizzontalmente.



**Figura 8.** Lettura dei tempi di primo arrivo. a) determinazione del primo arrivo delle onde P; b) determinazione del primo arrivo delle onde S.

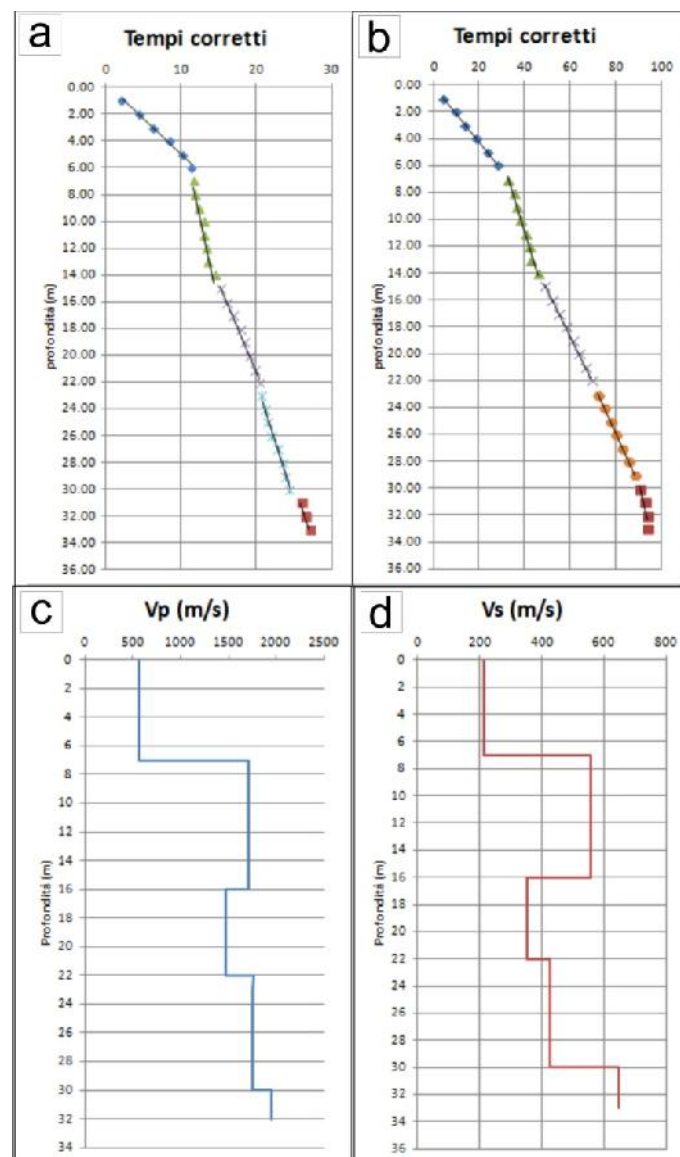
### 6.2.2 Correzione dei tempi di primo arrivo

Come descritto nel paragrafo 4, dato che la sorgente energizzante è stata posizionata ad una distanza non trascurabile dall'asse del perforo (2 metri), è necessario correggere i tempi di primo arrivo in modo da ottenere i valori che si riscontrerebbero se il percorso dei raggi sismici fosse verticale. I tempi corretti sono stati poi elaborati rispetto alla profondità (z) in modo da individuare le dromocrone (Figure 9a e 9b) relative ai litotipi incontrati nella perforazione, determinandone le velocità e gli spessori. Allo scopo di avere una valutazione del grado di





disomogeneità dei sismostrati riscontrati nella perforazione, è stata determinata la velocità intervallo (Figure 9c e 9d), cioè la velocità cui viaggerebbe il fronte d'onda, lungo l'asse verticale, tra due posizioni consecutive dell'apparato geofonico. I tempi scaturiti, consentono in funzione della distanza tra il punto di energizzazione e la ricezione dei segnali, di definire, per i singoli intervalli, le velocità delle onde P ( $V_p$ ) e delle onde S ( $V_s$ ).



