

Schlumberger



**STOGIT:
STUDIO DI FATTIBILITÀ
RETE MICROSISMICA DI SUPERFICIE
CAMPO DI ALFONSINE (RA)**

Studio eseguito da:

Fabio Ogliani
Giulia Barisione

Schlumberger
SIS-Data Services
Continental Europe

DOCUMENTO DI RIFERIMENTO
0128-00-BGRV-12538

ALLEGATO **Punto n.20**

Studio di fattibilità di una rete microsismica di superficie nel campo Stogit di Alfonsine (RA)

Premessa.....	3
Scopo del lavoro.....	4
Parte prima	5
1 - STAZIONI DELLA RETE.....	5
2 - MODELLO DI VELOCITÀ.....	6
3 - ANALISI DEL RUMORE AMBIENTALE.....	11
4 - SCALE DI MAGNITUDO	23
Parte seconda: modellizzazione della risposta microsismica	25
Magnitudo minime per sola detezione (3 ricevitori) Rumore di fondo minimo per singola stazione, Mappe a diversi livelli di profondità.....	27
Magnitudo minime per sola detezione (3 ricevitori) Rumore di fondo massimo per singola stazione, Mappe a diversi livelli di profondità.....	30
Magnitudo minime per sola detezione (3 ricevitori) Rumore di fondo massimo con due stazioni in pozzetto, Mappe a diversi livelli di profondità.....	33
Magnitudo minime per localizzazione (4 ricevitori) Rumore di fondo minimo per singola stazione, Mappe a diversi livelli di profondità.....	36
Magnitudo minime per localizzazione (4 ricevitori) Rumore di fondo massimo per singola stazione, Mappe a diversi livelli di profondità.....	39
Magnitudo minime per sola localizzazione (3 ricevitori) Rumore di fondo massimo con due stazioni in pozzetto, Mappe a diversi livelli di profondità.....	42
Incertezza verticale di localizzazione Rumore di fondo minimo per singola stazione, Mappe a diversi livelli di profondità.....	45
Incertezza verticale di localizzazione Rumore di fondo massimo per singola stazione, Mappe a diversi livelli di profondità.....	48
Incertezza verticale di localizzazione Rumore di fondo massimo con due stazioni in pozzetto, Mappe a diversi livelli di profondità.....	51
Incertezza orizzontale di localizzazione Rumore di fondo minimo per singola stazione, Mappe a diversi livelli di profondità.....	54
Incertezza orizzontale di localizzazione Rumore di fondo massimo per singola stazione, Mappe a diversi livelli di profondità.....	57
Incertezza orizzontale di localizzazione Rumore di fondo massimo con due stazioni in pozzetto, Mappe a diversi livelli di profondità.....	60
Tabelle riassuntive delle soglie di detezione e localizzazione e delle relative incertezze.....	63
Conclusioni	64

Studio di fattibilità di una rete microsismica di superficie nel campo Stogit di Alfonsine (RA)

Premessa

A seguito della presentazione da parte di Stogit di istanza di avvio della procedura di Valutazione di Impatto Ambientale relativa al progetto di sviluppo allo stoccaggio del giacimento di Alfonsine (RA), il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, con comunicazione Prot. n. 0002356 del 27 giugno 2016, ha richiesto documentazione integrativa al fine di espletare la suddetta procedura.

Questa relazione tecnica intende riscontrare in particolare la richiesta formulata al Punto 20 della citata comunicazione, ossia:

“Si chiede di presentare una proposta di monitoraggio sismico delle attività correlate all'esercizio dello stoccaggio, che tenga conto delle seguenti considerazioni:

- *dovrà essere realizzata una rete sismica locale che permetta di valutare la sismicità naturale e di verificare tempestivamente eventuali anomalie sismiche dovute alle attività di esercizio; tale rete di monitoraggio dovrà essere realizzata prima della perforazione dei pozzi in previsione, in maniera da misurare la sismicità naturale in atto e le eventuali altre vibrazioni ambientali presenti (quindi definire l'attività sismica di fondo);*
- *tale rete di monitoraggio sismico dovrà garantire un monitoraggio di qualità uniforme ed essere in grado di rilevare e localizzare i terremoti a partire da magnitudo locale ML compresa tra 0 e 1 ($0 \leq ML \leq 1$), con incertezza nella localizzazione dell'ipocentro di alcune centinaia di metri all'interno del target;*
- *considerato l'elevato rumore sismico di fondo presente in superficie nella Pianura Padana, alcuni strumenti dovranno essere installati in foro (a profondità di almeno m 100 da p.c.); tale soluzione permetterà di valutare tempestivamente eventuali anomalie sismiche indotte dalle attività di esercizio (prelievo e/o reiniezione)“.*

Sulla base dello studio intrapreso è stata definita una configurazione geometrica teorica della rete di monitoraggio microsismico, rispondente alla prescrizione sopra citata, costituita da 5 stazioni ed in grado di coprire l'area interessata dal giacimento.

SCOPO DEL LAVORO

Questo studio intende rispondere all'interesse per una futura realizzazione di una rete microsismica di dettaglio nel campo a gas di Alfonsine, non lontano da Ravenna.

La microsismica è una tecnica geofisica di tipo passivo, in cui, cioè, non viene emesso alcun segnale artificiale e i cui sensori semplicemente registrano i segnali sismici che possono provenire dal sottosuolo. In particolare 'si tende l'orecchio' verso quegli eventi a bassa intensità che sono avvertibili solo con strumentazione adatta (in pratica verso gli eventi sismici di magnitudo inferiore a 3).

La microsismica è essenzialmente una tecnica di geofisica ambientale perché permette di verificare al loro insorgere potenziali effetti geodinamici qualora si svolgano operazioni industriali in sottosuolo.

Nel caso presente, la rete microsismica di dettaglio viene intesa come contributo allo svolgimento in sicurezza di future operazioni di stoccaggio e recupero di gas naturale nel campo attualmente esaurito di Alfonsine.

Poiché in un esperimento di microsismica non è possibile controllare la sorgente di energia acustica (generata da microsismi che avvengono in natura in qualsiasi punto sotto la superficie) occorre modellizzare in anticipo l'efficacia della rete in progetto, in relazione alle proprietà della rete stessa e del luogo in cui si colloca.

La prima parte di questo rapporto descrive le condizioni di contorno entro cui si muove l'indagine:

- Le stazioni riceventi della rete in progetto
- Il modello di velocità del sottosuolo
- Il rumore ambientale alle stazioni che può contrastare la ricezione dei segnali sismici di interesse.
- Le scale di magnitudo adottate.

La seconda parte del rapporto contiene le simulazioni che descrivono le magnitudo minime degli eventi che possono essere riconosciuti dalla rete, sia in termini di semplice detezione, sia in termini di localizzazione degli ipocentri in coordinate spaziali. La localizzabilità è accompagnata dalla possibile incertezza che le può caratterizzare.

Data la complessità della predizioni, queste vengono descritte da mappe situate a profondità caratteristiche del sottosuolo: 1500 m, 3000 m e 5000 m.

PARTE PRIMA:

- 1- STAZIONI DELLA RETE IN PROGETTO**
- 2- MODELLO DI VELOCITÀ**
- 3- ANALISI DEL RUMORE AMBIENTALE DELLE STAZIONI**
- 4- SCALE DI MAGNITUDO ADOTTATE**

1 STAZIONI DELLA RETE

Al fine di ottemperare alla prescrizione al Punto 20 della richiesta del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare di giugno 2016, la committente Stogit ha dapprima individuato la possibile localizzazione di cinque stazioni, secondo una configurazione rispondente ai seguenti requisiti:

- copertura areale dell'intera area interessata dal giacimento
- copertura areale dell'area definita 'Dominio interno di rilevazione' nelle linee-guida per i monitoraggi delle attività minerarie di sottosuolo pubblicate dal Ministero dello Sviluppo Economico nel novembre 2014; tale dominio si estende per una fascia di circa 2 km oltre la proiezione in superficie del giacimento.

Le cinque stazioni, denominate con numerazione progressiva seguita dal suffisso "Di", distano fra loro mediamente 5 km. La stazione 1Di è collocata al centro della proiezione del giacimento, mentre le altre si situano esternamente allo stesso, presso i margini del Dominio interno (Figura 1, Tab 1).

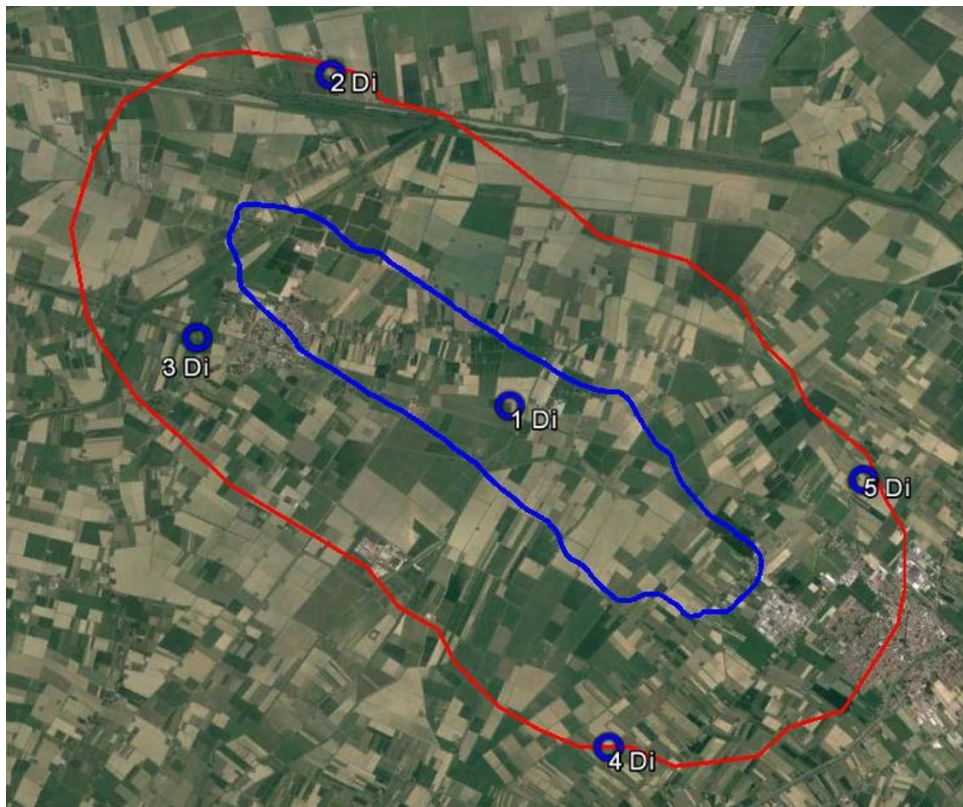


Figura 1. Ubicazione delle stazioni della rete in progetto in relazione alla proiezione in superficie del limite del giacimento (in ble) ed al Dominio interno di rilevazione (in rosso).

Tabella 1: Coordinate stazioni Dominio interno Dominio esteso

STAZIONE	LATITUDINE	LONGITUDINE
1 Di	44°31'59.8141"	11°58'29.8805"
2 Di	44°34'33.1103"	11°56'41.9101"
3 Di	44°32'30.3903"	11°55'23.2403"
4 Di	44°29'31.1604"	11°59'27.2902"
5 Di	44°31'13.2003"	12°02'29.6602"

2 MODELLO DI VELOCITÀ

La definizione del modello di velocità di sottosuolo si basa:

- sulle curve log del sonico-P e della densità del pozzo Alfonsine 33, nell'intervallo di profondità 735-1544 m (Plio-Pleistocene). Non sono disponibili dati simili a profondità minori, verso la superficie, o maggiori di questo fondo-pozzo.
- Su dati delle formazioni più profonde e antiche ottenute dai profili UNMIG di un buon numero di pozzi situati tra Bologna, Ferrara e Ravenna. Le informazioni d'interesse sono le profondità, da cui ricavare gli spessori formazionali, e le velocità P del sonic log. Questi dati sono stati inoltre confrontati con quelli forniti da vari articoli, come descritto in seguito.

Spessori, velocità e altre proprietà vengono definite lungo un asse verticale che attraversa il campo e idealmente raggiunge grandi profondità e da quest'asse vengono estrapolate orizzontalmente.

Profondità 735-1544 m

La figura seguente illustra le curve log registrate in Alfonsine-33 a Ottobre 1995. Le curve elastiche di interesse sono il sonic-log (DTCO, che esprime le velocità P) e la curva di densità (RHOB).

Il sonic-log 'Shear', in verde nella traccia più a destra, non è un dato acquisito in campo, ma è stato calcolato in questo studio tramite relazioni statistiche dal sonico P in acquiferi. Le relazioni utilizzate provengono da Castagna et al. (1985), Williams (1990), Brie et al. (1995) e Brocher (2015). La media dei risultati ottenuti dalle quattro relazioni fornisce il sonico-Shear finale.

Il modello di velocità è stato realizzato assumendo un numero limitato di strati. Un unico strato occupa tutto l'intervallo log e viene caratterizzato da velocità medie. Il suo spessore viene esteso per ulteriori 500 m verso il basso e verso l'alto. Questo disegno introduce potenzialmente delle imprecisioni presso i limiti superiore e inferiore dello strato, ma è comunque sufficientemente accurato al suo interno e permette delle simulazioni realistiche alla quota di interesse di 1500 m, secondo lo scopo del lavoro.

Come ulteriore beneficio, un unico strato di forte spessore può meglio rispondere a possibili variazioni laterali dato un modello a geometria orizzontale.

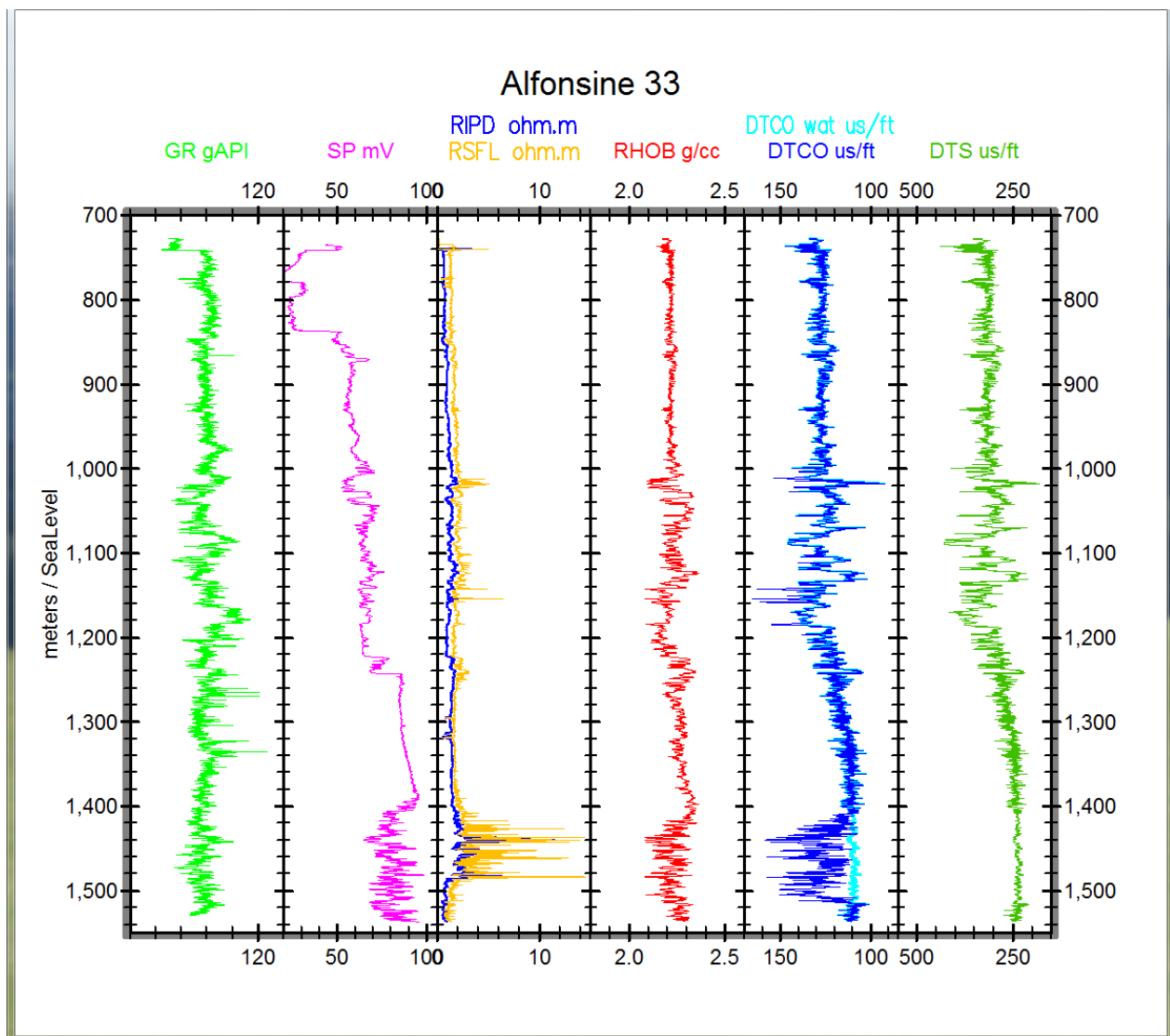


Figura 2. Curve log del pozzo di Alfonsine 33. Tutte le curve sono state registrate a Ottobre 1995, eccetto due curve calcolate in questo studio: a) la curva DTCO in celeste, nella seconda traccia da destra, che ricostruisce la risposta teorica di un acquifero al posto del giacimento a gas (1420-1520 m) e b) la curva del DT-Shear, in verde nella prima traccia destra, ottenuta sinteticamente dalla precedente.

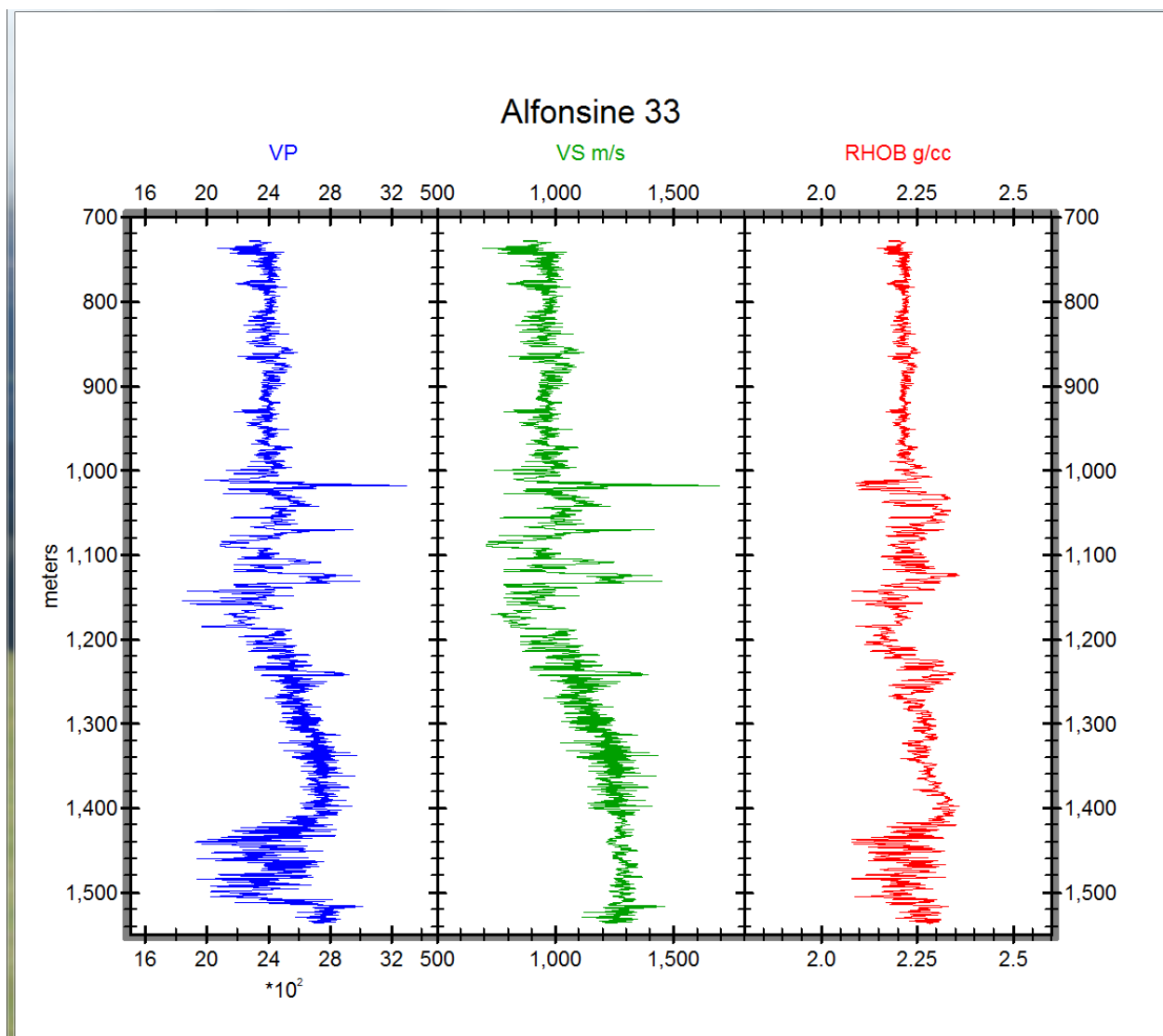


Figura 3. Sintesi delle curve log delle proprietà elastiche in Alfonsine 33.

Profondità maggiori di 1544 m

Le formazioni site a grande profondità sotto il campo di Alfonsine sono pronosticabili dalle sezioni geologiche presentate in Pieri e Groppi (1981, sez. 11), Fantoni e Franciosi (2008, fig.1 sez.4) e Toscani et al. (2009, fig. 3b).

Si riscontra che le serie clastiche di arenarie-argille pre-plioceniche hanno spessori e profondità fortemente differenziati tra aree di bacino e di alto strutturale. L'analisi degli spessori si intreccia con l'andamento delle velocità P desumibili da vari profili UNMIG di pozzi compresi tra Bologna, Ferrara e Ravenna e dalle informazioni fornite da Mariucci e Montone (2014) e Molinari et al. (2015).

L'insieme dei dati indica che nella zona bacinale di Alfonsine il passaggio tra la base delle serie clastiche e il top dei carbonati della Scaglia (Eocene medio) é stimabile alla profondità approssimativa di 6000 m. Le velocità riassunte nella figura seguente hanno suggerito l'inserimento di un'interfaccia a 4000 m per rispettare l'aumento progressivo delle velocità.

I pozzi situati nell' alto strutturale della dorsale ferrarese (fig.4) hanno fornito informazioni su spessori e velocità P delle serie calcareo-dolomitiche che occupano principalmente il Mesozoico.

Per il modello di Alfonsine, questi spessori e velocità vengono traslati verso il basso ponendo il loro top alla quota suddetta di 6000 m.

Poco si sa del basamento cristallino del Paleozoico (a cui sono assimilabili anche i termini del Triassico inferiore), il cui tetto viene fissato con inevitabile arbitrarietà a 9000 m.

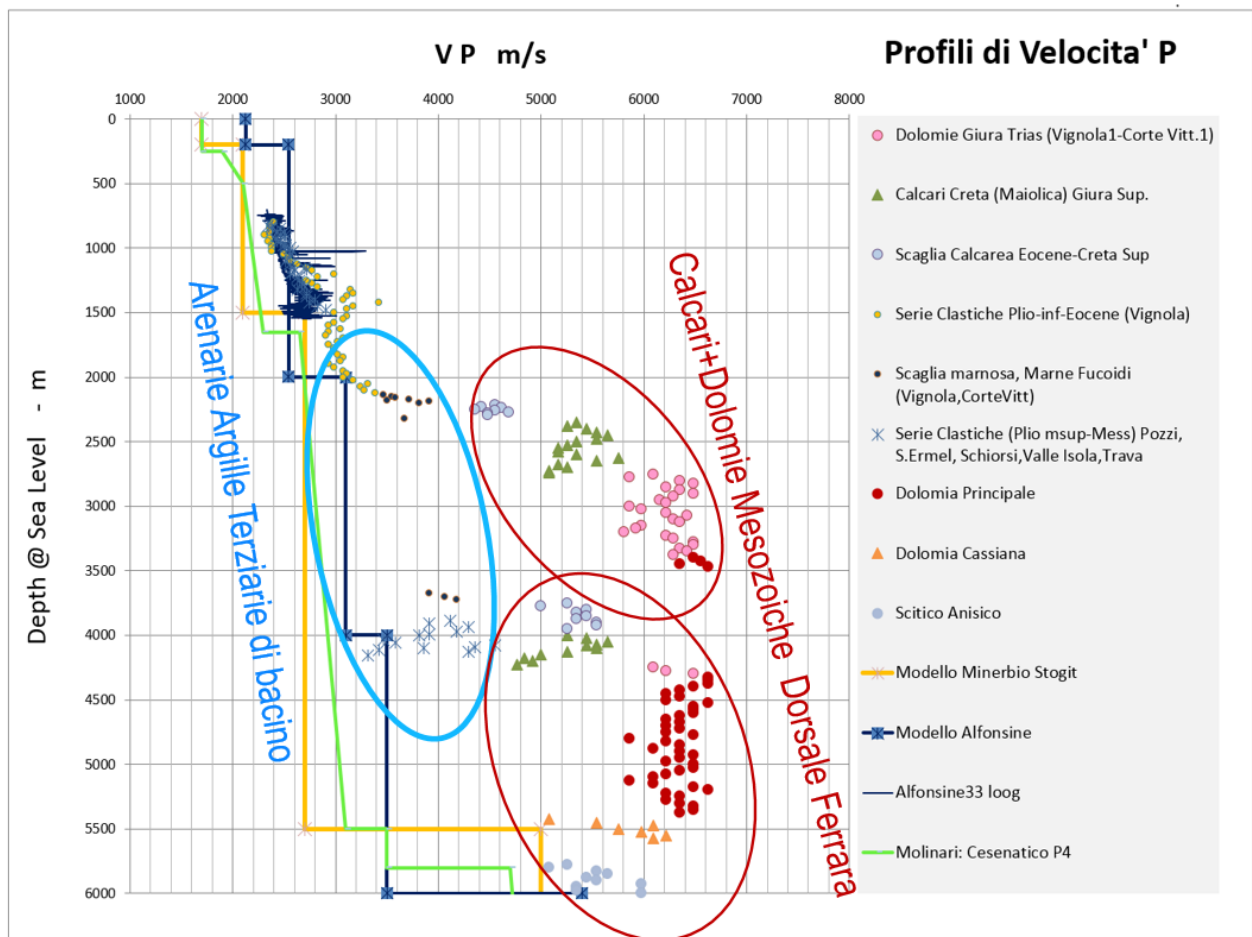


Figura 4. Velocità P ottenute dai profili UNMIG di vari pozzi situati tra Bologna, Ferrara e Ravenna. In arancione, il profilo di velocità adottato nella fattibilità delle rete di Minerbio. In blu scuro con quadrati, il profilo adottato per il presente studio sulla fattibilità della rete di Alfonsine.

