

**S.S. N. 685 "DELLE TRE VALLI UMBRE"
TRATTO SPOLETO-ACQUASPARTA
2° stralcio: Firenzuola - Acquasparta**

PROGETTO DEFINITIVO

COD. **PG373**

PROGETTAZIONE: ATI SINTAGMA - GP INGEGNERIA - ENGEKO - GDG - ICARIA

IL RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

Dott. Ing. Giorgio Guiducci
Ordine degli Ingegneri della Prov. di Roma n° 14035

IL PROGETTISTA:

Dott. Ing. Federico Durastanti
Ordine degli Ingegneri della Prov. di Terni n°A844

IL GEOLOGO:

Dott. Geol. Giorgio Cerquiglini
Ordine dei Geologi della Regione Umbria n°108

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

Dott. Ing. Filippo Pambianco
Ordine degli Ingegneri della Prov. di Perugia n° A1373

IL RESPONSABILE DI PROGETTO

Dott. Ing. Rita Gandolfo

IL R.U.P.

Dott. Ing. Alessandro Micheli

PROTOCOLLO

DATA

IL GRUPPO DI PROGETTAZIONE:

MANDATARIA:

 Sintagma

Dott. Ing. N. Granieri
Dott. Ing. V. Truffini
Dott. Ing. L. Spaccini
Dott. Arch. A. Bracchini
Dott. Ing. E. Bartolucci
Dott. Ing. L. Casavecchia
Dott. Geol. G. Cerquiglini
Dott. Ing. F. Pambianco
Dott. Ing. M. Abram
Dott. Arch. C. Presciutti
Dott. Agr. F. Berti Nulli
Geom. S. Scopetta
Geom. M. Zucconi

MANDANTI:

 **GPI INGEGNERIA**
GESTIONE PROGETTI INGEGNERIA srl

Dott. Ing. G. Guiducci
Dott. Ing. E. Moscatelli
Dott. Ing. A. Signorelli
Dott. Ing. A. Belà
Dott. Ing. G. Lucibello
Dott. Arch. G. Guastella
Dott. Geol. M. Leonardi
Dott. Ing. G. Parente

 **engeko**

Dott. Ing. C. Muller

 **GEOTECHNICAL DESIGN GROUP**

Dott. Ing. D. Carlaccini
Dott. Ing. C. Consorti
Dott. Ing. E. Loffredo
Dott. Ing. S. Sacconi

 **ICARIA**
società di ingegneria

Dott. Ing. V. Rotisciani
Dott. Ing. F. Macchioni
Dott. Ing. G. Verini
Dott. Ing. V. Piuino
Dott. Ing. G. Pulli



**03.STUDIO GEOLOGICO GEOTECNICO
03.01 GEOLOGIA**

ANAS - Documentazione campagna indagini 2022/2023: geofisica

CODICE PROGETTO		NOME FILE	REVISIONE	SCALA:
PROGETTO	LIV. PROG. ANNO	T00GE01GEOS02A		
D P P G 3 7 3	D 2 2	CODICE ELAB. T 0 0 G E 0 1 G E O S C 0 2	A	-
A	Emissione	Apr 2023		G.Guiducci
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO APPROVATO

REPORT INDAGINI GEOFISICHE



PROGETTO:

SERVIZI DI INDAGINI GEOGNOSTICHE E MONITORAGGIO GEOTECNICO ANTE OPERAM PER IL PROGETTO DEFINITIVO DELL'INTERVENTO: S.S N.685 "DELLE TRE VALLI UMBRE". TRATTO SPOLETO – ACQUASPARTA.

LOCALITA':

ACQUASPARTA (TR)

COMMITTENTE:

ANAS S.P.A.

OGGETTO:

REPORT INDAGINI GEOFISICHE



Tecno In Ref.: R.C. 343/22
Revision n°: 00
Date: marzo 2023
Description: emissione

Redacted by: Dr. Geol. Nocerino Luciano
Reviewed by: Dr. Geol. Giovanni Antonucci
Approved by: Dr. Geol. Lucio Amato
Document code: 343-22_ANAS_Acquasparta_indagini_geofisiche

INDICE

1	PREMESSA.....	4
2	TOMOGRAFIA GEOELETTRICA.....	6
2.1	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA.....	6
2.2	DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ E DELLA STRUMENTAZIONE	8
2.3	RISULTATI INDAGINI GEOELETTRICHE.....	12
2.3.1	<i>Profilo ERT1</i>	13
2.3.2	<i>Profilo ERT2</i>	14
2.3.3	<i>Profilo ERT3</i>	15
2.3.4	<i>Profilo ERT4</i>	16
2.3.5	<i>Profilo ERT5</i>	17
2.3.6	<i>Profilo ERT6</i>	18
3	TOMOGRAFIA SISMICA A RIFRAZIONE.....	20
3.1	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA	20
3.2	DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ E DELLA STRUMENTAZIONE	22
3.3	RISULTATI INDAGINI SISMICA A RIFRAZIONE.....	25
3.3.1	<i>Profilo SRT1</i>	26
3.3.2	<i>Profilo SRT2</i>	29
3.3.3	<i>Profilo SRT4</i>	35
3.3.4	<i>Profilo SRT5</i>	38
3.3.5	<i>Profilo SRT6</i>	41
4	INDAGINI SISMICA A RIFLESSIONE 2D	44
4.1	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA.....	44
4.2	TECNICHE DI ACQUISIZIONE.....	47
4.3	STRUMENTAZIONE UTILIZZATA.....	47
4.4	DESCRIZIONE DELL'ELABORAZIONE DEI DATI	49
4.5	RISULTATI INDAGINI SISMICA A RIFLESSIONE.....	55
4.5.1	<i>Profilo SRT1</i>	56
4.5.2	<i>Profilo SRT2</i>	57
4.5.3	<i>Profilo SRT6</i>	58

5	INDAGINI DOWN-HOLE.....	60
5.1	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA.....	60
5.2	DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA.....	63
5.3	DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ ESECUTIVE	64
5.4	RISULTANZE INDAGINI DOWN-HOLE	65
5.4.1	S01-DH	66
5.4.2	S11-DH	71
6	METODOLOGIA SISMICA MASW	76
6.1	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA.....	76
6.2	RISULTATI INDAGINE MASW.....	78

ELENCO ELABORATI FUORI TESTO

- 1 [Allegato 1: Tavola Profili di resistività imbocchi](#)
- 2 [Allegato 2: Tavola Profili di resistività trasversali](#)
- 3 [Allegato 3: Tavola Profilo di resistività Galleria delle Rose](#)
- 4 [Allegato 4: Tavola Profili sismica a rifrazione imbocchi](#)
- 5 [Allegato 5: Tavola Profili sismica a rifrazione trasversali](#)
- 6 [Allegato 6: Tavola Profili sismica a rifrazione Galleria delle Rose](#)
- 7 [Allegato 7: Tavola Profili sismica a riflessione trasversali](#)
- 8 [Allegato 8: Tavola Profili sismica a riflessione Galleria delle Rose](#)

9 PREMESSA

La Tecno In S.p.A. è stata incaricata dalla società ANAS S.p.A. di eseguire una campagna di rilievi ed indagini geognostiche e geofisiche, nell'ambito della progettazione definitiva ante operam dell'intervento: S.S N.685 "Delle tre valli umbre". Tratto Spoleto – Acquasparta.

Nel seguente elaborato si relaziona in merito alle risultanze preliminari ottenute dalle indagini geofisiche fin qui eseguite, che hanno interessato i profili riportati nella Fig. 9.1.

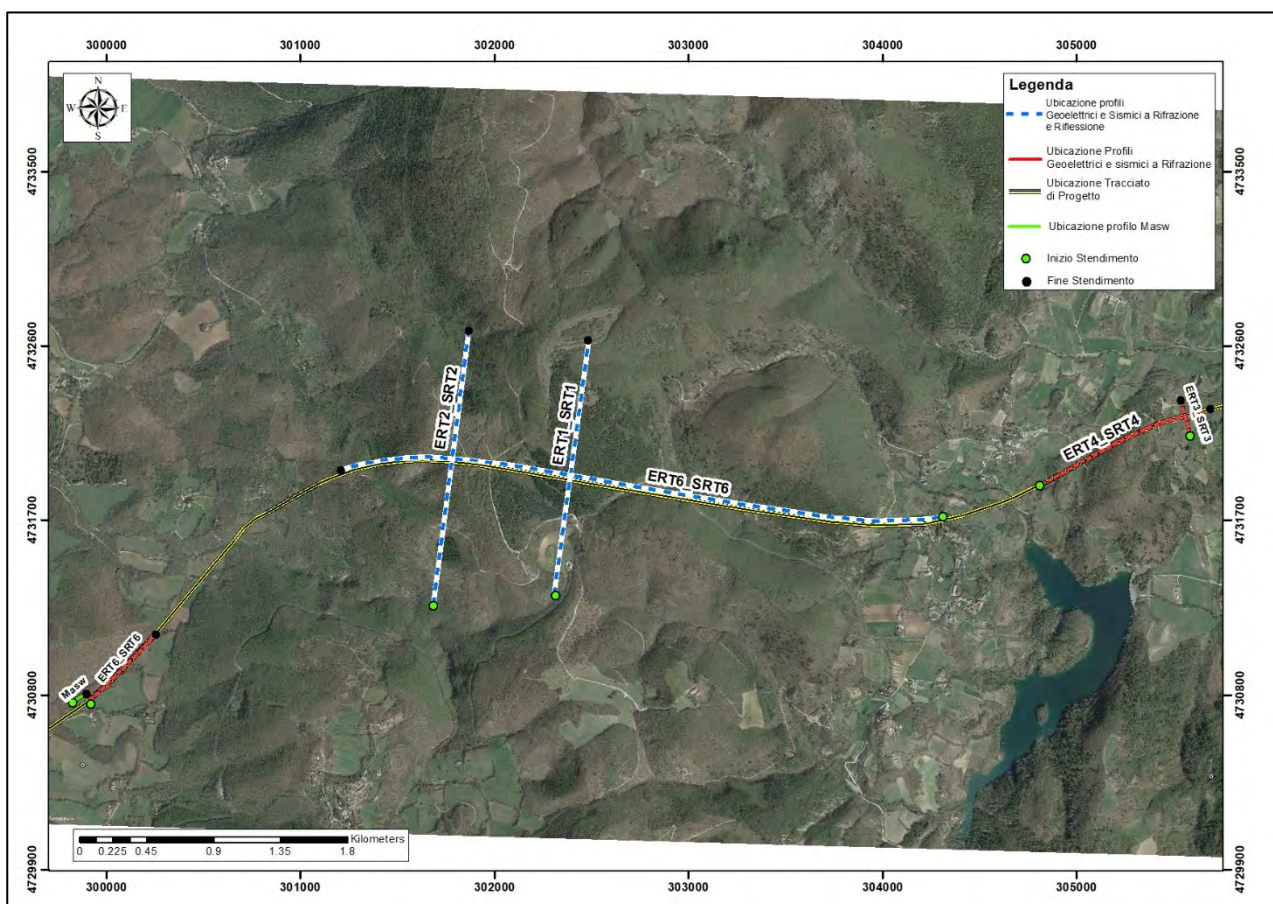


Fig. 9.1 – Ubicazione indagini geofisiche.

Preliminarmente alle attività geofisiche, tutte le linee interessate dalle indagini sono state topograficamente tracciate e sottoposte ad intense operazioni di sfalci, al fine di garantire le condizioni logistiche di operatività.

Nello specifico, il *piano di indagini geofisiche*, è consistito nelle seguenti attività:

- esecuzione di n.3 profili di geoelettrica e sismica a riflessione-rifrazione, in corrispondenza delle linee *ERT1_SRT1* e *ERT2_SRT2* ubicate trasversalmente al tracciato di progetto, ed *ERT6_SRT6* ubicato longitudinalmente al tracciato.
- esecuzione di n.3 profili di geoelettrica e simica a rifrazione, in corrispondenza delle linee *ERT3_SRT3*, *ERT4_SRT4* ed *ERT5_SRT5*, ubicati in corrispondenza dei due imbocchi di progetto.
- Esecuzione di n.2 indagini sismiche in foro Down-Hole, in corrispondenza dei sondaggi *S01-DH* e *S11-DH*.
- Esecuzione n.1 indagine sismica Masw.
- tracciamento topografico, mediante strumentazione GPS di alta precisione, dei singoli elettrodi e geofoni degli stendimenti realizzati.

Di seguito si riporta il dettaglio dei profili eseguiti, relativo alle lunghezze e alle coordinate di inizio e fine stendimento.

Sistema di riferimento UTM WGS84					
Codice indagine	Lunghezza profilo (m)	Coordinata inizio profilo -	Coordinata inizio profilo -	Coordinata fine profilo - EST	Coordinata fine profilo - NORD
SRT1_ERT1	1280 m	302306,739	4731315,057	302474,923	4732552,384
SRT2_ERT2	1430 m	301682,622	4731261,947	301863,344	4732670,388
SRT3_ERT3	142 m	305581,994	4732148,922	305538,16	4732305,761
SRT4_ERT4	950 m	304813,864	4731880,901	305659,512	4732273,455
SRT5_ERT5	475 m	299911,161	4730772,652	300246,338	4731106,519
SRT6_ERT6	3115 m	304319,235	4731723,643	300646,352	4731643,608
Masw	50 m	299852,162	4730754,981	299892,274	4730784,393

Tabella 1 - Informazioni di dettaglio profili realizzati.

10 TOMOGRAFIA GEOELETRICA

10.1 Descrizione della metodologia

Le prospezioni geoelettriche si basano sugli effetti prodotti da una corrente elettrica, di origine naturale o artificiale, rilevabili in superficie attraverso misure di differenza di potenziale. I metodi di investigazione attivi solitamente adottati, consistono in misurazioni della resistività elettrica.

Il metodo geoelettrico in corrente continua, detto di resistività, consiste nella determinazione sperimentale di un set di valori che, in accordo ad una formulazione matematica deducibile direttamente dalle leggi dell'elettromagnetismo per campi stazionari, descrivono una qualsiasi struttura complessa formata da materiali fisicamente diversi in contatto elettrico.

La resistività elettrica, esprime la maggiore o minore predisposizione di un materiale a farsi attraversare dalla corrente e dipende da molteplici fattori, i più importanti dei quali sono la presenza di acque ionizzate e/o di particelle minerali metalliche nella struttura dei pori. Entrambi i fattori, infatti, possono dar luogo a traiettorie interne particolarmente conduttive, in contrasto con situazioni resistive caratterizzate da strutture compatte e/o pori anidri.

In particolare, la tecnica di tomografia elettrica bidimensionale (ERT), consente di ottenere gli andamenti della resistività elettrica nel sottosuolo in termini *bidimensionali* ovvero attraverso pseudo sezioni elettriche.

In fase esecutiva, attraverso gli elettrodi C1 e C2, secondo una sequenza opportunamente predisposta ed automatizzata, si immette una corrente continua nel terreno, misurando la differenza di potenziale che si determina ai capi di altri due elettrodi, indicati con P1 e P2, posti secondo una geometria predefinita rispetto all'allineamento formato con gli altri due elettrodi C1 e C2 (Fig. 10.1).

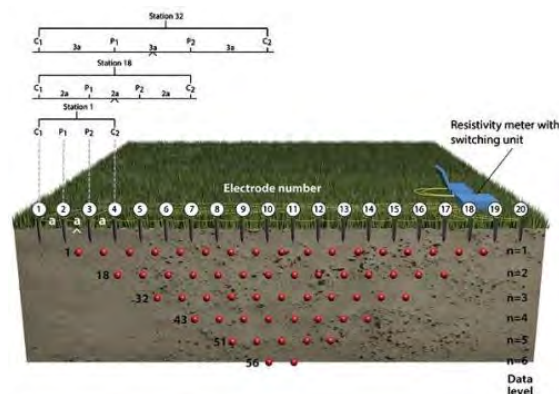


Fig. 10.1 – Schema di acquisizione di indagini geoelettriche multi elettrodo (ERT).

Poiché il sottosuolo non è elettricamente omogeneo ed isotropo, quando si immette corrente, una qualsiasi fonte di variazione della conducibilità ne altera il flusso naturale, provocando un'anomalia nella distribuzione del potenziale, rispetto ad un sottosuolo isotropo e omogeneo.

Di conseguenza, il valore di resistività che si misura nella realtà è "anomalo" rispetto al valore che si misurerebbe rispetto ad una distribuzione uniforme e prende il nome di resistività apparente (ρ_a); la resistività si calcola secondo la relazione di seguito:

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$$

in cui: " ρ_a " è la resistività apparente; " k " è il coefficiente geometrico, dipendente dal tipo di array multi elettrodo adoperato; " ΔV " è la differenza di potenziale ai capi degli elettrodi di potenziale P1 e P2; " I " rappresenta l'intensità di corrente inviata tramite gli elettrodi di corrente C1 e C2.

Dalle misurazioni di campo si ottiene una pseudo sezione del dato "*misurato*", che fornisce un'approssimazione della distribuzione di resistività nel sottosuolo dando un primo step per un'interpretazione quantitativa. Il passo successivo è la risoluzione del cosiddetto modello diretto mediante il quale si ottiene una pseudo sezione bidimensionale in cui è rappresentata la distribuzione della resistività apparente calcolata, avvalendosi di un ipotetico rilievo compiuto sulla medesima struttura. L'elaborazione del modello diretto si esegue suddividendo il sottosuolo in un insieme di blocchi regolari, o celle elementari, per ognuno dei quali è determinata la resistività apparente mediante un procedimento iterativo ai minimi - quadrati; successivamente si verifica se il valore calcolato sia in accordo o meno con i valori di resistività misurati durante la fase di campo. In questa fase possono essere poste in input al modello eventuali strutture sepolte, se ipotizzate, quali aree fratturate, corpi sepolti, etc.

La suddetta procedura consente di ottenere la pseudo sezione "*calcolata*".

Verificata la congruenza tra la pseudo sezione misurata e la pseudo sezione calcolata, si deve procedere alla modellazione di un sottosuolo le cui caratteristiche elettriche siano proprio definite dai valori di resistività misurati in superficie.

Tuttavia, affinché si possa risalire ad un modello di sottosuolo che sia in accordo con i dati misurati, è essenziale avvalersi dei cosiddetti **metodi d'inversione**. La procedura d'inversione comporta che i parametri del modello siano costituiti da valori di resistività assegnati all'insieme di blocchi regolari costituenti il sottosuolo che sono posti successivamente a confronto con i valori misurati di resistività apparente. Siccome è noto che per lo stesso insieme di dati esiste un'ampia gamma di modelli i cui valori calcolati di resistività apparente collimano con il dataset misurato, il metodo d'inversione cerca di minimizzare la differenza tra i valori di resistività apparente misurata e calcolata (problema di equivalenza). La variazione riscontrata è espressa in termini di scarto quadratico medio. L'iterazione che consente di ottenere un accordo tra i dati con il minore RMS possibile fornisce, quindi, il modello di sottosuolo che viene analizzato in fase interpretativa.

Per l'elaborazione dei dati di resistività, è stato utilizzato l'algoritmo di Loke e Barker (1996) ed in particolare il **software RES2DINV™** della **Geotomo Int.**

Le pseudo sezioni bidimensionali ottenute, sono state rappresentate mediante software di contouring come **Surfer®** della **Golden Software Inc.**

10.2 Descrizione delle attività e della strumentazione

Come detto in premessa, sono stati eseguiti **n.6 stendimenti di tomografia elettrica** (o ERT).

L'ubicazione delle indagini, è stata modulata in modo da fornire una posizione in grado di coprire in maniera omogenea, in base alla logistica, le aree oggetto di indagine.

Per l'esecuzione delle prospezioni di tomografia geoelettrica, è stata adoperata la strumentazione di cui si descrivono di seguito le caratteristiche principali:

- Georesistivimetro multicanale **Syscal Pro Switch 96**, con tensione massima in uscita ± 800 V, intensità massima di corrente 2.5 A, potenza massima 250 W, impedenza di ingresso 100 Mohm, risoluzione di 1 μ V, accuratezza dello 0.2 %, azzeramento automatico dei potenziali spontanei.
- elettrodi in acciaio impolarizzabili;
- set di cavi in PUR multipolari ognuno munito di 24" take out" per il collegamento agli elettrodi.

La sequenza di scansione dei picchetti è stata preliminarmente fissata, via software, mediante l'elaborazione di una matrice di punti, stabilendo il passo ed il valore dei livelli di approfondimento, i quali vanno a definire la densità spaziale e, conseguentemente, la risoluzione verticale/orizzontale delle misure. Per ridurre gli effetti indotti dal rumore, sono state eseguite non meno di 5 iterazioni da cui è stato calcolato il valore medio e la deviazione standard.

In relazione alla posizione reciproca degli elettrodi di corrente rispetto a quelli di potenziale, è possibile realizzare varie tipologie di configurazione elettrodica o *array*.

I dispositivi scelti per le indagini in oggetto sono Wenner e Dipolo-dipolo assiale.

Attraverso queste configurazioni è possibile ottenere una buona copertura sia orizzontale che verticale del sottosuolo indagato, un buon approfondimento delle indagini e un'intensità del segnale misurato maggiore.

Terminata la fase di acquisizione, si è proceduto al rilievo topografico di precisione di tutti i punti dello stendimento. La georeferenziazione delle indagini è stata eseguita utilizzando una sola antenna GPS Geomax Zenith Z35 Pro collegata, mediante modem GSM/GPRS, ad una rete di stazioni permanenti (servizio SmartNet ItalPoS), distribuite sul territorio nazionale. I dati, opportunamente combinati, vengono utilizzati per erogare servizi di correzione RTK, all'antenna in campo (modalità NRTK, Net Real Time Kinematic).

A seguire, vengono riportate alcune foto eseguite durante le fasi di acquisizione in campo.



Fig. 10.2 – Foto del profilo ERT1 di tomografia elettrica di resistività.



Fig. 10.3 – Foto del profilo ERT2 di tomografia elettrica di resistività.



Fig. 10.4 – Foto del profilo ERT3 di tomografia elettrica di resistività.



Fig. 10.5 – Foto del profilo ERT4 di tomografia elettrica di resistività.



Fig. 10.6 – Foto del profilo ERT5 di tomografia elettrica di resistività.



Fig. 10.7 – Foto del profilo ERT6 di tomografia elettrica di resistività.

10.3 Risultati Indagini Geoelettriche

Dall'osservazione delle sezioni di resistività dei singoli profili, acquisiti con metodo di tomografia elettrica ad alta risoluzione, e interpretate in diverse successive iterazioni mediante applicazione di metodi geostatistici, i valori di resistività reale sono rappresentati attraverso curve ad isolinee. Gli intervalli (range) sono evidenziati adottando specifiche colorazioni (dal blu al rosso-viola), secondo gli standard internazionali.

Dall'analisi dei profili di resistività risulta che i terreni investigati presentano tre distinti intervalli elettrostratigrafici di seguito descritti:

- zone con valori di resistività compresi tra circa e $1,0 \div 100,0 \Omega \text{ m}$ (toni di blu-celeste) sono da riferire ad aree basso resistive, che in alcuni casi sono indicatori di zone interessate da carsismo diffuso.
- zone con valori di resistività comprese tra circa $100,0 \div 1200 \Omega \text{ m}$ (toni di verde e giallo) rappresentano il "medio resistivo" dell'area, ovvero la componente elettroresistiva più rappresentata, riferita ad un comportamento elettrico medio dei terreni ed indicativa della componente litologica prevalente.
- zone con valori di resistività comprese tra circa e $1200 \div$ e oltre $5000,0 \Omega \text{ m}$ (toni da rosso fino al viola) sono da riferire ad aree medio-alto resistive.

10.3.1 Profilo ERT1

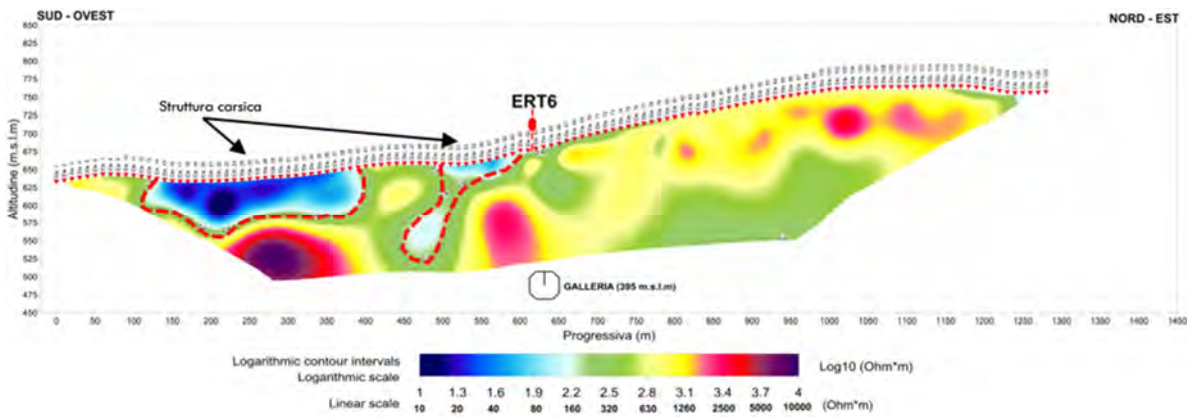


Fig. 10.8 – Pseudosezione di resistività profilo ERT1.