**Figura 9.** a) Dromocrone onde P; b) Dromocrone onde S; c) Velocità intervallo onde P; d) velocità intervallo onde S.



### 6.2.3 Risultati

Le colonne sismostratigrafiche (Tabella 3), ottenute dall'elaborazione dei dati DH, mostrano che i terreni di copertura fini hanno velocità di circa  $V_s$  250 m/sec. I terreni di copertura ascrivibili alle ghiaie mostrano velocità  $V_s$  dai 350 ai 550 m/sec. Il substrato geologico mostra valori superiori a 600 m/sec. Dall'elaborazione di tali dati si evince che la velocità equivalente  $V_{S30}$  al suolo di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità dalla superficie topografica dove è stata effettuata la prospezione sismica risulta:  $V_{S30}$ : 355 m/s. (Categoria di suolo C)

<b>Profondità (m)</b>	<b>Vp (m/s)</b>
0.0 - 7.0	562
7.0 - 16.0	1712
16.0 - 22.0	1475
22.0 - 30.0	1748
30.0 - 33.0	1951
<b>Profondità (m)</b>	<b>Vs (m/s)</b>
0.0 - 7.0	215
7.0 - 16.0	559
16.0 - 22.0	353
22.0 - 30.0	426
30.0 - 33.0	647

**Tabella 3:** Velocità intervallare delle onde di compressione e delle onde di taglio.



## 7. MACROAREA MARCHE 3

### 7.1 Sito: Ascoli Piceno

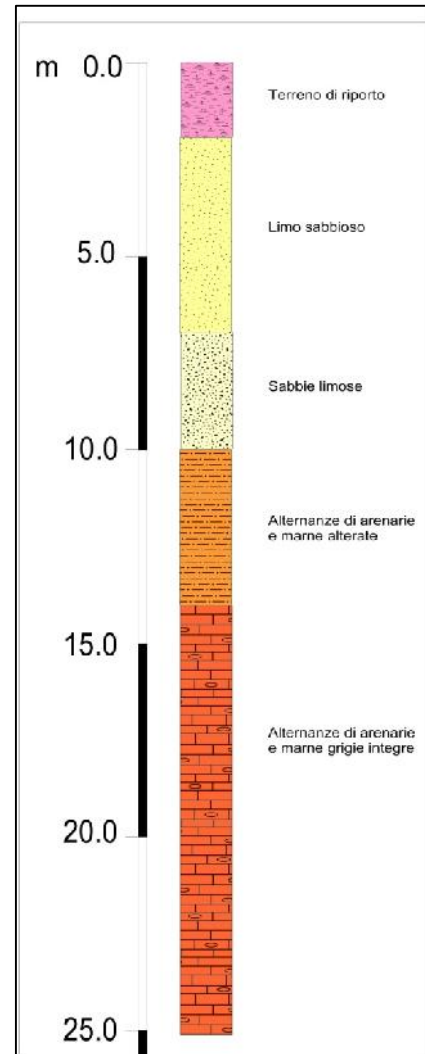
Nella zona oggetto di studio il modello di sottosuolo è caratterizzato dalla seguente presenza di sedimenti (figura 10).

In particolare è possibile distinguere al di sopra del substrato roccioso, due litologie appartenenti a tipologie deposizionali di coperture.

Nel dettaglio le litologie di copertura individuate, escludendo i circa 2 metri di riporto antropico, fanno parte delle coltri eluvio-colluviali e sono costituite da:

- Limi sabbiosi, per uno spessore di circa 5 metri;
- Sabbie limose, per uno spessore di circa 3 metri

Le unità del substrato comprendono per uno spessore di circa 4 metri, alternanze di arenarie e marne fratturate/alterate, a cui seguono alternanze di arenarie e marne grigie intere (bedrock sismico) associabile a Torbiditi silico-clastiche in strati spessi e medi, a granulometria da grossolana a fine, con rare intercalazioni sottili, a volte discontinue, di argille siltose azzurre.