Altre proprietà: velocità di taglio, densità e fattori non-elastici

Alle velocità di compressione sono state in seguito associate le velocità di taglio (S) e le densità secondo le relazioni proposte da autori sopra menzionati, Castagna et al. (1985), Williams (1990), Brie et al. (1995) e Brocher (2015). È stata fatta attenzione alle diverse risposte delle varie litologie (silicee, calcaree e dolomitiche).

Le successive simulazioni di magnitudo ricostruiscono le ampiezze sismiche tramite ray-tracing considerando:

- l'attenuazione elastica per divergenza sferica o pseudo-sferica dei fronti d'onda
- l'attenuazione elastica per trasmissione attraverso le interfacce tra strato e strato
- l'attenuazione intrinseca non-elastica per attrito interno entro ciascun strato.

L'attenuazione non-elastica è funzione del fattore Q, una proprietà tipica per ogni formazione, e di difficile determinazione, a meno di condurre specifiche analisi su dati sismici.

Essendo una proprietà non direttamente correlabile ad altre proprietà note, si è preferito assumere un valore intermedio caratteristico delle formazioni sedimentarie mediamente consolidate (Q=80), comune alle fasi P e S del segnale simulato.

Conclusioni

In sintesi, il modello viene disegnato per la fattibilità microsismica nel campo di Alfonsine. I dati di partenza vengono semplificati per produrre predizioni di magnitudo robuste alle quote di interesse di 1500, 3000 e 5000 m (Tabella 2).

Sono state evitate inversioni di velocità all'aumentare delle profondità.

Sono stati disegnati forti spessori che possono coprire variazioni laterali di velocità.

Tabella 2: profondità e proprietà di strato del modello di velocità

Prof da liv.mare (top strato)	Velocità P	Velocità S	Densità'	QP	QS
m	m/s	m/s	g/cc		
0	2126.6	720.5	2.179	80	80
200	2545.9	1155.6	2.296	80	80
2000	3100.6	1550.0	2.462	80	80
4000	3500.0	1850.0	2.594	80	80
6000	5400.0	3300.0	2.670	80	80
6900	6100.0	3365.0	2.730	80	80
7600	6350.0	3480.0	2.750	80	80
9000	6500.0	4010.0	2.770	80	80
20000	6500.0	4010.0	2.770	80	80

3 ANALISI DEL RUMORE AMBIENTALE

In una simulazione della risposta microsismica di una rete in progetto, è necessario quantificare il rumore ambientale (o rumore sismico di fondo) che insiste su ogni stazione ricevente. In generale, a parità di altre condizioni, una stazione che risente di debole rumore ambientale fornisce registrazioni in cui un segnale sismico di sottosuolo può stagliarsi ed essere riconosciuto con certezza, anche a piccole ampiezze. Viceversa, se la stazione risente di un forte rumore ambientale, lo stesso segnale sismico viene sommerso dall'attività di fondo della traccia registrata.

La definizione di questo parametro così importante è stata effettuata da piccole acquisizioni ad hoc sui siti designati per le varie stazioni. Le acquisizioni sono state condotte dagli esecutori di questo studio con la supervisione di personale Stogit nei giorni 17-19 luglio 2017.

In ogni sito è stato collocato un geofono Lennartz 'LE-3D/1s-lite-MKIII' di proprietà del trattatista e sono stati acquisiti dati per circa 30 minuti in condizioni di puro ascolto senza sollecitazioni. Il geofono viene appoggiato sul terreno compatto in modo da assicurare un buon accoppiamento e posto in condizioni di orizzontalità per garantire una risposta fedele con sensore Z in verticale. I sensori X e Y vengono allineati lungo le direttrici Est e Nord rispettivamente.

Le tracce X, Y, e Z vengono registrate da acquisitore Taurus-Nanometrics in formato 'Seed' con passo di campionamento di 10 ms.



Figura 5. Esempio di acquisizione sul campo del rumore sismico di fondo.



Figura 6. Esempio di tracce acquisite sulla stazione 1-Di, per circa 80 secondi, con relativa analisi di frequenza.

Nell'analisi del rumore, vengono calcolate le ampiezze quadratiche medie (RMS) in ogni secondo di dato (6 campioni). La buona qualità dei dati non richiede operazioni preliminari di filtraggio delle tracce. Le quantità di interesse sono le ampiezze RMS minime e massime (Min_Noise e Max_Noise) risultanti dall'insieme delle tre componenti per ogni secondo di dato:

I risultati lungo i 30 minuti di registrazione vengono analizzati come:

- serie temporali del Min e Max_Noise.
- istogrammi di frequenza degli stessi
- diagrammi di densità spettrale delle componenti di registrazione X, Y e Z, che non appaiono significative probabilmente a causa delle forti variazioni di ampiezza.

Tutti questi risultati concordano nel mostrare che l'attività del rumore è fortemente variabile

- a) da stazione a stazione
- b) entro una stessa stazione con alternanze apparentemente irregolari tra momenti di quiete e momenti rumorosi.

Si è deciso dunque di assegnare ad ogni stazione due valori tipici di rumore di fondo per le due diverse condizioni ambientali.

Il valore minimo di rumore viene facilmente calcolato mediando i valori dei 15 sec., 30 sec. e 60 secondi ad ampiezze più basse del canale Min_Noise. Per controllo, il valore ottenuto coincide con l'estremo inferiore degli istogrammi dello stesso canale.

In via teorica, si interpreta che il valore di rumore minimo rappresenti la condizione limite ottimale di ogni stazione, tale da produrre registrazioni ad alto rapporto segnale/disturbo e cogliere eventi sismici anche di bassa magnitudo.

In pratica, si può tendere a queste condizioni nelle ore notturne e alloggiando i geofoni in pozzetti superficiali alla profondità indicativa di 100 m.

Il valore massimo di rumore é identificabile con minor ovvietà del precedente. Gli istogrammi del canale Max_Noise hanno distribuzione asimmetrica estesa verso i valori alti. Si interpreta che i valori più alti possano corrispondere a fonti sonore riconoscibili che nella pratica tendono ad essere evitate nell' installazione di una stazione sismica. Al contrario, i valori di picco degli istogrammi Max_Noise possono essere significativi in quanto espressione di rumore di fondo indistinto non evitabile. In pratica, il picco del canale di Max_Noise può essere associato alla ricezione diurna di una stazione posta sul piano campagna o a pochissimi metri di profondità.

In sintesi, i valori ottenuti di rumore ambientale minimo e massimo esprimono due condizioni limite che nelle simulazioni che seguono, portano a predire eventi di magnitudo relativamente bassa o alta. Questi due estremi di magnitudo delimitano una fascia entro cui si possono realisticamente predire gli eventi sismici registrabili da una futura rete microsismica.

Tabella 3: valori del rumore di fondo minimo e massimo ottenuti dalle registrazioni in Alfonsine.

STAZIONE	Rumore di fondo	
	Minimo $\mu\text{m/s}$	Massimo $\mu\text{m/s}$
1-Di	0.35	2.24
2-Di	0.36	5.62
3-Di	1.11	4.47
4-Di	0.72	2.51
5-Di	1.34	3.98

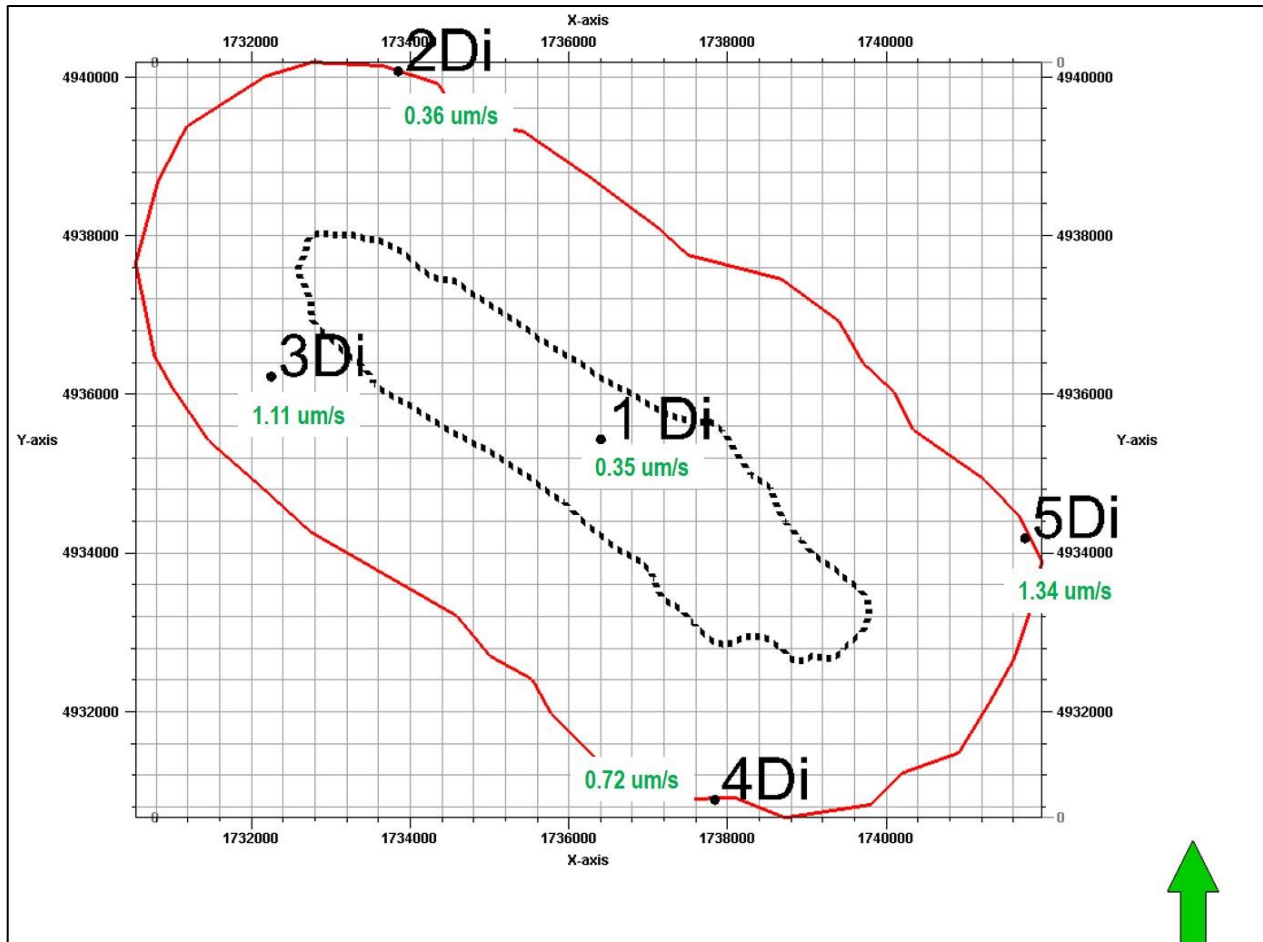


Figura 7. valori del rumore di fondo minimo per singola stazione.

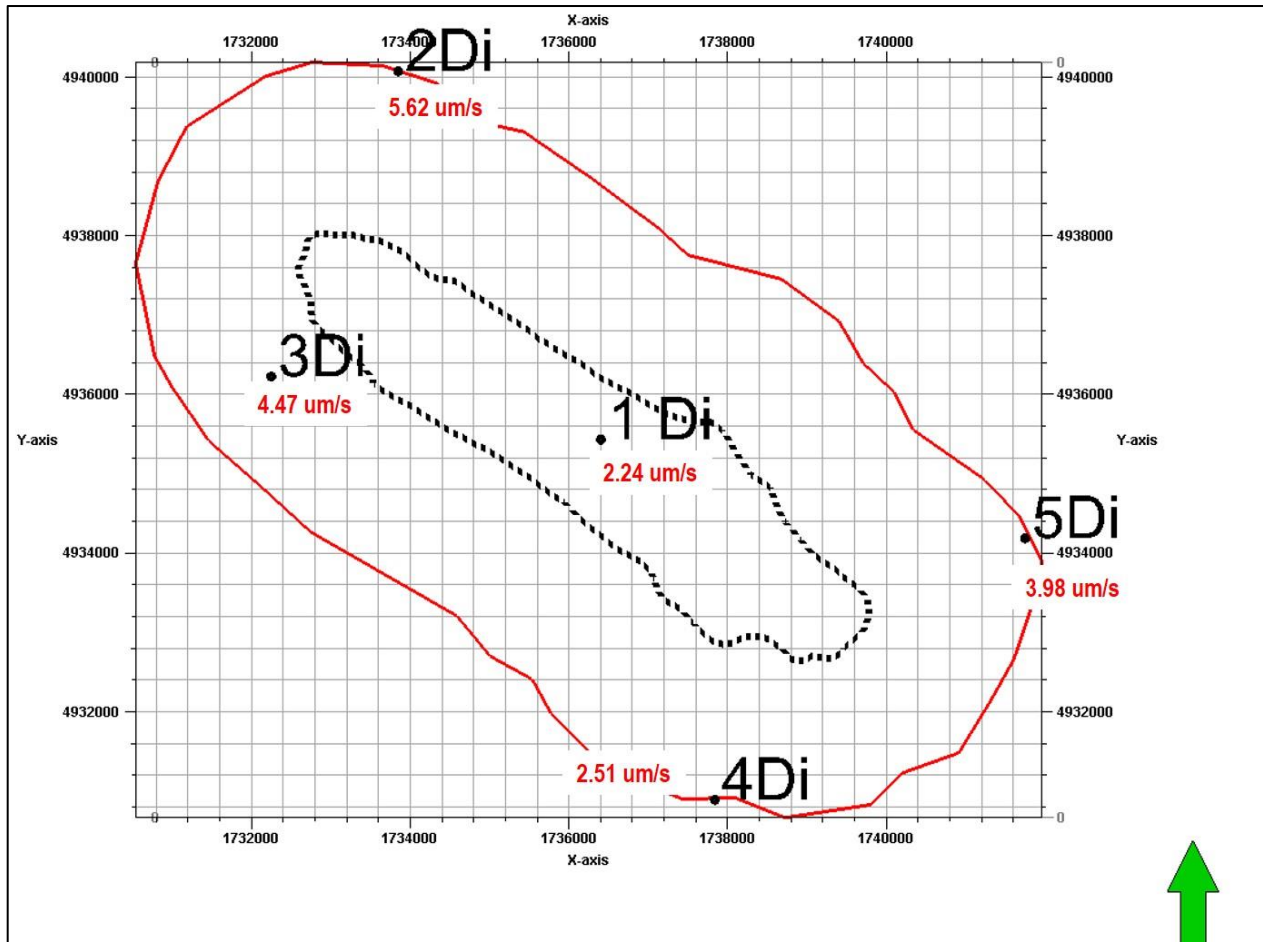


Figura 8. valori del rumore di fondo massimo per singola stazione.

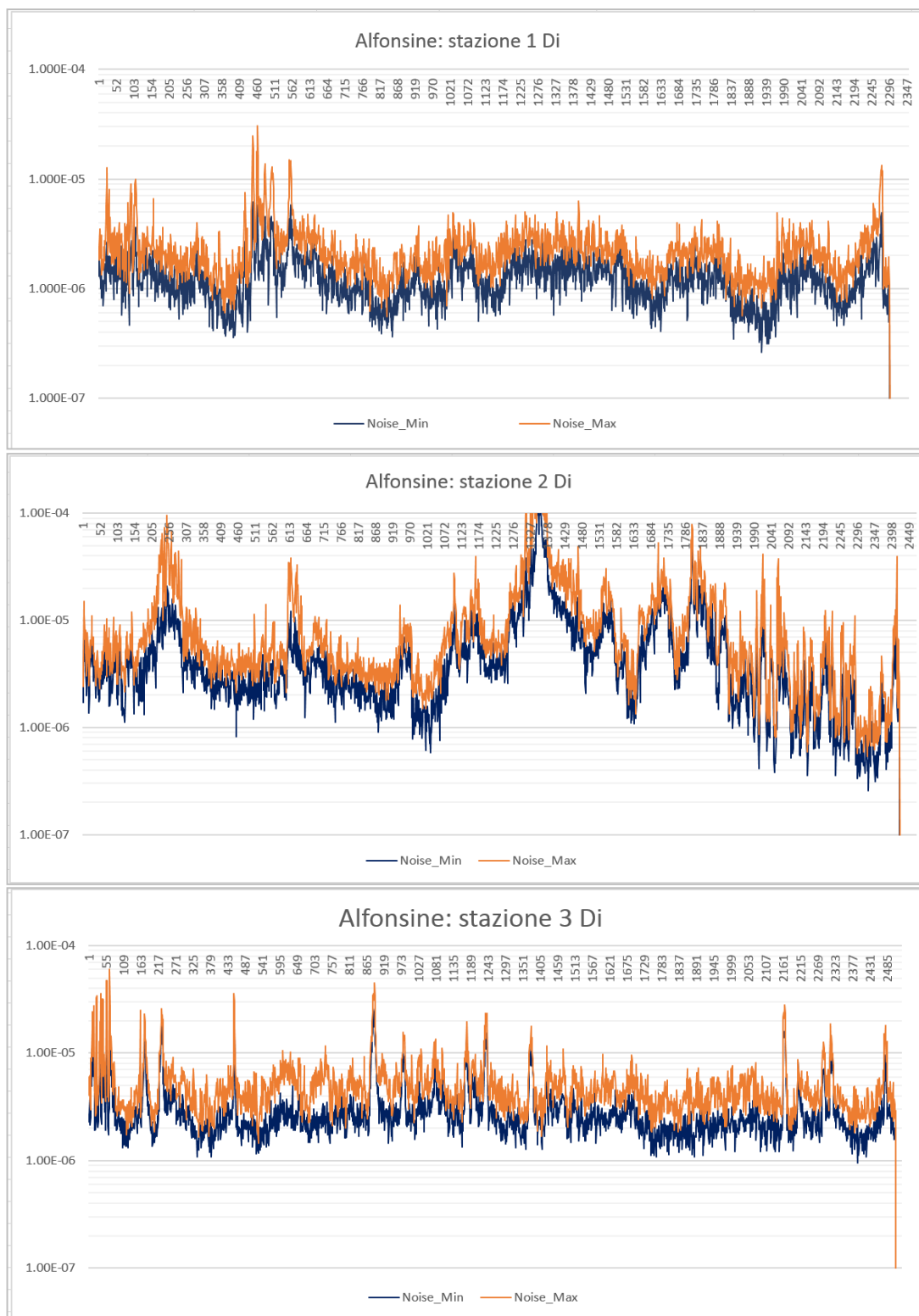


Figura 9a. Serie temporale del rumore di fondo minimo e massimo (Min_Noise in blu, Max_Noise in arancione) lungo i 30 minuti di registrazione: stazioni 1Di, 2Di e 3Di.

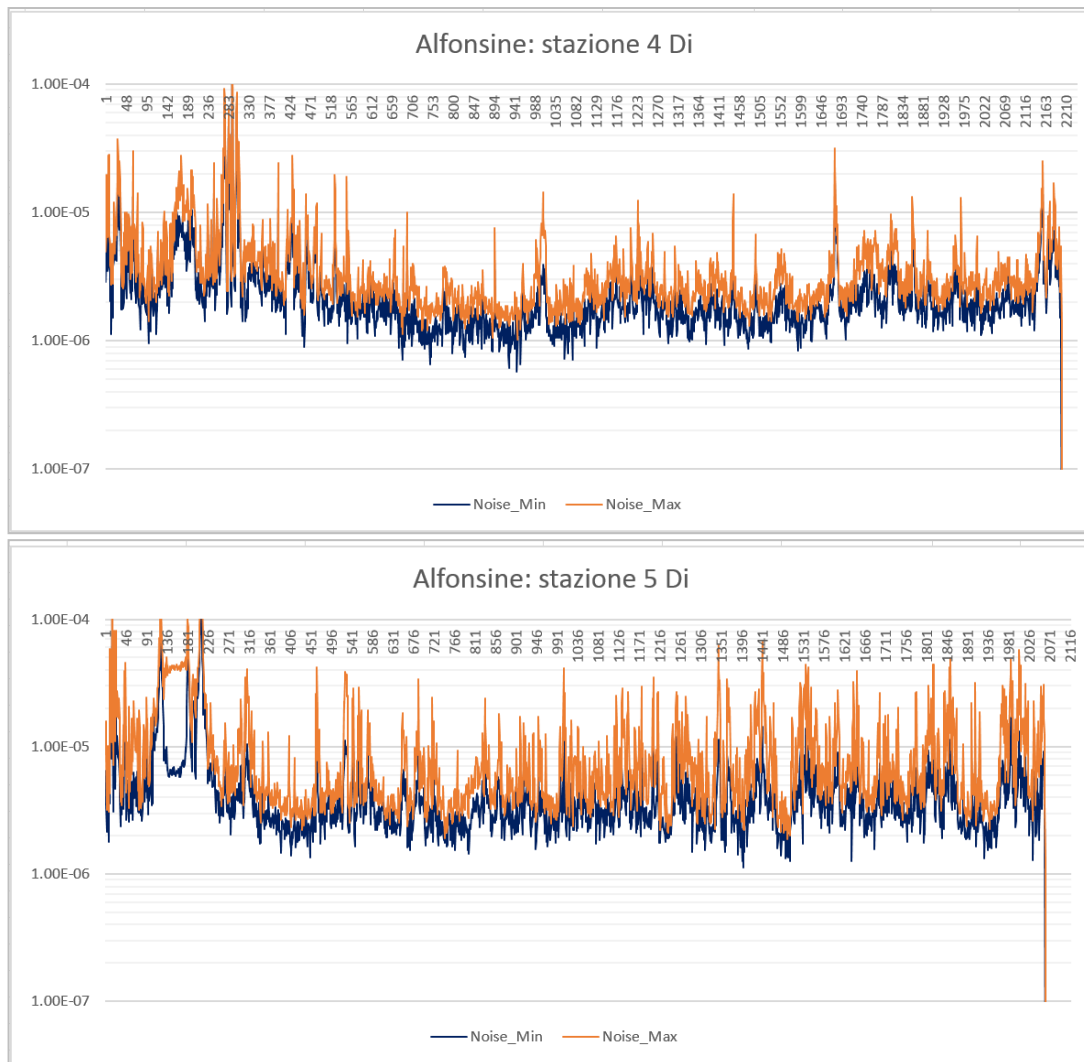


Figura 9b. Serie temporale del rumore di fondo minimo e massimo (Min_Noise in blu, Max_Noise in arancione) lungo i 30 minuti di registrazione: stazioni 4Di e 5Di.