Dall'analisi della sezione **ERT1**, ubicata trasversalmente al tracciato di progetto, si evidenzia, tra le progressive metriche 0-650, una distribuzione molto eterogenea dei valori di resistività, sia orizzontalmente che lungo la verticale. Non si evidenziano dunque elettrostrati continui ma contatti tra orizzonti discontinui più conduttivi e resistivi.

In particolare, tra le progressive metriche 100-400, si osserva una zona ben definita morfologicamente, che si estende in profondità fino alla quota di circa 550 m.s.l.m., caratterizzata da bassi valori di resistività. Da osservazioni di campo la suddetta zona indica la presenza di una struttura carsica.

A seguire, tra le progressive metriche 450-600, si evidenzia una seconda zona basso resistiva, che apparentemente potrebbe indicare la presenza di un'ulteriore struttura carsica. A partire dalla progressiva metrica 650, fino al termine della sezione, non sono emersi elementi d'interesse agli scopi d'indagine. In generale le resistività misurate sono compatibili con le unità litologiche presenti nella zona investigata.

10.3.2 Profilo ERT2

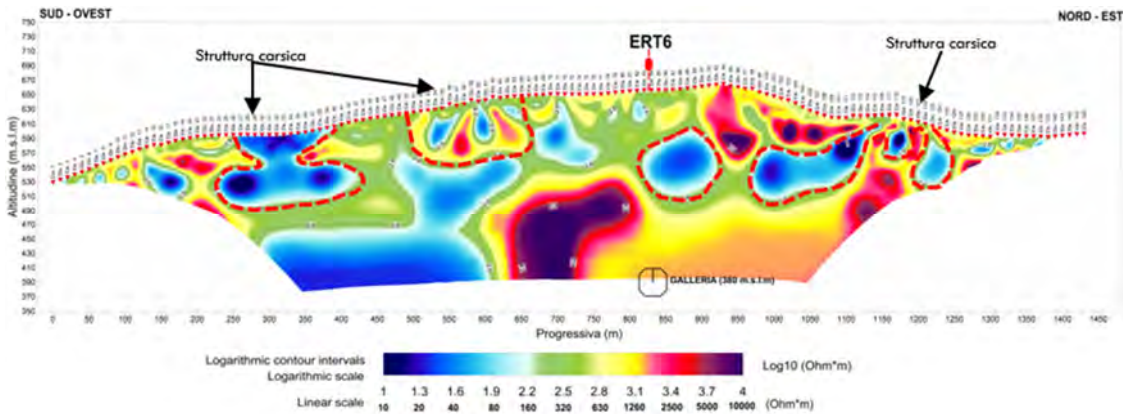


Fig. 10.9 – Pseudosezione di resistività profilo ERT2.

Dall'analisi della sezione trasversale **ERT2** si evidenzia, in tutta la sezione una distribuzione molto eterogenea della resistività, sia orizzontalmente che lungo la verticale. Non si evidenziano dunque, come visto in precedenza, elettrostrati continui ma contatti tra orizzonti discontinui più conduttivi e resistivi.

In particolare, tra le progressive metriche 250-400, si osserva una zona ben definita morfologicamente, che si estende in profondità fino alla quota di circa 500 m.s.l.m., caratterizzata da bassi valori di resistività. Da osservazioni di campo la suddetta zona indica la presenza di una struttura carsica.

A seguire, tra le progressive 500-700 e 950-1250, si evidenziano ulteriori due zone d'interesse, che apparentemente potrebbe indicare la presenza di un'ulteriore struttura carsica, di cui la seconda, caratterizzata da diverse ramificazioni profonde. Nel resto della sezione non sono emerse zone di particolare interesse agli scopi d'indagine.

10.3.3 Profilo ERT3

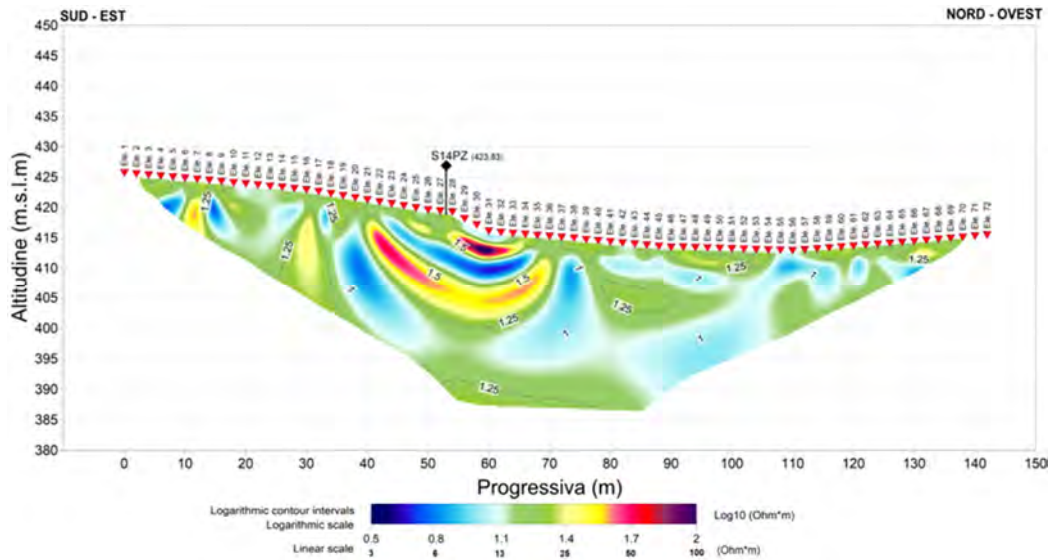


Fig. 10.10 – Pseudosezione di resistività profilo ERT3.

Dall'analisi della sezione **ERT3**, ubicata in corrispondenza dell'imbocco di progetto Est, si evidenzia una distribuzione abbastanza regolare dei valori di resistività, eccetto nella parte centrale del profilo dove, probabilmente per effetti di natura topografica, si osserva una distribuzione maggiormente caotica lungo la verticale, del parametro di resistività.

In generale la sezione mostra valori mediamente bassi, compatibilmente con le litologie presenti nella zona indagata, ed emerse dal sondaggio S14PZ, realizzato nei pressi del profilo.

10.3.4 Profilo ERT4

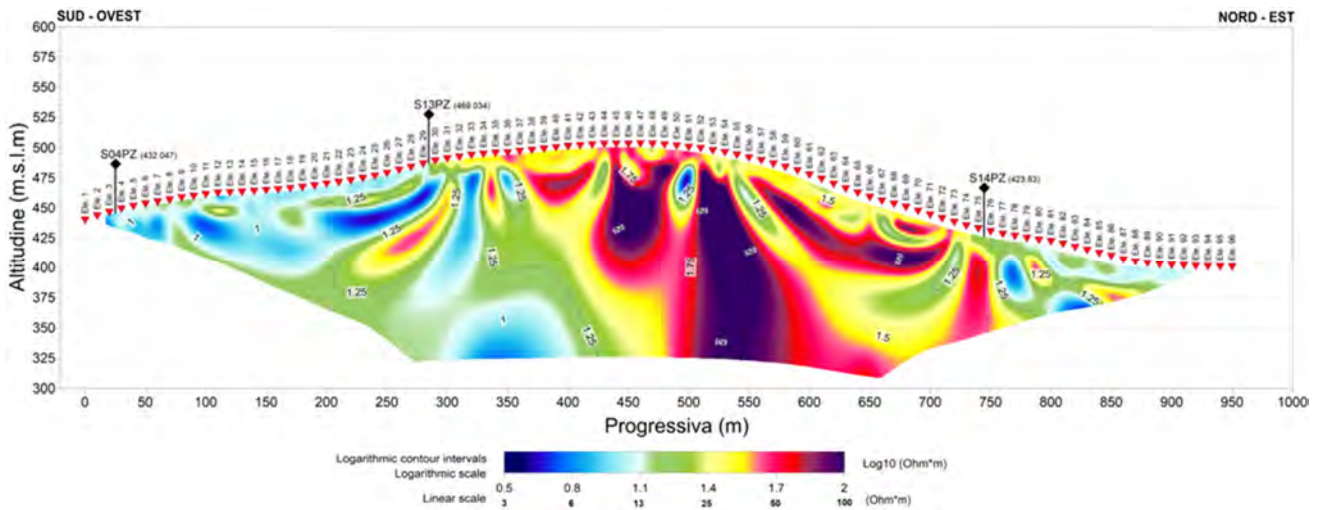


Fig. 10.11 – Pseudosezione di resistività profilo ERT4.

Dall'analisi della sezione trasversale **ERT4**, ubicata ugualmente nei pressi dell'imbocco di progetto Est, si osserva, in corrispondenza della progressiva metrica 350, la presenza di un contatto latero-verticale tra litologie a diverso comportamento elettrico. In particolare nel primo tratto della sezione, la presenza di materiali più sabbioso-limosi, è caratterizzata da valori di resistività compresi tra 3-30 ohm*m, mentre a seguire il tratto centrale della sezione, si caratterizza da valori di resistività che raggiungono i limiti di scala superiore. Tale situazione è legata alla presenza, in questa porzione di sezione, di litologie più compatte, con compente marnoso-arenaceo dominante, così come emerso dai sondaggi eseguiti in zona (S04PZ-S13PZ).

10.3.5 Profilo ERT5

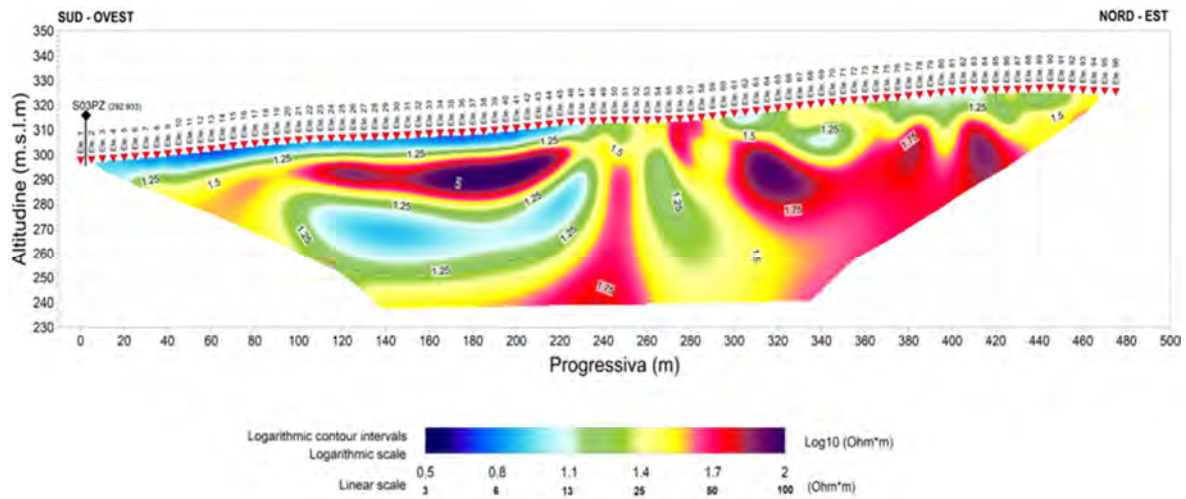


Fig. 10.12 – Pseudosezione di resistività profilo ERT5.

Dall'analisi della sezione **ERT5**, ubicato nei pressi dell'imbocco di progetto Ovest, si evidenzia, una distribuzione abbastanza omogenea dei valori di resistività, con un range di variazione compreso tra 3 e 100 ohm*m. Tali valori sono compatibili con le litologie presenti nell'area, che come emerso dal sondaggio S03PZ, si caratterizzano dall'alternanza di materiali argillosi caratterizzati da diverso grado di compattezza.

10.3.6 Profilo ERT6

Dall'analisi della sezione **ERT6**, realizzata longitudinalmente all'asse del tracciato di progetto, ed orientata in direzione Ovest-Est, e di estensione di circa tre chilometri, di evidenza una distribuzione molto eterogenea della resistività, sia orizzontalmente che lungo la verticale. Non si osservano dunque elettrostrati continui ma contatti tra orizzonti discontinui più conduttivi e resistivi.

In particolare, tra le progressive metriche 200-450, si osserva una zona ben definita morfologicamente, che si estende in profondità fino alla quota di circa 400 m.s.l.m., caratterizzata da bassi valori di resistività. Da osservazioni di campo la suddetta zona potrebbe indicare la presenza di una struttura carsica, caratterizzata da diverse ramificazioni sotterranee.

A seguire, tra le progressive 450-1600 si evidenziano diverse morfologie sub verticali, che potrebbero indicare la presenza di strutture tettoniche. A partire dalla progressiva metrica 1600, fino al termine della sezione, i valori di resistività registrati, risultano estremamente bassi, rispetto alla porzione di sezione precedentemente descritta. Ciò indica, come emerso anche dai sondaggi diretti, un contatto latero verticale tra diverse formazioni geologiche. In suddetta zona non sono emersi ulteriori elementi di interesse, utili agli scopi d'indagine.

Documentazione preliminare indagini geofisiche

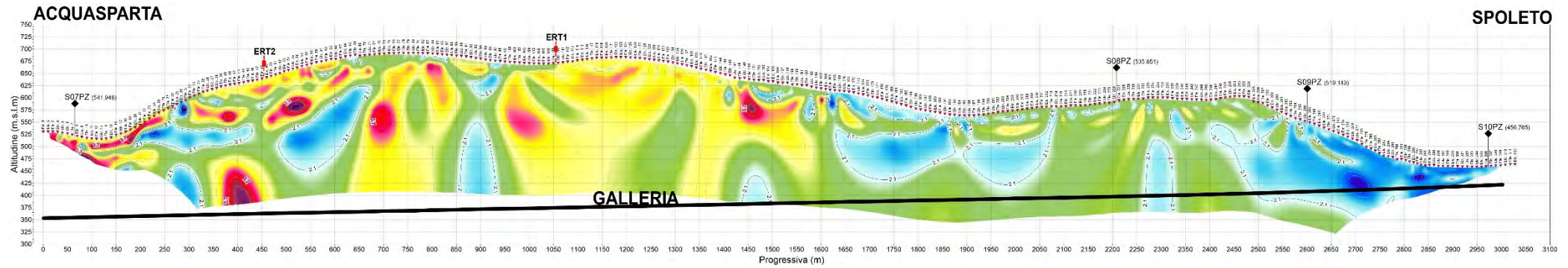


Fig. 10.13 – Pseudosezione di resistività profilo ERT6.

11 TOMOGRAFIA SISMICA A RIFRAZIONE

11.1 Descrizione della metodologia

Il metodo sismico a rifrazione è un metodo non invasivo che si basa sulla misura dei tempi di arrivo delle onde elastiche P, generate in superficie da una "sorgente" e captate da un array di ricevitori (geofoni), anch'essi disposti in superficie, con spaziatura regolare e a distanza variabile dalla sorgente, lungo allineamenti.

I tempi di arrivo, correlati alle distanze sorgente-ricevitore, permettono la ricostruzione delle geometrie del sottosuolo (morfologia e profondità delle interfacce) e del campo di velocità di propagazione delle onde sismiche. La generazione delle onde elastiche viene registrata presso una base sismica, operando su più punti di energizzazione distribuiti lungo ed esternamente alla base stessa, mediante impatti (shot) ripetuti in modo da ottenere un'onda caratterizzata da un rapporto segnale-rumore soddisfacente. Tale geometria è necessaria per l'utilizzo successivo dell'algoritmo tomografico.

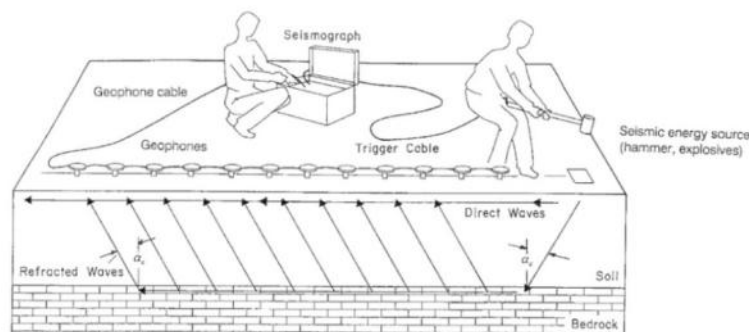


Fig. 11.1 – Schema di acquisizione di indagini sismiche a rifrazione (fonte norma ASTM D 5777 – 00).

L'indagine sismica con elaborazione tomografica, necessita di un numero di tiri, eseguiti sia internamente che esternamente allo stendimento, in numero sufficiente da consentire una ricostruzione dettagliata della geometria dei rifrattori. Nel caso in oggetto, sono stati eseguiti un numero di tiri variabile da 20 a 40, in funzione della logistica e della lunghezza degli stendimenti.

I dati acquisiti in campo sono stati sottoposti ad una fase di pre-processing avvalendosi del software **IXSeg2Segy** della **INTERPEX**. Tale fase è consistita nell'applicazione del DC removal, di un filtraggio passa-banda e nell'ottimizzazione del guadagno.

Ultimata questa fase, si è proceduto con la determinazione dei tempi di primo arrivo (*first break peak - F.B.P.*) delle onde P. Per ciascun file dati acquisito in campo, è stato creato un file testo contenente i tempi d'arrivo espressi in millisecondi (ms). Tutti i file relativi ai tempi d'arrivo sono confluiti in un foglio di calcolo al fine di poter restituire le cosiddette *dromocrone* ovvero la rappresentazione dei diagrammi *tempo-distanze* della sezione sismica.

Al fine di eseguire l'elaborazione, in termini di velocità di propagazione delle onde elastiche, sono stati ricavati tre file ascii relativi, rispettivamente, al numero e disposizione delle sorgenti (file *source*), al numero e disposizione dei geofoni (file *receiver*) ed ai tempi d'arrivo (file *observations*). Tali file costituiscono l'input per il software tomografico utilizzato **SeisOpt@2D** della **Optim™** software & data solutions.

Il metodo tomografico utilizzato, si basa su un approccio di ottimizzazione non-lineare, noto come metodo di ottimizzazione numerica simulata (*simulated annealing*), utilizzato per ricavare un modello di velocità delle onde sismiche, ad elevata risoluzione, dalla misurazione dei tempi di arrivo delle onde P.

Il processing citato è basato sul metodo di Monte-Carlo che può combinare i tempi di arrivo delle onde in un modello di velocità. Tale modello può essere considerato superiore ai più sofisticati metodi d'inversione non-lineare. L'algoritmo compie un'elaborazione impostando un modello con una variazione casuale del parametro d'interesse, sino a che il modello sismico sintetico dei tempi di arrivo delle onde sismiche calcolate non collima con i tempi di arrivo osservati.

Processi iterativi fanno in modo di far convergere la soluzione riducendo, ad ogni iterazione, lo scarto eliminando quelle soluzioni i cui errori oltrepassano l'errore totale ammesso dall'algoritmo di calcolo.

In definitiva, il processo di ottimizzazione adottato troverà la soluzione testando diverse migliaia di soluzioni possibili prima di arrivare alla soluzione ottimale proposta che è quella, come detto in precedenza, in cui i tempi di arrivo calcolati coincidono, a meno di uno scarto ridotto, con quelli osservati.

In pratica, i software adottati, che si basano sul principio del *simulated annealing*, pervengono ad un modello ottimizzato delle velocità utilizzando, in input, i soli tempi di primo arrivo delle onde sismiche e la geometria dell'array (distanze e variazioni di quota) non richiedendo informazioni preliminari sulla geometria della struttura sotterranea.

L'algoritmo, come già accennato in precedenza, esegue ripetute modellizzazioni dirette laddove un nuovo modello proposto è accettato o rigettato in base ad un criterio di probabilità tenendo in considerazione l'andamento globale dei tempi di arrivo.

11.2 Descrizione delle attività e della strumentazione

Come detto in premessa, sono stati eseguiti **n.6 stendimenti di tomografia sismica a rifrazione** (o SRT),

Per l'esecuzione delle prospezioni è stata adoperata la strumentazione di cui si descrivono di seguito le caratteristiche principali:

- Per le misurazioni in oggetto, il sistema di acquisizione dati è costituito da sismografi modulari GEODE della Geometrics (da 24 canali cadauno) in un numero compreso tra quattro e sette. Il Geode è un sismografo a 24 bit ad elevata dinamica (144 dB di range dinamico totale - 105 dB istantanei), ampia banda d'ingresso (1.75 Hz - 20 kHz), con passo di campionamento da 0.02 ms a 16 ms, che amplifica e digitalizza il segnale ricevuto dai geofoni e lo invia all'unità di memorizzazione dati. Più moduli geode sono stati collegati in serie da cavi di interfaccia digitali in modo da costituire sistemi multicanale. Ogni modulo è alimentato autonomamente con batterie esterne da 12 Volt, con un consumo ridotto grazie ad un efficiente sistema di stand-by.
- Il sistema di trasduzione è costituito da geofoni Geospace 4,5 Hz verticali per trasformare la sollecitazione dinamica dovuta alle vibrazioni del terreno, cui è reso solidale attraverso un punzone, in un segnale elettrico proporzionale alla velocità di vibrazione. I segnali elettrici uscenti dai geofoni sono inviati tramite cavi multipolari (cavi sismici) ai suddetti sismografi Geode.
- Il sistema d'immagazzinamento dati, costituito da un notebook collegato tramite rete locale Ethernet ai sismografi, svolge il compito di archiviare i dati digitalizzati (in formato seg-2), di gestire i parametri d'acquisizione e consente di valutare interattivamente la qualità dei dati acquisiti.
- sistema di energizzazione: energizzatore sismico Isotta che genera onde elastiche attraverso l'esplosione in un foro, profondo 30-40cm, di una cartuccia di tipo industriale calibro 8. Essendo a impatto ambientale praticamente nullo, si può ripetere sullo stesso posto l'energizzazione e sommare i dati (*stack verticale*) per un numero di volte sufficiente a incrementare convenientemente il rapporto S/N.

Terminata la fase di acquisizione, si è proceduto al rilievo topografico di precisione di tutti i punti dello stendimento.

La georeferenziazione delle indagini è stata eseguita utilizzando un ricevitore GPS Geomax Zenith Z35 Pro, collegato ad una rete di stazioni permanenti distribuite sul territorio nazionale (servizio SmartNet ItalPoS) per usufruire dei servizi di correzione RTK, all'antenna in campo (modalità NRTK, Net Real Time Kinematic).

Di seguito, si riportano alcune foto eseguite durante le fasi di acquisizione in campo.



Fig. 11.1 – Foto del profilo SRT4 di tomografia sismica.



Fig. 11.2 – Foto del profilo SRT5 di tomografia sismica.



Fig. 11.3 – Foto del profilo SRT3 di tomografia sismica.



Fig. 11.4 – Foto del profilo SRT6 di tomografia sismica.

11.3 Risultati Indagini Sismica a Rifrazione

Le prospezioni sismiche in oggetto sono state compiute posizionando al suolo **n.6** basi sismiche, aventi un numero di canali compreso tra 28 e oltre 600, con lunghezza complessiva compresa tra 135 e circa 3000 metri.

Come accennato in precedenza, i tempi di arrivo delle onde sismiche sono stati adoperati quale input (assieme alla geometria dei tiri di energizzazione e dei geofoni) nel software di elaborazione tomografica, per ottenere le relative pseudosezioni sismiche.

Queste sono riportate esprimendo i dati di velocità delle onde di taglio mediante isolinee e campitura a falsi colori.

Di seguito, per i profili eseguiti, si riportano le seguenti informazioni / elaborazioni:

- dromocrone ottenute dalla lettura dei primi tempi d'arrivo delle onde P;
- stralcio della planimetria delle indagini, con l'ubicazione del profilo investigato;
- pseudosezioni sismiche in onde P;
- analisi dei dati in velocità di propagazione delle onde elastiche in termini di gradiente geosismico per l'individuazione dei sismostrati.