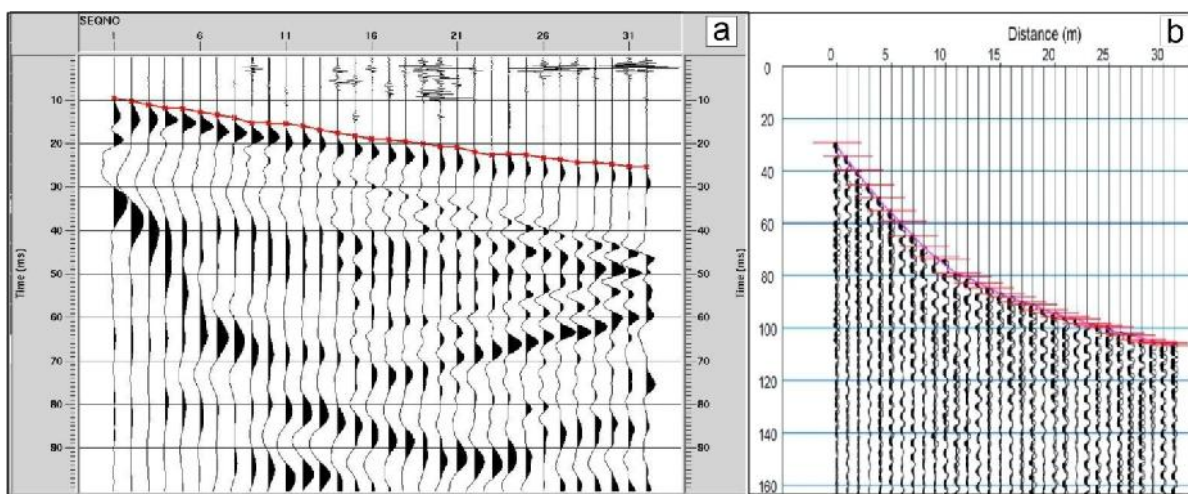
**Figura 10.** Sito Ascoli Piceno: colonna stratigrafica.