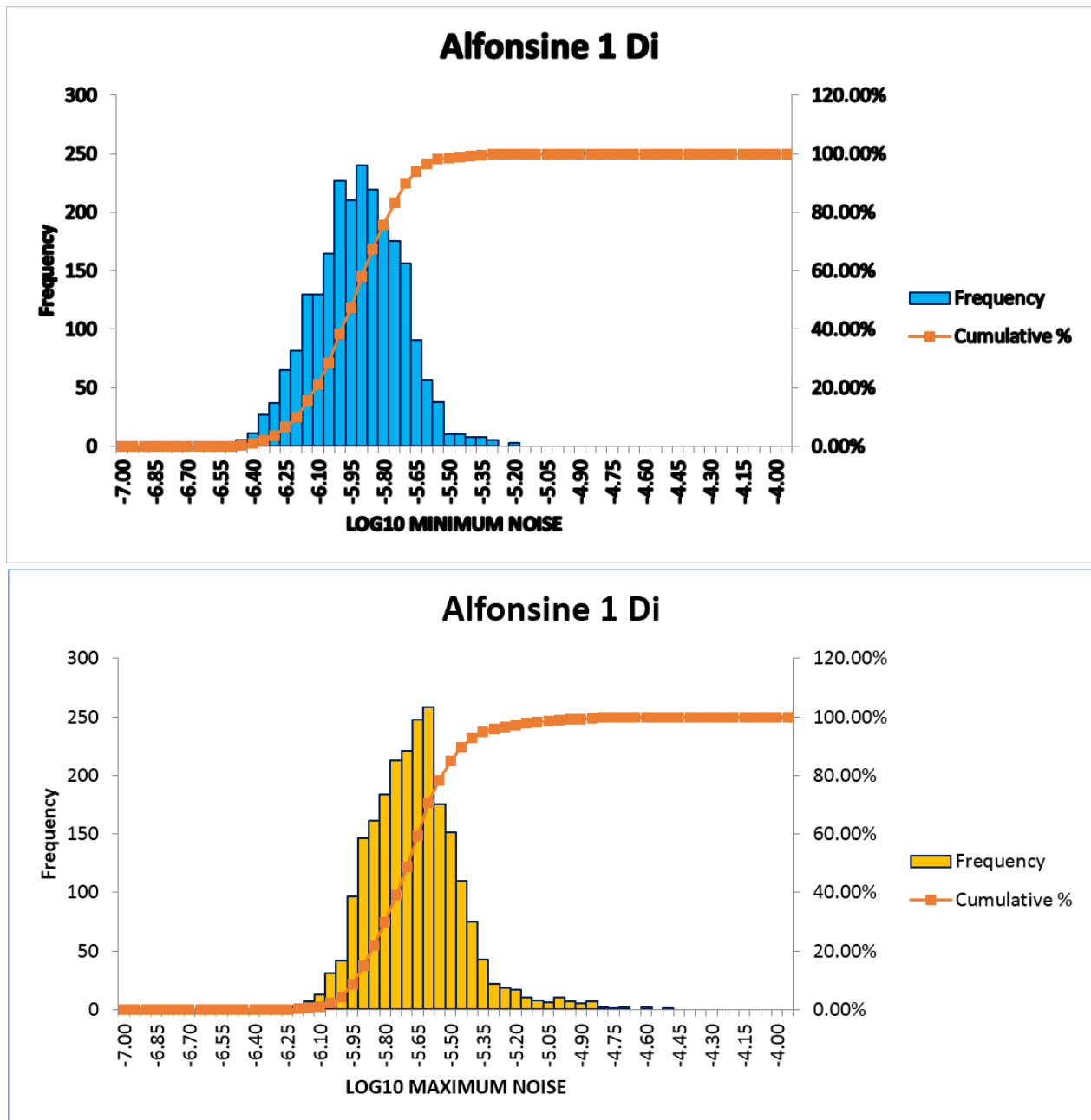


Figura 10a. Istogrammi di frequenza dei valori delle curve di Min_Noise (in alto, in blu) e di Max_Noise (in basso, in arancione). Stazione 1Di.

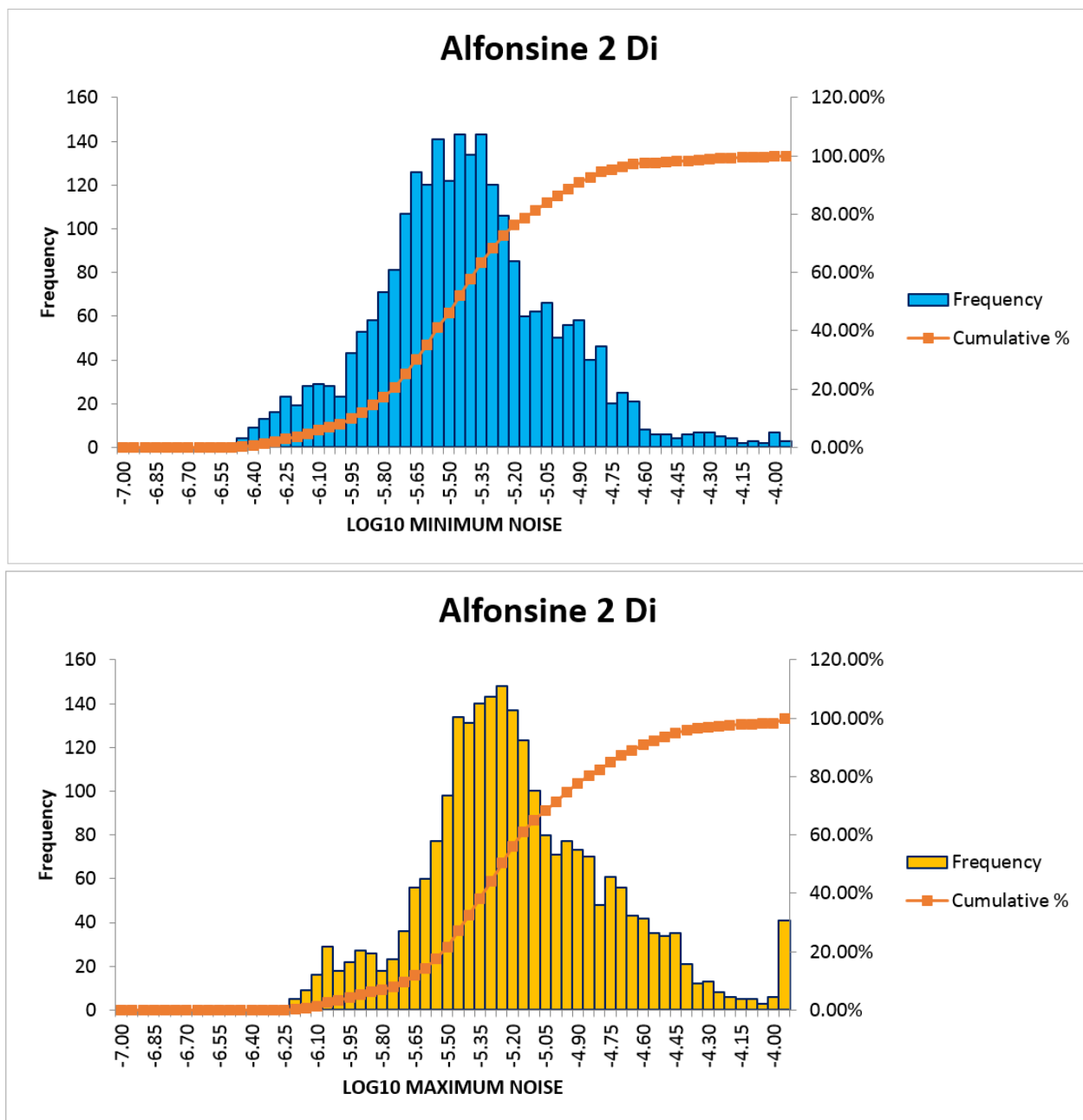


Figura 10b. Istogrammi di frequenza dei valori delle curve di Min_Noise (in alto, in blu) e di Max_Noise (in basso, in arancione). Stazione 2Di.

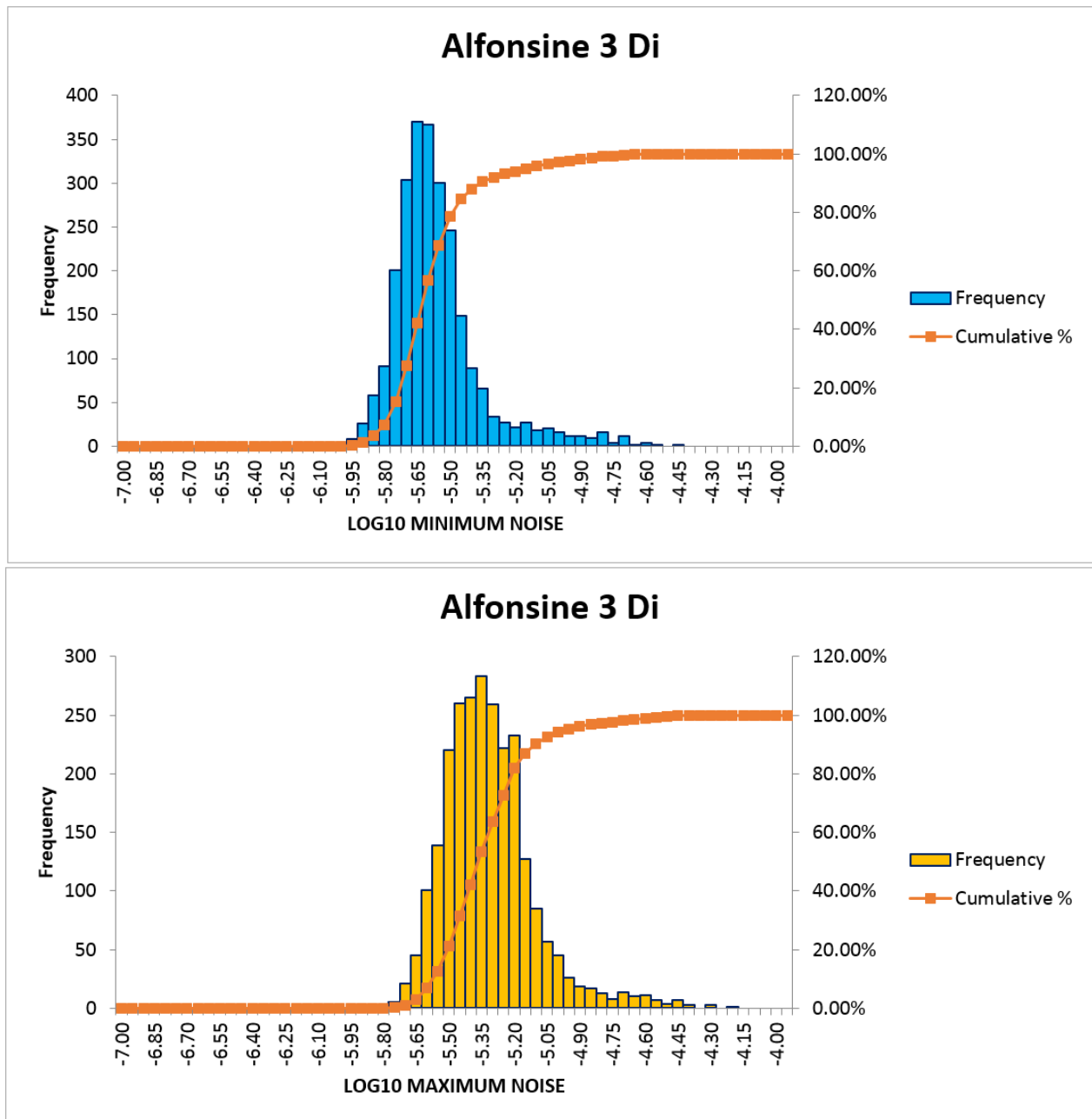


Figura 10c. Istogrammi di frequenza dei valori delle curve di Min_Noise (in alto, in blu) e di Max_Noise (in basso, in arancione). Stazione 3Di.

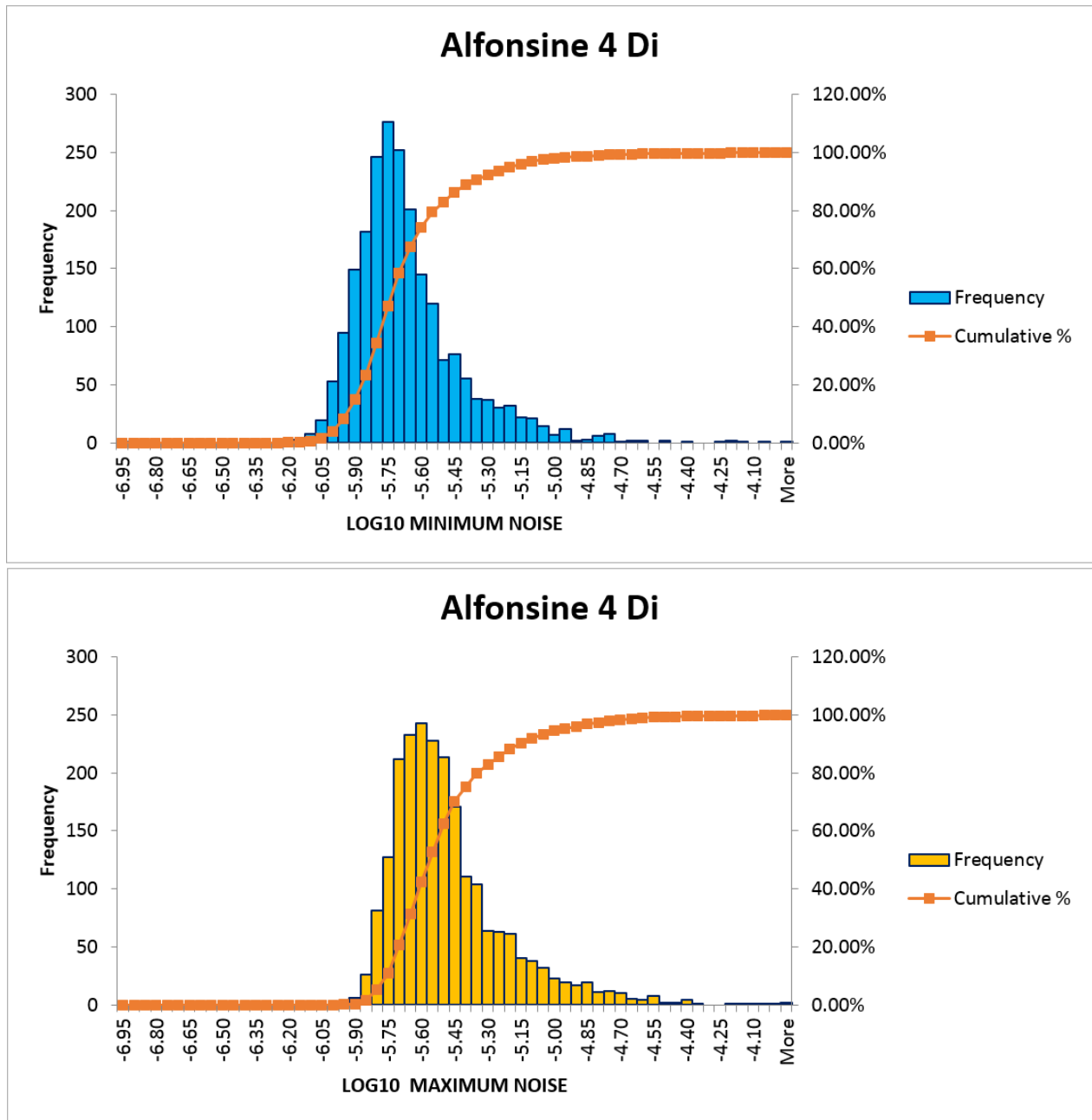


Figura 10d. Istogrammi di frequenza dei valori delle curve di Min_Noise (in alto, in blu) e di Max_Noise (in basso, in arancione). Stazione 4Di.

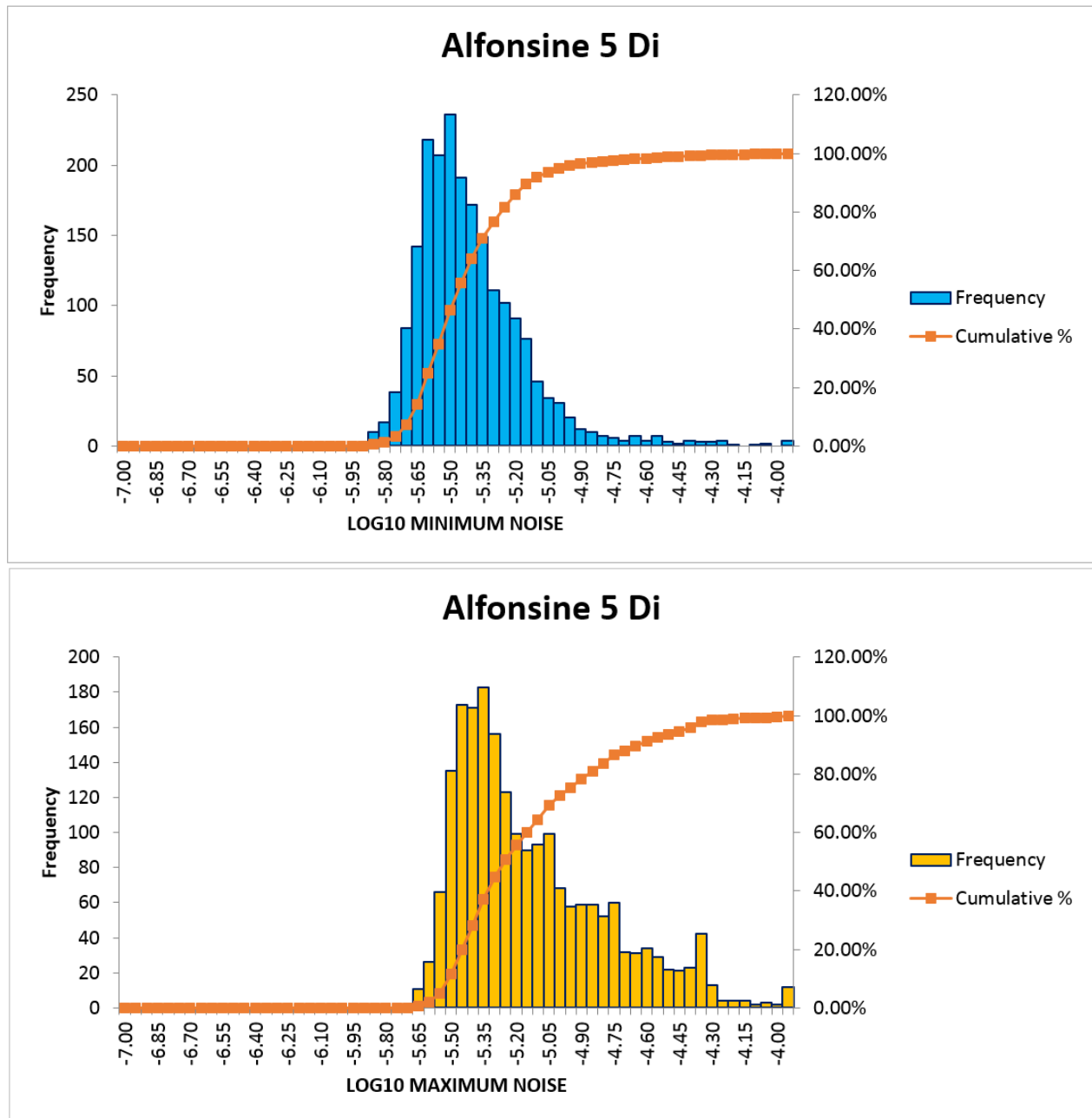


Figura 10e. Istogrammi di frequenza dei valori delle curve di Min_Noise (in alto, in blu) e di Max_Noise (in basso, in arancione). Stazione 5Di.

4 SCALE DI MAGNITUDO

Come avvertenza per il lettore, si precisa che le computazioni oggetto della parte seguente adottano la Magnitudo Momento (M_w) quale scala di riferimento delle magnitudo. La Magnitudo Momento viene derivata dal Momento Sismico secondo la relazione: $M_w = 2/3 \log_{10} M_0 - 6$ impiegata per ogni valore di M_0 (Hanks & Kanamori 1979).

In Italia é frequente l'uso della Magnitudo Locale (M_L) e quindi si é voluto affiancare questa scala alle Magnitudo Momento (M_w) usata internamente dagli algoritmi.

É generalmente noto che i due tipi di magnitudo sono in relazione 1: 1 per valori maggiori di 3.

Per magnitudo microsismiche inferiori a 3 (in cui si perde tale relazione 1:1) si é fatto riferimento ai dati presentati da Boore (1989, fig. 10) e qui riprodotti nella figura seguente. Sostituendo il valore di M_0 con quello di M_w , si ottiene una relazione con andamento curvo alle basse magnitudo. A simili conclusioni giungono Goertz-Allmann et al. (2011) nell'analisi dei terremoti registrati in Svizzera (fig.10).

La relazione finale M_w - M_L adottata nelle rappresentazioni della parte seguente é riportata in figura 11 (curva blu secondo Boore).

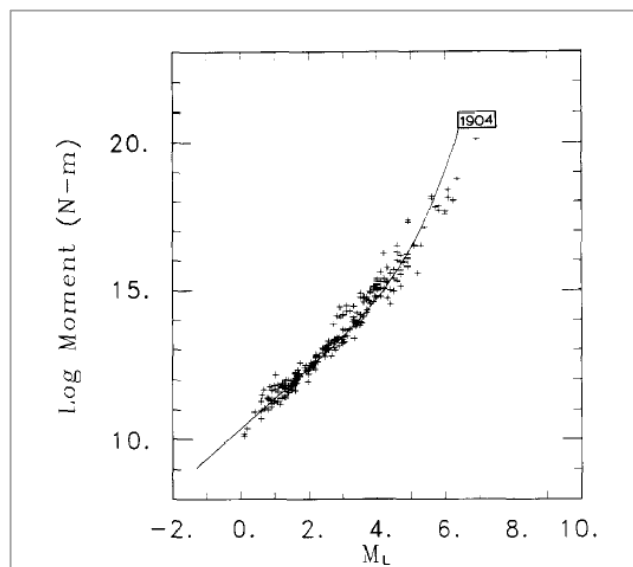


Fig. 10. Moment-magnitude data for central California earth-

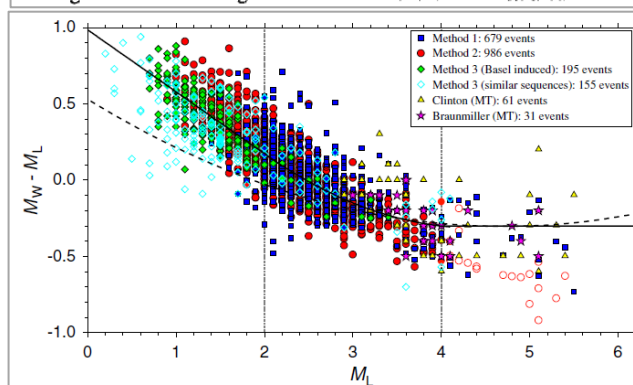


Figure 4. Difference between M_L and M_w versus M_L of the

Figura 11. In alto: relazione tra Momento Sismico M_0 e Magnitudo Locale M_L , da Boore (1989).

In basso: relazione tra Magnitudo Momento M_w e Magnitudo Locale M_L , da Goertz-Allmann et al. (2011).

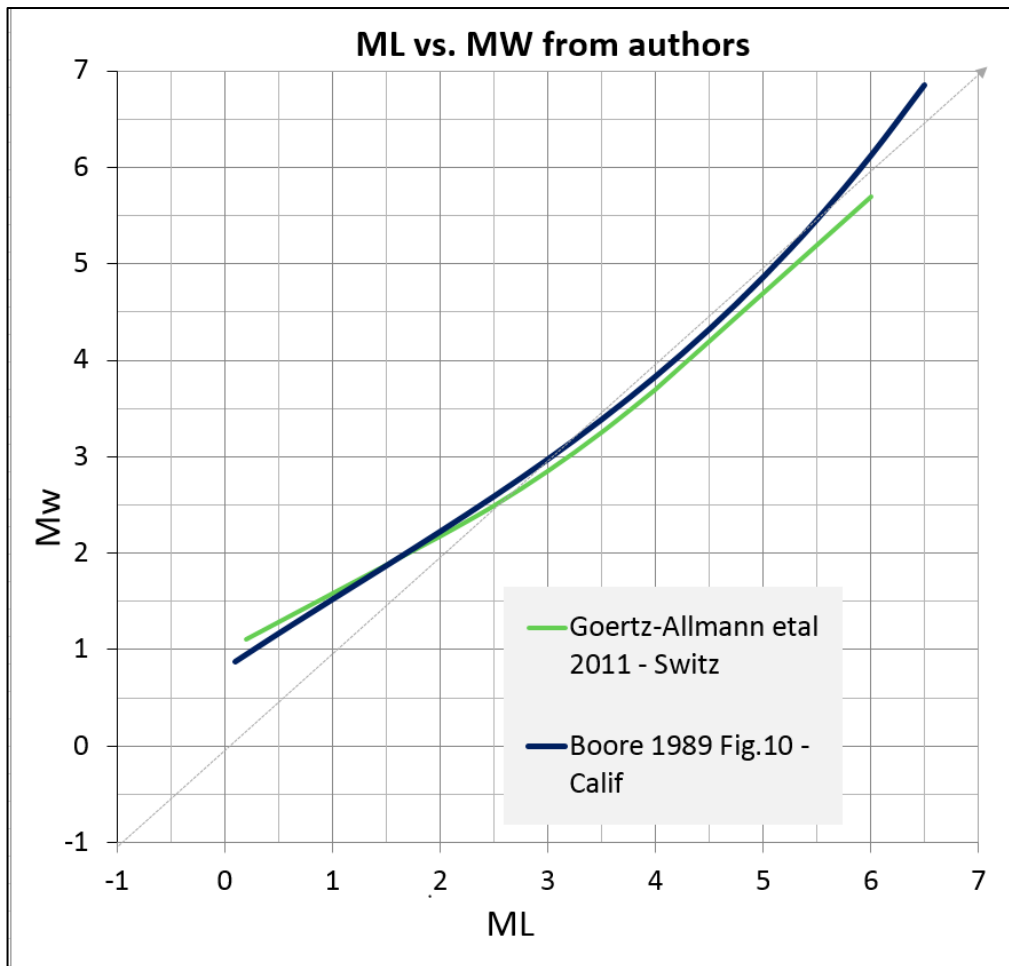


Figura 12. relazione tra Magnitudo Momento M_w e Magnitudo Locale M_L , riscritta dai dati della figura precedente. La relazione di Boore viene impiegata nella parte seguente per affiancare le due scale nelle mappe di magnitudo minima.

PARTE SECONDA: MODELLIZZAZIONE DELLA RISPOSTA MICROSISMICA

Caratteri generali

Le descrizioni della prima parte esprimono il quadro entro cui viene modellizzata la risposta microsismica della rete in progetto nel campo di Alfonsine.

Noti la geometria dei ricevitori, il rumore ambientale di cui possono risentire e le proprietà del sottosuolo, vengono calcolate e predette le magnitudo minime e le incertezze di localizzazione degli eventi che potranno essere conseguiti dalla rete stessa.

Il software impiegato (Netmod) opera come plug-in in ambiente Petrel ed è sviluppato dal contrattista. La descrizione dei principi che lo costituiscono è riportata da Raymer & Leslie (2011).