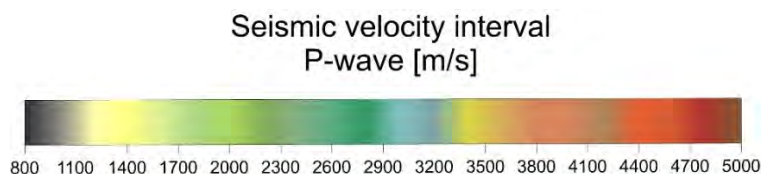


Fig. 11.5 – Limiti valori di velocità di propagazione delle onde sismiche P.

11.3.1 Profilo SRT1

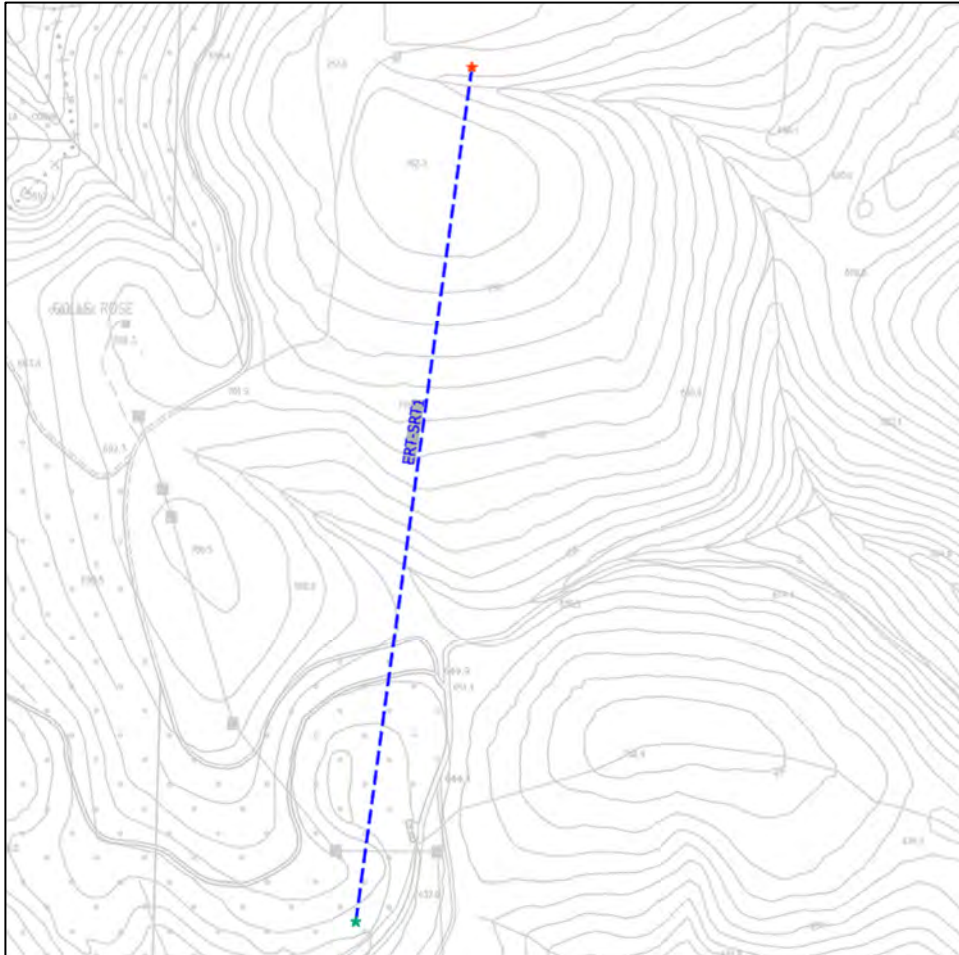


Fig. 11.6 Stralcio dell'ubicazione indagine.

★ ★ I simboli indicano l'inizio (stella colore ciano) e la fine (stella di colore arancione) del profilo.

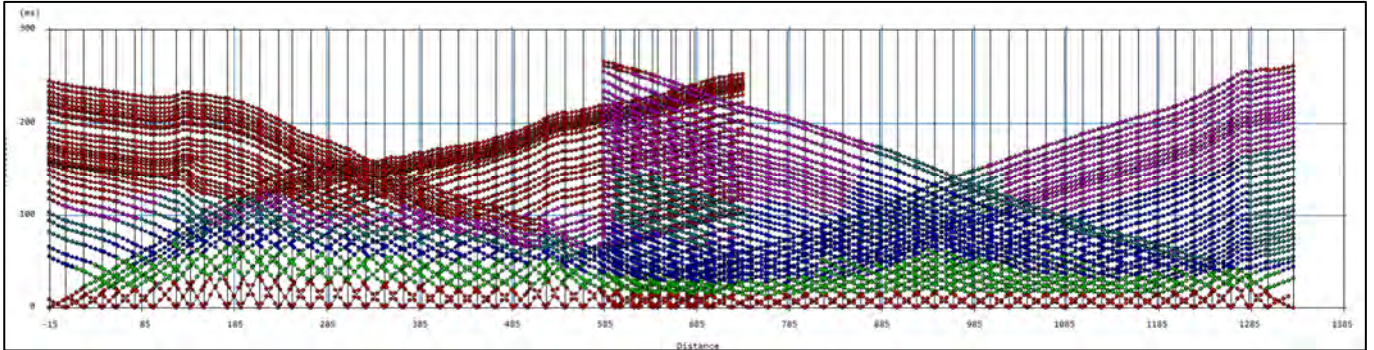


Fig. 11.7 –Tomografia sismica in onde P Profilo SRT1. Dromocrone.

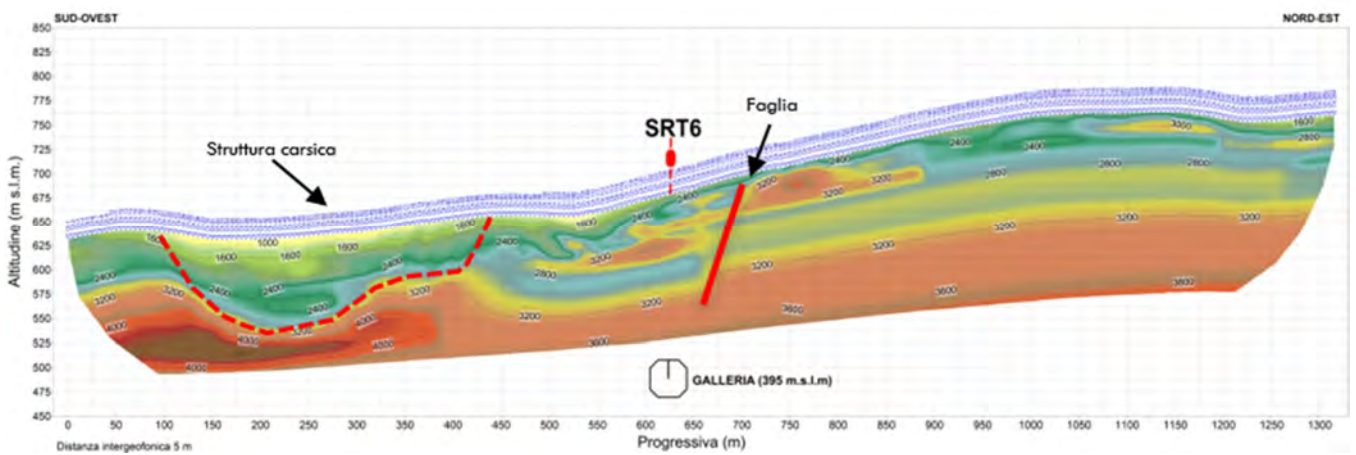


Fig. 11.8 –Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo SRT1.

La pseudosezione elaborata per il profilo sismico **SRT1** ha permesso di evidenziare due sismostrati principali.

Il primo sismostrato, si attesta ad una profondità massima dal piano campagna pari a circa 550 m.s.l.m. ed è costituito da una forte eterogeneità laterale nella distribuzione dei valori di velocità delle onde di compressione, che varia tra 1.000 e 2.500 m/s.

Il secondo sismostrato, che si estende sino al termine della pseudosezione, è costituito da una la velocità delle onde di compressione compresa tra 2.500 e 3.800 m/s.

Si osservano altresì elementi strutturali d'interesse, ai fini degli scopi d'indagine.

In particolare tra le progressive metriche 100 – 450 metri, si osserva una morfologia concava, e una forte attenuazione di velocità delle onde sismiche, per effetto di una struttura carsica, osservabile anche a piano campagna. Inoltre in corrispondenza della progressiva metrica 650, si osserva la presenza di una possibile faglia.

11.3.2 Profilo SRT2

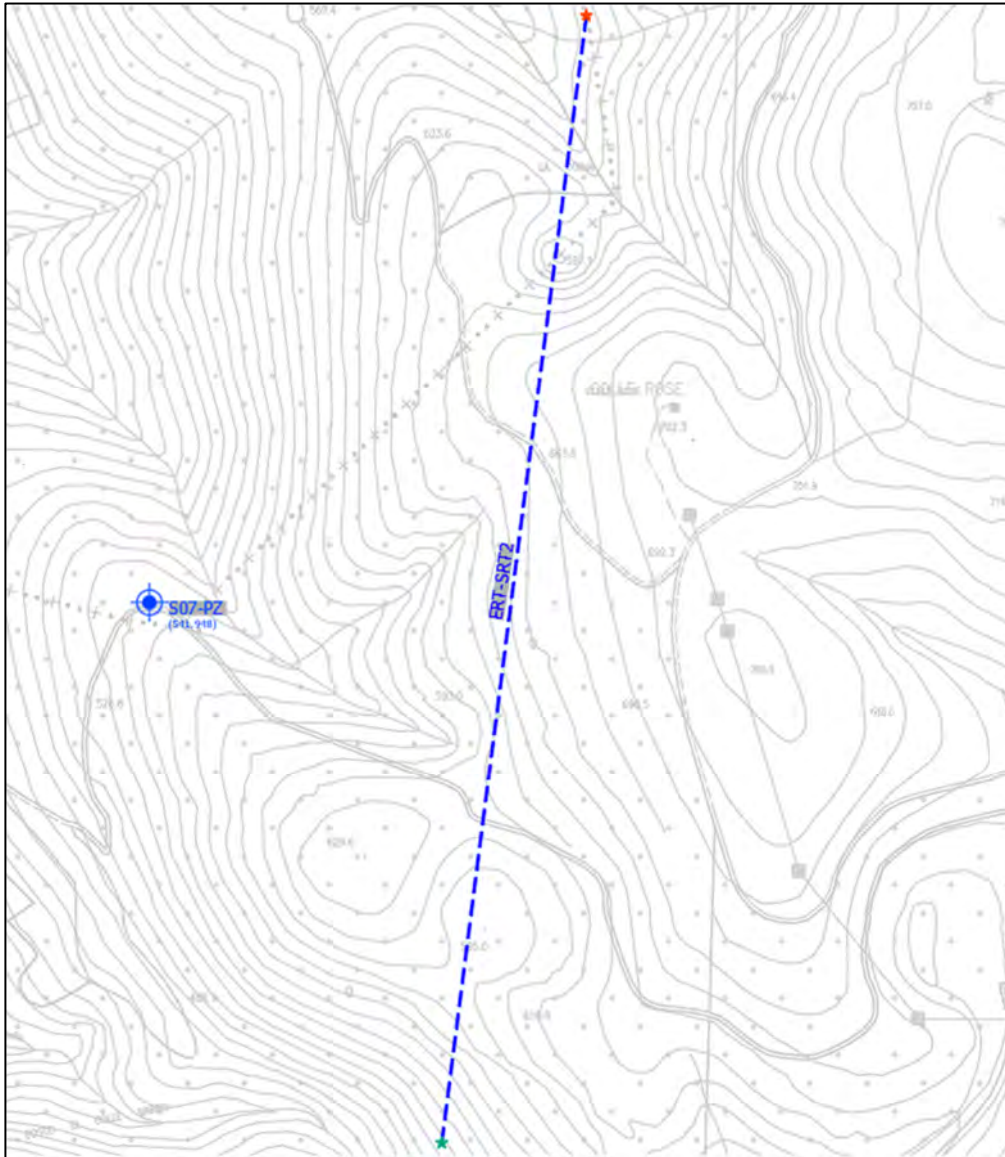


Fig. 11.9 Stralcio dell'ubicazione indagine.



I simboli indicano l'inizio (stella colore ciano) e la fine (stella di colore arancione) del profilo.

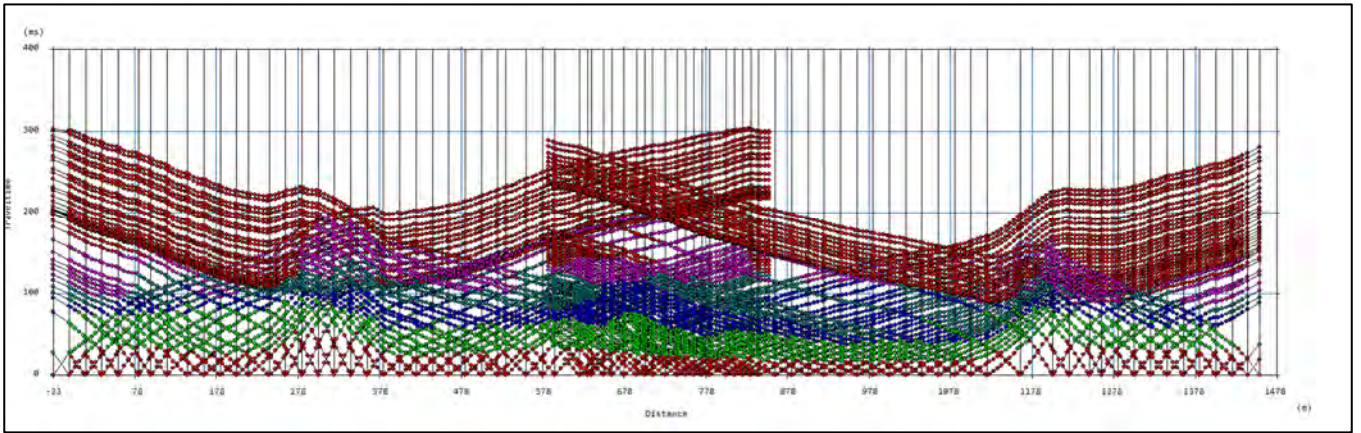


Fig. 11.10 –Tomografia sismica in onde P Profilo SRT2. Dromocrone.

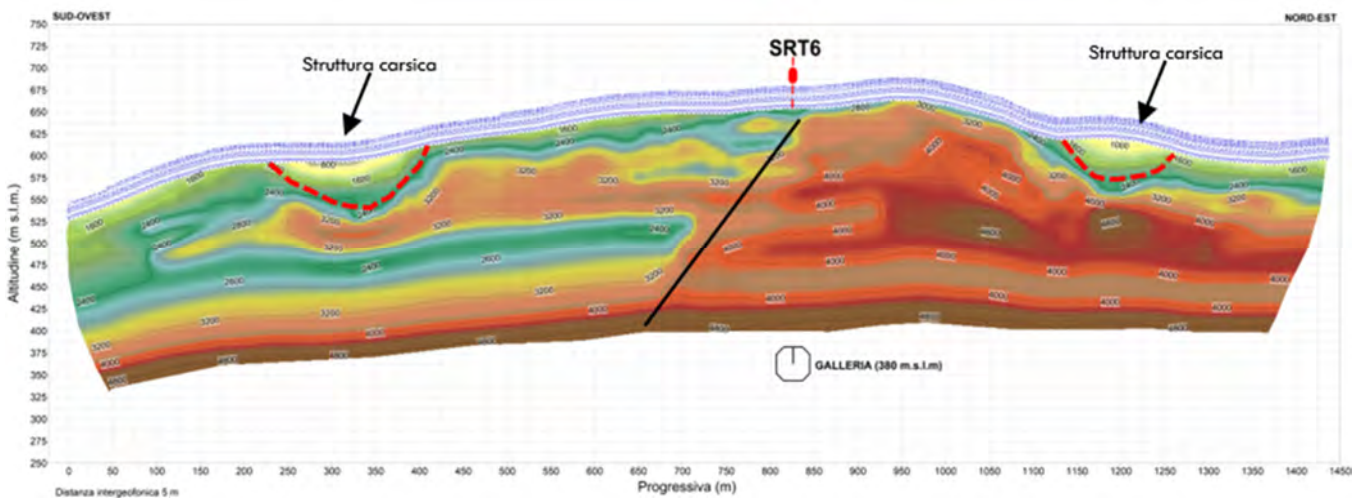


Fig. 11.11 –Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo SRT2.

Documentazione preliminare indagini geofisiche

La pseudosezione elaborata per il profilo sismico **SRT2** ha permesso di evidenziare una marcata eterogeneità latero-verticale nella distribuzione dei valori di velocità delle onde sismiche.

In particolare tra l'inizio della sezione e la progressiva metrica 800 si osserva la presenza di due sismostrati principali e la presenza di una zona di attenuazione di velocità, morfologicamente concava, associabile ad una struttura carsica.

Nello specifico i valori di velocità registrati oscillano tra 800 e 2.500 m/s fino a circa 400 m.s.l.m. e 4.800 m/s in profondità.

Nella seconda porzione di sezione, a partire dalla metrica 800, la velocità aumenta gradualmente con la profondità, evidenziando tra le metriche 1150 e 1300, un ulteriore zona di attenuazione di velocità, associabile anche in questo caso ad una struttura carsica, le cui evidenze sono osservabili anche al piano campagna.

Profilo SRT3

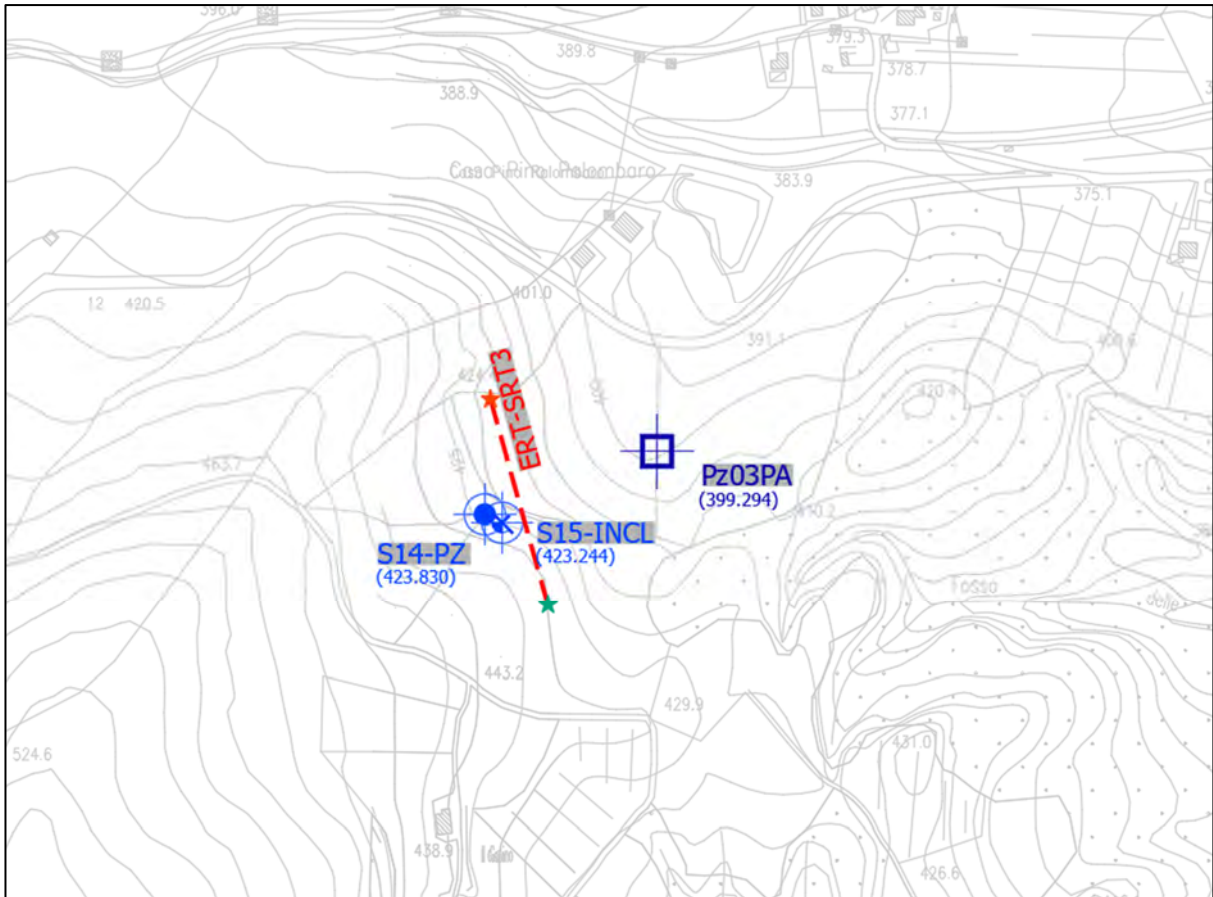


Fig. 11.12 Stralcio dell'ubicazione indagine.



I simboli indicano l'inizio (stella colore ciano) e la fine (stella di colore arancione) del profilo.

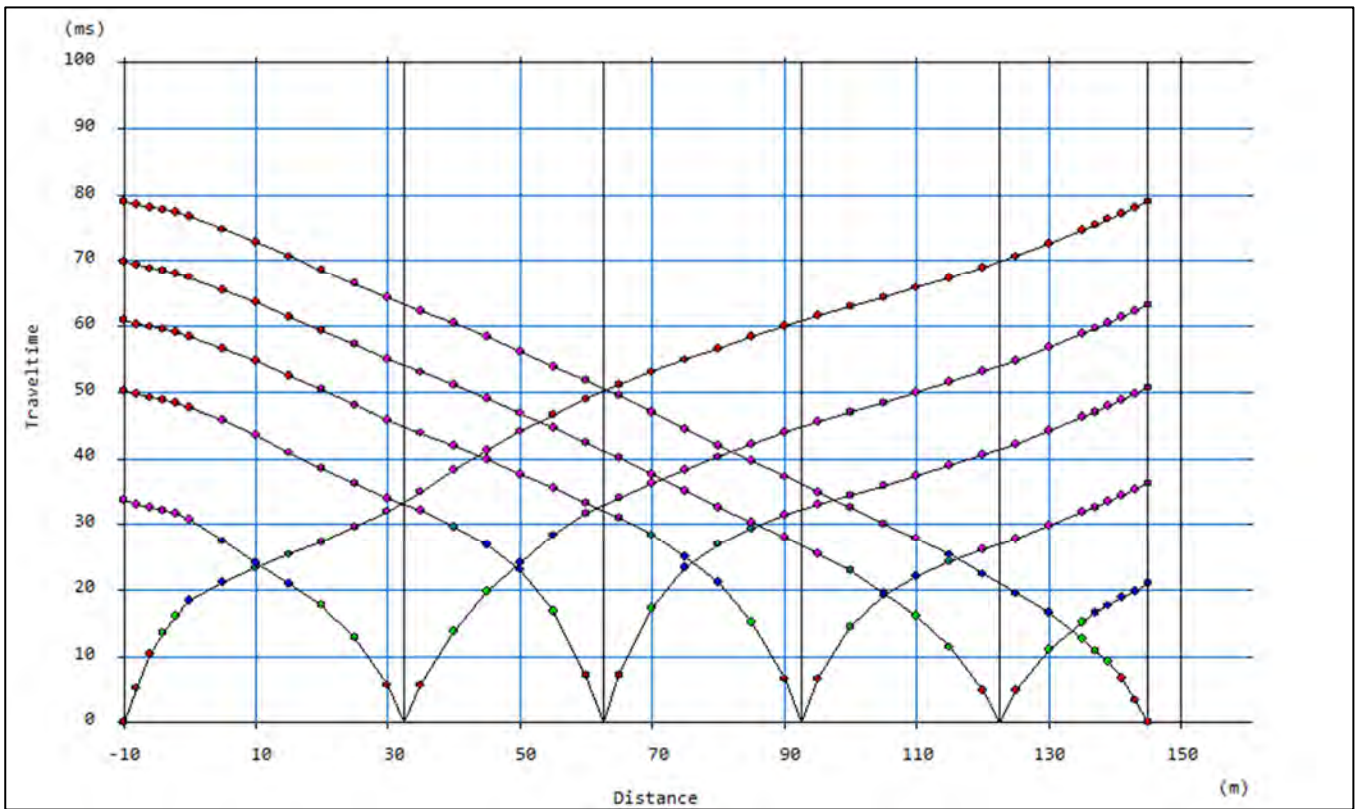


Fig. 11.13 -Tomografia sismica in onde P Profilo SRT3. Dromocrone.