## 7.2 Dati geofisici

### 7.2.1 Picking

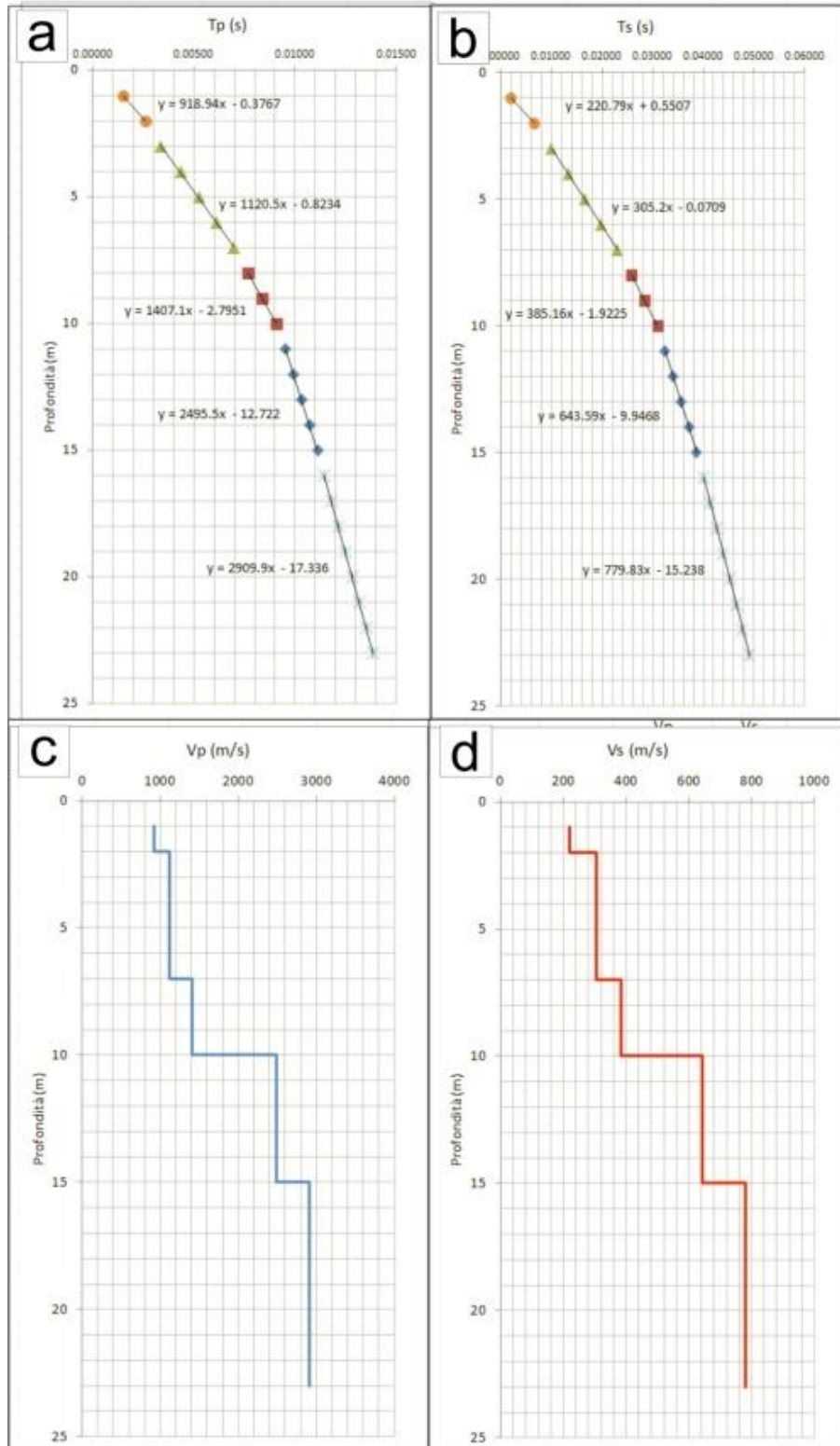
I segnali sismici registrati in formato digitale sono stati analizzati nel dominio del tempo con apposito software per la stima del primo arrivo delle onde sismiche generate (P ed S) (Figura 11).



**Figura 11.** Lettura dei tempi di primo arrivo. a) determinazione del primo arrivo delle onde P; b) determinazione del primo arrivo delle onde S

### 7.2.2 Correzione dei tempi di primo arrivo

L'elaborazione dei dati è consistita nella determinazione della velocità di propagazione delle onde sismiche P e S (figure 12). Tale velocità si ottiene conoscendo il tempo d'arrivo dei treni d'onda analizzati nonché la distanza tra il punto d'energizzazione ed il sensore posto in foro.



**Figura 12.** a) Dromocrone onde P; b) Dromocrone onde S; c) Velocità intervallo onde P; d) velocità intervallo onde S.



### 7.2.3 Risultati

Le colonne sismostratigrafiche (Tabella 4), ottenute dall'elaborazione dei dati DH, mostrano che i terreni di copertura fini hanno velocità delle onde di taglio variabili nell'intervallo 220-385 m/sec. I terreni appartenenti al substrato geologico alterato mostrano valori superiori a 600 m/sec, mentre il bedrock presenta valori di circa 800 m/s.

Dall'elaborazione di tali dati si evince che la velocità equivalente  $V_{s30}$  al suolo di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità dalla superficie topografica dove è stata effettuata la prospezione sismica risulta 498 m/s (Categoria di suolo B).

<b>Profondità (m)</b>	<b>Vp (m/s)</b>
0.0 - 2.0	919
2.0 - 7.0	1120
7.0 - 10.0	1407
10.0 - 15.0	2495
15.0 - 23.0	2910
<b>Profondità (m)</b>	<b>Vs (m/s)</b>
0.0 - 2.0	221
2.0 - 7.0	305
7.0 - 10.0	385
10.0 - 15.0	644
15.0 - 23.0	780

**Tabella 4:** Velocità intervallare delle onde di compressione e delle onde di taglio.



## 8. MACROAREA UMBRIA

### 8.1 Sito: Spoleto

Nella zona oggetto di studio il modello di sottosuolo è caratterizzato dalla seguente presenza di sedimenti (figura 13):

- Depositi antropici (Olocene) – materiali eterogeni di natura antropica.