Il numero di simulazioni effettuate è relativamente alto in funzione delle diverse condizioni ipotizzate:

- Modello di velocità: fisso per tutti i casi
- Rumore di fondo alle stazioni: si attribuisce un valore di rumore ambientale per ogni stazione alle seguenti condizioni:
 - a) rumore minimo
 - b) rumore massimo
 - c) combinazione di rumore massimo in tre stazioni e basso rumore per 2 stazioni previste con installazione in pozzetti a circa 100 m di profondità

Nota: per ognuno di questi casi, l'uso di livelli di rumore differenziati per ogni stazione può portare a mappe di magnitudo minima dall'aspetto irregolare. Cio' è spiegato schematicamente in figura 12 (caso teorico riferito ad una rete microsismica ipotetica costituita da 11 stazioni). In questa mappa, i cerchi esprimono l'area di influenza e il 'peso' delle diverse stazioni a seconda del rumore inserito. Cerchi ampi sono propri di stazioni con basso rumore ambientale. L'intersecazione di più cerchi può portare a interferenze costruttive di forma irregolare.

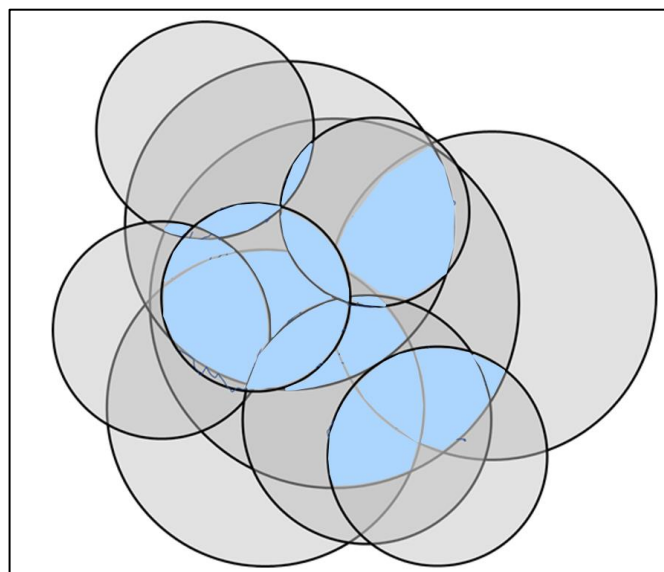


Figura 13. Interpretazione grafica mostrante come l'interferenza di più stazioni a diverso rumore può portare a distribuzioni irregolari delle magnitudo risultanti.

La predizione dell'ampiezza del segnale tiene conto di più fattori coinvolti (Raymer & Leslie, 2011):

Effetti sorgente

Si assume un meccanismo all'origine in cui l'energia prodotta si diffonde con irraggiamento sferico. Le caratteristiche del momento sismico iniziale vengono modellizzate secondo modelli teorici (Brune 1970, Madariaga 1976) che ricostruiscono lo spettro spostamento-ampiezza (in questa modellizzazione si assume uno "stress drop" costante di 1MPa).

Effetti percorso

Il percorso sismico sorgente – ricevitore è simulato da opportuno ray-tracing che tiene conto della divergenza geometrica, perdita di energia per riflessione e trasmissione ai contatti di strato e attenuazione intrinseca funzione del valore di Q.

Ampiezza al ricevitore

L'ampiezza al ricevitore è condizionata dal rapporto segnale-disturbo sulle tracce (S/N ratio fisso al valore costante di 5) e dal rumore ambientale di ogni stazione descritto precedentemente.

La somma dei tre effetti porta a definire le magnitudo minime registrabili dalle diverse configurazioni di una determinata rete, visualizzabili in forma di mappe.

- **Mappa di detezione:** la magnitudo minima è riconoscibile su un numero minimo di 3 stazioni; in questo modo viene simulato il caso in cui un evento sismico viene rilevato (detettato) ma non localizzato con affidabilità.
- **Mappa di localizzabilità:** la magnitudo minima è riconoscibile su un numero minimo di 4 stazioni; in questo modo viene simulato il caso in cui un evento sismico viene rilevato e localizzato con sufficiente affidabilità.
- **Mappe di incertezze di localizzazione:** la localizzazione degli eventi è associabile a barre di errore in funzione, oltre che dei parametri sopra descritti, anche dell'accuratezza del time picking. Le barre di errore vengono calcolate sia sul piano orizzontale che verticale.

Le simulazioni (e le mappe conseguenti) vengono effettuate alle profondità di 1500, 3000 e 5000 m. Per ogni livello la mappa si estende nel piano XY in un quadrato di 15 km di lato per il dominio interno e 21 km di lato per il dominio esteso. Al suo interno ogni quadrato è costituito da celle unitarie 25x25 m, ognuna delle quali ospita un potenziale punto sorgente.

Figure 14 – 16

**Magnitudo minime per sola detezone (3 ricevitori)
Rumore di fondo minimo per singola stazione
Mappe a diversi livelli di profondità**

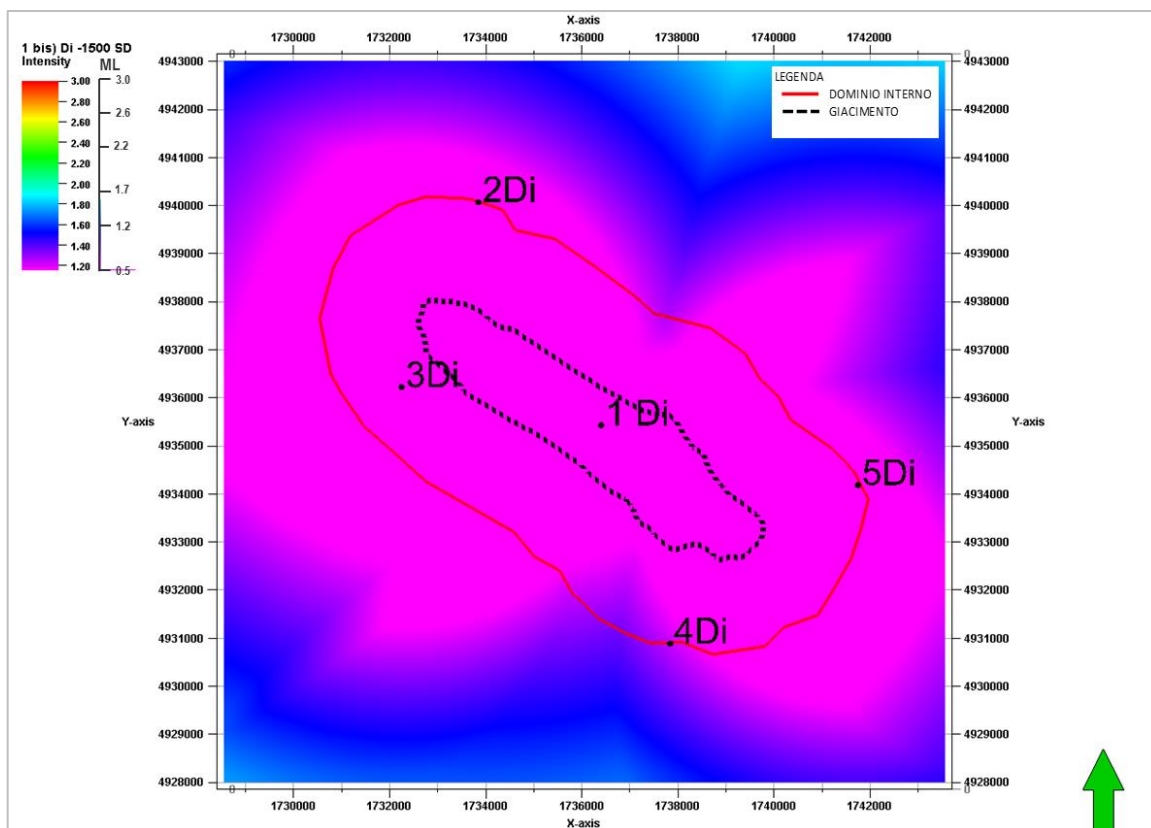


Figura 14. Mappa di detezione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni: profondità 1500 m.

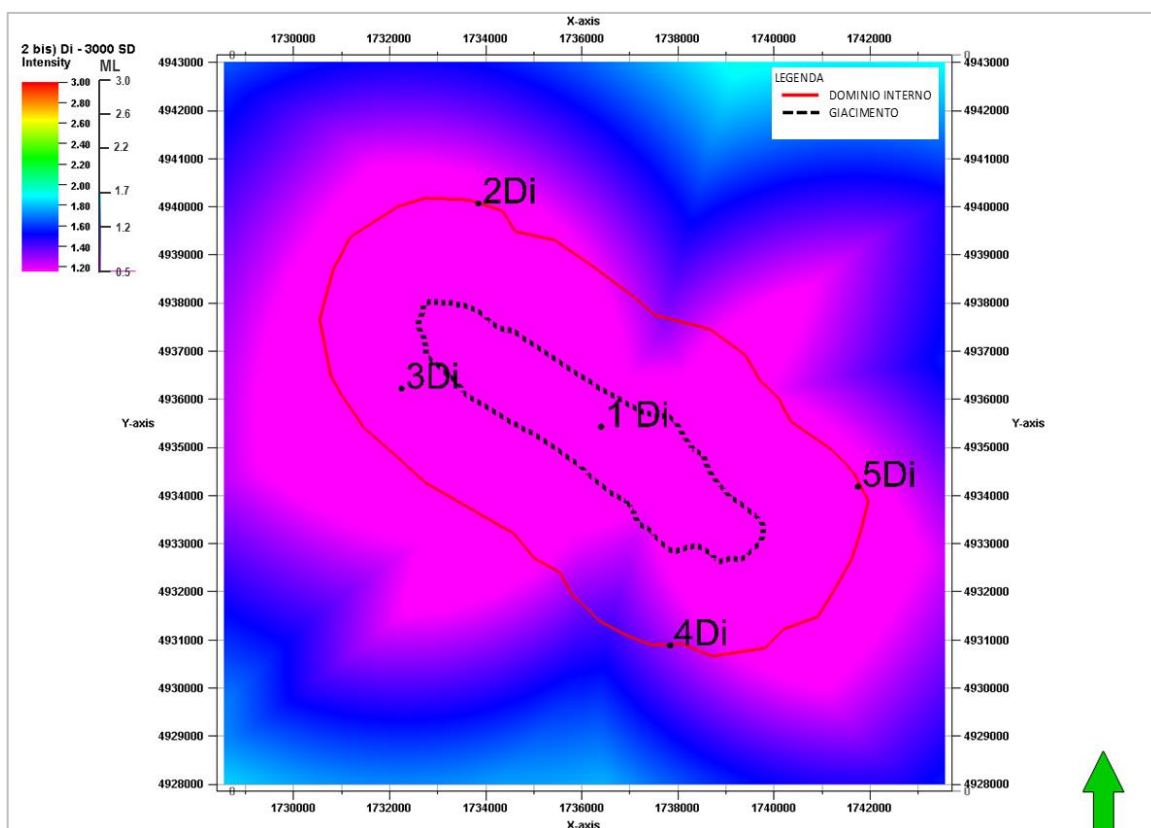


Figura 15. Mappa di detezione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni: profondità 3000 m.

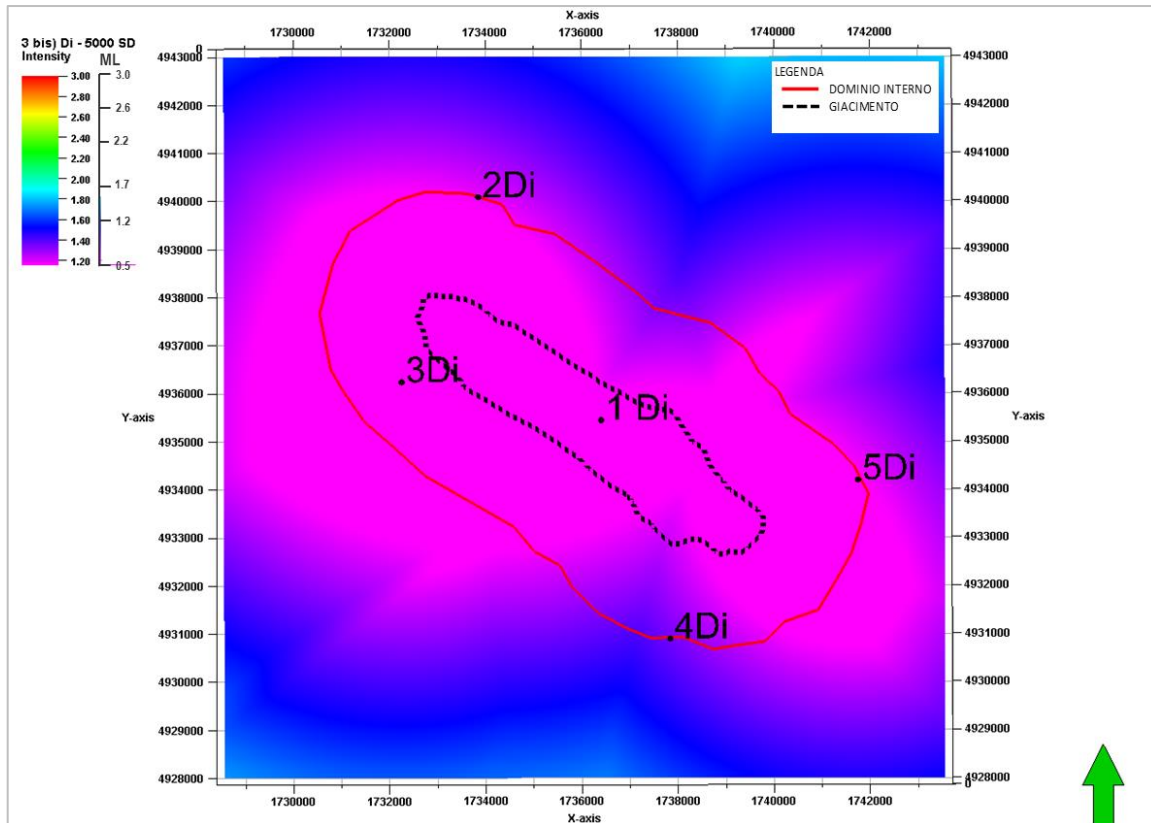


Figura 16. Mappa di detezione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni: profondità 5000 m.

Figure 17 – 19

**Magnitudo minime per sola detezone (3 ricevitori)
Rumore di fondo massimo per singola stazione
Mappe a diversi livelli di profondità**

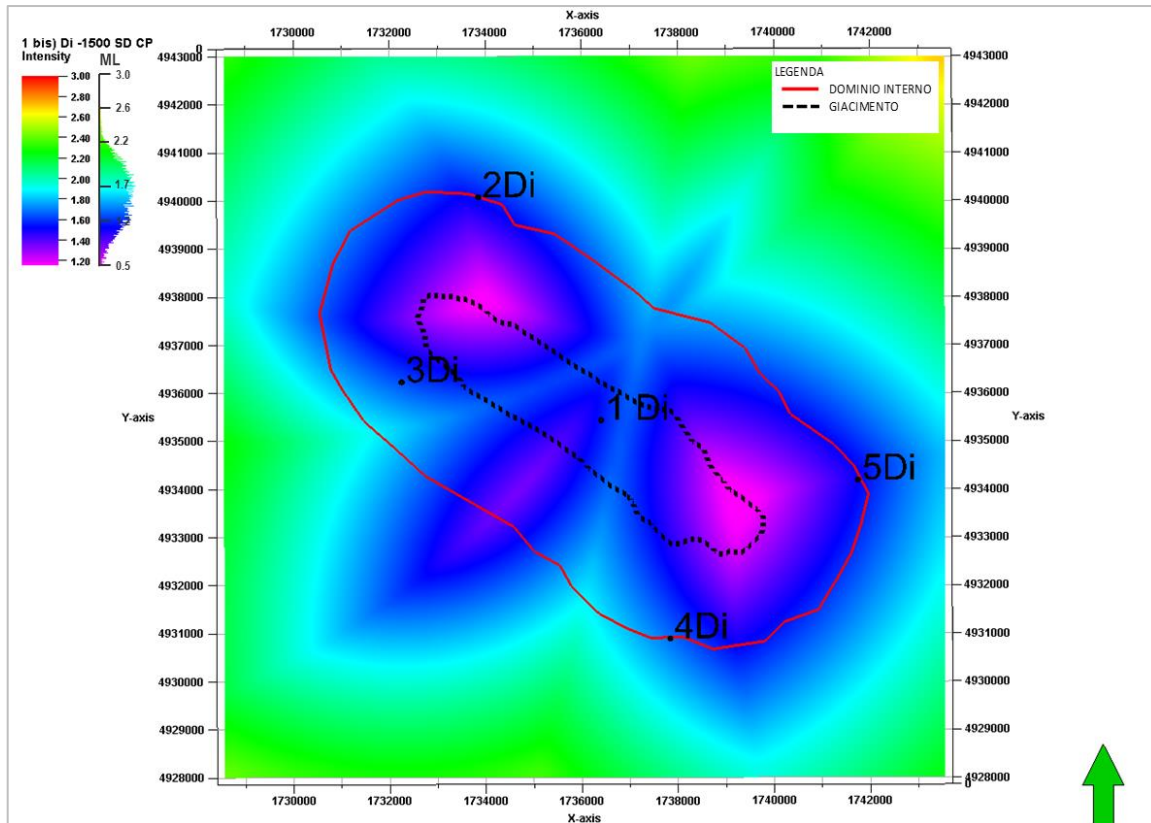


Figura 17. Mappa di detezione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni: profondità 1500 m.

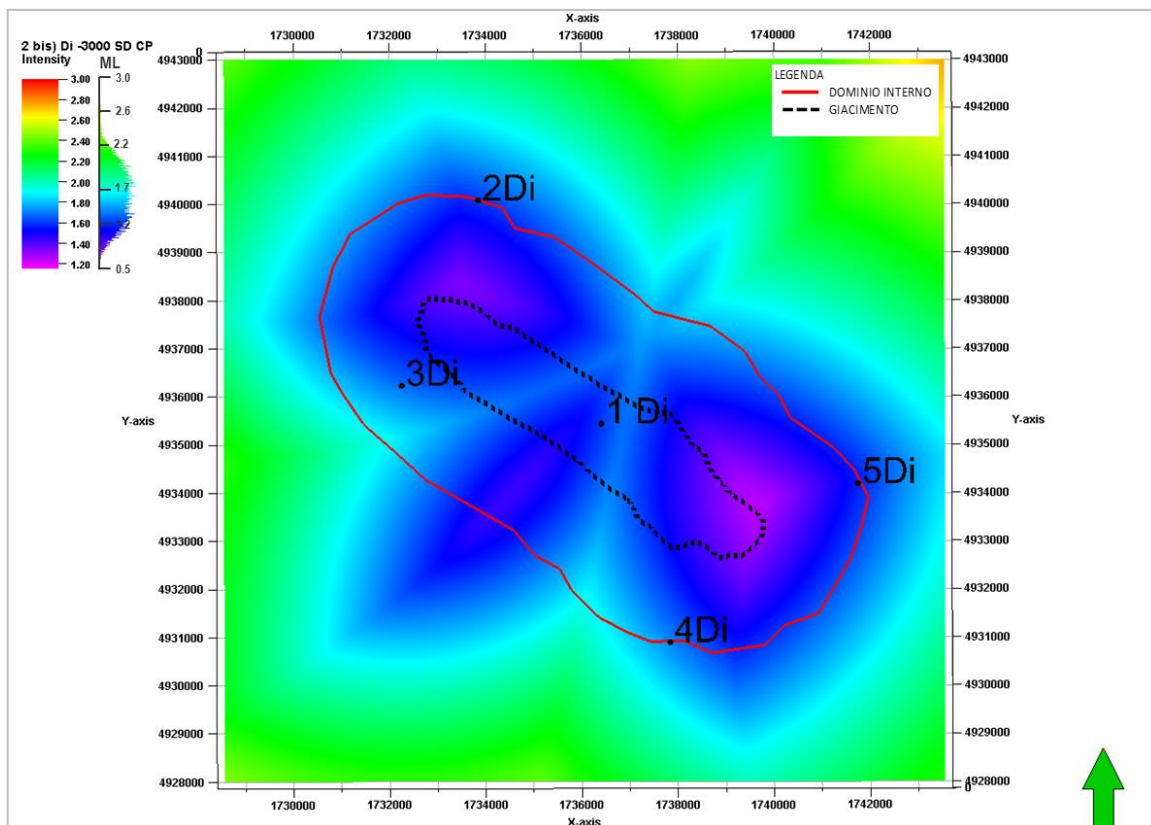


Figura 18. Mappa di detezione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni: profondità 3000 m.

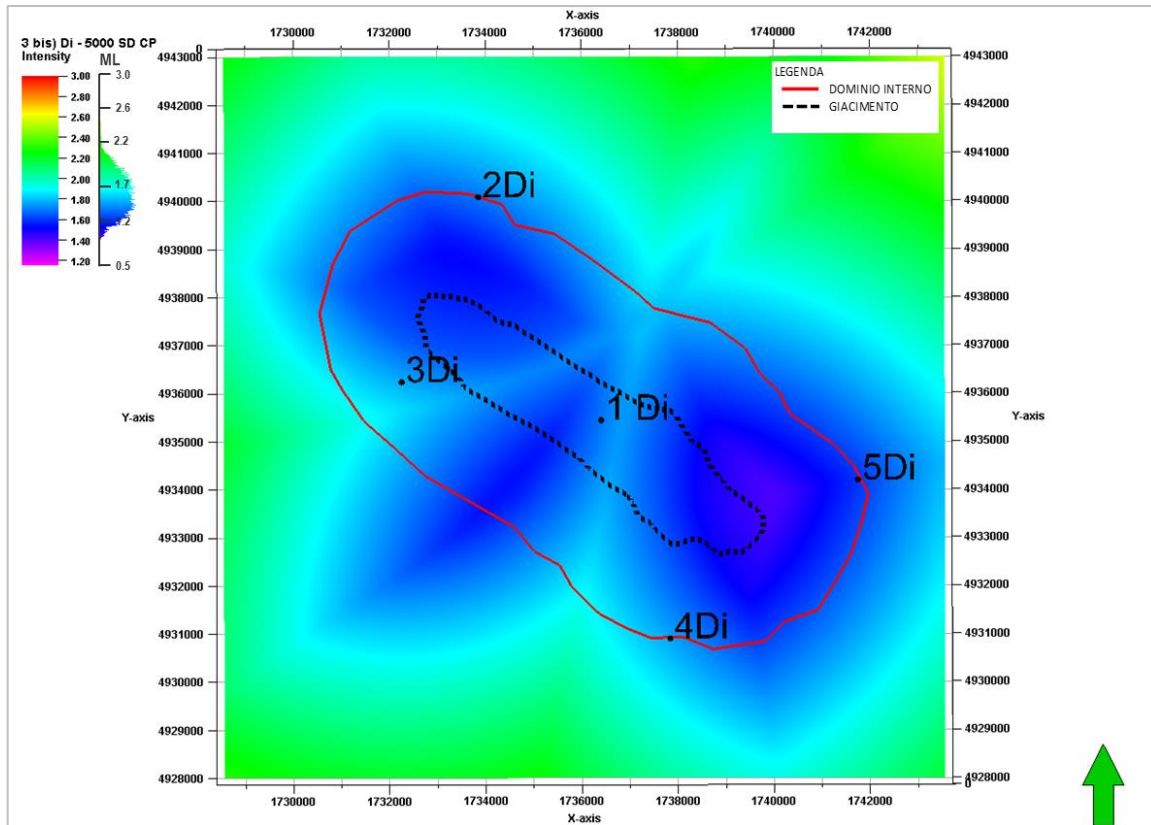


Figura 19. Mappa di detezione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni: profondità 5000 m.

Figure 20 – 22**Magnitudo minime per sola detezone (3 ricevitori)
Rumore di fondo massimo con due stazioni in pozzetto
Mappe a diversi livelli di profondità**

Nota: viene simulato il caso in cui le stazioni 3Di e 5Di del dominio interno sono posizionate in pozzetti superficiali di profondità 100 m. Il loro livello di rumore ambientale é desunto dal livello di rumore massimo registrato, ridotto di 10 dB per riprodurre una situazione di maggior quiete (in pozzetto). Le rimanenti stazioni 1Di, 2Di e 4Di vengono ipotizzate sul piano campagna e sono associate al loro massimo rumore ambientale.