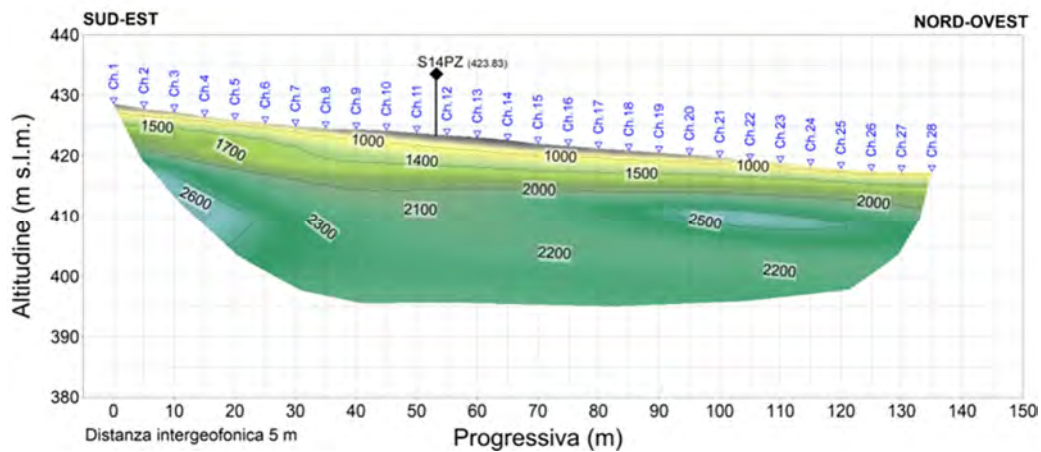


Fig. 11.14 -Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo SRT3.

La pseudosezione elaborata per il profilo sismico **SRT3** ha permesso di evidenziare due sismostrati principali.

Il primo sismostrato, si attesta ad una profondità massima dal piano campagna pari a circa 420 m.s.l.m. ed è costituito da velocità delle onde di compressione, che varia tra 800 e 2.000 m/s.

Il secondo sismostrato, che si estende sino al termine della pseudosezione, è costituito da una la velocità delle onde di compressione compresa tra 2.000 e 2.600 m/s.

Considerando il sondaggio S14PZ, ubicato nei pressi del profilo, è possibile correlare il primo sismostrato alla presenza di un livello limoso – sabbioso molto consistente, e a seguire il secondo sismostrato a litologie marnoso arenacee.

11.3.3 Profilo SRT4

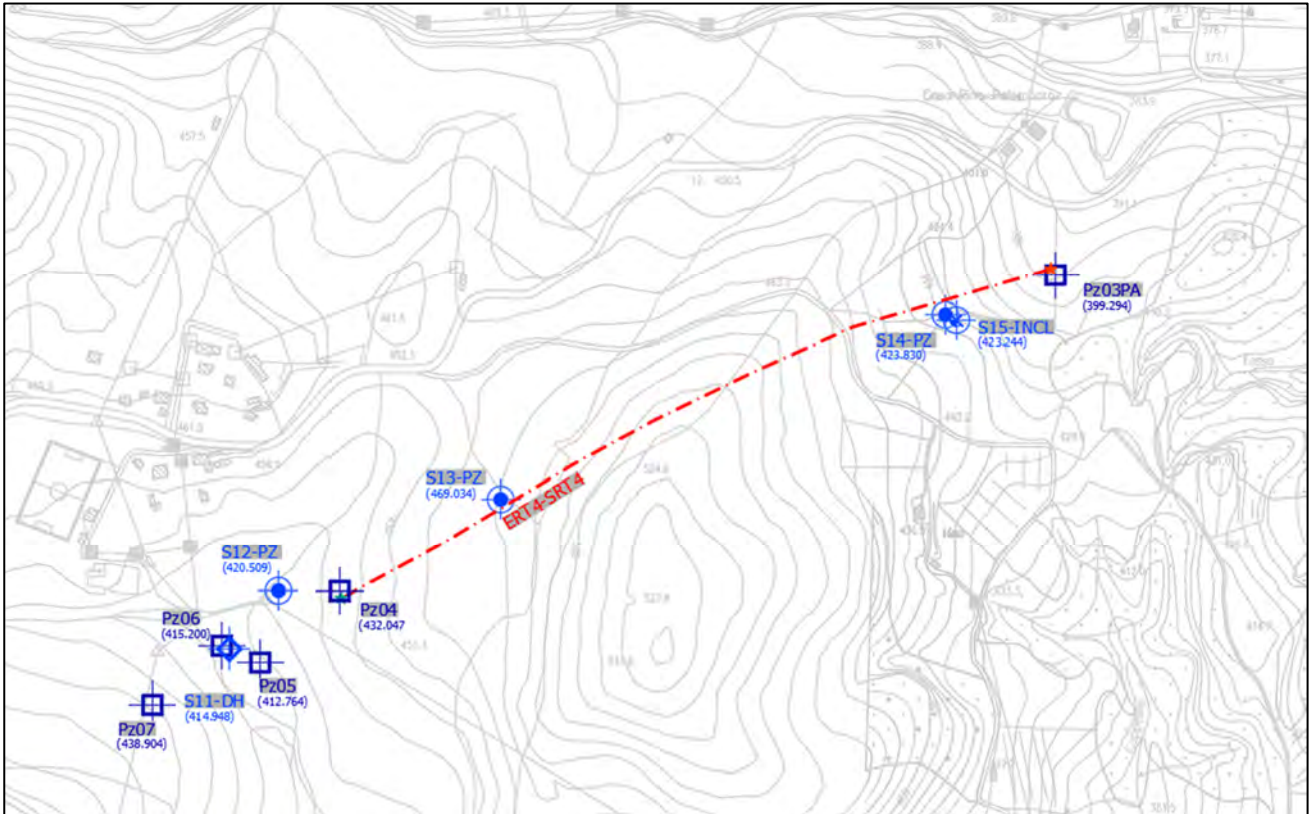


Fig. 11.15 Stralcio dell'ubicazione indagine.



I simboli indicano l'inizio (stella colore ciano) e la fine (stella di colore arancione) del profilo.

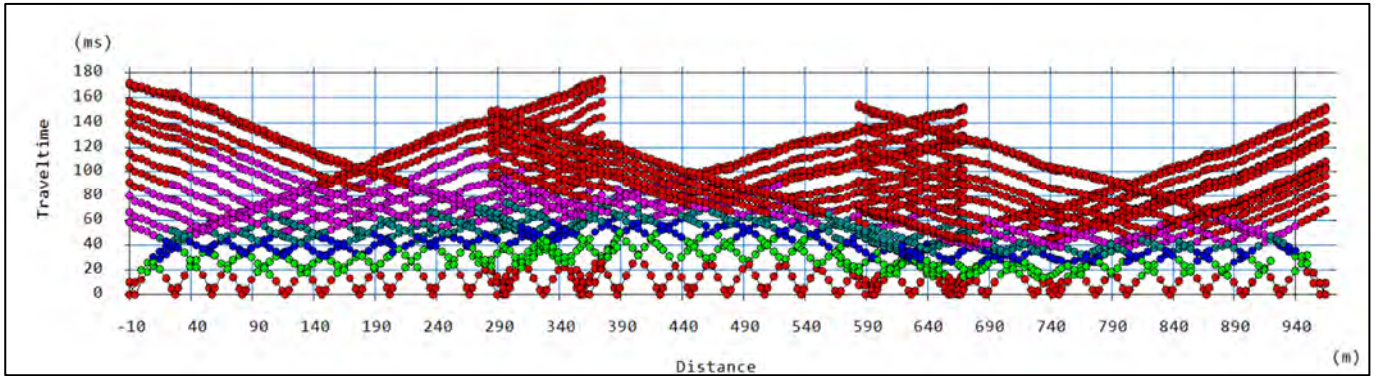


Fig. 11.16 –Tomografia sismica in onde P Profilo SRT4. Dromocrone.

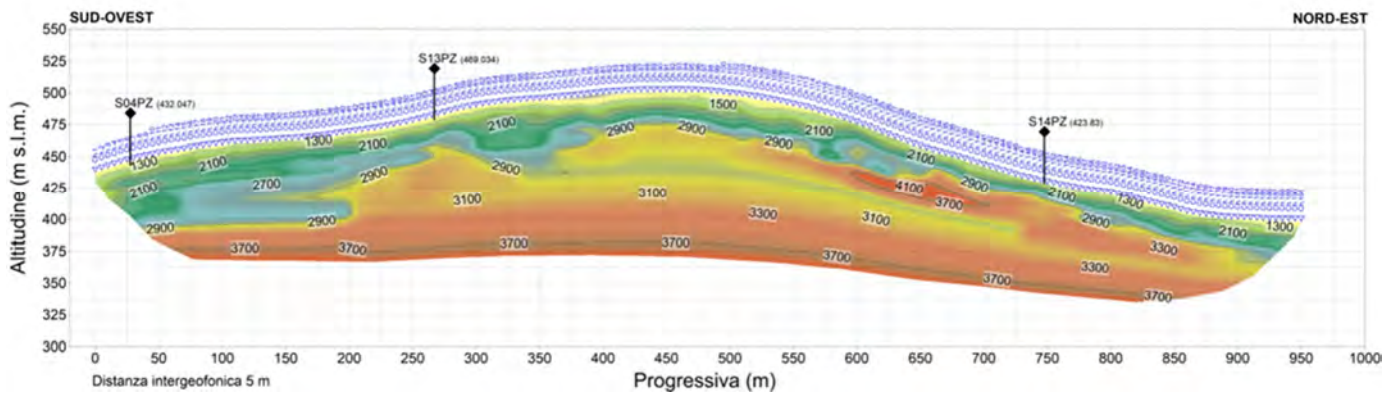


Fig. 11.17 –Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo SRT4.

La pseudosezione elaborata per il profilo sismico **SRT4** ha permesso di evidenziare due sismostrati principali.

Il primo sismostrato, si attesta ad una profondità massima dal piano campagna pari a circa 400 m.s.l.m. ed è costituito da velocità delle onde di compressione, che varia tra 1000 e 2.000 m/s.

Il secondo sismostrato, che si estende sino al termine della pseudosezione, è costituito da una la velocità delle onde di compressione compresa tra 2.000 e 3700 m/s.

Considerando i sondaggi S04PZ, S13PZ e S14PZ, ubicati nei pressi del profilo, è possibile correlare, come visto per la sezione precedente, il primo sismostrato alla presenza di un livello limoso – sabbioso molto consistente, e a seguire il secondo sismostrato a litologie marnoso arenacee.

11.3.4 Profilo SRT5

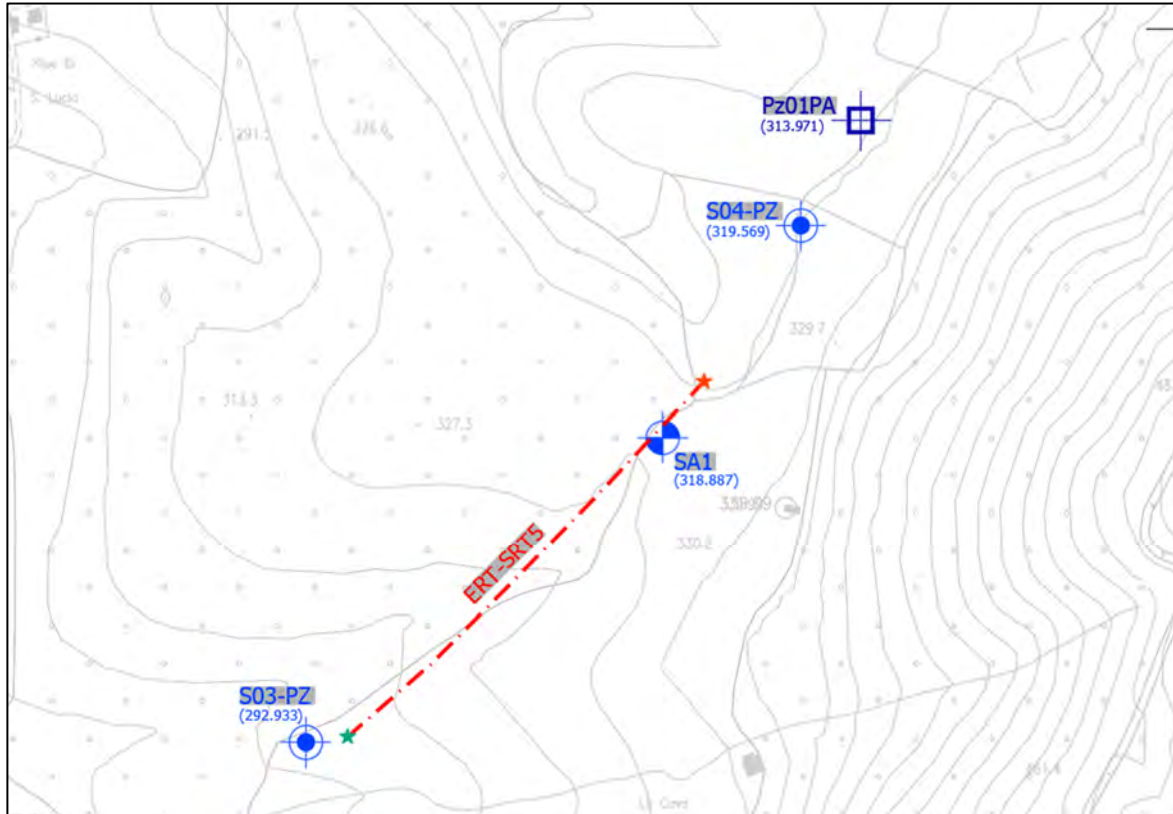


Fig. 11.18 Stralcio dell'ubicazione indagine.



I simboli indicano l'inizio (stella colore ciano) e la fine (stella di colore arancione) del profilo.

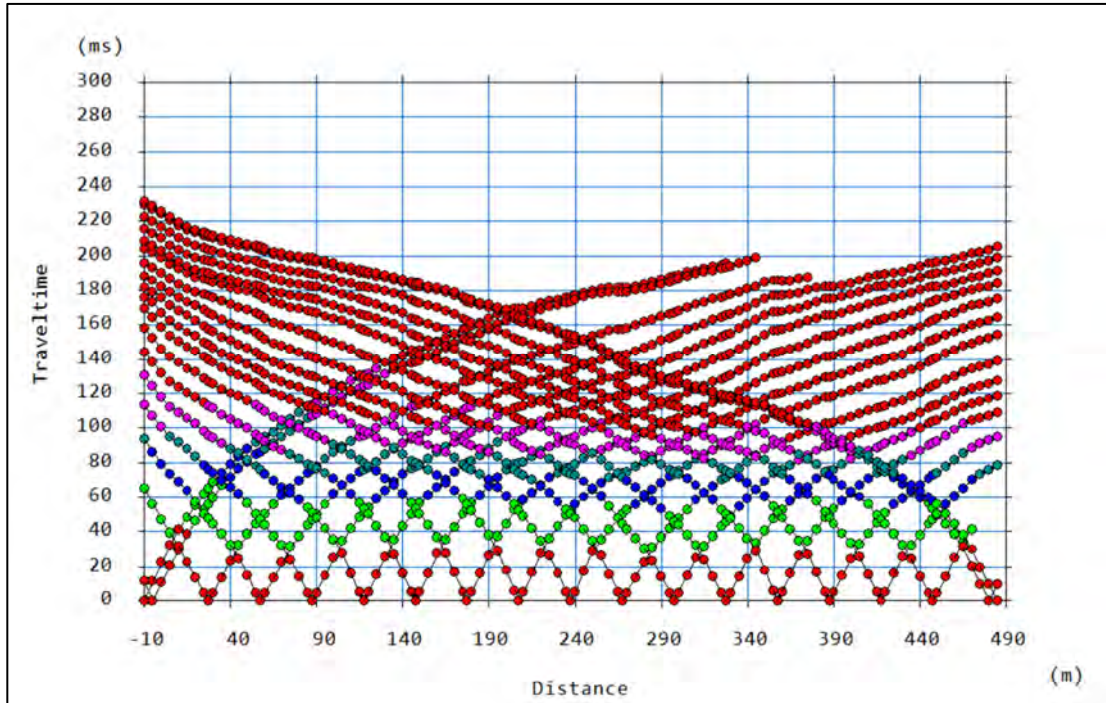


Fig. 11.19 -Tomografia sismica in onde P Profilo SRT5. Dromocrone.

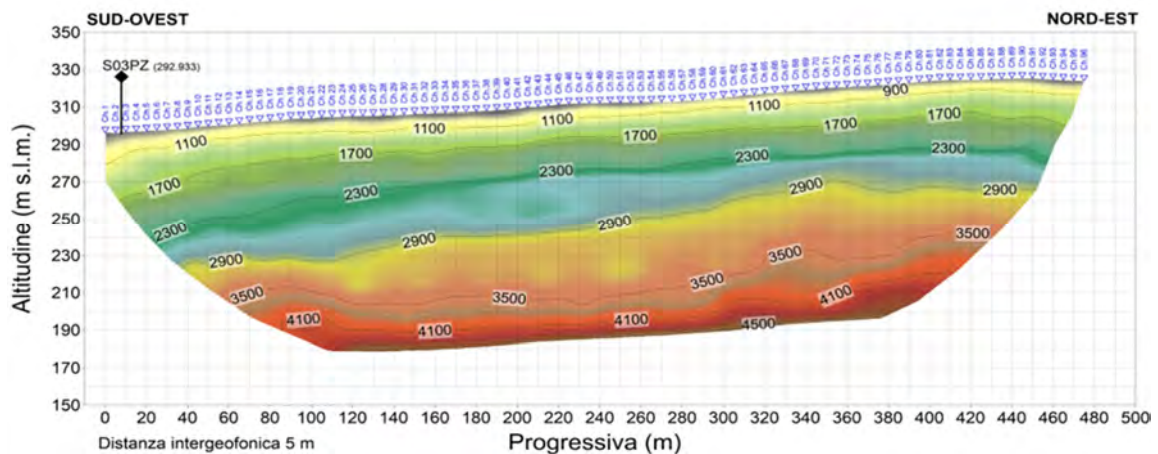


Fig. 11.20 -Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo SRT5.

Documentazione preliminare indagini geofisiche

La pseudosezione elaborata per il profilo sismico **SRT5** ha permesso di evidenziare la presenza di diversi sismostrati, caratterizzati da un generale e regolare incremento con la profondità dei valori di velocità di propagazione delle onde sismiche, e assenza di eterogeneità laterali.

Si osserva una generale variazione di velocità delle onde di compressione tra 800 m/s, in superficie, fino a circa 4.000 m/s in profondità.

Considerando il sondaggio S03PZ, ubicato nei pressi del profilo, è possibile correlare l'andamento della sezione alla presenza di argille ghiaiose, con grado di consistenza che aumenta con la profondità.

11.3.5 Profilo SRT6

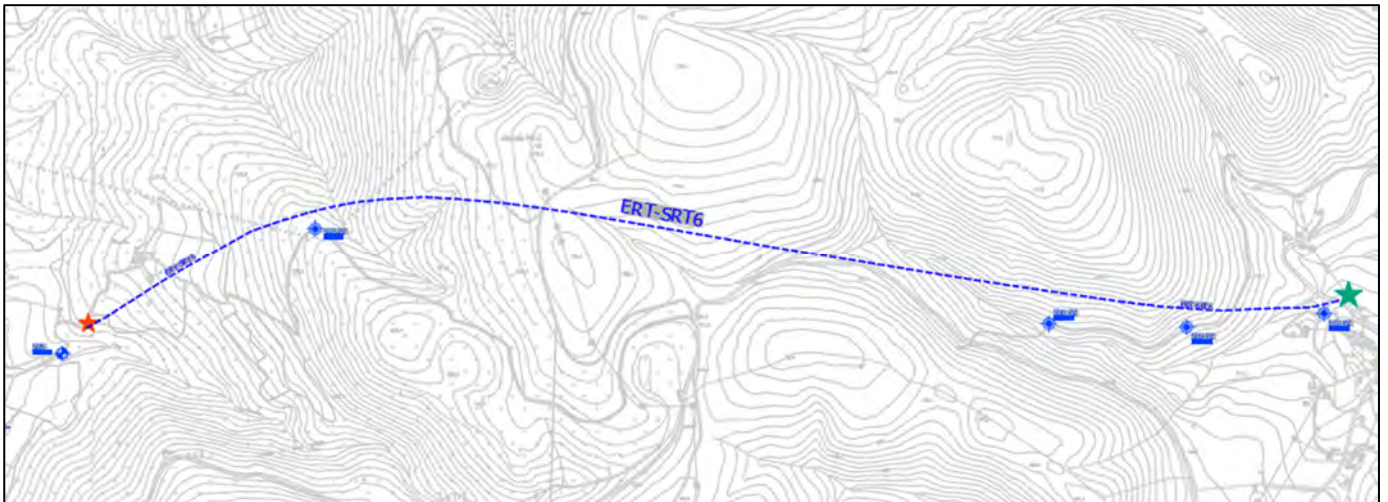


Fig. 11.21 Stralcio dell'ubicazione indagine.



I simboli indicano l'inizio (stella colore ciano) e la fine (stella di colore arancione) del profilo.

Documentazione preliminare indagini geofisiche

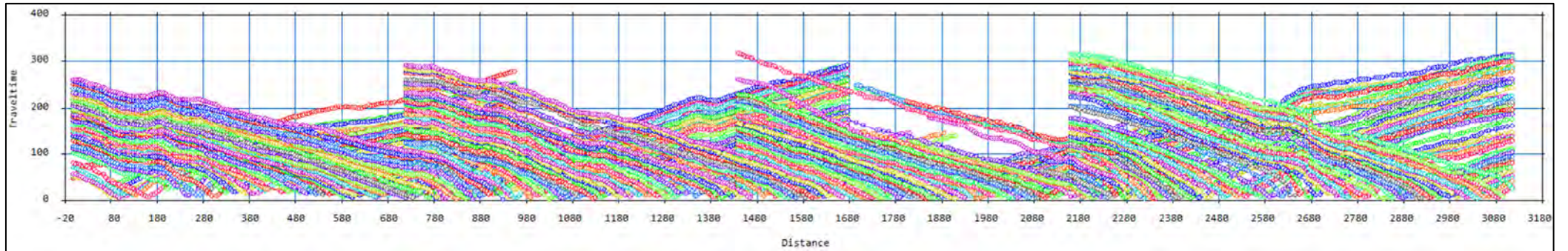


Fig. 11.22 –Tomografia sismica in onde P Profilo SRT6. Dromocrone.

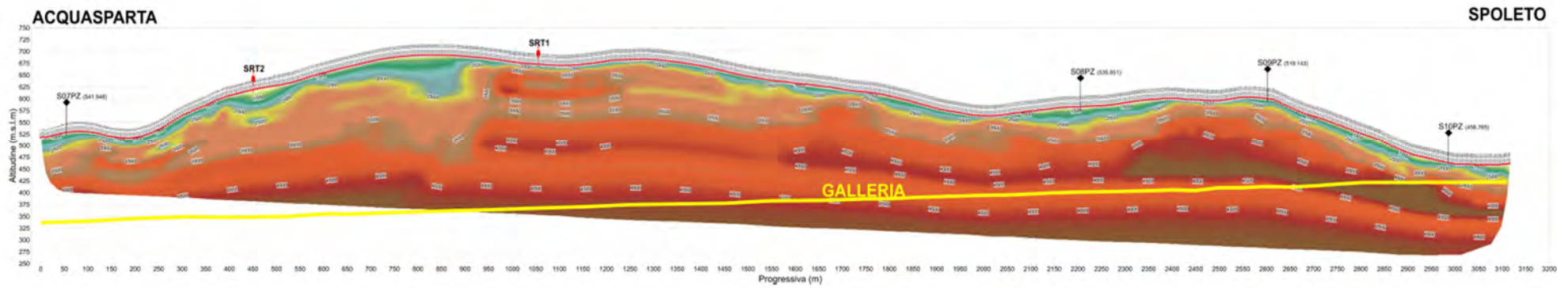


Fig. 11.23 –Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo SRT6

Documentazione preliminare indagini geofisiche

La pseudosezione elaborata per il profilo sismico **SRT6** ha permesso di evidenziare due sismostrati principali.

Il primo sismostrato, si attesta ad una profondità massima dal piano campagna pari a circa 575 m.s.l.m. ed è costituito da velocità delle onde di compressione che varia tra 1000 e 2500 m/s.