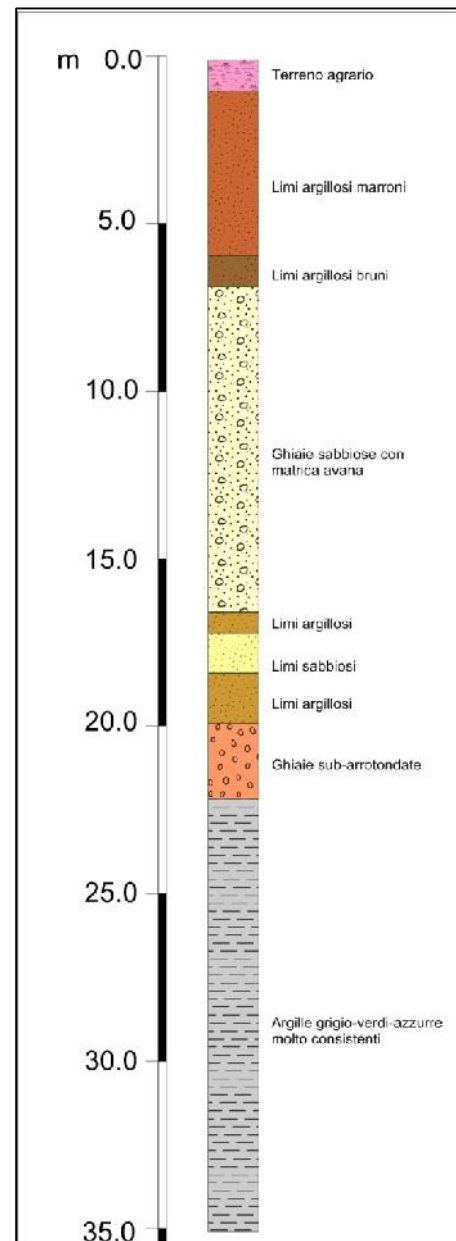
- Depositi detritico-eluviali (Olocene) – terreni eterogenei con abbondante matrice limoso-sabbiosa di colore marrone/bruno sciolti, o da limi argillosi con scarse ghiaie detritiche, normalconsolidati.

- Alluvioni recenti ed attuali (Pleistocene-Olocene) – ghiaie ciottolose da sciolte a mediamente addensate, subarrotondate a bassa sfericità, con matrice sabbiosa e sabbioso-limosa, con lenti e strati di sabbie color avana.

- limi argillosi sovraconsolidati, di colore grigio-azzurro e ocra e sabbie fini addensate di colore ocra

- Ghiaie ciottolose da poco arrotondate a subarrotondate, a bassa sfericità, da molto addensate a cementate

- argille limose con intercalazioni e lenti di ghiaie molto consistenti.