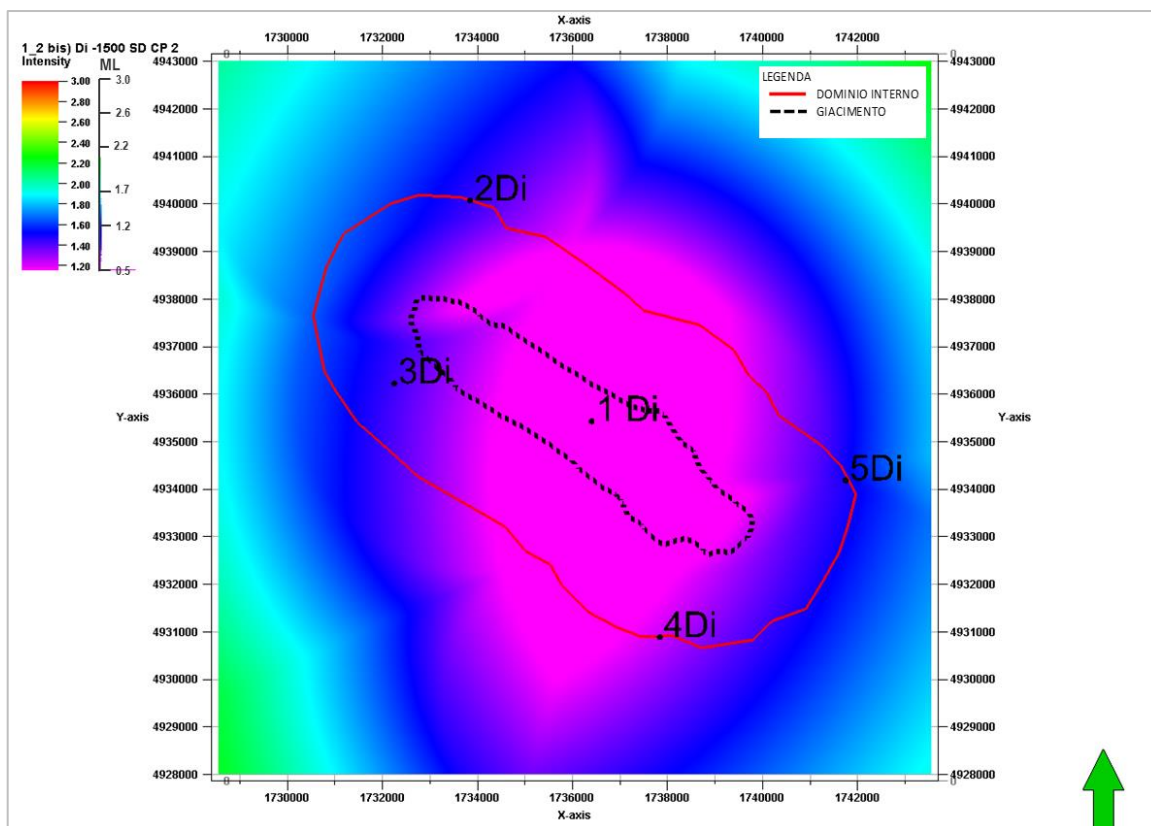


Figura 20. Mappa di detezione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni (2 stazioni in pozzetto): profondità 1500 m.

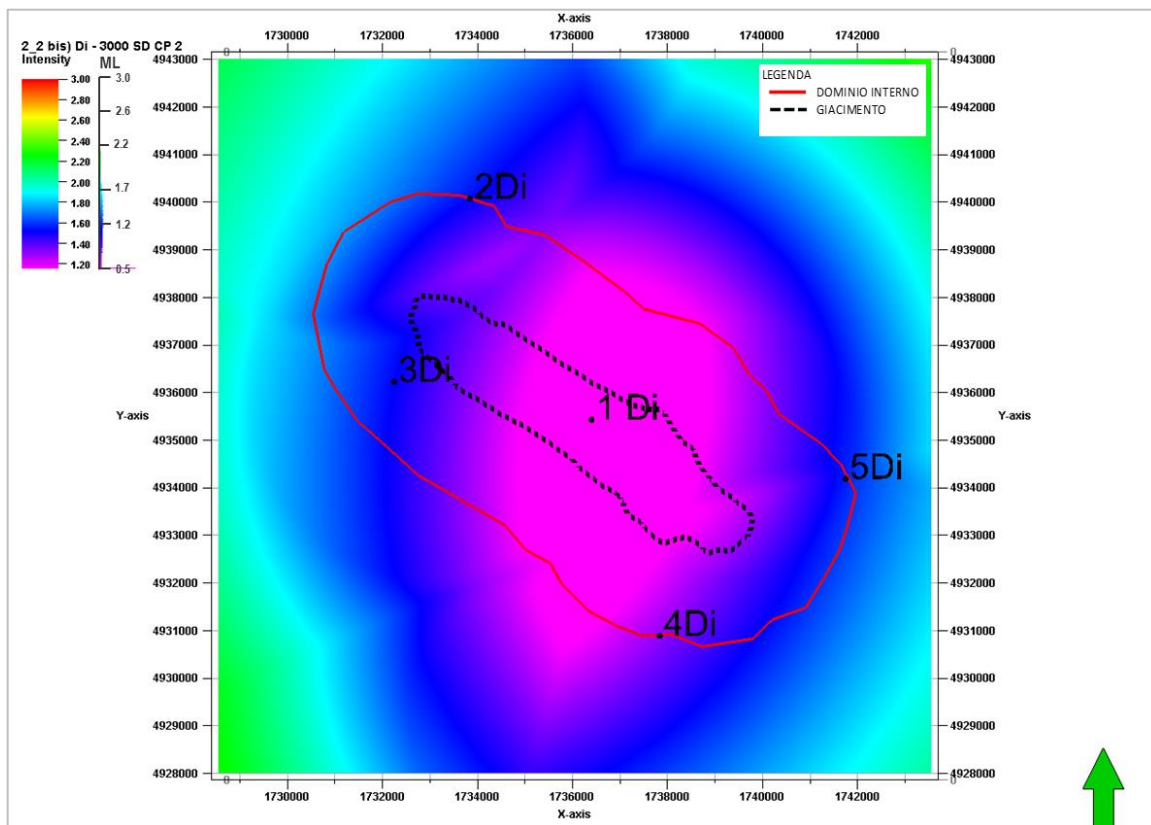


Figura 21. Mappa di detezione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni (2 stazioni in pozzetto): profondità 3000 m.

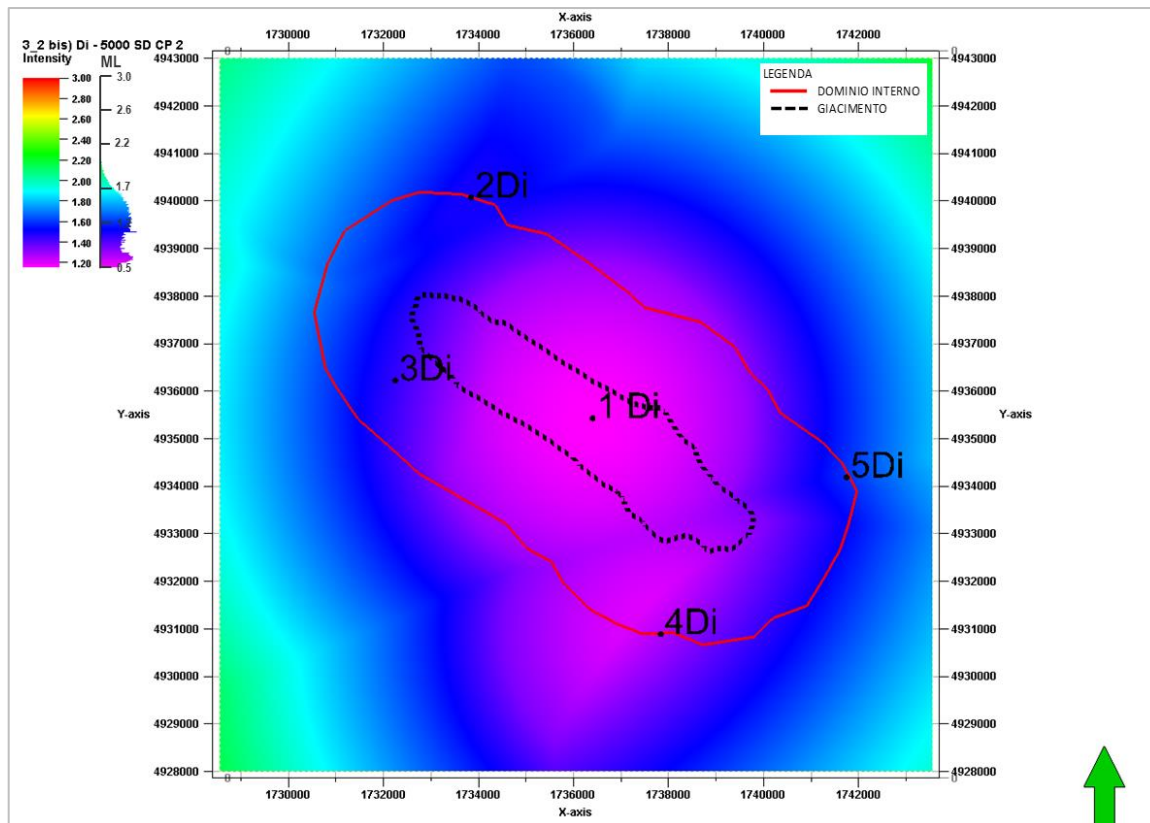


Figura 22. Mappa di detezione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni (2 stazioni in pozzetto): profondità 5000 m.

Figure 23 – 25

**Magnitudo minime per localizzazione (4 ricevitori)
Rumore di fondo minimo per singola stazione
Mappe a diversi livelli di profondità**

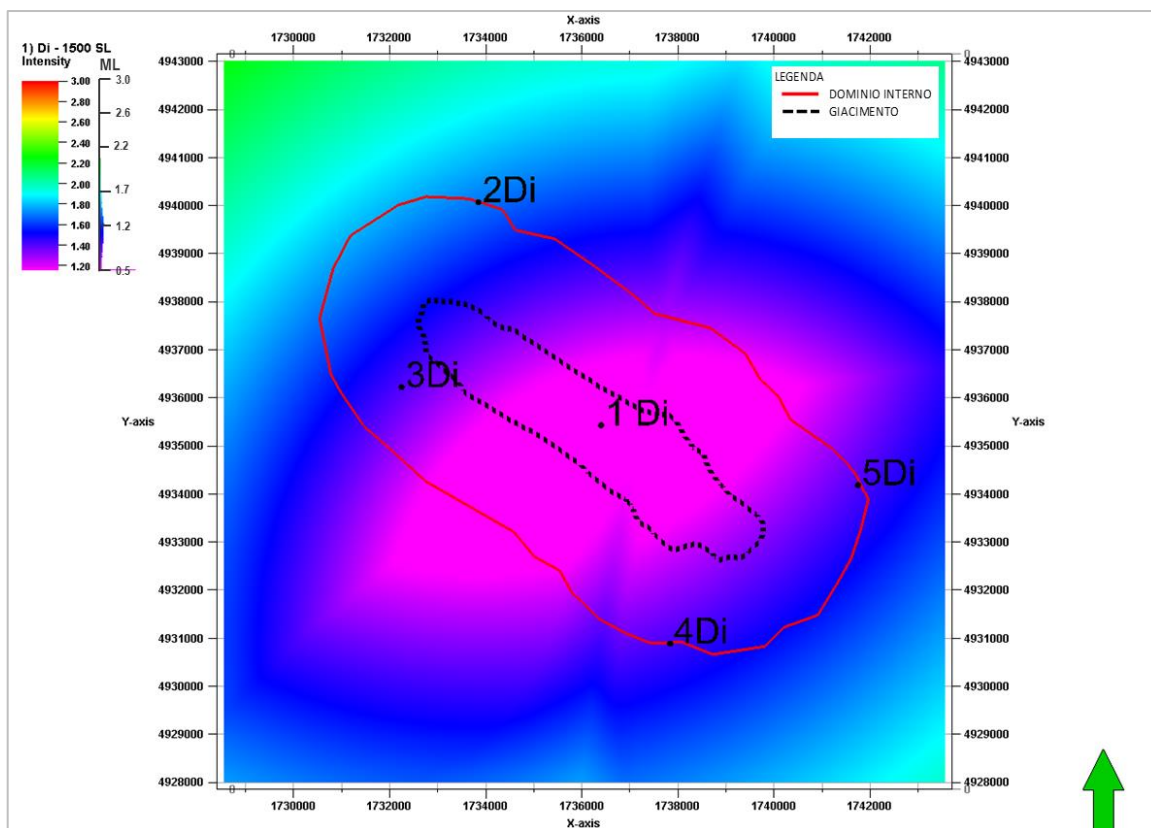


Figura 23. Mappa di localizzazione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni: profondità 1500 m.

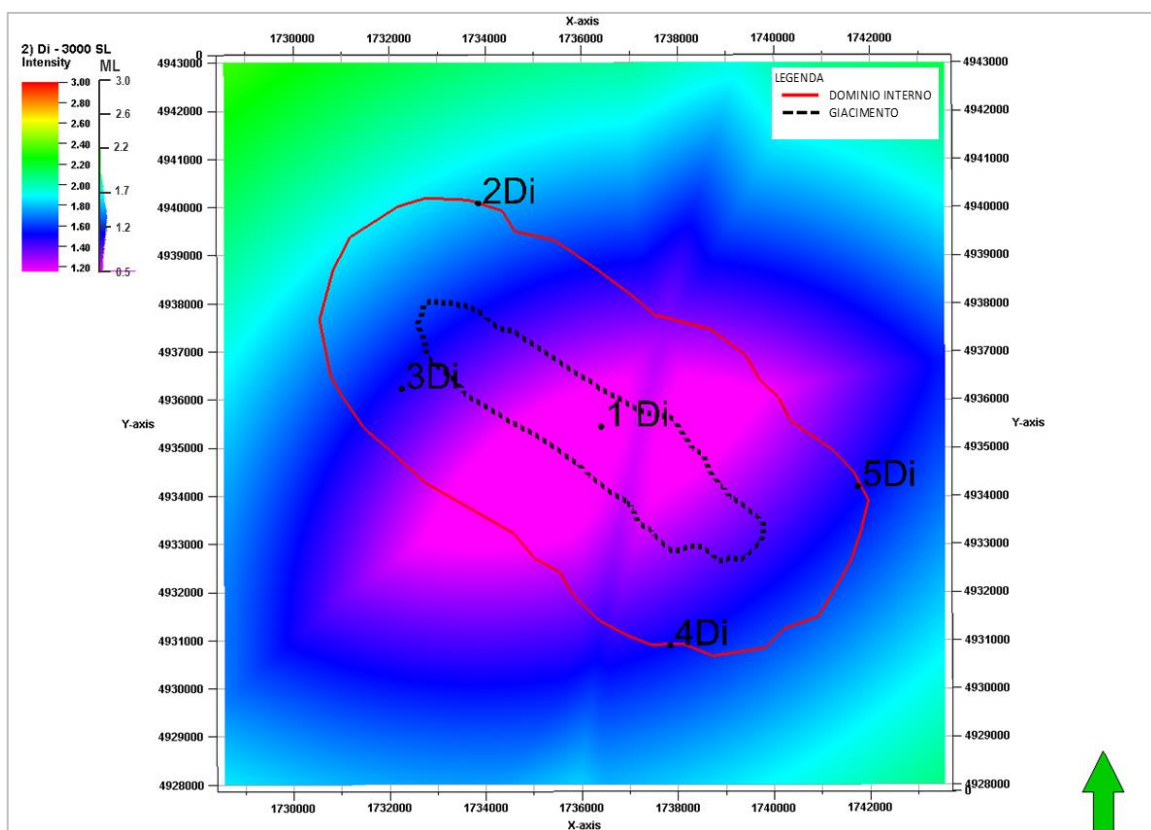


Figura 24. Mappa di localizzazione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni: profondità 3000 m.

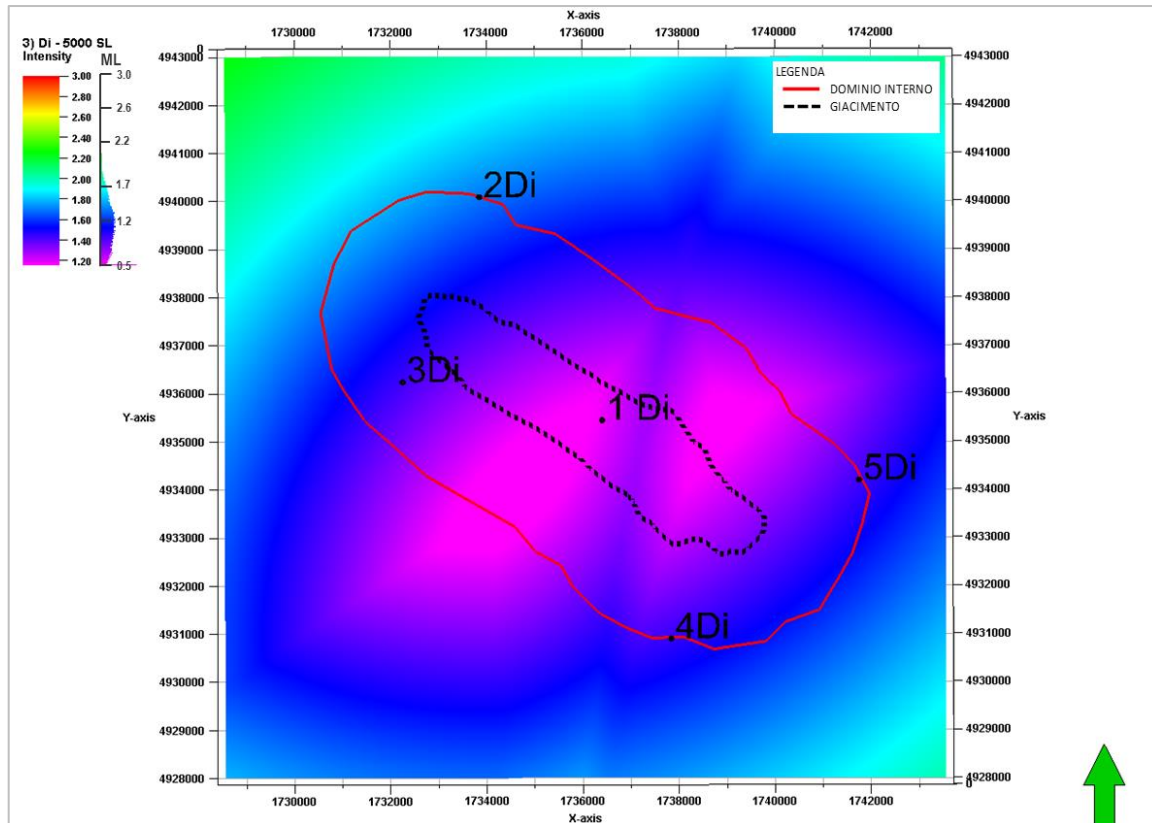


Figura 25. Mappa di localizzazione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni: profondità 5000 m.

Figure 26 – 28

**Magnitudo minime per localizzazione (4 ricevitori)
Rumore di fondo massimo per singola stazione
Mappe a diversi livelli di profondità**

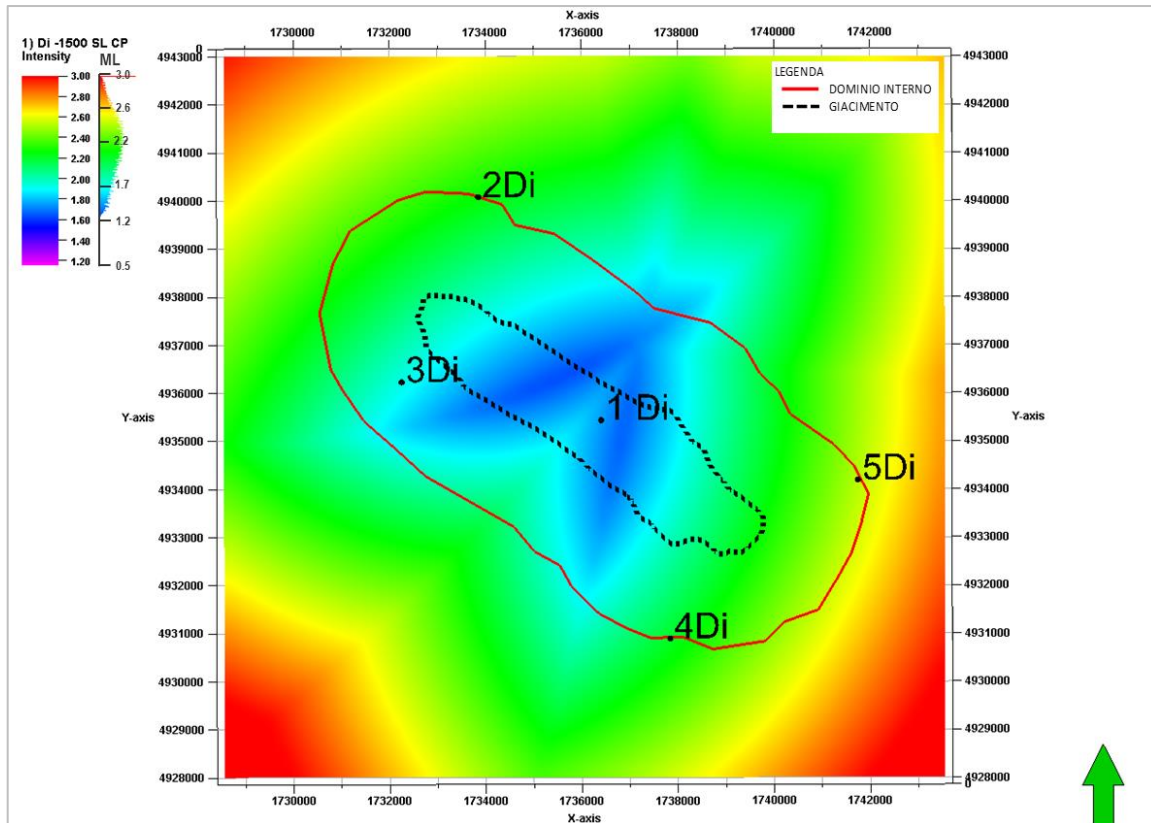


Figura 26. Mappa di localizzazione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni: profondità 1500 m.

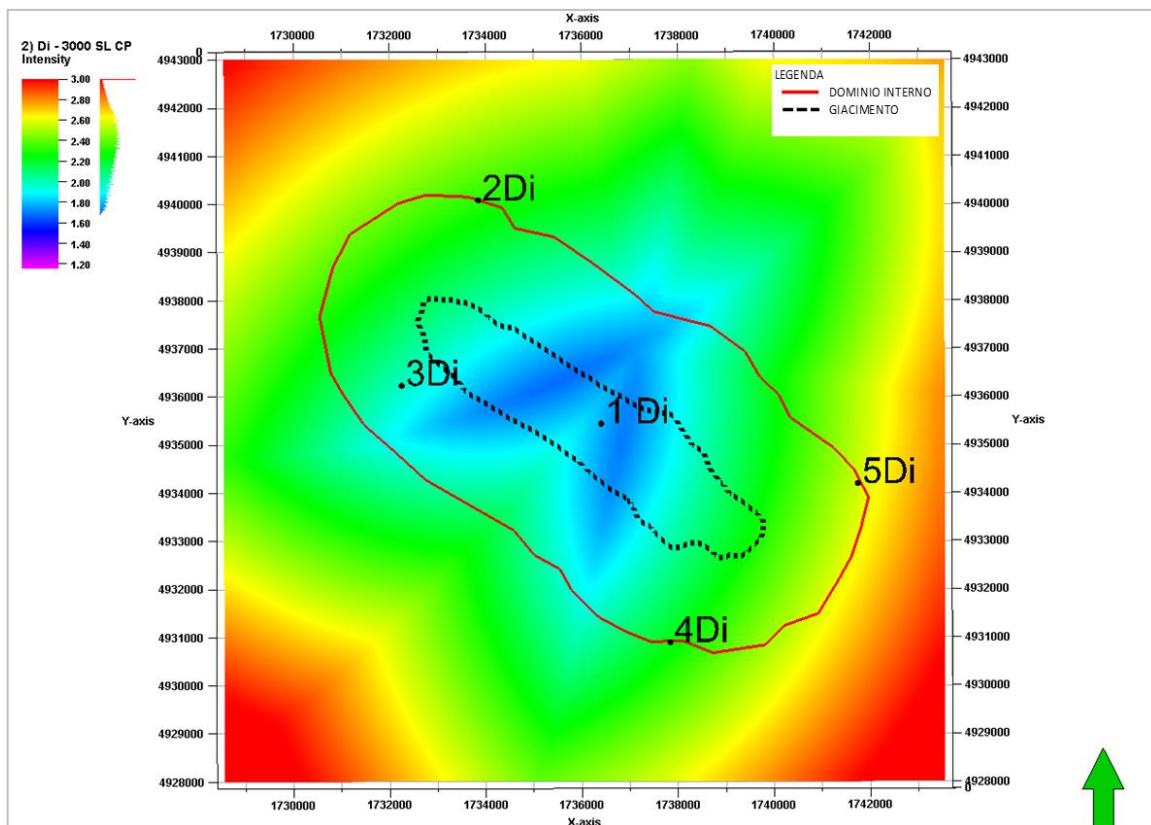


Figura 27. Mappa di localizzazione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni: profondità 3000 m.