Il secondo sismostrato, che si estende sino al termine della pseudosezione, è costituito da una la velocità delle onde di compressione compresa tra 2.500 e 4800 m/s.

Considerando i sondaggi ubicati nei pressi del profilo, è possibile correlare, il primo sismostrato alla presenza di detrito di versante, e a seguire il secondo sismostrato a litologie associabili a scaglie rosse e/o marne a fucoidi, a seconda del settore di sezione considerato.

12 INDAGINI SISMICA A RIFLESSIONE 2D

12.1 Descrizione della metodologia

Obiettivo della sismica a riflessione è la ricostruzione delle strutture geologiche sepolte, attraverso la raccolta, la registrazione e la successiva elaborazione (processing) delle informazioni contenute negli echi di onde elastiche generate artificialmente in prossimità della superficie (Figura 4.1).

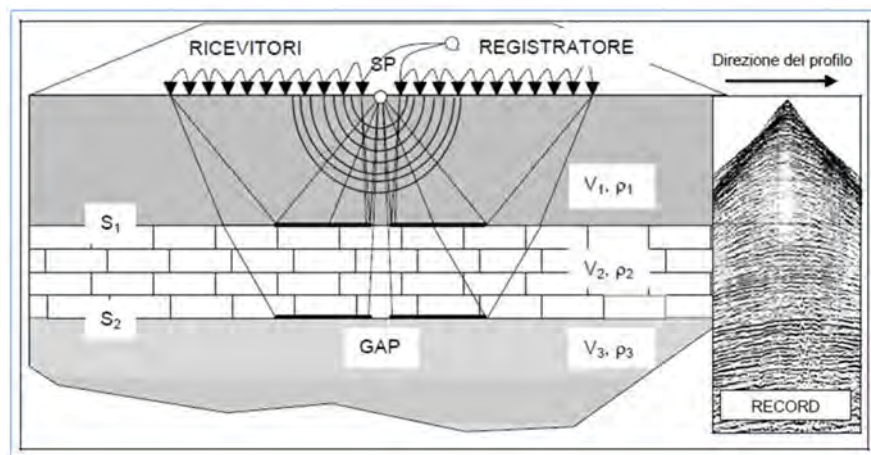


Fig. 12.1 – Prospezione sismica a riflessione. Acquisizione dati.

La prospezione sismica consiste nel generare impulsi di durata controllata o random e ad energia variabile dipendente dalle sorgenti utilizzate; i segnali sismici, connessi con le onde dirette, rifratte, difratte e riflesse, sono successivamente raccolti e registrati da opportuni sensori (geofoni) organizzati secondo determinate configurazioni spaziali 2D o 3D. I segnali registrati costituiscono i sismogrammi o tracce sismiche ed includono la 'signature' della sorgente, il sistema sottosuolo ed il tutto aggiunto del noise. Le tracce sismiche registrate simultaneamente in risposta a una singola energizzazione (shot) formano un record sismico (shot gather). Un gruppo di shot collezionati lungo una determinata direzione costituisce a sua volta un profilo sismico.

L'energia connessa con gli eventi riflessi è funzione dell'angolo di incidenza. In particolare le riflessioni post-critiche sono quelle a più alto contenuto energetico. L'energia presente in una registrazione sismica inoltre, rappresenta in generale, solo una piccola percentuale del segnale primario riflesso; la restante parte costituisce l'energia connessa con le onde superficiali, onde di volume dirette/trasmesse/scattering e da rumore sismico.

In generale, tutti gli arrivi che non sono riconducibili a una riflessione sono considerati alla stregua di "rumore" e vanno incluse in questa categoria le onde rifratte e quelle di superficie. Uno dei principali obiettivi dell'elaborazione è quello di ripulire il record da questi disturbi generati dalla sorgente ed esaltare così gli eventi riflessi.

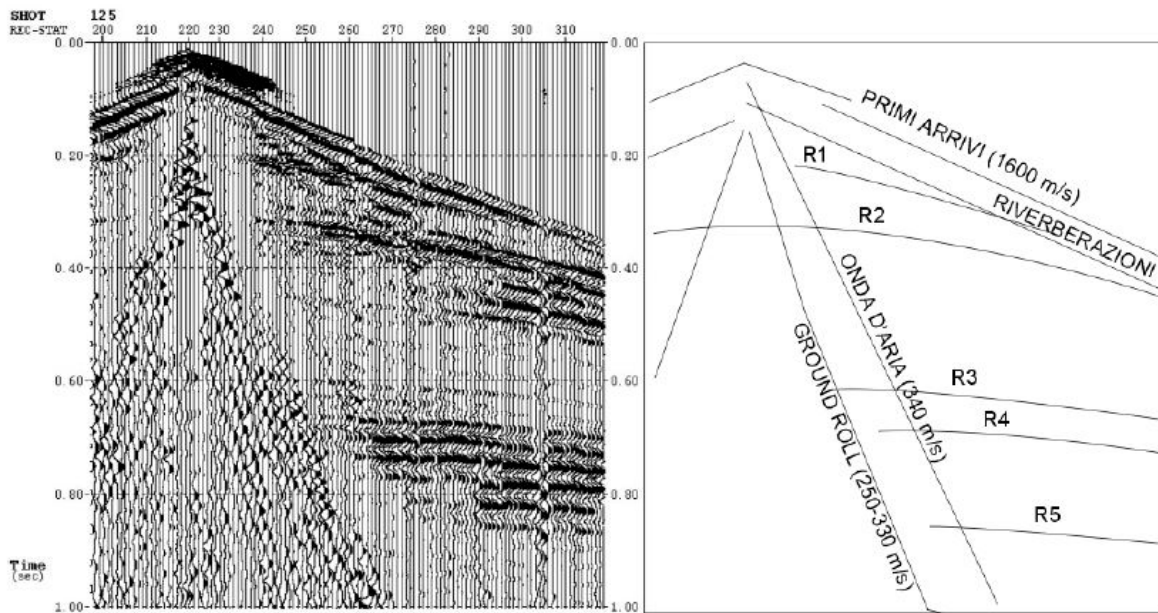


Fig. 12.2 – Prospettiva sismica a riflessione. Esempio di record di campagna.

In un record sismico si possono individuare:

- onde riflesse;
- onde S di superficie;
- onde dirette e onde rifratte;
- l'onda d'aria;
- multiple, riverberazioni ed eventi *ghost*;
- rumore ambientale.

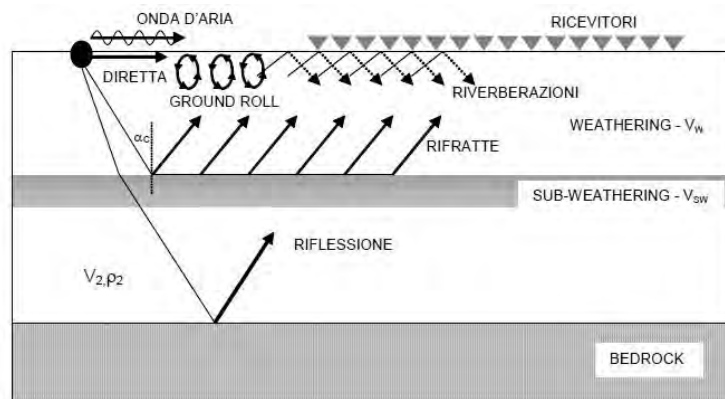


Fig. 12.3 – Schematizzazione delle geometrie dei percorsi degli eventi sismici e del rumore della sorgente.

L'energia sismica irradiata dalla sorgente è composta da onde di volume (di compressione "P" e di taglio "S") e di superficie.

Quando il fronte d'onda compressionale incide una superficie di separazione tra due mezzi, caratterizzati da proprietà fisiche differenti, una parte dell'energia incidente viene riflessa e una parte trasmessa. Le leggi che governano questi fenomeni furono formalizzate da Knott e Zoeppritz e mettono in relazione ampiezza e angolo d'incidenza per ciascuna delle onde P ed S riflesse e trasmesse in mezzi caratterizzati da velocità e densità.

La sismica a riflessione studia gli echi delle onde P a basso angolo di incidenza (10°- 20°). In questo caso le equazioni di Zoeppritz possono essere ridotte a una forma semplificata che conduce alla definizione dei coefficienti di riflessione e di trasmissione per incidenza normale. Definite A_0 l'ampiezza dell'onda incidente, A_1 quella dell'onda riflessa e A_2 quella dell'onda trasmessa, i coefficienti di riflessione r e trasmissione t sono dati dalle espressioni riportate nella figura seguente.

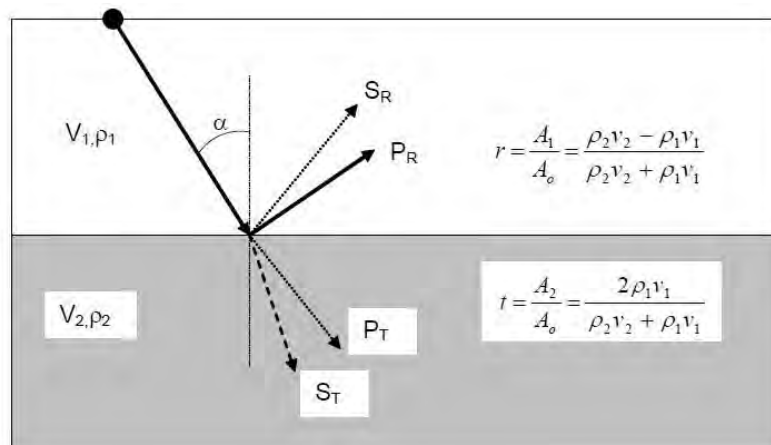


Fig. 12.4 – L'incidenza di un'onda P su una superficie di discontinuità genera due riflessioni P ed S e due trasmissioni P ed S. Per limitati angoli di incidenza a valgono le espressioni riportate a lato.

La quantità ρv rappresenta l'impedenza acustica (ρ densità e v velocità di propagazione dell'onda nel mezzo).

Poichè $A_1 + A_2 = A_0$, tra il coefficiente di riflessione r e quello di trasmissione t la relazione è la seguente:

$$t + r = 1$$

Gli eventi sismici riflessi si dispongono sul record lungo traiettorie iperboliche secondo la nota relazione:

$$T_x^2 = T_0^2 + \frac{x^2}{v^2}$$

X = distanza sorgente – ricevitore (offset);

T_x = tempo di arrivo della riflessione all'offset X ;

T_0 = tempo di arrivo (teorico) della riflessione all'offset 0 (sorgente \equiv ricevitore).

La differenza in tempi tra l'arrivo a offset = 0 e quello a offset = X è definito *Normal Move Out* (NMO). Il NMO varia con l'offset e con la velocità: in particolare, dato l'incremento della velocità con la profondità, riflessioni provenienti da profondità elevate esibiscono NMO inferiori rispetto a quelle più superficiali a parità di offset

12.2 Tecniche di acquisizione

La realizzazione pratica del metodo a riflessione necessita dei seguenti elementi:

- una sorgente di energia elastica;
- uno o più trasduttori preposti alla misurazione dell'ampiezza delle onde e alla successiva conversione in un segnale elettrico;
- un'apparecchiatura di registrazione.

La distribuzione spaziale delle sorgenti e dei gruppi di ricevitori definisce la geometria di acquisizione. La geometria di acquisizione è l'elemento sul quale si agisce in funzione dell'obiettivo.

12.3 Strumentazione utilizzata

La strumentazione utilizzata per le prospezioni sismiche a riflessione in oggetto è costituita da quattro unità principali:

- sistema d'acquisizione dati;
 - sistema di trasduzione;
 - sistema di memorizzazione dati;
 - sistema di energizzazione.
-
- ✓ Per le misurazioni in oggetto, il sistema di acquisizione dati è costituito da un sismografo GEODE della Geometrics a 24 bits, le cui caratteristiche sono state descritte nel paragrafo 3.1.
 - ✓ Il sistema di trasduzione è costituito da geofoni Geospace 4,5 Hz, a componente verticale, per trasformare la sollecitazione dinamica dovuta alle vibrazioni del terreno, cui è reso solidale attraverso un punzone, in un segnale elettrico proporzionale alla velocità di vibrazione. I segnali elettrici uscenti dai geofoni sono inviati tramite cavi multipolari (cavi sismici) al sismografo.
 - ✓ Il sistema d'immagazzinamento dati, costituito da un notebook collegato tramite rete locale Ethernet ai sismografi, svolge il compito di archiviare i dati digitalizzati (in formato seg-2), di gestire i parametri d'acquisizione e consente di valutare interattivamente la qualità dei dati acquisiti.



Foto 1 – Prospezioni sismiche a riflessione. Postazione di acquisizione dati.

- ✓ Infine, il sistema di energizzazione è costituito da un sorgente sismica in cui le onde elastiche sono generate tramite la deflagrazione di cariche esplosive, ognuna di dimensioni di circa 150 grammi, inserite all'interno di prefori profondi circa 2 metri. In totale sono state eseguite oltre 800 energizzazioni.



Foto 2 – Prospezioni sismiche a riflessione. Preparazione innesco.

12.4 Descrizione dell'elaborazione dei dati

L'elaborazione è stata articolata in tre fasi:

- 1) pre-processing;
- 2) analisi di velocità e stacking;
- 3) post-stack e migrazione.

Il flusso generale mostrato in figura 4.5 è stato adattato, attraverso l'applicazione di processi specifici, alle differenti problematiche presentate dai diversi dataset acquisiti.

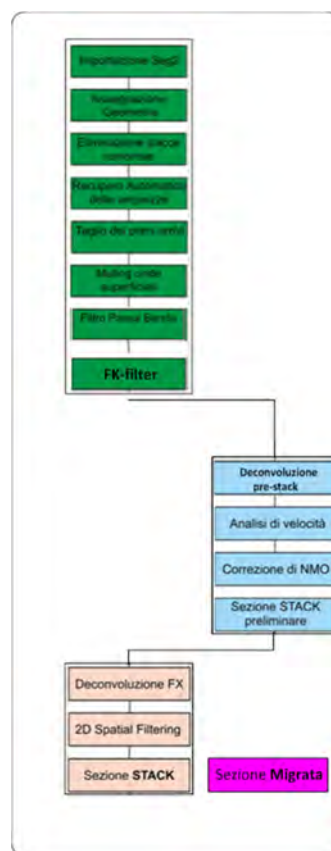


Fig. 12.5 – Sequenza di processing utilizzata per l'elaborazione dei profili sismici.

Una volta importato il dato in formato Seg-2, la prima operazione è stata l'assegnazione della geometria di acquisizione.

Durante la successiva fase d'elaborazione, definita "pre-processing", il dato raggruppato per punto di energizzazione comune (Common shot gather - CSG) è stato tratto al fine di incrementare il rapporto segnale-rumore. A questo scopo sono state eliminate le tracce morte o caratterizzate da un bassissimo rapporto Segnale/Rumore (S/R) dovuto a problemi di accoppiamento del geofono con il terreno.

È stato inoltre eseguito il muting dei primi arrivi e delle onde superficiali in modo tale da esaltare l'energia riflessa primaria. L'analisi della qualità del dato sismico a differenti offset è stata utile per eliminare le tracce rumorose prossime alla sorgente.

La figura seguente, riporta un esempio di shot-gather acquisiti durante le fasi di campagna.

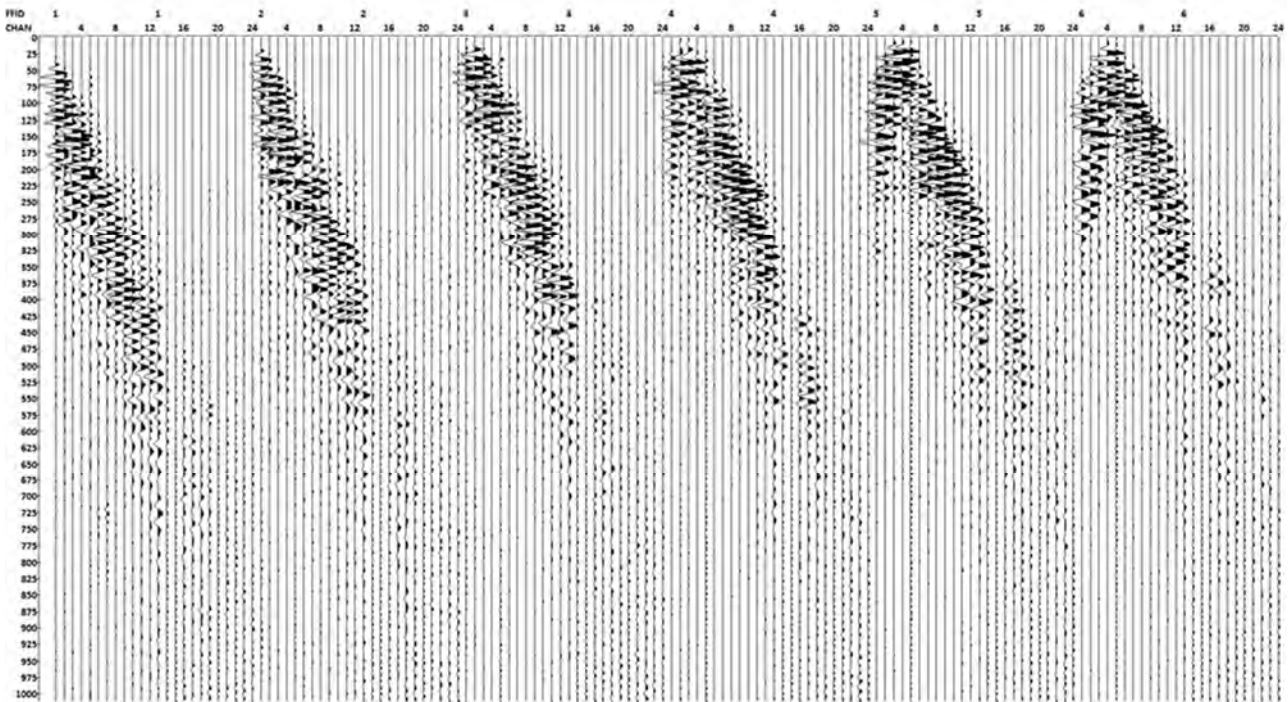


Fig. 12.6 - Dati sperimentali: Common Shot Gather relativi al profilo sismico.

L'elaborazione a riflessione è stata eseguita attraverso il software commerciale ProMAX 2D della Landmark. L'elaborazione, schematizzata in precedenza, è stata articolata in tre fasi:

- 1) pre-processing;
- 2) analisi di velocità e stacking;
- 3) post-stack.

Durante la fase dell'elaborazione, definita "pre-processing", il dato raggruppato per punto di energizzazione comune (Common shot gather - CSG) è stato tratto al fine di incrementare il rapporto segnale-rumore. A questo scopo sono state eliminate le tracce morte o caratterizzate da un bassissimo rapporto Segnale/Rumore (S/R) dovuto a problemi di accoppiamento del geofono con il terreno.

È stato inoltre eseguito il muting dei primi arrivi e delle onde superficiali in modo tale da esaltare l'energia riflessa primaria. L'analisi della qualità del dato sismico a differenti offset è stata utile per eliminare le tracce rumorose prossime alla sorgente.

Successivamente al preprocessing, l'applicazione della deconvoluzione (spiking e/o predittiva) ha ulteriormente compresso l'ondina sismica aumentandone il suo contenuto in frequenza e conseguentemente la risoluzione verticale ed hanno attenuato le riverberazioni e le multiple a corto periodo, a favore degli eventi riflessi primari. Precedentemente alla deconvoluzione al dato è stato applicato un controllo automatico del guadagno (AGC) per normalizzare le ampiezze del segnale.

Nella figura seguente è riportata la copertura per ogni cdp_x. è evidente il cdp massimo nella parte centrale con un valore di 2300 %.

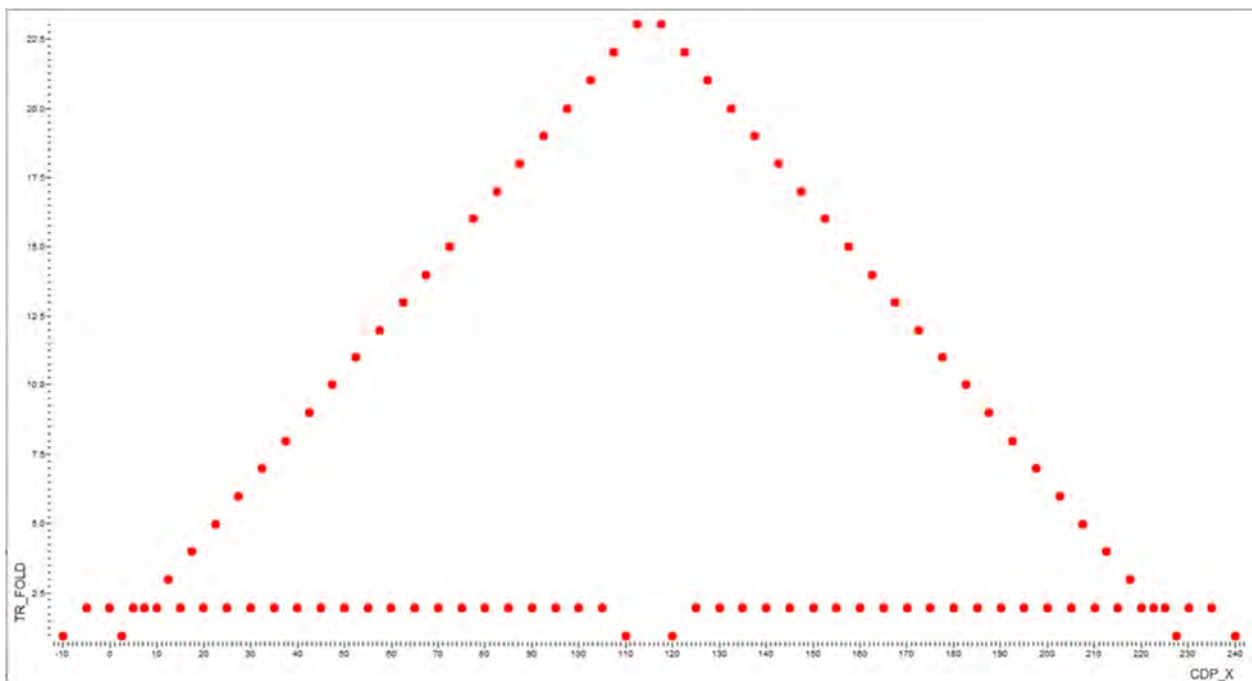


Fig. 12.7 – Mappa che riporta il CDP_X/fold.

Una parte importante del tempo totale di elaborazione è stata dedicata ai test di filtraggio. Il rumore ambientale ed il disturbo legato alla presenza sui dati, sia delle onde superficiali che dell'onda d'aria, sono stati attenuati rispettivamente con filtri passa-banda e con algoritmi mirati all'attenuazione di rumore coerente di tipo lineare.

Sono state inoltre applicate le correzioni statiche ai dati. Le correzioni statiche eliminano efficacemente gli sfalsamenti temporali presenti nelle tracce registrate, indotti sia dalle variazioni topografiche lungo il profilo, sia dalle variazioni di velocità e spessore dello strato aerato superficiale sovrapposto ad un bedrock con alta impedenza sismica e molto articolato.

Nella seconda fase del flusso d'elaborazione, i dati sono raggruppati per punto comune di riflessione (CDP) per eseguire l'analisi di velocità, necessaria per la correzione di Normal Moveout (NMO) e la successiva sommatoria (stack) delle tracce sismiche con gli eventi riflessi tutti in fase. I modelli preliminari di velocità di stacking sono stati ottenuti integrando pannelli di CSV (Constant Velocity Stack) ed il Semblance.

Le sezioni stack finali sono state trattate con un processo di filtraggio spaziale, che migliora l'informazione coerente e riduce il rumore casuale (Deconvoluzione FX).

Infine, sulle sezioni sismiche stack è stato applicato il processo di migrazione. La migrazione sismica è un processo basato sull'equazione d'onda che rimuove le distorsioni (associate alle sezioni stack) spostando gli eventi riflessi nella loro corretta posizione spaziale e collassando le diffrazioni nei loro punti di scattering. In particolare è stata adoperata la migrazione in tempi di Kirchhoff.

La figura seguente riporta lo spettro di ampiezza eseguito su tutti i dati.