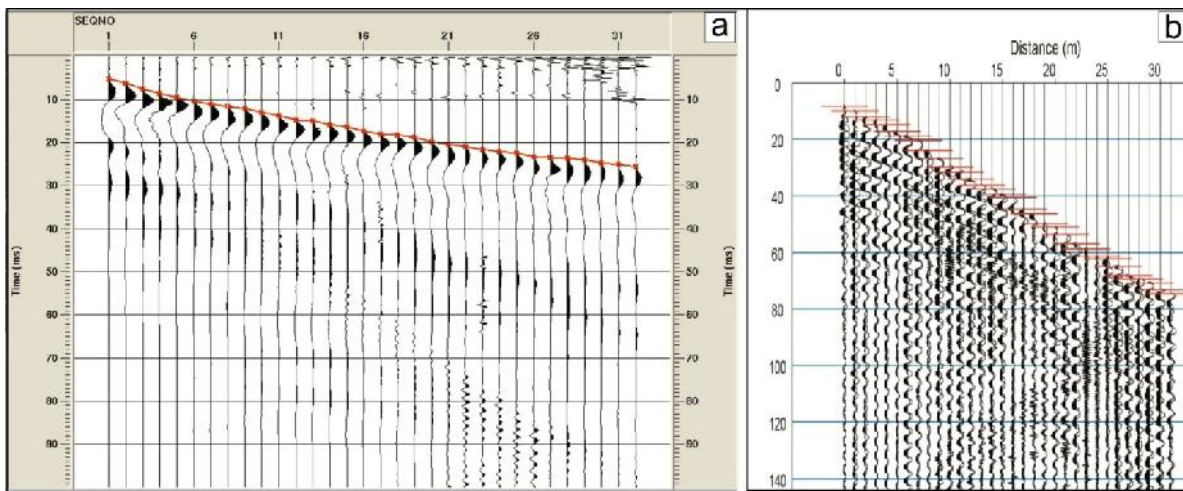
**Figura 13.** Sito Spoleto: colonna stratigrafica.



## 8.2 Dati geofisici

### 8.2.1 Picking

L'indagine di sismica DH si basa sulla determinazione dei primi arrivi delle onde P ed S (Figura 14) i quali, sottoposti ad un processo di correzione, permettono di ricostruire la distribuzione monodimensionale delle velocità sismiche.