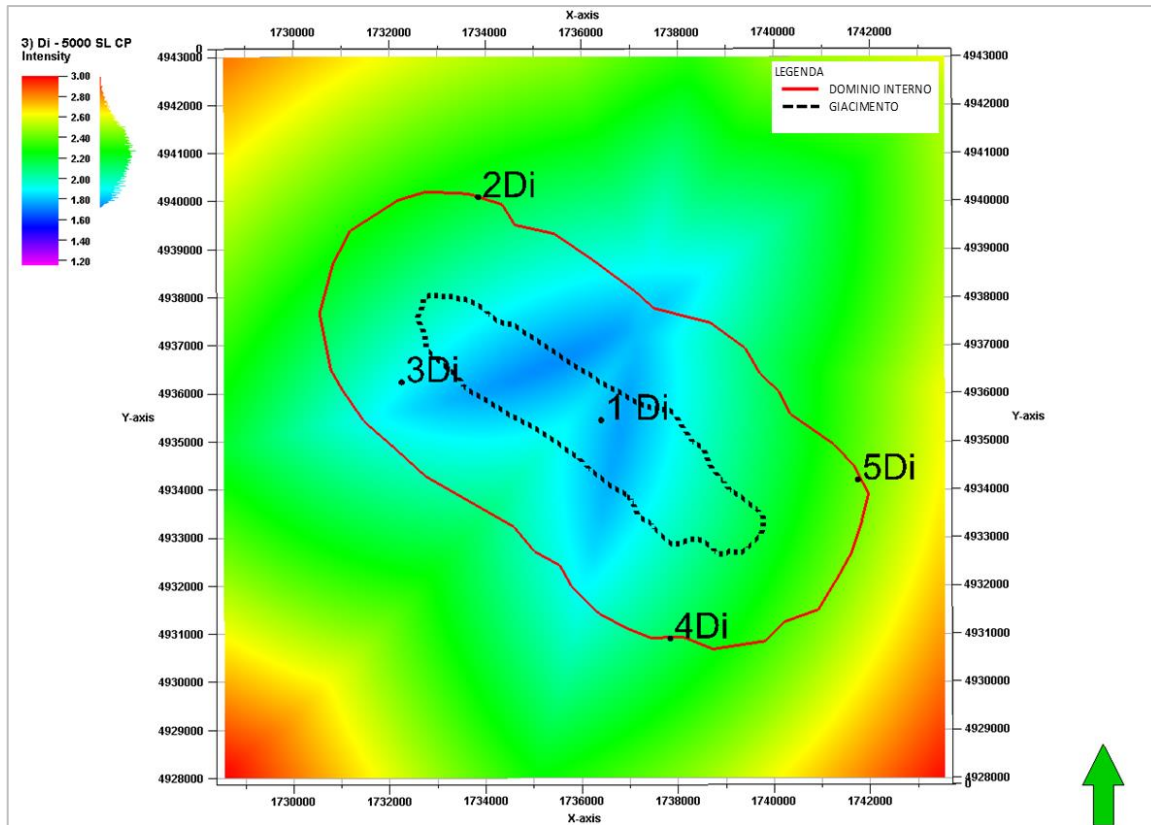


Figura 28. Mappa di localizzazione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni: profondità 5000 m.

Figure 29 – 31**Magnitudo minime per localizzazione (4 ricevitori)
Rumore di fondo massimo con due stazioni in pozzetto
Mappe a diversi livelli di profondità**

Nota: viene simulato il caso in cui le stazioni 3Di e 5Di del dominio interno sono posizionate in pozzetti superficiali di profondità 100 m. Il loro livello di rumore ambientale é desunto dal livello di rumore massimo registrato, ridotto di 10 dB per riprodurre una situazione di maggior quiete (in pozzetto). Le rimanenti stazioni 1Di, 2Di e 4Di vengono ipotizzate sul piano campagna e sono associate al loro massimo rumore ambientale.

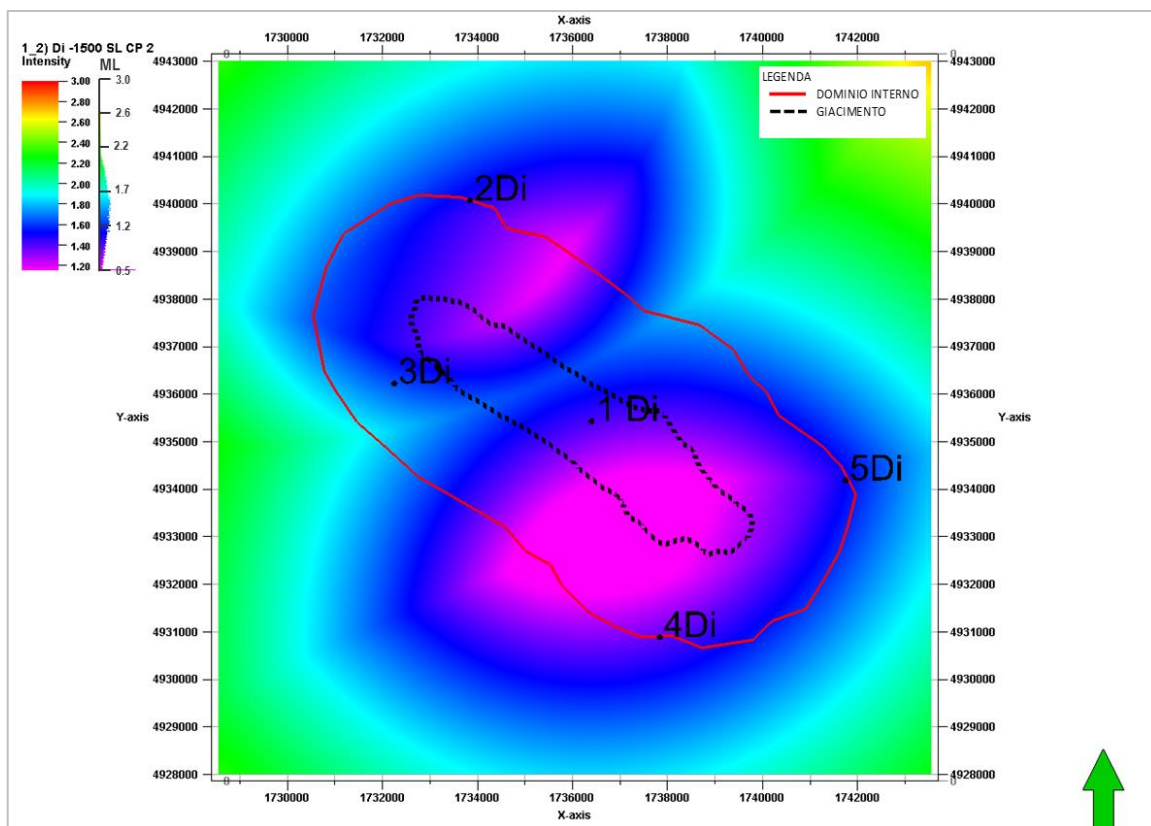


Figura 29. Mappa di localizzazione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni (2 stazioni in pozzetto): profondità 1500 m.

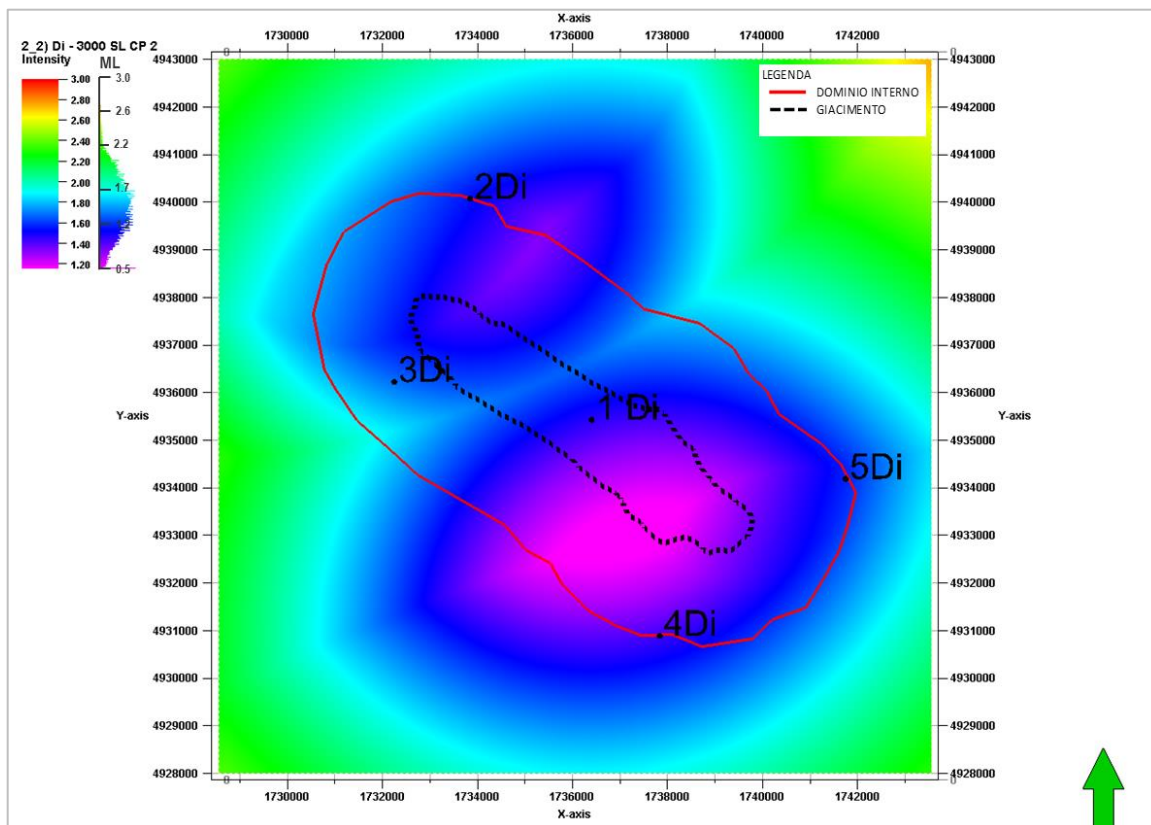


Figura 30. Mappa di localizzazione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni (2 stazioni in pozzetto): profondità 3000 m.

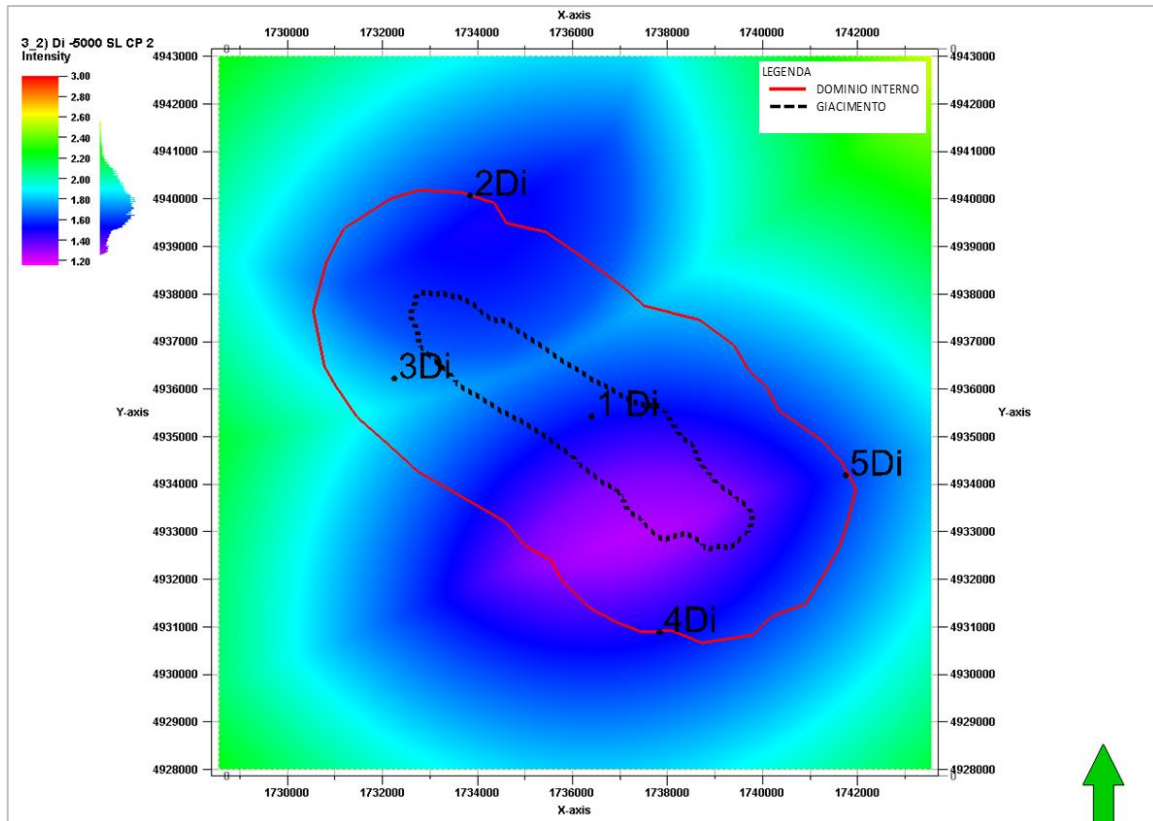


Figura 31. Mappa di localizzazione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni (2 stazioni in pozzetto): profondità 5000 m.

Figure 32 – 34

**Incerteza verticale di localizzazione
Rumore di fondo minimo per singola stazione
Mappe a diversi livelli di profondità**

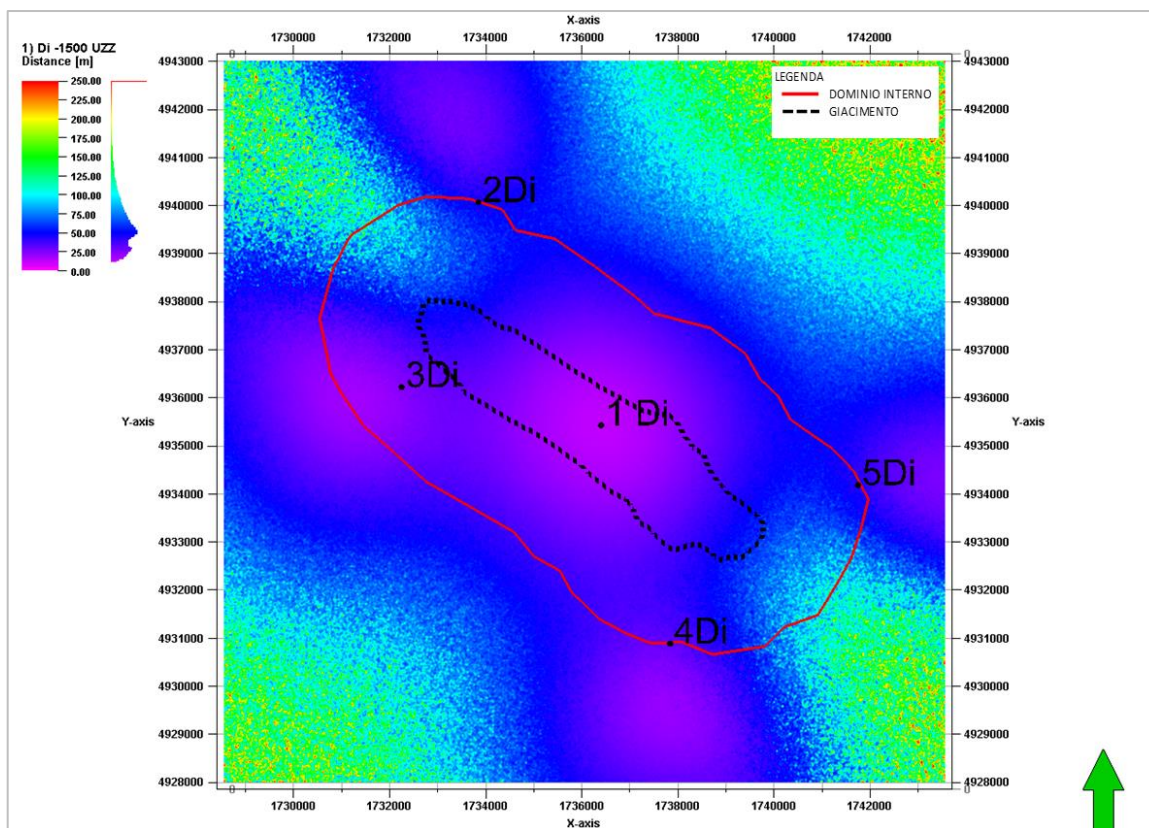


Figura 32. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni: profondità 1500 m.

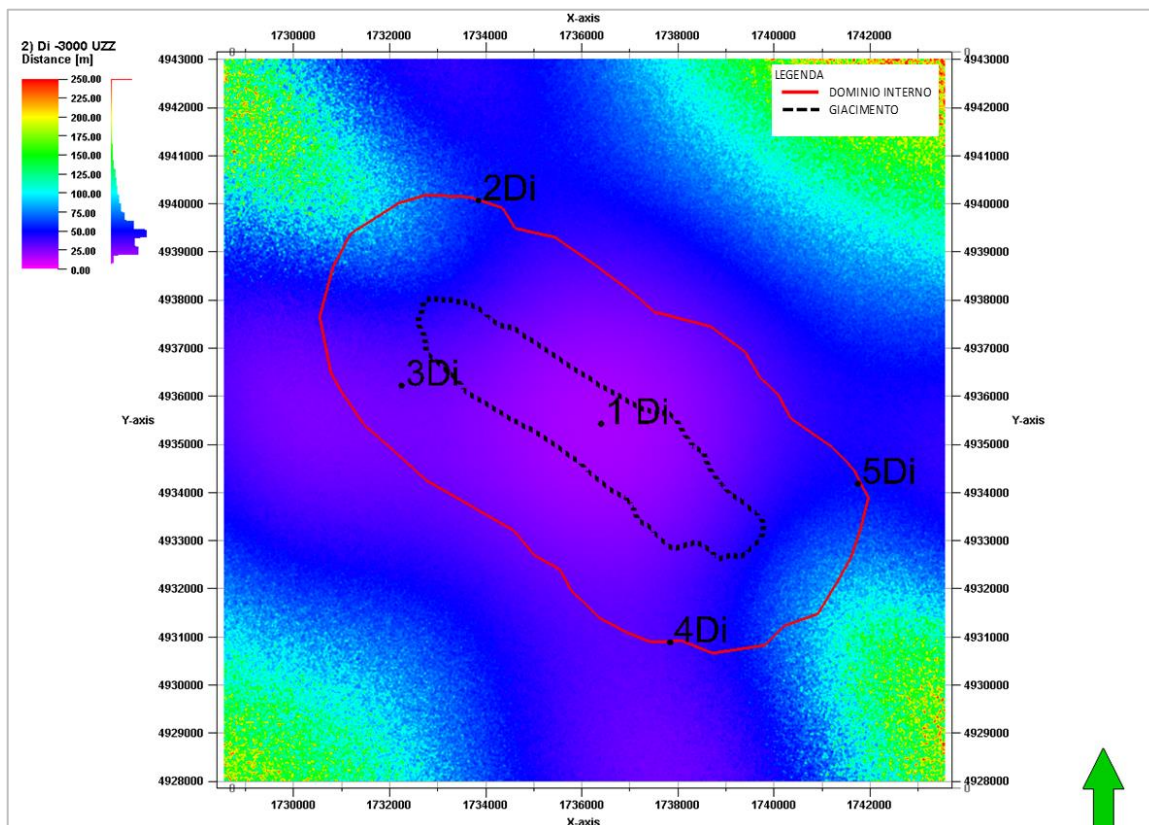


Figura 33. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni: profondità 3000 m.

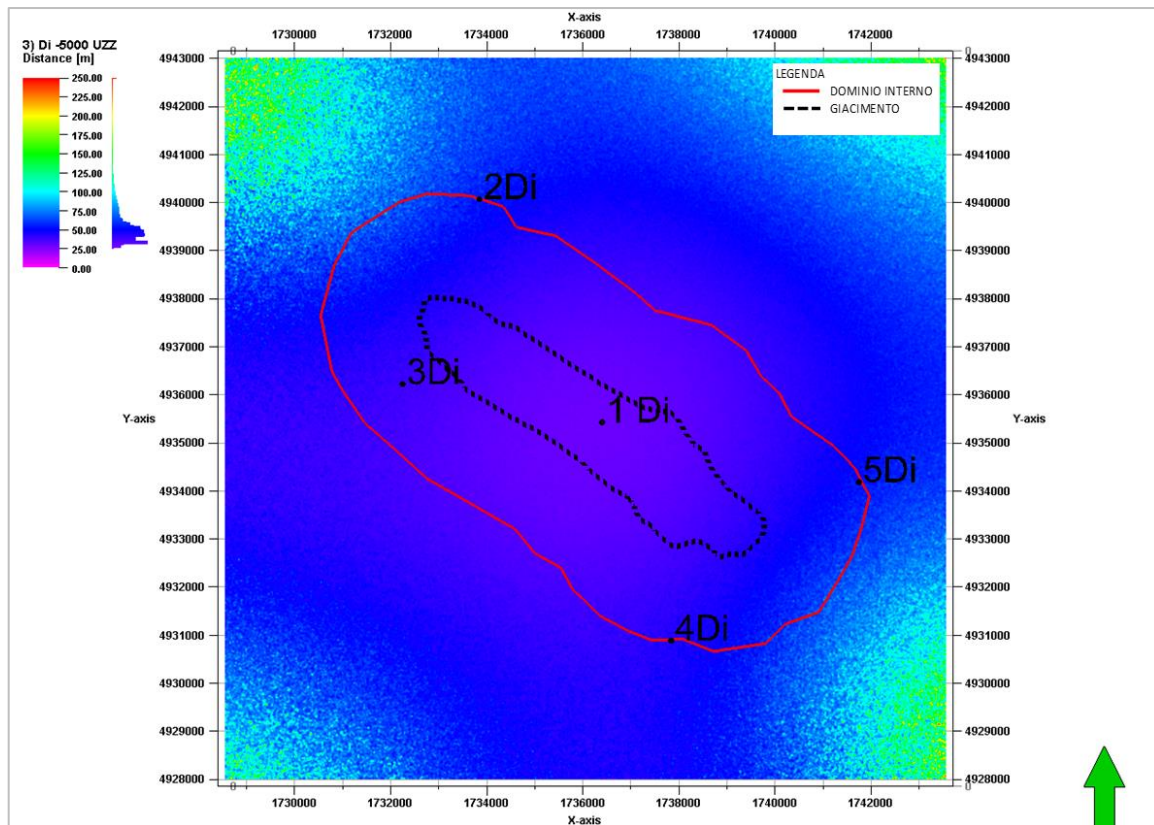


Figura 34. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni: profondità 5000 m.

Figure 35 – 37

**Incerteza verticale di localizzazione
Rumore di fondo massimo per singola stazione
Mappe a diversi livelli di profondità**

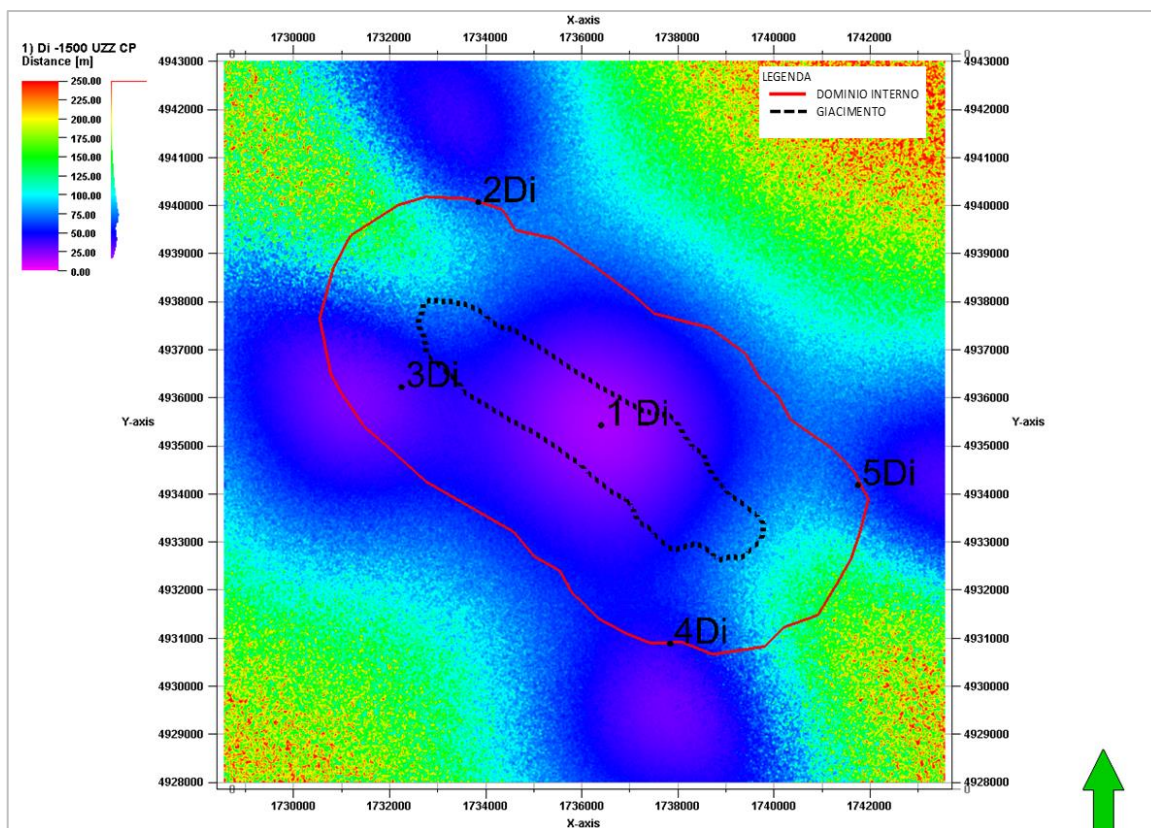


Figura 35. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni: profondità 1500 m.