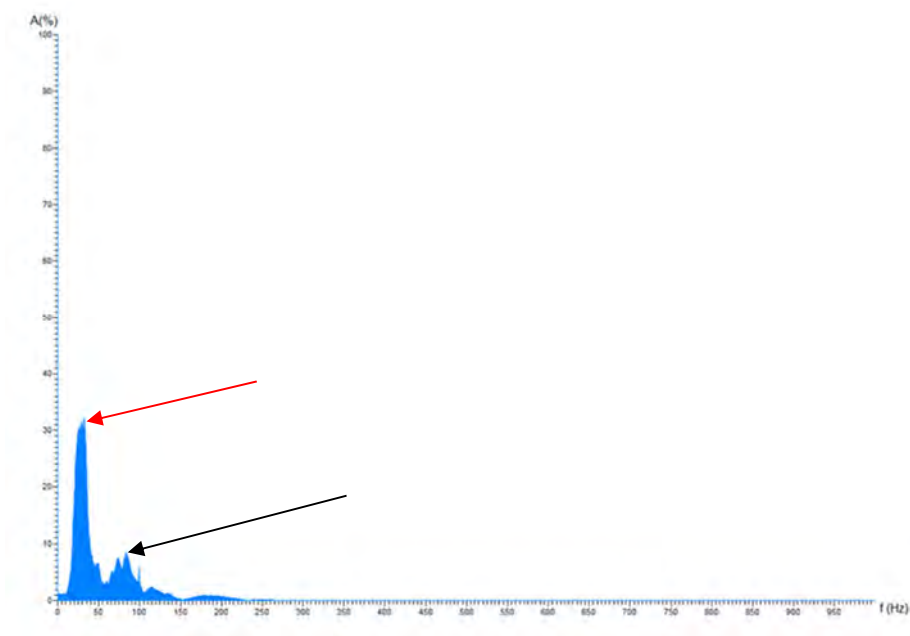


Fig. 12.8 – Contenuto Spettrale dei dati acquisiti pre-stack.
La freccia in rosso si riferisce al Ground roll, mentre la freccia in nero al segnale utile.

È possibile utilizzare il filtro FK (Frequency-Wavenumber) per eliminare rumore coerente associato con il Ground-roll. Infatti una sezione sismica rappresentata nel dominio (t,x) ha una corrispondente rappresentazione nel dominio (f,k). La relazione tra i due domini è descritta dalla seguente espressione:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{f}{k}$$

Si può dedurre come, eventi con una inclinazione B nel dominio (t,x) sono rappresentati come eventi con inclinazione (90-B) nel dominio (f,k). Inoltre un evento inclinato, contenente più frequenze, al raddoppiare della frequenza dovrà raddoppiare anche il numero d'onda corrispondente.

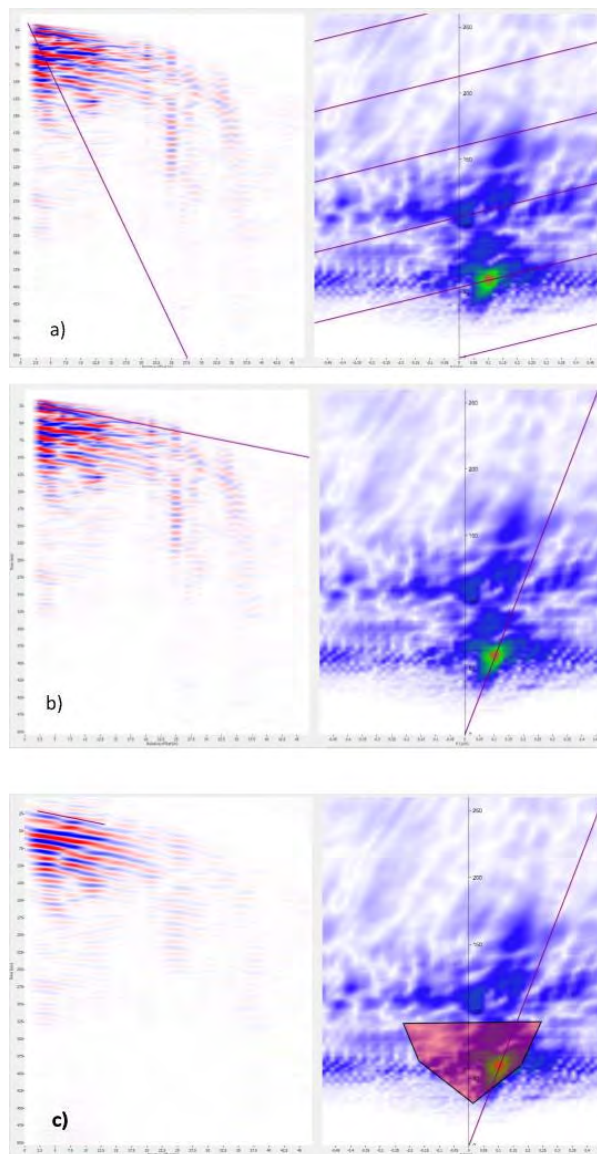


Fig. 12.9 – Esempio di filtraggio FK per la rimozione del Ground Roll. a) fan riferito alle onde superficiali di Rayleigh; b) fan riferito al segnale utile; c) poligono pass-filter utilizzato per filtrare i dati.

Documentazione preliminare indagini geofisiche

Nella seconda fase del flusso d'elaborazione, i dati sono raggruppati per punto comune di riflessione (CDP) per eseguire l'analisi di velocità, necessaria per la correzione di Normal Moveout (NMO) e la successiva sommatoria (stack) delle tracce sismiche con gli eventi riflessi tutti in fase. I modelli preliminari di velocità di stacking sono stati ottenuti mediante analisi della "Semblance" come riportato nella figura seguente.

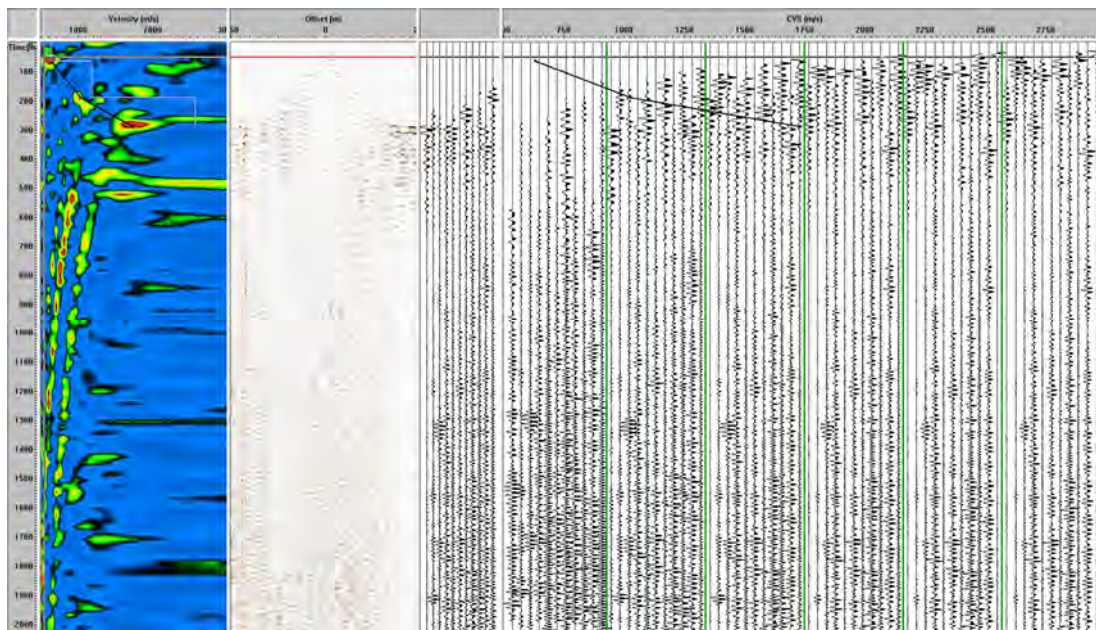


Fig. 12.10 – Esempio di funzione di 'Semblance' utilizzata nell'analisi di velocità CDP 21.

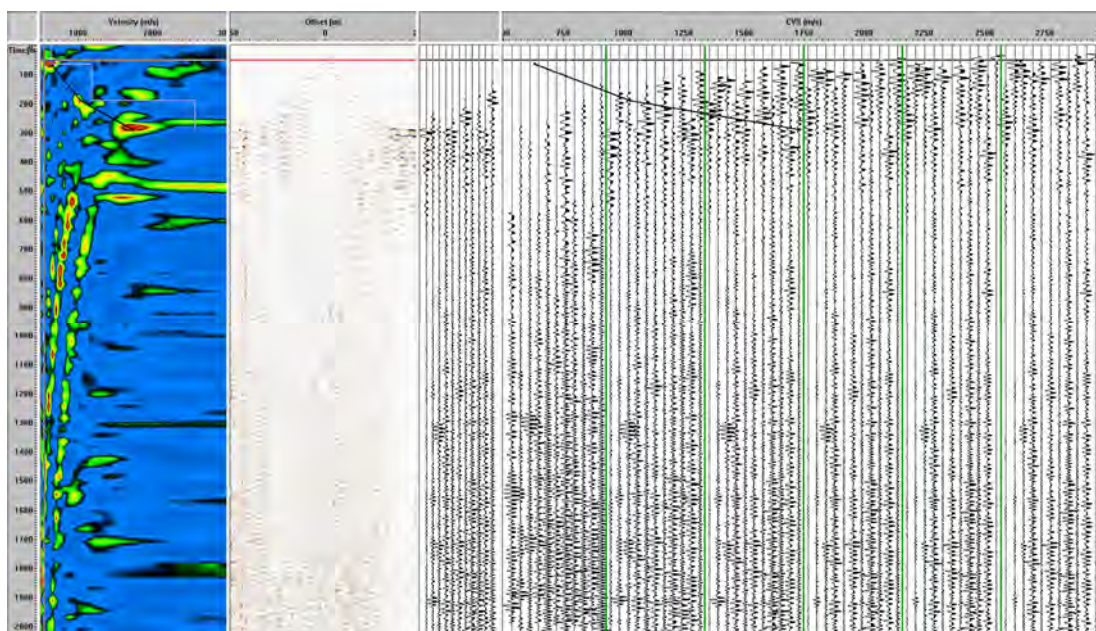


Fig. 12.11 – Esempio di funzione di 'Semblance' utilizzata nell'analisi di velocità CDP 61.

12.5 Risultati Indagini Sismica a Riflessione

Le prospezioni sismiche in oggetto sono state compiute posizionando al suolo **n.3** basi sismiche, aventi un numero di canali compreso tra 260 e oltre 625, con lunghezza complessiva compresa tra 1500 e circa 3000 metri.

Come accennato in precedenza, per ogni singolo profilo sono stati realizzati un numero di energizzazioni comprese tra 100 e 250. Le sezioni elaborate hanno permesso di investigare il sottosuolo dell'area d'interesse, fino ad una profondità di circa 500 metri dal piano campagna.

Dall'analisi delle singole sezioni, ottenute dalla sequenza di processing precedentemente illustrata, e in base al modello geologico-strutturale, scaturito dal rilievo eseguito sul campo durante le fasi di acquisizione dai dati e dalle indagini dirette, sono emersi diversi elementi utili agli scopi d'indagine.

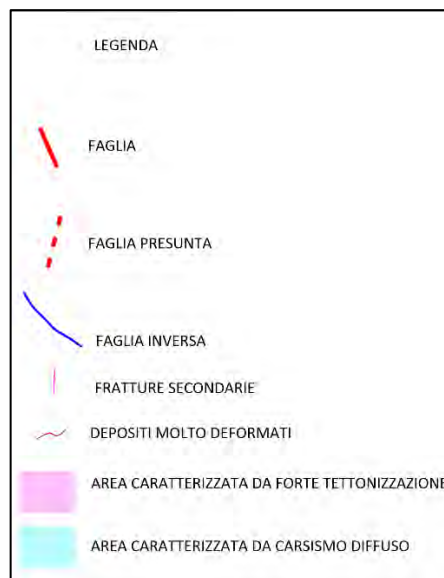


Fig. 12.12 – Legenda target indagine sismica a riflessione.

12.5.1 Profilo SRT1

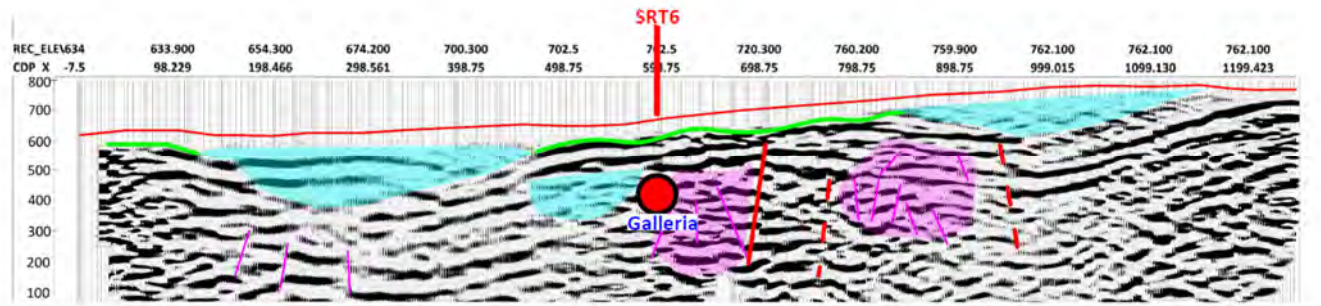


Fig. 12.13 – Sezione sismica a riflessione profilo SRT1.

Osservando la sezione ottenuta dall'elaborazione dei dati acquisiti in corrispondenza del profilo **SRT1**, sono chiaramente evidenti elementi di discontinuità dei riflettori, classificati secondo la legenda annessa. In particolare si osservano diverse zone di attenuazione in ampiezza del segnale sismico, ubicate in alcuni casi in corrispondenza dell'asse di progetto, associabili alla presenza di strutture carsiche. Sono state altresì individuate diverse faglie, legate a strutture subverticali con accennata immersione apparente in direzione SSO, di dimensioni decimetriche, e zone localizzate fortemente tettonizzate. Si evidenziano inoltre due orizzonti significativi, al top della sezione, con una buona continuità orizzontale (colore verde).

12.5.2 Profilo SRT2

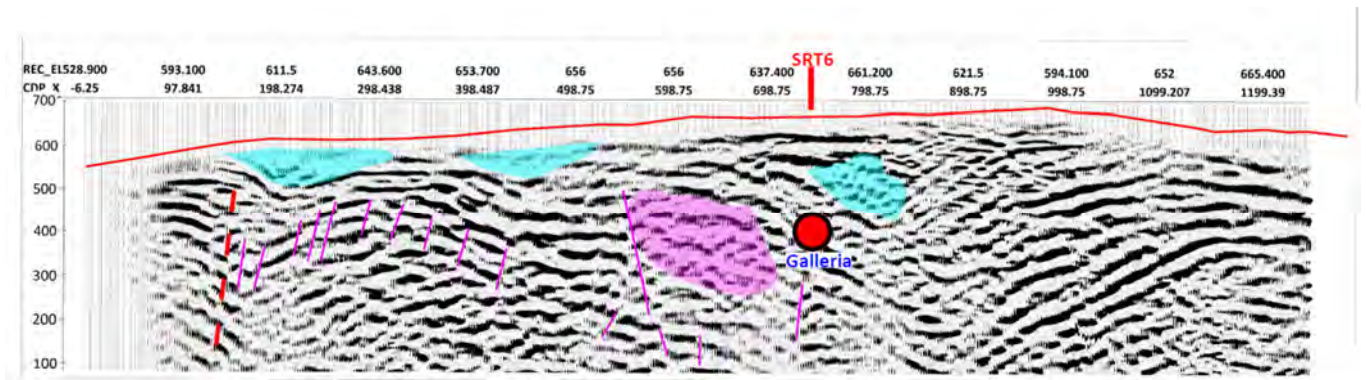


Fig. 12.14 – Sezione sismica a riflessione profilo SRT2.

Osservando la sezione ottenuta dall'elaborazione dei dati acquisiti in corrispondenza del profilo **SRT2**, anche in questo caso sono chiaramente evidenti elementi di discontinuità dei riflettori, con la presenza di tre zone di attenuazione dell'ampiezza del segnale sismico, associabili alla presenza di strutture carsiche. È stata inoltre individuata una possibile struttura subverticale con immersione apparente in direzione NSO, di dimensioni decimetriche, e ulteriori zone localizzate fortemente tettonizzate, che lambiscono il tracciato di progetto.

12.5.3 Profilo SRT6

Osservando la sezione ottenuta dall'elaborazione dei dati acquisiti in corrispondenza del profilo **SRT6**, ubicata longitudinalmente al tracciato di progetto, ed orientata in direzione Ovest – Est (Acquasparta – Spoleto) sono chiaramente evidenti numerosi elementi di discontinuità dei riflettori.

In particolare si osserva, tra le progressive metriche 350 e 650, una zona di attenuazione in ampiezza del segnale sismico, associabile alla presenza di strutture carsiche. A seguire, tra le progressive metriche 700 e 1300 sono state altresì individuate diverse faglie, con accennata immersione apparente in direzione NE-SO, di dimensioni decimetriche, e che lambiscono zone fortemente tettonizzate.

Nel resto della sezione si evidenziano ulteriori elementi di interesse (faglie, sovrascorrimenti e zone fortemente tettonizzate) chiaramente visibili alle diverse progressive metriche.

Documentazione preliminare indagini geofisiche

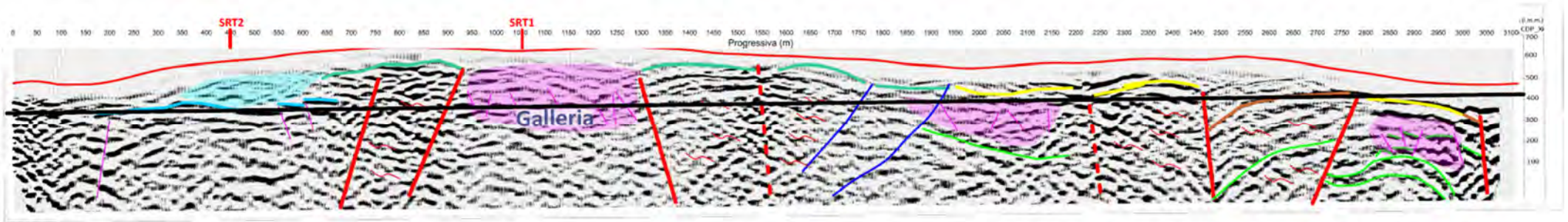


Fig. 12.15 – Sezione sismica a riflessione profilo SRT6.

13 INDAGINI DOWN-HOLE

13.1 Descrizione della metodologia

Il metodo sismico in foro down-hole consente di determinare il tempo di propagazione delle onde elastiche di compressione e di taglio, P ed S , generate in superficie mediante l'uso di una massa battente, all'interno delle varie unità litologiche che si incontrano lungo una perforazione. In fase esecutiva, per il rilievo delle onde elastiche, si utilizza un sistema di ricezione costituito da geofoni opportunamente assemblati (geofono da pozzo), che viene fissato a profondità man mano crescenti contro le pareti di un perforo, opportunamente condizionato, mediante un sistema pneumatico (Fig. 13.1).

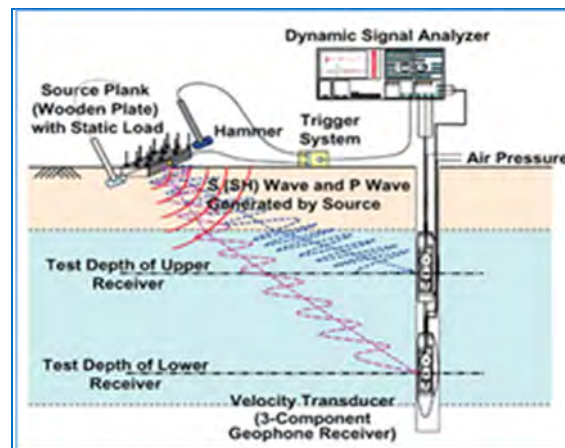


Fig. 13.1 – Schema di sistema di acquisizione per prove sismiche in foro tipo down-hole.

La rilevazione delle onde P e delle onde S , nota la profondità dell'apparato di misurazione, permette di determinare le relative velocità di propagazione e di calcolare i moduli elastici dinamici dei litotipi, assunti i valori dei pesi di volume che li caratterizzano.

A differenza della sismica a rifrazione, che misura i tempi di arrivo delle onde sismiche dopo che queste hanno subito fenomeni di rifrazione e/o di riflessione, il metodo down-hole, misurando il tempo di arrivo delle onde elastiche man mano che queste penetrano negli strati più profondi, ha il vantaggio di non avere come condizione necessaria l'aumento della velocità con la profondità; pertanto è sempre possibile valutare eventuali inversioni di velocità nel pacco di litotipi attraversati dall'indagine.

Se la sorgente energizzante è molto prossima all'asse del perforo e le superfici di discontinuità sono perpendicolari a tale asse, il raggio sismico che dalla sorgente si muove verso i geofoni, non subirà alcuna deviazione nell'attraversare le suddette discontinuità.

Se, invece, sia per motivi logistici sia per evitare che l'onda elastica si trasmetta lungo il materiale di condizionamento, la sorgente energizzante viene a trovarsi ad una certa distanza dall'asse del perforo, i tempi di arrivo delle onde devono essere corretti in modo da riportarli ai valori che si sarebbero riscontrati qualora il raggio avesse viaggiato secondo un tragitto verticale.

In fase di elaborazione, per una prima valutazione del grado di disomogeneità delle litologie lungo il profilo verticale, si usa determinare la "velocità intervallo", ovvero la velocità con cui viaggerebbe il fronte d'onda lungo l'asse verticale tra due posizioni consecutive del ricevitore, intervallate da un determinato spessore, rappresentate mediante un diagramma del tipo *step plot*. Successivamente, si determina il profilo di velocità reale lungo la verticale per il pozzo, sia per le onde *P* che per le onde *S*, nell'ipotesi che il sottosuolo sia localmente stratificato. In tal modo, sono costruiti diagrammi "tempi di arrivo corretti - profondità" per procedere all'individuazione di *dromocrone*, laddove ciascuno dei segmenti individua un intervallo di profondità entro cui la velocità dell'onda sismica è costante.

Infine, dalla conoscenza dei valori di velocità di propagazione delle onde *P* ed *S*, in ogni strato, e noti i valori del peso di volume naturale, è possibile determinare i valori dei moduli elastici dinamici tra cui i principali sono il *modulo di Poisson* (ν), *modulo di Taglio* *G* ed il *modulo di Elasticità* o *modulo di Young* (*E*) ed il *modulo di Compressibilità* (*K*).

<u>Modulo di Poisson</u>	$\nu = \frac{0.5 \cdot (V_p/V_s)^2 - 1}{(V_p/V_s)^2 - 1}$	(1)
<u>Modulo di Taglio</u>	$G = \gamma \cdot V_s^2$	(2)
<u>Modulo di Elasticità</u>	$E = V_s^2 \cdot \gamma \frac{(3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)}$	(3)
<u>Modulo di Compressibilità</u>	$K = \gamma \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$	(4)

Al termine della prova si è proceduto all'elaborazione dei dati avvalendosi dei seguenti software specialistici:

- IXSeg2Segy per la visualizzazione dei segnali acquisiti;
- GEOSTRU – Software down-hole per la lettura dei tempi di arrivo ed il calcolo delle velocità intervallo.

L'interpretazione della prospezione down-hole è avvenuta seguendo l'iter descritto:

- analisi dei segnali nel dominio delle frequenze e filtraggio del segnale stesso (se necessario);
- lettura dei tempi di arrivo delle onde *P* ed *S* per le singole registrazioni.

Per quanto concerne le registrazioni ottenute da energizzazione applicata in verticale, è stato determinato il primo arrivo in onde P come mostrato nella figura seguente (Fig. 13.2), in cui, si osserva distintamente il primo arrivo dell'onda di compressione.



Fig. 13.2 - Esempio di onda P e di lettura del primo tempo di arrivo.

Nelle registrazioni ottenute energizzando con percussione orizzontale, per ciascuna profondità d'indagine, sono state sovrapposte le misure conseguenti alla "battuta diretta o destra" (SH-A) e alla "battuta coniugata o inversa o sinistra" (SH-B).

Tale metodica ha consentito, tramite l'inversione di fase dell'onda SH, di identificare con maggiore facilità l'onda di taglio e di determinare, con maggior esattezza, il tempo di arrivo (Fig. 13.3).