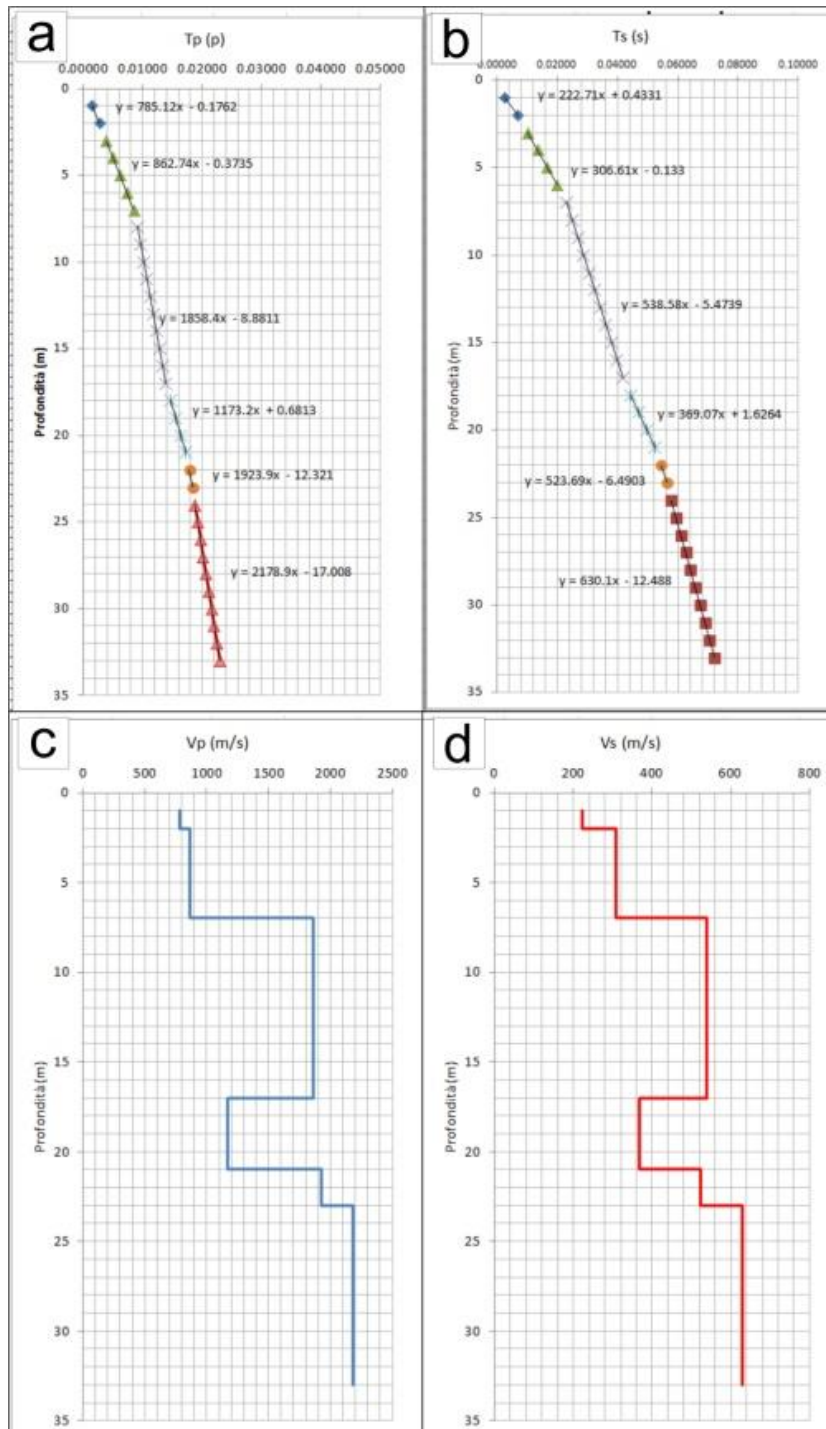


**Figura 14.** Lettura dei tempi di primo arrivo. a) determinazione del primo arrivo delle onde P; b) determinazione del primo arrivo delle onde S

### 8.2.2 Correzione dei tempi di primo arrivo

Dopo che sui sismogrammi registrati sono stati “letti” i tempi di arrivo sia delle onde sismiche P che delle onde S, per ogni intervallo di profondità, il calcolo delle velocità sismiche (Figure 15) è stato realizzato attraverso la misura della differenza di tempi fra posizioni differenti del geofono ed il punto di energizzazione.





**Figura 15.** a) Dromocrone onde P; b) Dromocrone onde S; c) Velocità intervallo onde P; d) velocità intervallo onde S.



### 8.2.3 Risultati

Le colonne sismostratigrafiche (Tabella 5), ottenute dall'elaborazione dei dati DH, mostrano che i depositi detritico-eluviali hanno velocità delle onde di taglio di circa 300 m/sec. Le alluvioni recenti mostrano valori superiori a 530 m/sec, mentre le argille limose consistenti presentano valori di superiori a 800 m/s.

Dall'elaborazione di tali dati si evince che la velocità equivalente  $V_{s30}$  al suolo di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità dalla superficie topografica dove è stata effettuata la prospezione sismica risulta 431 m/s (Categoria di suolo B).

<b>Profondità (m)</b>	<b><math>V_p</math> (m/s)</b>
0.0 - 2.0	785
2.0 - 7.0	863
7.0 - 17.0	1858
17.0 - 21.0	1173
21.0 - 23.0	1923
23.0 - 33.0	2178
<b>Profondità (m)</b>	<b><math>V_s</math> (m/s)</b>
0.0 - 2.0	223
2.0 - 7.0	307
7.0 - 17.0	539
17.0 - 21.0	369
21.0 - 23.0	524
23.0 - 33.0	630

**Tabella 5:** Velocità intervallare delle onde di compressione e delle onde di taglio



## **Conclusioni**

La tecnica DH è ancor oggi un modo valido per misurare la velocità delle onde sismiche P ed S. In realtà non è un metodo banale ma neanche semplice da applicare in quanto per un corretto test è necessario seguire le linee guida ASTM e Indirizzi e Criteri (volume DPC) che risultano molto rigorose.

L'esperienza maturata in questo progetto ha evidenziato l'importanza di questa tecnica nella determinazione delle velocità  $V_p$  e  $V_s$ .

In particolare, si mette in evidenza la variabilità delle velocità delle onde sismiche nelle diverse formazioni che a volte, come nel caso del complesso pelitico-arenaceo risulta abbastanza ampia.