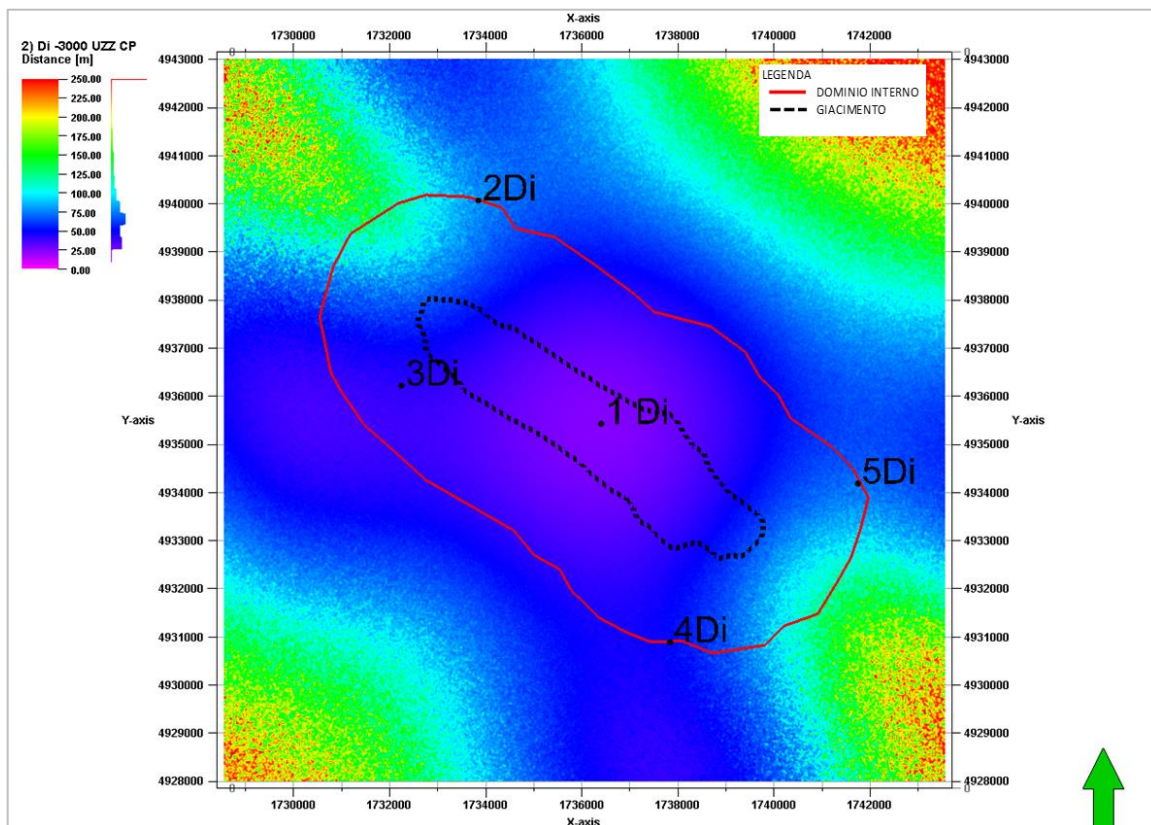


Figura 36. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni: profondità 3000 m.

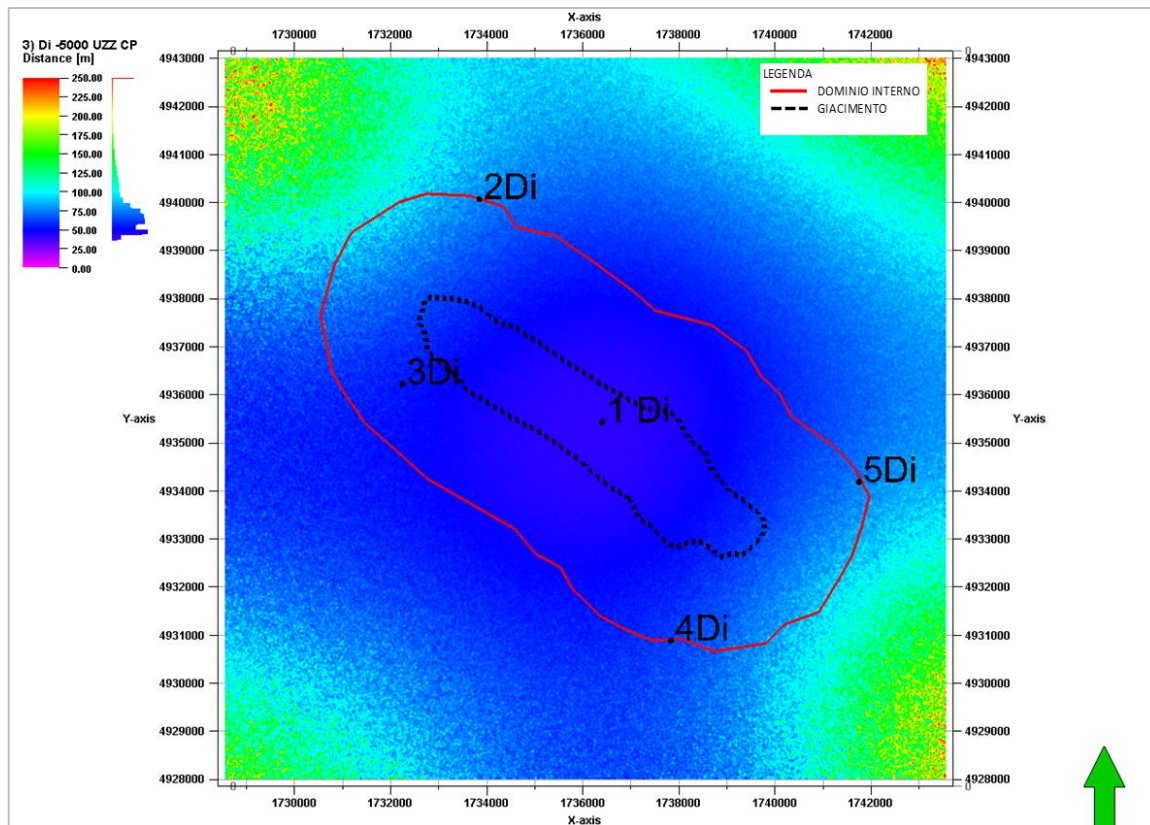


Figura 37. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni: profondità 5000 m.

Figure 38 – 40**Incertezza verticale di localizzazione
Rumore di fondo massimo con due stazioni in pozzetto
Mappe a diversi livelli di profondità**

Nota: viene simulato il caso in cui le stazioni 3Di e 5Di del dominio interno sono posizionate in pozzetti superficiali di profondità 100 m. Il loro livello di rumore ambientale é desunto dal livello di rumore massimo registrato, ridotto di 10 dB per riprodurre una situazione di maggior quiete (in pozzetto). Le rimanenti stazioni 1Di, 2Di e 4Di vengono ipotizzate sul piano campagna e sono associate al loro massimo rumore ambientale.

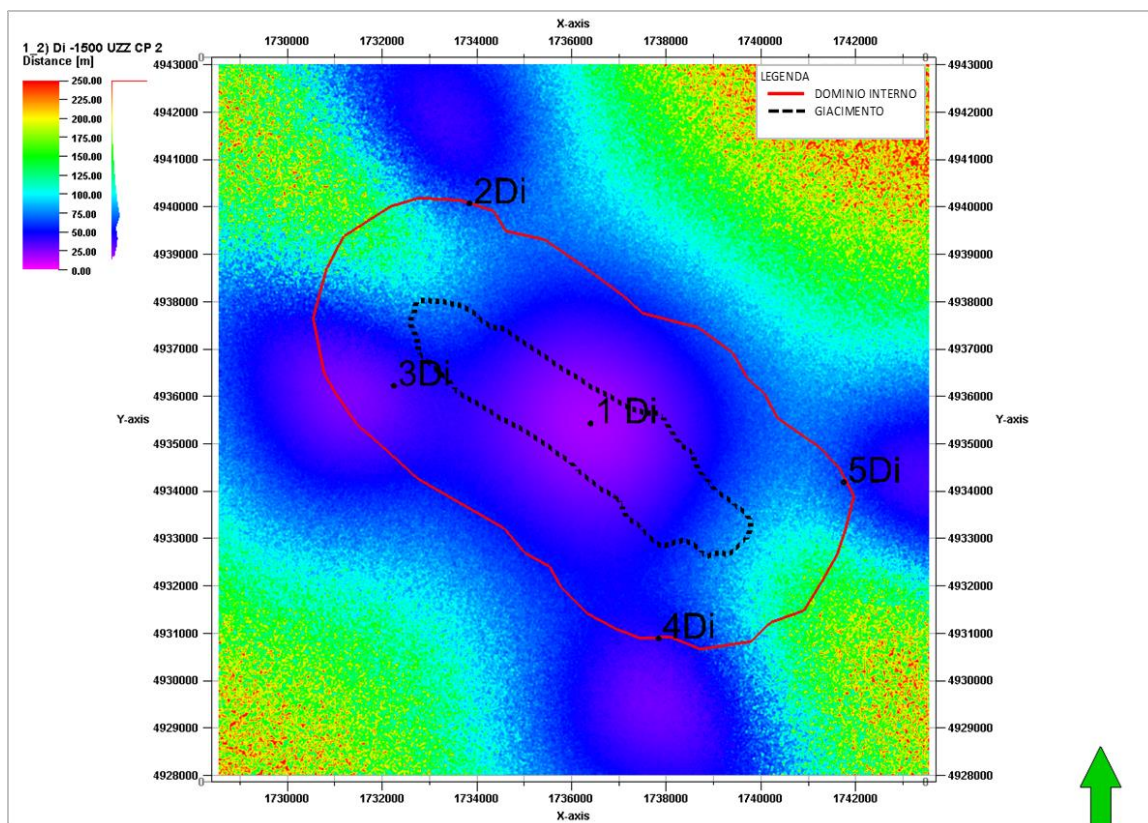


Figura 38. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni (2 stazioni in pozzetto): profondità 1500 m.

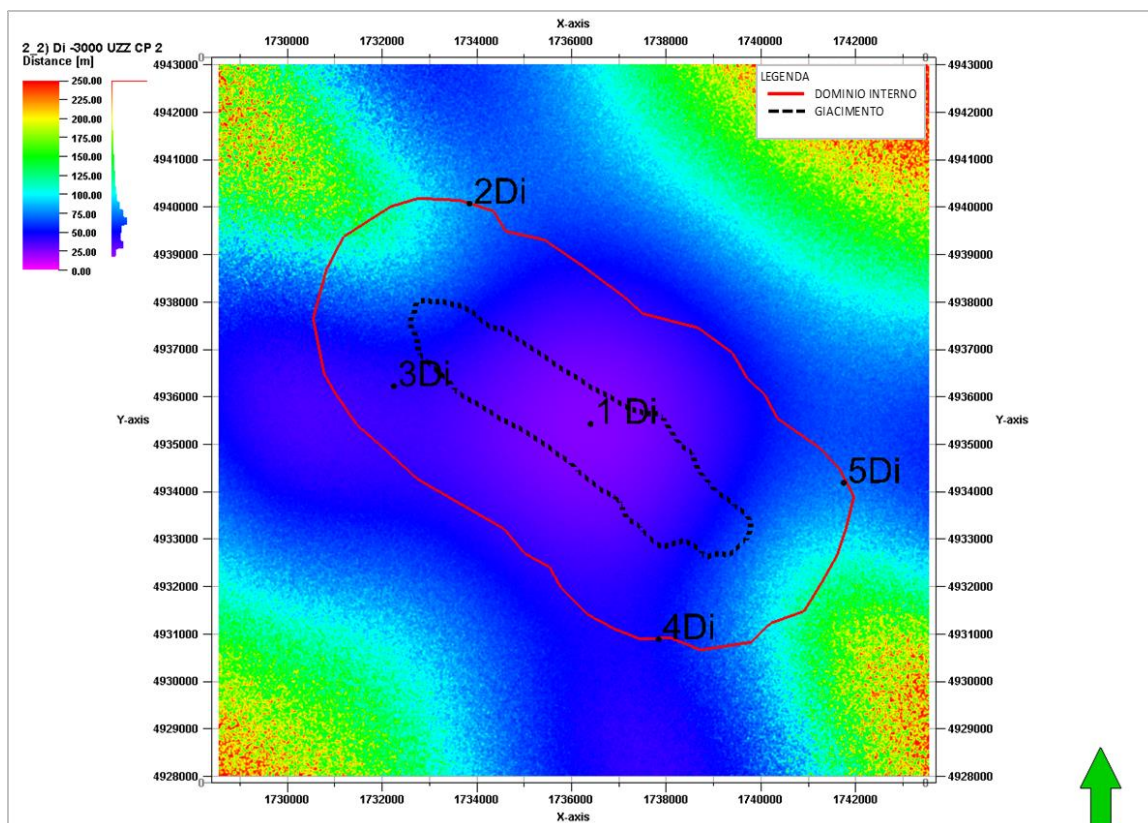


Figura 39. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni (2 stazioni in pozzetto): profondità 3000 m.

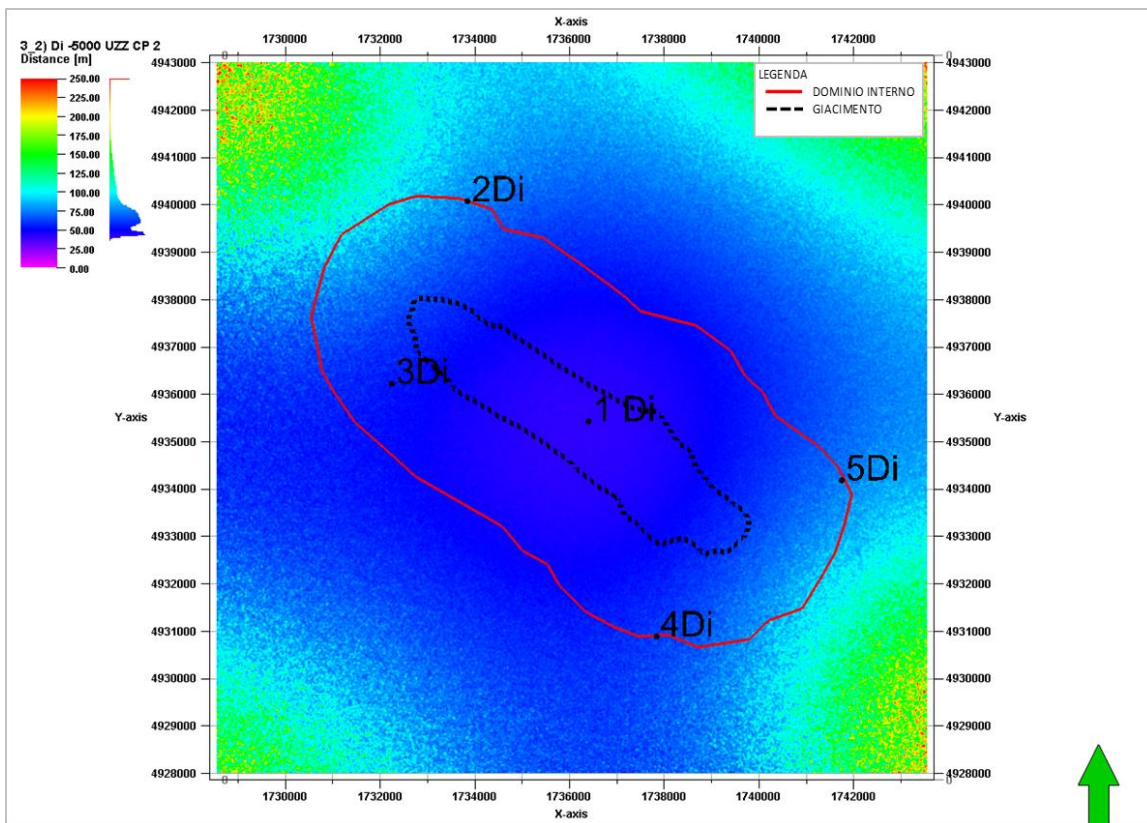


Figura 40. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni (2 stazioni in pozzetto): profondità 5000 m.

Figure 41 – 43

**Incerteza orizzontale di localizzazione
Rumore di fondo minimo per singola stazione
Mappe a diversi livelli di profondità**

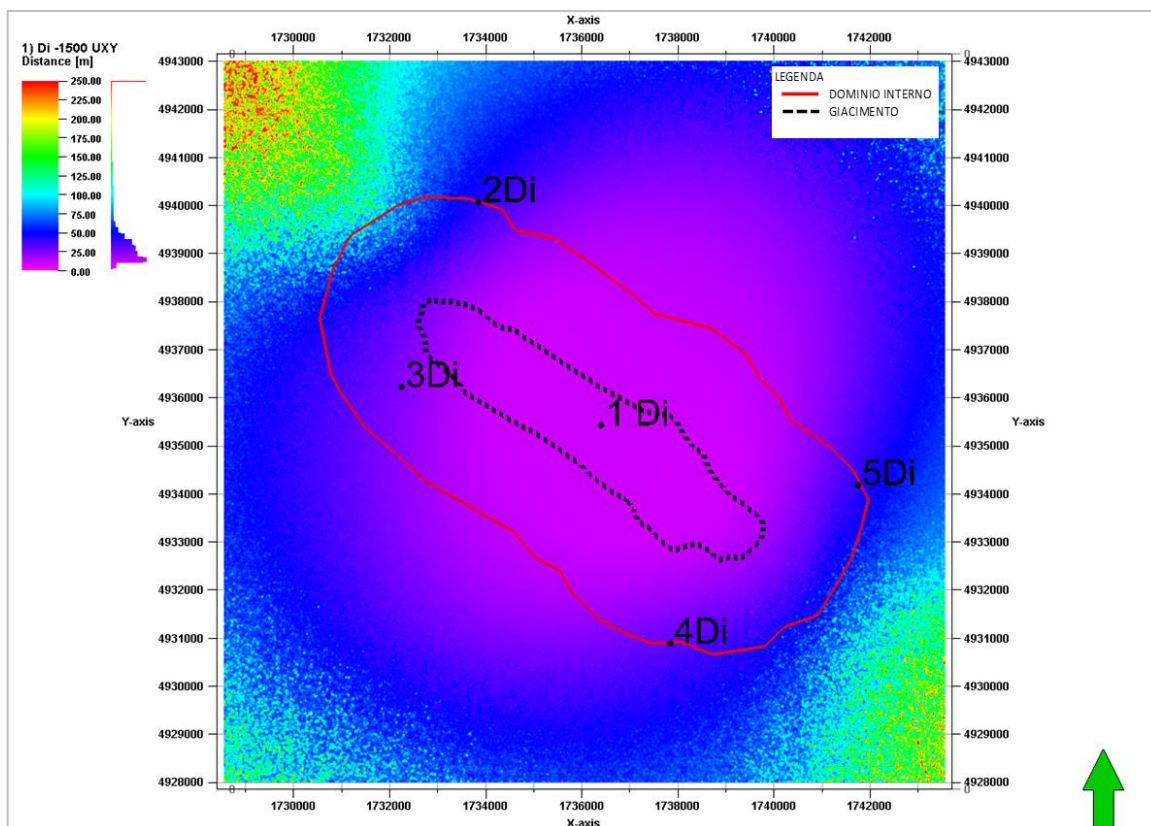


Figura 41. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni: profondità 1500 m.

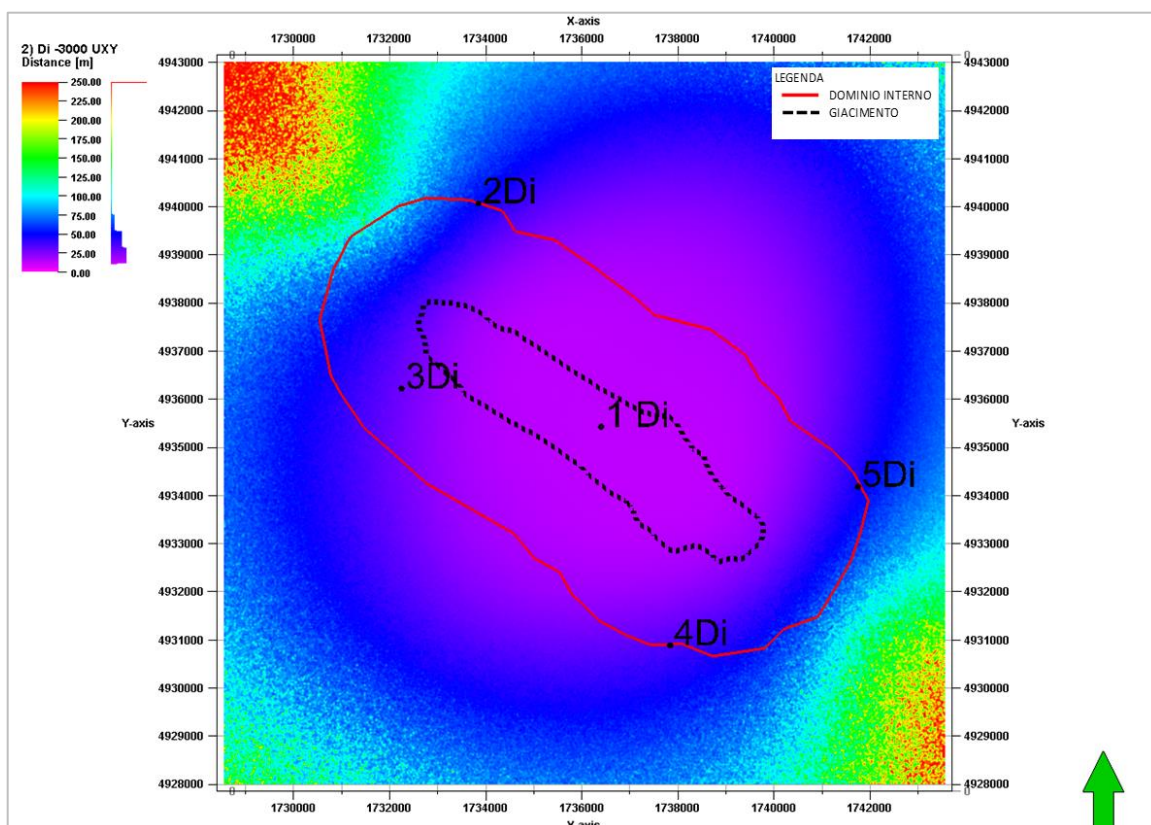


Figura 42. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni: profondità 3000 m.

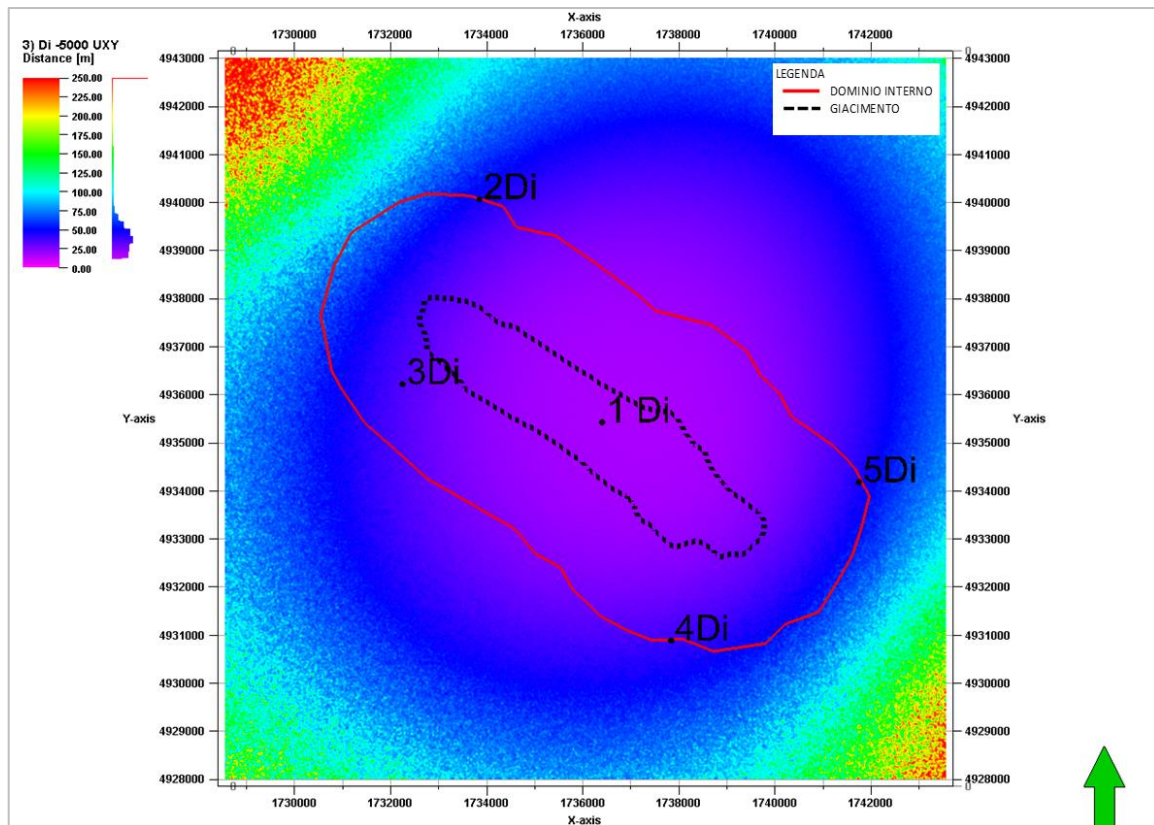


Figura 43. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni: profondità 5000 m.