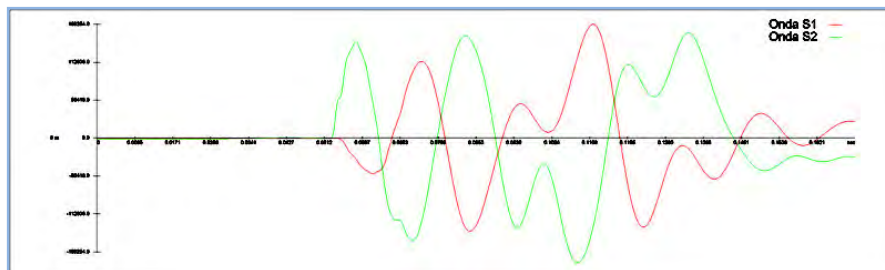


Fig. 13.3 - Esempio di onda S e dell'inversione di fase necessaria per l'individuazione del tempo di arrivo dell'onda di taglio (onda S).

Inoltre, le suddette battute sono state tra loro sottratte in modo da esaltare l'onda di taglio. Con tale metodica le onde di compressione, provocate durante l'energizzazione, con la differenza "battuta diretta-battuta coniugata", si riducono in ampiezza laddove le onde SH (che invertono in polarità a seconda della direzione di battuta) tenderanno, invece, a sommarsi aumentando così d'ampiezza. In definitiva, le metodologie descritte, hanno consentito di individuare più agevolmente il tempo di arrivo delle onde S.

13.2 Descrizione della strumentazione utilizzata

Di seguito sono riportate le specifiche della strumentazione utilizzata per la prova down-hole:

- Geofono da pozzo modello "3D Twin Borehole Geophone" della **AMBROGEO**, costituito da una coppia di sensori tridimensionali, distanziati tra loro 1 metro, ciascuno dei quali è composto da una terna di trasduttori di velocità (geofoni) da 10 Hz, orientati secondo una terna cartesiana ortonormale, di cui n.1 sensore verticale (per la rilevazione delle onde P) e n.2 orizzontali (per la rilevazione delle onde SH), questi ultimi due disposti a 90° l'uno con l'altro.
- Trigger, costituito da un dispositivo, collegato al sistema di acquisizione, che permette di avviare la registrazione del segnale sismico acquisito dai geofoni nell'istante in cui la sorgente viene attivata e parte la sollecitazione dinamica. Il sistema di "innesco" è stato realizzato mediante un geofono di superficie posizionato in prossimità della sorgente e attivato dall'impatto, nell'istante in cui la massa battente colpisce la sorgente.
- Sistema di energizzazione, costituito da una sorgente impattiva. Per la generazione delle onde di compressione è stato utilizzato un martello da 10 kg e un piattello metallico posto al suolo, mentre per la generazione delle onde di taglio è stato utilizzato un parallelepipedo in polietilene ad alta densità, reso solidale con il terreno mediante un carico verticale, sollecitata alle due estremità dalla massa battente (martello). Tale sistema è in grado di produrre onde di taglio polarizzate nel piano orizzontale.

13.3 Descrizione delle modalità esecutive

Nell'ambito della commessa in oggetto, come accennato in premessa, sono state eseguite **n.2** prove down-hole la cui ubicazione è riportata nelle tavole allegate.

Di seguito, si riportano le specifiche della prospezione:

Codice indagine	Profondità dal p.c. (m)	COORDINATE UTM WGS84 con quota dal Piano Campagna		
		Coordinata EST	Coordinata NORD	Quota (m s.l.m. m.)
S01-DH	30	299538,691	4730555,814	278,00
S11-DH	40	304681,080	4731821,314	414,94

Tab. 13.1 – Indagini sismiche in foro down-hole.

Le indagini sono state eseguite sino alle profondità riportate in tabella, acquisendo i segnali relativi ad onde elastiche, mediante un sistema di rilevamento composto da 2 triplette di geofoni, distanziate di 1 metro, ognuna equipaggiata con un geofono a componente verticale (per la rilevazione delle onde P) e 2 geofoni a componente orizzontale (per la rilevazione delle onde S). Questi ultimi risultano disposti, all'interno del dispositivo, in maniera da formare un angolo di 90°. Tale disposizione, consente l'acquisizione e, successivamente, la corretta determinazione delle onde S, a prescindere dall'orientamento nel foro del sistema di rilevamento rispetto al punto di battuta.



Foto 3 – Prospezioni sismica in foro Down-Hole S01-DH.



Foto 4 – Prospezioni sismica in foro Down-Hole S11-DH.

13.4 Risultanze indagini Down-Hole

Per la prova in oggetto, sono stati visualizzati i singoli sismogrammi per la determinazione dei tempi di arrivo delle onde "P" ed "SH" (picking) e, al termine del processo di lettura, nota la profondità dei sensori, sono state calcolate le velocità di propagazione delle onde elastiche, per ogni intervallo di profondità.

Si è, quindi, proceduto all'elaborazione dei dati secondo il duplice criterio descritto nei paragrafi precedenti, ossia adottando il metodo diretto ed il metodo intervallo, riportando, nel primo caso, i diagrammi "tempi di arrivo verticale (o corretti) – profondità" ovvero le dromocrone, in cui i valori di velocità "media" sono stati determinati in base al coefficiente angolare dei singoli tratti "congruenti" di dromocrona.

Secondo il metodo intervallo, è stata stimata la velocità intervallo delle onde sismiche, riportando in grafico il diagramma "velocità intervallo – profondità".

Di seguito, oltre ai citati diagrammi, si riportano le tabelle numeriche riepilogative contenenti: 1) i valori dei tempi letti e corretti misurati; 2) le velocità calcolate, per ciascun intervallo di profondità, sia delle onde P che delle onde S; 3) la profondità, la distanza e le altre caratteristiche geometriche del sistema di ricezione.

I siti di energizzazione sono stati posizionati nei pressi di ciascun perforo ed i segnali sismici sono stati acquisiti posizionando il geofono da pozzo a passi di un metro e vincolando lo stesso alle pareti del perforo mediante espansione di un sistema di pistoni.

Di seguito, per ciascuna indagine, si riportano le seguenti informazioni / elaborazioni:

- determinazione dei tempi di arrivo delle onde P ed S;
- determinazione della velocità di propagazione delle onde P ed S, per ogni metro di profondità;
- determinazione dei valori dei moduli elastici¹ ovvero del coefficiente di Poisson (ν) e dei parametri elastici G, E, K in forma tabellare e grafica.

¹ I valore dei pesi di volume (o gamma naturale), è stato attribuito in base a prove di laboratorio.

13.4.1 S01-DH

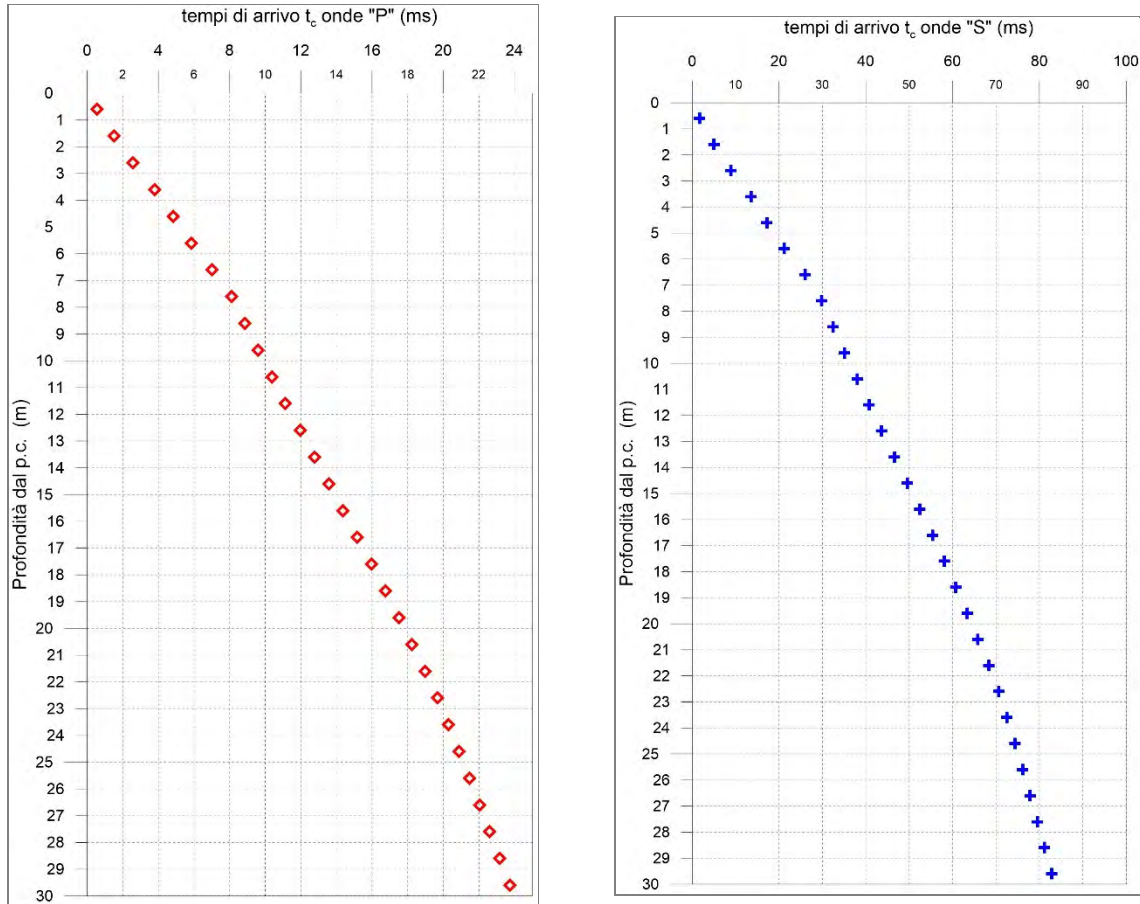


Fig. 13.4 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "S", in funzione della profondità dal p.c.

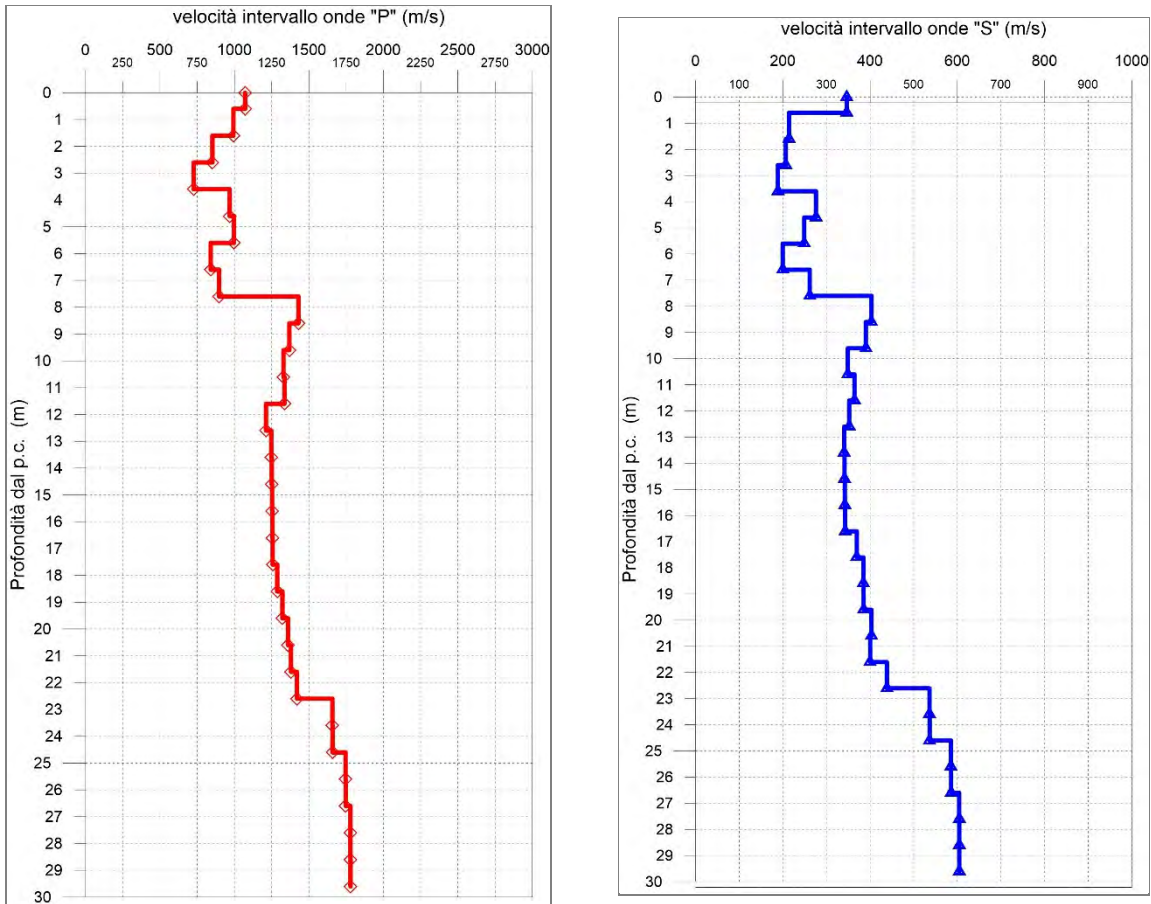


Fig. 13.5 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "S", in funzione della profondità dal p.c.

Documentazione preliminare indagini geofisiche

Profondità (m dal p.c.)	tempi osservati t_o "P" (ms)	tempi osservati t_o "S" (ms)	tempi corretti t_c "P" (ms)	tempi corretti t_c "S" (ms)	velocità intervallo V_p (m/s)	velocità intervallo V_s (m/s)	V_p/V_s	Poisson (ν)	γ_n gamma NATURALE	G Mpa	E Mpa	K Mpa
0,6	2,40	7,42	0,56	1,73	1071	347	3,1	0,44	1,90	228	658	1876
1,6	2,80	9,27	1,51	5,00	993	214	4,6	0,48	1,90	87	257	1757
2,6	3,55	12,36	2,56	8,91	852	207	4,1	0,47	1,90	81	239	1270
3,6	4,62	16,48	3,79	13,54	726	188	3,9	0,46	1,90	67	197	911
4,6	5,50	19,57	4,83	17,19	968	276	3,5	0,46	1,90	145	421	1586
5,6	6,40	23,18	5,84	21,16	997	249	4,0	0,47	1,90	118	345	1731
6,6	7,50	27,81	7,01	26,01	841	200	4,2	0,47	1,90	76	222	1242
7,6	8,55	31,42	8,12	29,84	897	262	3,4	0,45	2,00	137	398	1426
8,6	9,22	33,78	8,85	32,44	1429	403	3,5	0,46	2,00	325	948	3651
9,6	9,92	36,26	9,60	35,09	1369	390	3,5	0,46	2,00	304	886	3341
10,6	10,65	39,04	10,37	37,99	1329	349	3,8	0,46	2,00	244	713	3206
11,6	11,39	41,72	11,13	40,78	1335	364	3,7	0,46	2,00	265	775	3213
12,6	12,19	44,50	11,96	43,65	1212	352	3,4	0,45	2,00	248	721	2607
13,6	12,98	47,38	12,77	46,60	1248	341	3,7	0,46	2,00	232	677	2803
14,6	13,77	50,26	13,57	49,54	1251	341	3,7	0,46	2,00	233	681	2817
15,6	14,56	53,15	14,37	52,48	1253	342	3,7	0,46	2,00	234	683	2828
16,6	15,34	56,03	15,17	55,41	1255	343	3,7	0,46	2,00	235	685	2837
17,6	16,13	58,71	15,97	58,13	1257	369	3,4	0,45	2,00	273	793	2794
18,6	16,90	61,29	16,75	60,74	1287	385	3,3	0,45	2,00	296	859	2918
19,6	17,65	63,86	17,51	63,35	1322	385	3,4	0,45	2,00	297	862	3100
20,6	18,38	66,32	18,25	65,84	1359	403	3,4	0,45	2,00	325	944	3263
21,6	19,10	68,80	18,97	68,35	1379	400	3,4	0,45	2,00	320	931	3378
22,6	19,80	71,07	19,68	70,64	1420	439	3,2	0,45	2,00	385	1113	3517
23,6	20,40	72,92	20,29	72,52	1657	536	3,1	0,44	2,10	604	1741	4961
24,6	21,00	74,78	20,89	74,39	1658	536	3,1	0,44	2,10	604	1743	4965
25,6	21,57	76,48	21,47	76,12	1746	586	3,0	0,44	2,10	720	2069	5440
26,6	22,14	78,18	22,04	77,83	1746	586	3,0	0,44	2,10	720	2070	5444
27,6	22,70	79,83	22,61	79,50	1778	604	2,9	0,43	2,10	767	2200	5618
28,6	23,26	81,47	23,17	81,16	1779	604	2,9	0,43	2,10	767	2201	5621
29,6	23,82	83,12	23,74	82,83	1779	605	2,9	0,43	2,10	768	2202	5624

Tab. 13.2 -Indagini down-hole S01-DH. Riepilogo dei valori dei tempi di arrivo delle onde P ed S,
dei valori delle velocità intervallo delle onde P ed S e dei moduli dinamici.

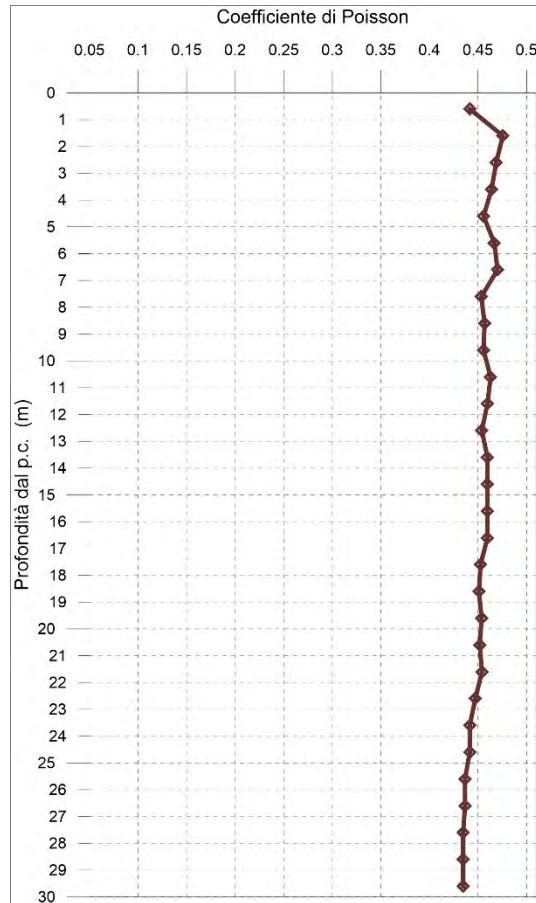


Fig. 13.6 - Diagramma relativo all'andamento del coefficiente di Poisson in funzione della profondità dal p.c.

Documentazione preliminare indagini geofisiche

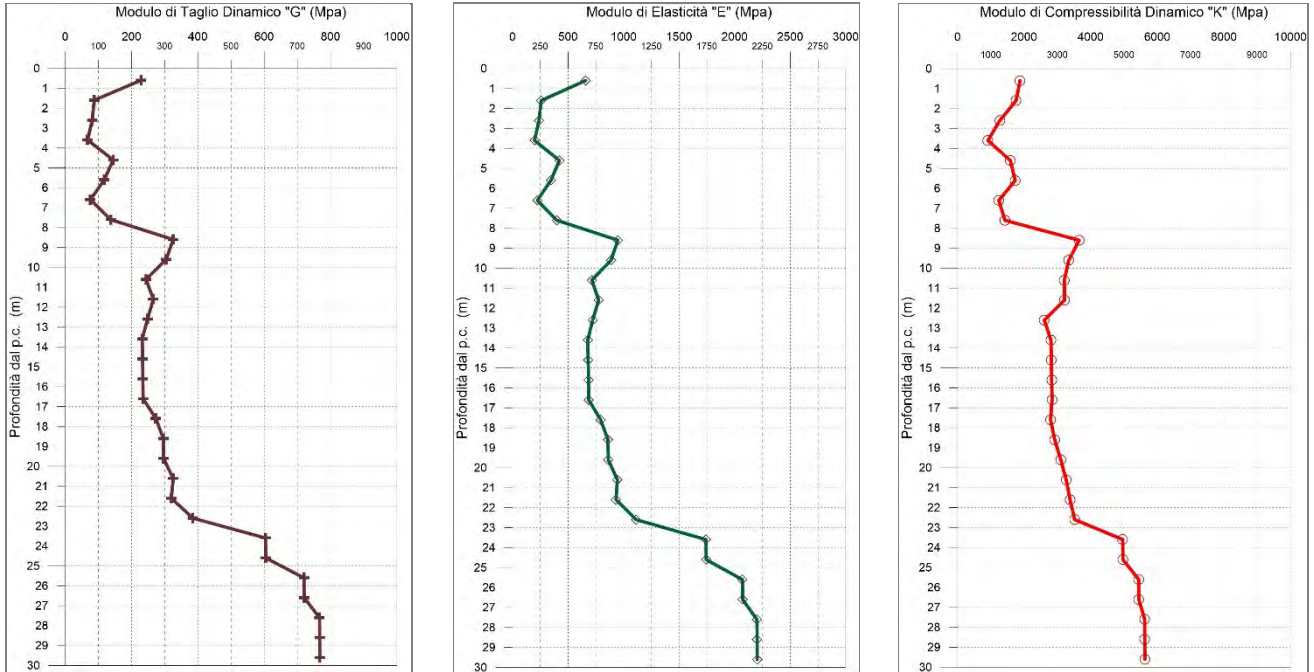


Fig. 13.7 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "G" in funzione della profondità dal p.c. Al centro, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "E" in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "K" in funzione della profondità dal p.c.

13.4.2 S11-DH

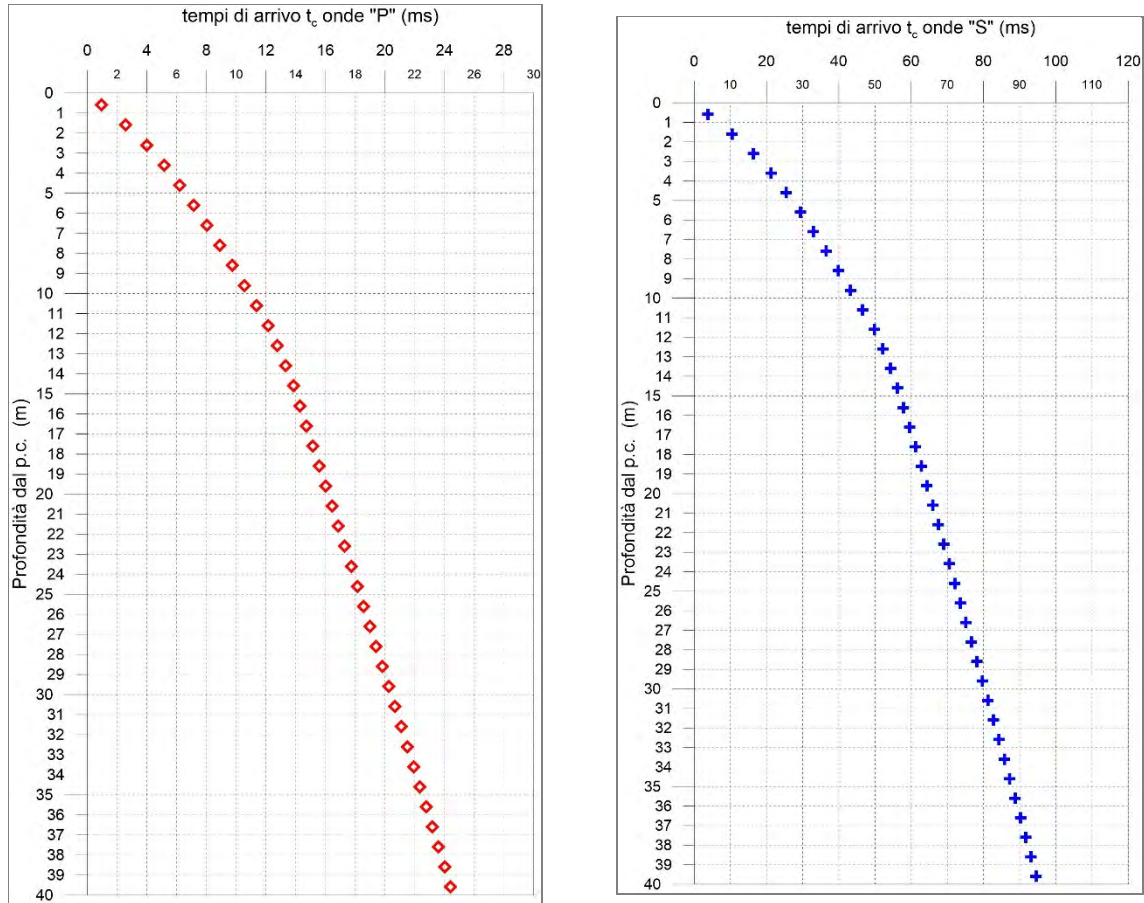


Fig. 13.8 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "S", in funzione della profondità dal p.c.