Figure 44 – 46

**Incertezza orizzontale di localizzazione
Rumore di fondo massimo per singola stazione
Mappe a diversi livelli di profondità**

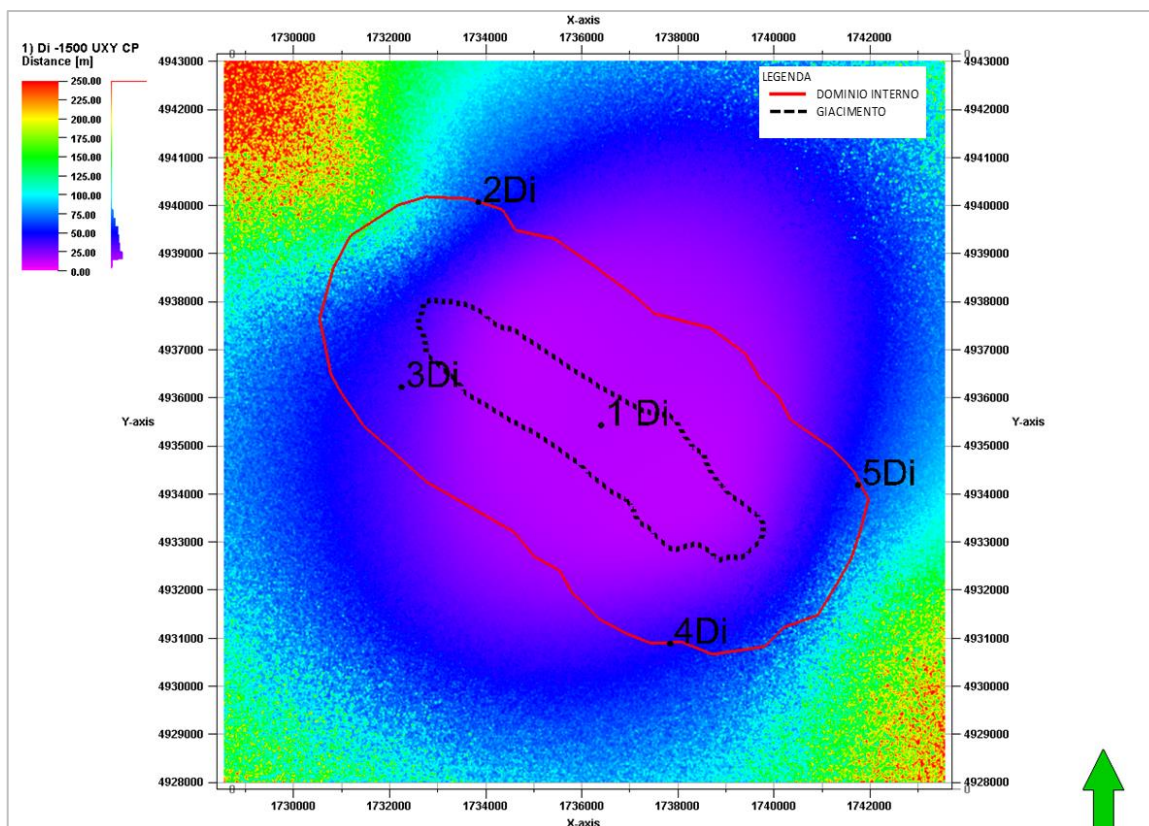


Figura 44. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni: profondità 1500 m.

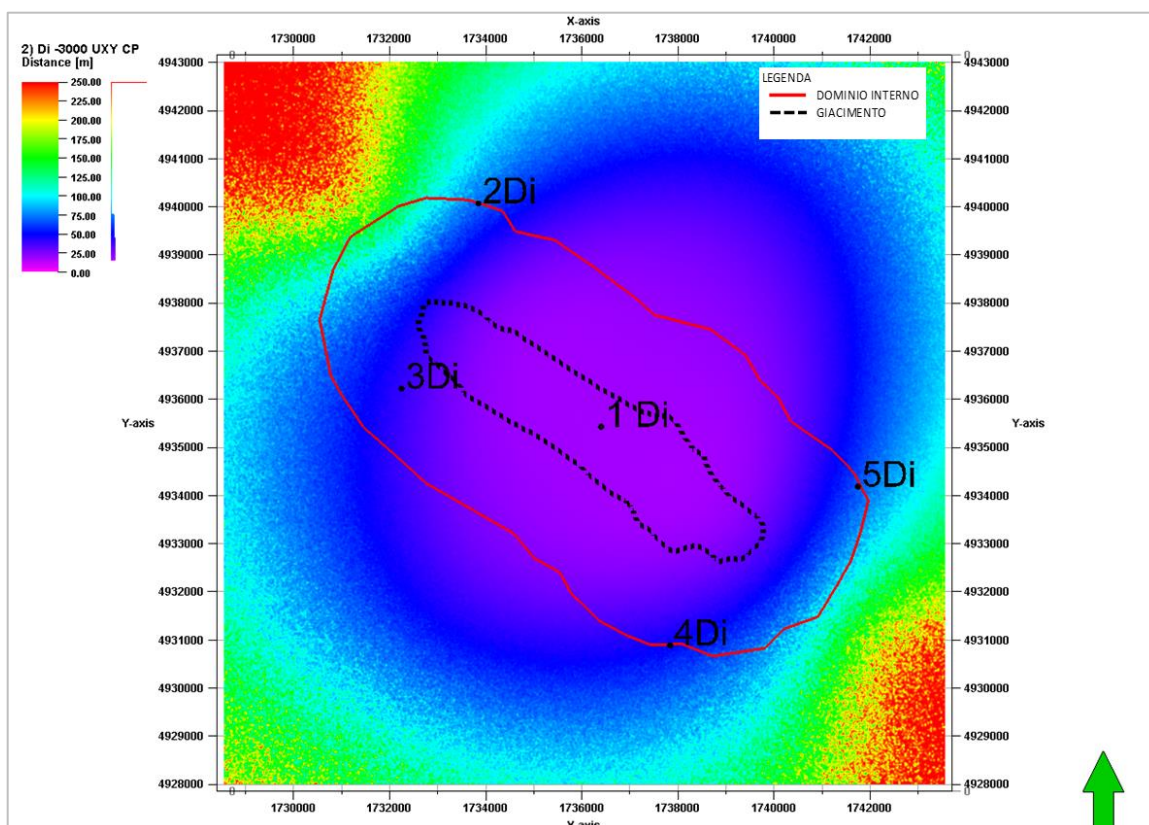


Figura 45. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni: profondità 3000 m.

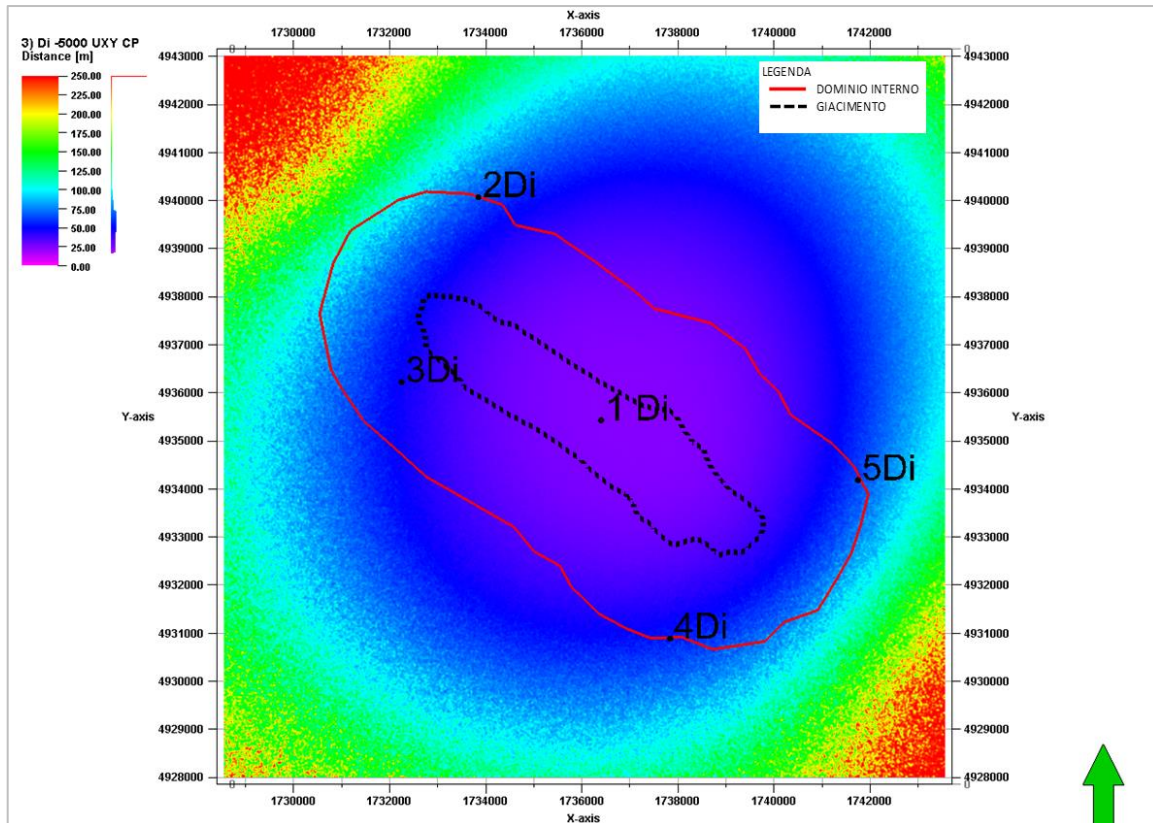


Figura 46. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni: profondità 5000 m.

Figure 47 – 49**Incertezza orizzontale di localizzazione
Rumore di fondo massimo con due stazioni in pozzetto
Mappe a diversi livelli di profondità**

Nota: viene simulato il caso in cui le stazioni 3Di e 5Di del dominio interno sono posizionate in pozzetti superficiali di profondità 100 m. Il loro livello di rumore ambientale é desunto dal livello di rumore massimo registrato, ridotto di 10 dB per riprodurre una situazione di maggior quiete (in pozzetto). Le rimanenti stazioni 1Di, 2Di e 4Di vengono ipotizzate sul piano campagna e sono associate al loro massimo rumore ambientale

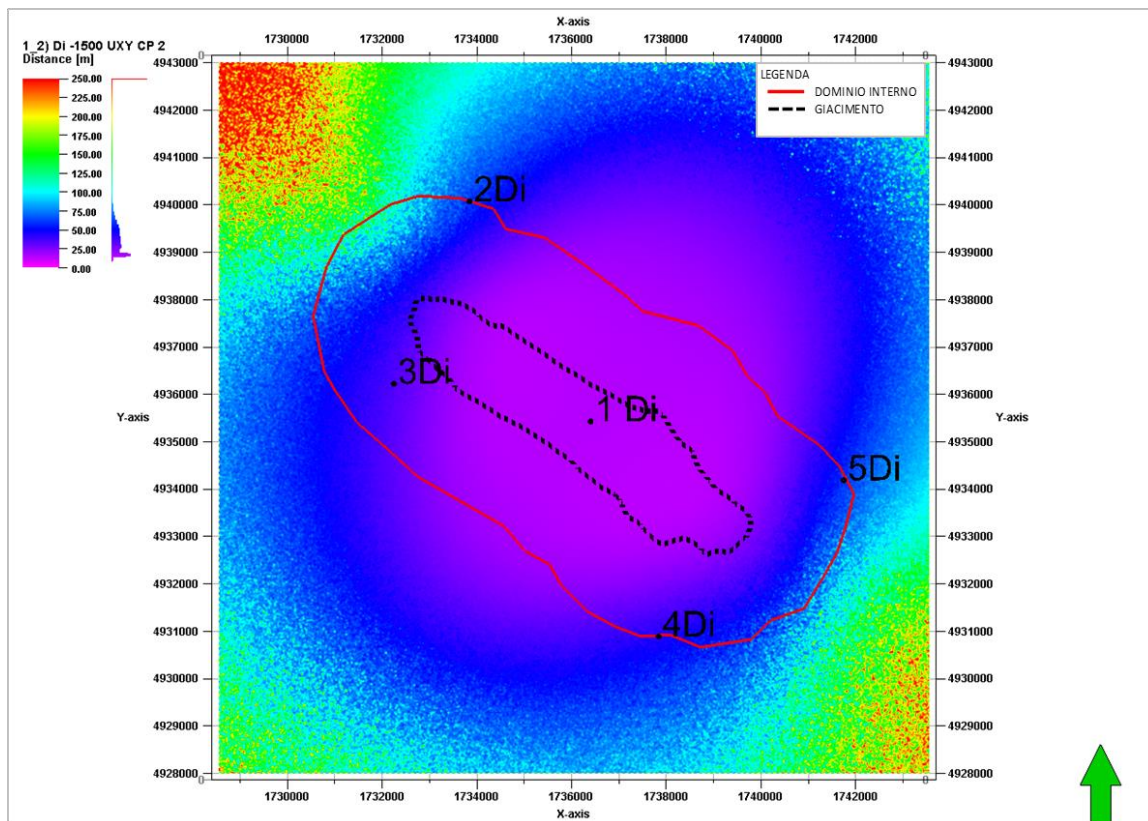


Figura 47. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni (2 stazioni in pozzetto): profondità 1500 m.

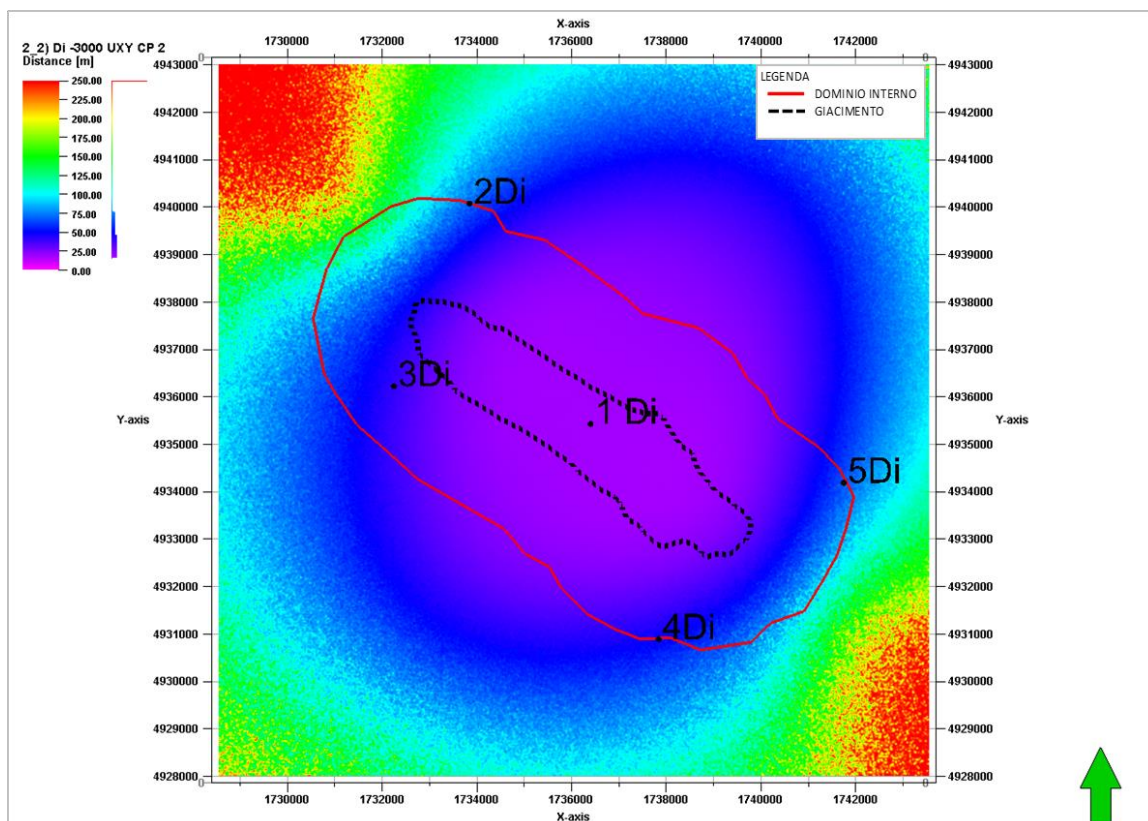


Figura 48. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni (2 stazioni in pozzetto): profondità 3000 m.

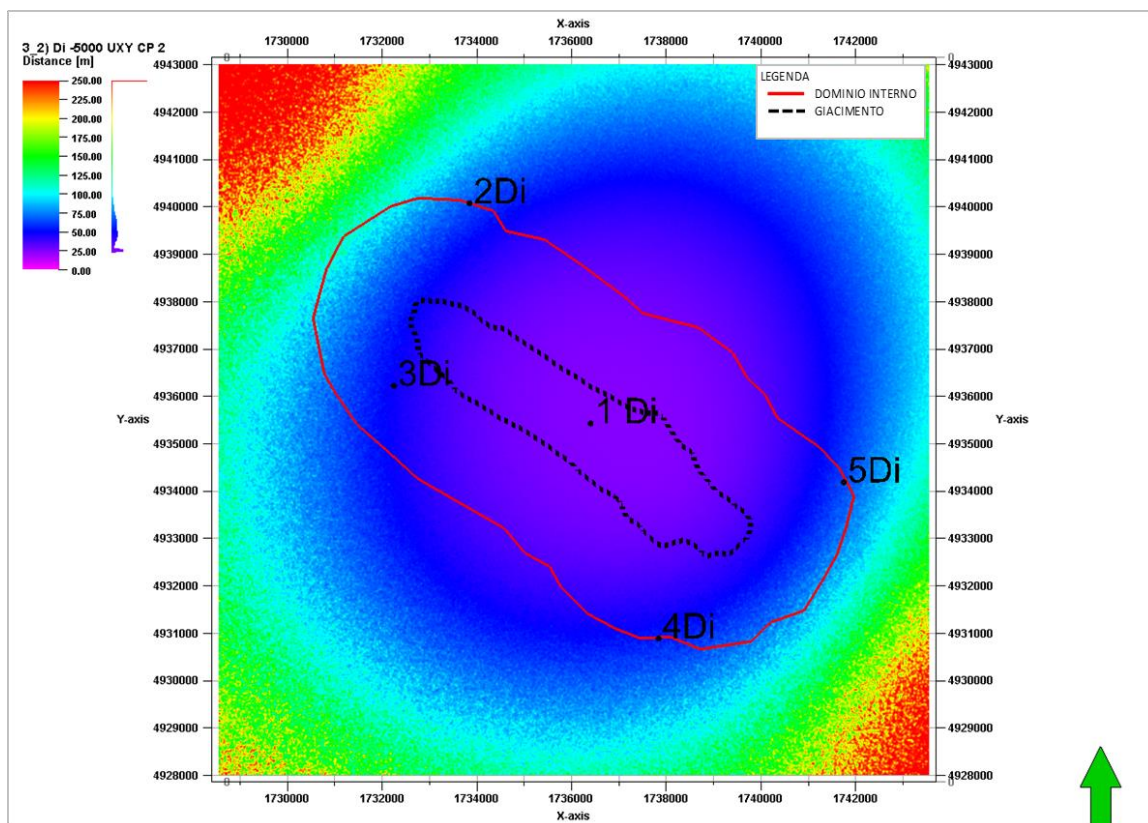


Figura 49. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni interno (2 stazioni in pozzetto): profondità 5000 m.

Tabelle riassuntive delle soglie di deteazione e localizzazione e delle relative incertezze

Le tabelle seguenti riassumono i principali risultati ottenuti dalle simulazioni descritte precedentemente. In particolare, per ciascun intervallo di profondità si riportano i valori di soglia di deteazione e di localizzazione (espressi in magnitudo locale, ML), con le relative incertezze verticali ed orizzontali (in metri), calcolati considerando:

- il livello di rumore minimo per singola stazione (Tabella 4);
- il livello di rumore massimo per singola stazione (Tabella 5);
- il livello di rumore massimo per singola stazione, considerando di installare due stazioni in pozzetto (Tabella 6).

Tabella 4. Soglie di deteazione e localizzazione e di incertezza riscontrabili al bordo del dominio interno, nelle condizioni di minimo rumore ai ricevitori.

Livello rumore minimo per singola stazione				
Profondita' Km	Soglia Deteazione (SD) ML	Soglia Localizzazione (SL) ML	Errore Verticale m	Errore Orizzontale m
1,5	0,5	0,7	50	50
3,0	0,5	0,7	50	50
5,0	0,5	0,7	50	50

Tabella 5. Soglie di deteazione e localizzazione e di incertezza riscontrabili al bordo del dominio interno, nelle condizioni di massimo rumore ai ricevitori.

Livello rumore massimo per singola stazione				
Profondita' Km	Soglia Deteazione (SD) ML	Soglia Localizzazione (SL) ML	Errore Verticale m	Errore Orizzontale m
1,5	1,2	1,8	100	100
3,0	1,2	1,8	100	100
5,0	1,5	1,9	100	100

Tabella 6. Soglie di deteazione e localizzazione e di incertezza riscontrabili al bordo del dominio interno, nelle condizioni di 2 sensori in pozzetti.

Livello rumore massimo, con 2 stazioni in pozzetto				
Profondita' Km	Soglia Deteazione (SD) ML	Soglia Localizzazione (SL) ML	Errore Verticale m	Errore Orizzontale m
1,5	0,5	0,8	100	100
3,0	0,5	0,8	100	100
5,0	0,8	1,0	100	100

Dalle simulazioni effettuate si evince che la configurazione di una rete microsismica costituita da 5 stazioni, di cui due con sismometri installati in pozzetti profondi circa 100 m, soddisfa i requisiti indicati nelle richieste integrative del Ministero dell'Ambiente, sia in termini di Magnitudo rilevata e localizzata, sia in termini di incertezze nella localizzazione, anche in caso di rumore massimo.

CONCLUSIONI

Lo studio intrapreso ha consentito di definire una configurazione geometrica teorica della rete di monitoraggio microsismico della Concessione Alfonsine Stoccaggio rispondente alle indicazioni e ai criteri di cui al Punto 20 della richiesta di documentazione integrativa pervenuta dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, con comunicazione Prot. n. 0002356 del 27 giugno 2016.

Sulla base degli scenari ipotizzati nello studio e di quanto riportato principalmente nelle Tabelle 4, 5 e 6, vengono fornite le seguenti indicazioni sui valori di magnitudo minima e sul margine di incertezza.

I valori di magnitudo minima ritenuti significativi per la performance della rete progettata vengono letti in corrispondenza del limite del Dominio interno; ovviamente sono possibili anche magnitudo inferiori a quelle riportate se la lettura è riferita ad un'area molto piccola centrata sul giacimento.

Le simulazioni effettuate mostrano come le prestazioni della rete siano principalmente influenzate dal rumore ambientale delle singole stazioni. Al variare di altri parametri, tra cui le profondità comprese tra 1500-5000 m, i risultati risultano maggiormente stabili.

Assumendo livelli di rumore minimi si hanno soglie di localizzazione di 0.7 ML (magnitudo minime) in corrispondenza del Dominio interno.

Assumendo livelli di rumore massimo si hanno soglie medie di localizzazione di 1.8 ML (magnitudo minime) in corrispondenza del Dominio interno.

Si valuta che tali risultati possano essere conseguiti solo parzialmente con geofoni posti in superficie (ad esempio nelle ore notturne); un maggiore affinamento delle prestazioni si può prevedere posizionando i geofoni in pozzetti profondi circa 100 m.

Una soluzione intermedia prevede un sistema misto piano superficie-pozzetto, con tre stazioni mantenute sul piano campagna e due poste in pozzetti, a profondità di circa 100 m. In tal caso si raggiungono soglie di localizzazione di 0.8 ML, che soddisfano i requisiti indicati nelle richieste integrative del Ministero dell'Ambiente, anche in caso di rumore massimo.

Analoghi scenari di configurazione sono stati ipotizzati per definire le incertezze di localizzazione, il cui margine di tolleranza è valutato non superiore a 100 metri.

In conclusione, dalle simulazioni effettuate si evince che la configurazione di una rete microsismica costituita da 5 stazioni, di cui due con sismometri installati in pozzetti profondi circa 100 m, soddisfa i requisiti indicati nelle richieste integrative del Ministero dell'Ambiente, sia in termini di Magnitudo rilevata e localizzata, sia in termini di incertezze nella localizzazione, anche in caso di rumore massimo.

Riferimenti bibliografici

Boore D. M., 1988

The Richter scale: its development and use for determining earthquake source parameters
Tectonophysics, 166 (1989) 1-14

Brie A., Pampuri F., Marsala A.F. & Meazza O., 1995

Shear sonic interpretation in gas-bearing sands, SPE 30595

Brocher T.M., 2015

Empirical Relations between Elastic Wavespeeds and Density in the Earth's Crust
Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 95, No. 6, pp. 2081–2092, December 2005,

Brune, J.N., 1970

Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes
Jour. Geoph. Res., 75, 4997-5009

Castagna J.P., Batzle M.L., and Eastwood R.L., 1985

Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks
Geophysics, Vol. 50, n.4 (APRIL 1985); P. 571-581,

Fantoni R. & Franciosi R., 2008

8 geological sections crossing Po Plain and Adriatic foreland
Rend. Online Soc. Geol. It., 3 , 365-366

Goertz -Allmann B. P., Edwards B., Bethmann F., Deichmann N., Clinton J., Fäh D., and Giardini D.

A New Empirical Magnitude Scaling Relation for Switzerland
Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 101, No. 6, pp. 3088–3095, December 2011, doi: 10.1785/0120100291

Hanks, T.C., Kanamori, 1979

A Moment magnitude scale, Jour. Geoph. Res., 84(B5), 2348-2350

Madariaga, R., 1976

Dynamics of an expanding circular fault., Bull. Seis. Soc. Am. 66, 639-666

Mariucci M.T., Montone P., 2014

P wave velocity and density: Borehole data for a better Shallow Crust model in the Po plain
AGU, FALL MEETING

Molinari I., Argnani A., Morelli A. and Basini P., 2015

Development and Testing of a 3D Seismic Velocity Model of the Po Plain Sedimentary Basin, Italy
Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 105, No. 2A, pp. 753–764, April 2015, doi: 10.1785/0120140204

Pieri M., Groppi G., 1981

Subsurface geological structure of the Po plain, Italy
CNR, Prog.Finalizzato Geodinamica, Pubblicazione n.414

Raymer D. G., Leslie H. D., 2011

Microseismic Network Design - Estimating Event Detection
73rd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011 Vienna, Austria, 23-26 May 2011

Toscani G., Burrato P., Di Bucci D., Seno S., Valensise G., 2007

Plio-Quaternary tectonic evolution of the Northern Apennines thrust fronts (Bologna-Ferrara section, Italy): seismotectonic implications
Ital.J.Geosci. (Boll.Soc.Geol.It.), Vol. 128, No. 2 (2009), pp. 605-613, 5 figs. (DOI: 10.3301/IJG.2009.128.2.605)

Williams, D.M., 1990

The acoustic log hydrocarbon indicator
SPWLA 31st Ann. Logging Symp., June 24-27, 1990, Paper W.