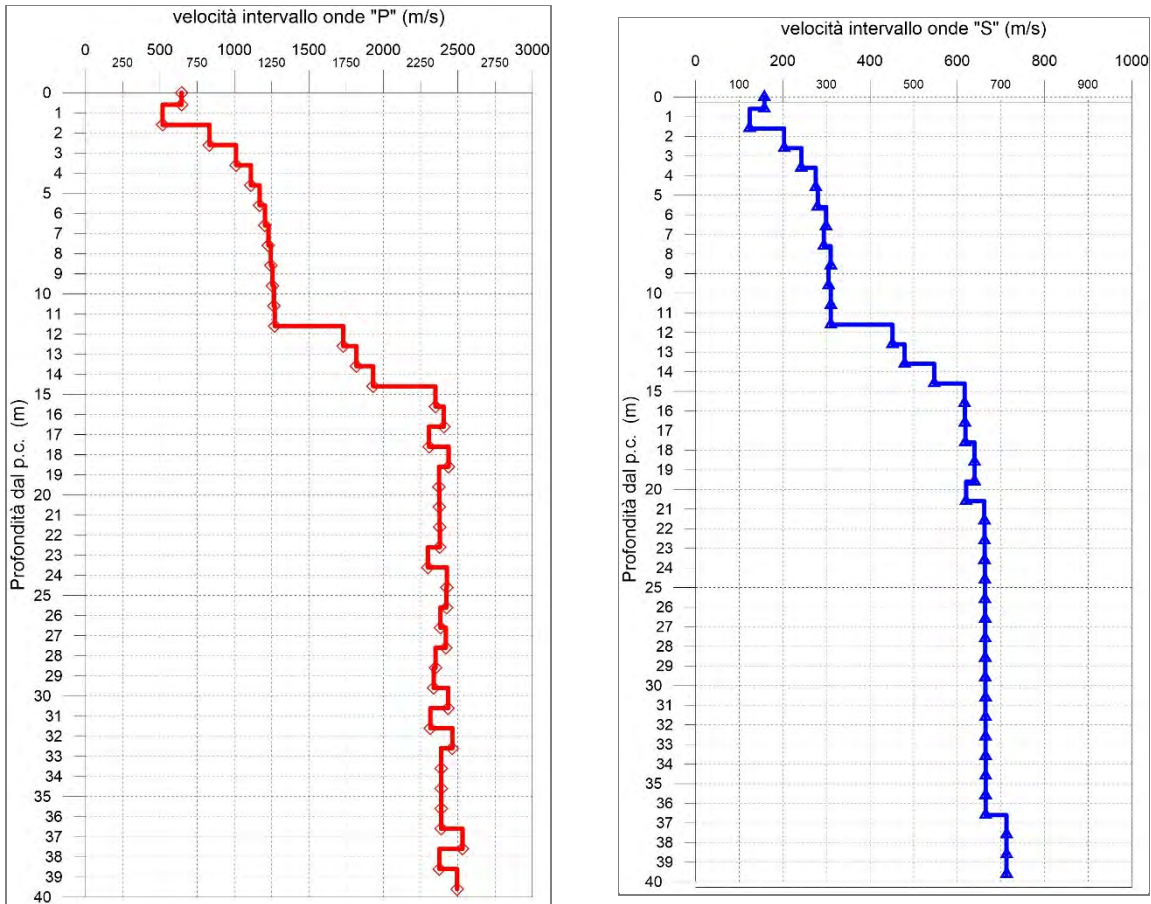


Fig. 13.9 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "S", in funzione della profondità dal p.c.

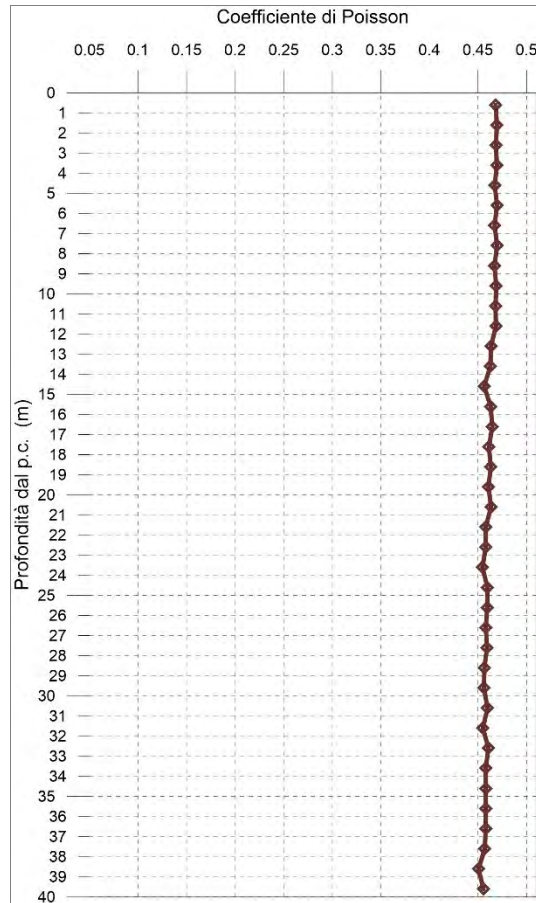


Fig. 13.10 - Diagramma relativo all'andamento del coefficiente di Poisson in funzione della profondità dal p.c.

Documentazione preliminare indagini geofisiche

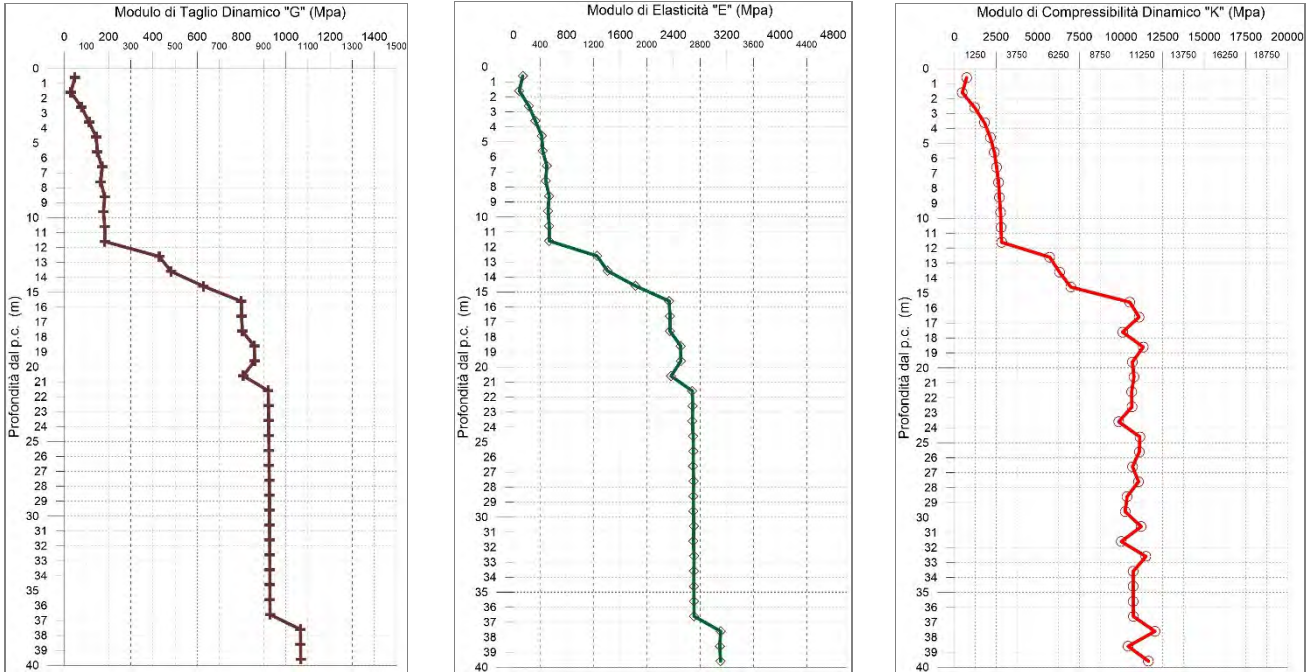


Fig. 13.11 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "G" in funzione della profondità dal p.c. Al centro, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "E" in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "K" in funzione della profondità dal p.c.

14 METODOLOGIA SISMICA MASW

14.1 Descrizione della metodologia

La tecnica di analisi MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), rappresenta una tipologia d'indagine sismica che consente di individuare il profilo verticale di velocità delle onde di taglio V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali (Rayleigh e Love).

Il metodo MASW è basato sul fenomeno secondo il quale, in un mezzo stratificato, le onde superficiali sono "dispersive", ovvero sul fatto che frequenze diverse (cioè lunghezze d'onda diverse) viaggiano a velocità diversa. Più specificatamente, le lunghezze d'onda maggiori (cioè le frequenze più basse) sono influenzate dalla parte più profonda del sottosuolo e, quindi, caratterizzeranno gli strati più profondi, mentre le piccole lunghezze d'onda (frequenze più alte) dipendono dalle caratteristiche della parte più superficiale del sottosuolo.

Il metodo d'indagine MASW, descritto nella presente nota, è del tipo attivo ovvero le onde superficiali sono generate artificialmente mediante l'impatto di una massa battente (mazza sismica) sulla superficie del suolo e misurate ad uno stendimento lineare di velocimetri o geofoni. Un tipico schema di acquisizione è mostrato nella seguente figura.

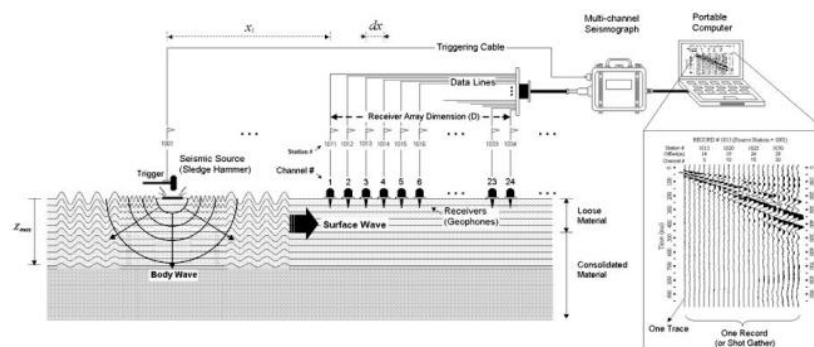


Figura 14.1 Esempio di configurazione sorgente-ricevitori per un tipico rilievo Masw.

Nel metodo MASW di seguito descritto, si usano onde superficiali polarizzate nel piano verticale alla superficie libera del terreno ovvero le onde di Rayleigh, trascurando gli effetti dovuti alle onde di volume, alle onde riflesse o rifratte.

Sebbene una sorgente puntiforme verticale generi anche altri tipi di onde, oltre a quelle superficiali, intervengono due aspetti che rendono il contributo di queste ultime prevalente sul contributo delle onde di volume. Il primo è che le onde di Rayleigh trasportano circa i due terzi dell'energia generata dalla sorgente. Il secondo aspetto è che, allontanandosi dalla sorgente, le onde di superficie subiscono un'attenuazione geometrica inferiore rispetto alle onde P ed S_v , perché esse si propagano secondo fronti d'onda cilindrici, mentre le onde di volume si propagano secondo fronti d'onda sferici.

Il processo utilizzato per l'elaborazione dei profili di velocità delle onde di taglio con la tecnica MASW ha richiesto tre passaggi fondamentali, di seguito descritti nel dettaglio:

1. Caricati i files d'interesse ed impostate le caratteristiche geometriche del profilo, in primo luogo viene calcolata la velocità di fase (o curva di dispersione) apparente sperimentale, mediante un processo di elaborazione che consente di estrarre la suddetta curva dallo spettro nel dominio frequenza - numero d'onda applicando una doppia trasformata di Fourier al campo di moto misurato originariamente nel dominio spazio - tempo.
2. Successivamente, viene stimata la velocità di fase (o curva di dispersione) calcolata o numerica, del modo fondamentale delle onde di Rayleigh, mediante modellazione del sottosuolo in termini di velocità delle onde P ed S, valori del coefficiente di Poisson, densità dei materiali, numero e spessore degli strati.
3. La terza ed ultima fase consiste nell'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , modificando opportunamente lo spessore degli orizzonti litologici e la densità fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la curva di dispersione sperimentale e quella numerica corrispondente al modello di suolo assegnato, attraverso un processo iterativo.

L'inversione della curva di dispersione permette di ricavare un profilo di velocità delle onde S, che è posizionato in corrispondenza del centro dello stendimento sismico di geofoni.

L'elaborazione dei dati è avvenuta avvalendosi dei seguenti software specialistici:

- **IXSeg2Segy** per la visualizzazione dei segnali acquisiti;
- **WinMASW®** sviluppato da **Eliosoft**, di Giancarlo Dal Moro, nel 2006.

Per l'esecuzione delle prospezioni sismiche MASW, è stata adoperata la strumentazione descritta nel paragrafo 3.3.

La tecnica d'indagine sismica MASW, prevede che agli estremi dello stendimento ed allineati ad esso, siano materializzati i punti di energizzazione in numero e a distanza variabile in base alle esigenze specifiche di sito e alla logistica. Per le indagini in oggetto sono stati eseguiti n.4 *off-end shot*, agli estremi di ogni stendimento, ad una distanza variabile da un minimo di 2 a un massimo di 5 metri, come schematizzato nella figura di seguito.



Figura 14.2 Indagine MASW. Disposizione siti di energizzazione.

14.2 Risultati indagine Masw

Nel paragrafo seguente, sono riportate le risultanze delle prospezioni sismiche MASW, riepilogate tramite gli elaborati elencati:

Finestra di Input

- Sismogramma originale, in cui sono riportate le tracce registrate sull'intero array di geofoni costituenti lo stendimento.
- Spettro originale - frequenza Vs velocità (in m/s).

Finestra di output

- Spettro elaborato - frequenza Vs velocità (in m/s).
- Diagramma dell'evoluzione del modello "migliore", espresso in termini di minor *misfit* ovvero della minore discrepanza tra curva osservata e curva calcolata e diagramma del modello medio calcolato secondo l'operazione statistica nota come *Marginale Posterior Probability Density*.
- Profilo verticale della velocità delle onde S (V_s) relativo al modello "migliore" ed al modello "medio"
- Tabella di sintesi dove sono riportati gli spessori degli strati e la relativa velocità delle onde di taglio.

Documentazione preliminare indagini geofisiche

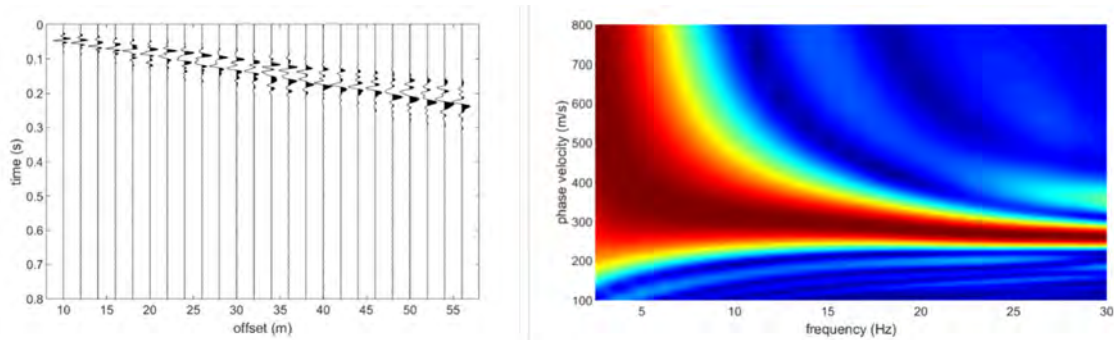


Figura 14.3 - Sismogramma e curva di dispersione.

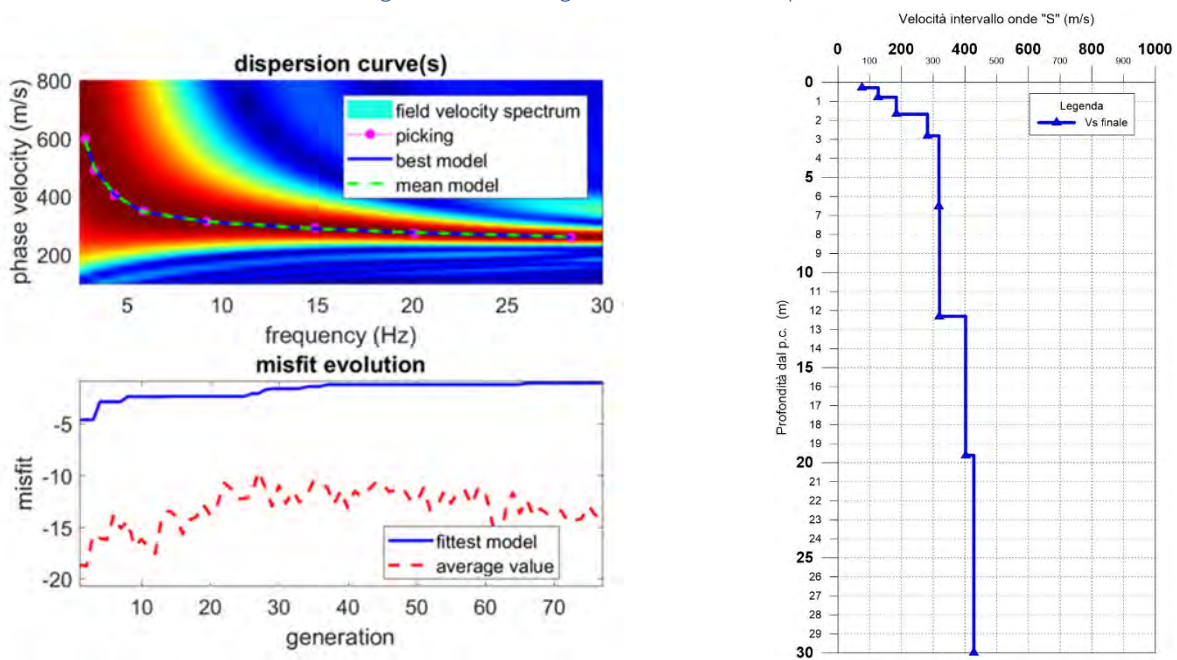


Figura 14.4 - Spettro di velocità e profilo verticale delle onde di taglio (Vs).

Vs finale (m/s)	Spessore (m)	Profondità (m dal p.c)	h/Vs
75	0,29	0,29	0,00381
127	0,50	0,78	0,00391
184	0,89	1,67	0,00483
282	1,14	2,81	0,00404
318	3,70	6,51	0,01162
320	5,79	12,30	0,01811
402	7,31	19,61	0,01818
428	10,39	30,00	0,02427

Tabella 14-1 - Tabella di sintesi in cui sono riportati gli spessori degli strati e la relativa velocità delle onde di taglio.

INDAGINI GEOFISICHE



PROJECT:
SERVIZI DI INDAGINI GEONOSTICHE E MONITORAGGIO GEOTECNICO ANTE OPERAM PER IL PROGETTO DEFINITIVO DELL'INTERVENTO: S.S N.685 "DELLE TRE VALLI UMBRE". TRATTO SPOLETO - ACQUASPARTA.

LOCATION:
ACQUASPARTA (TR)

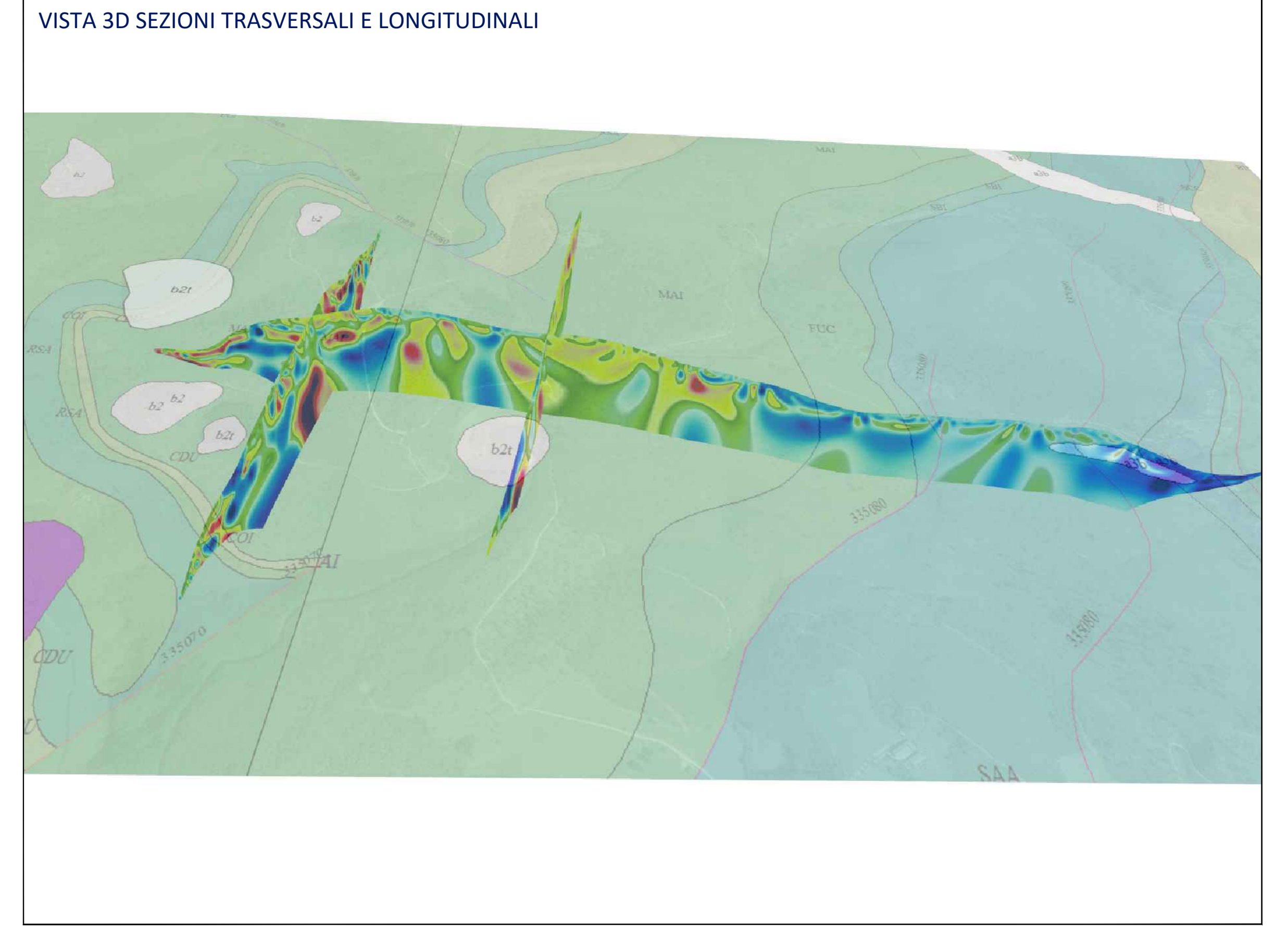
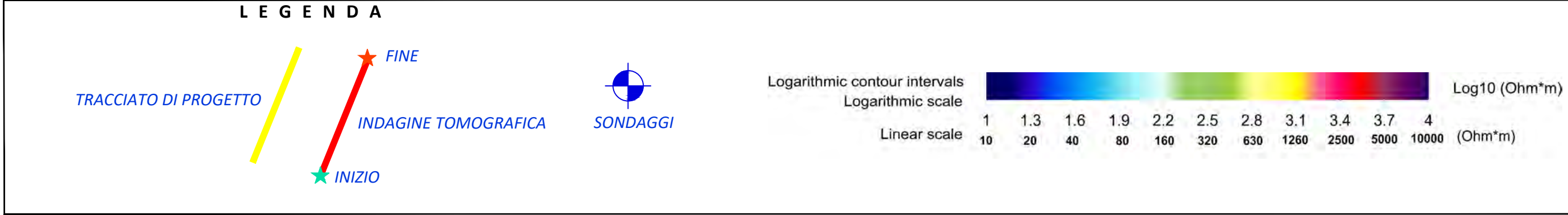
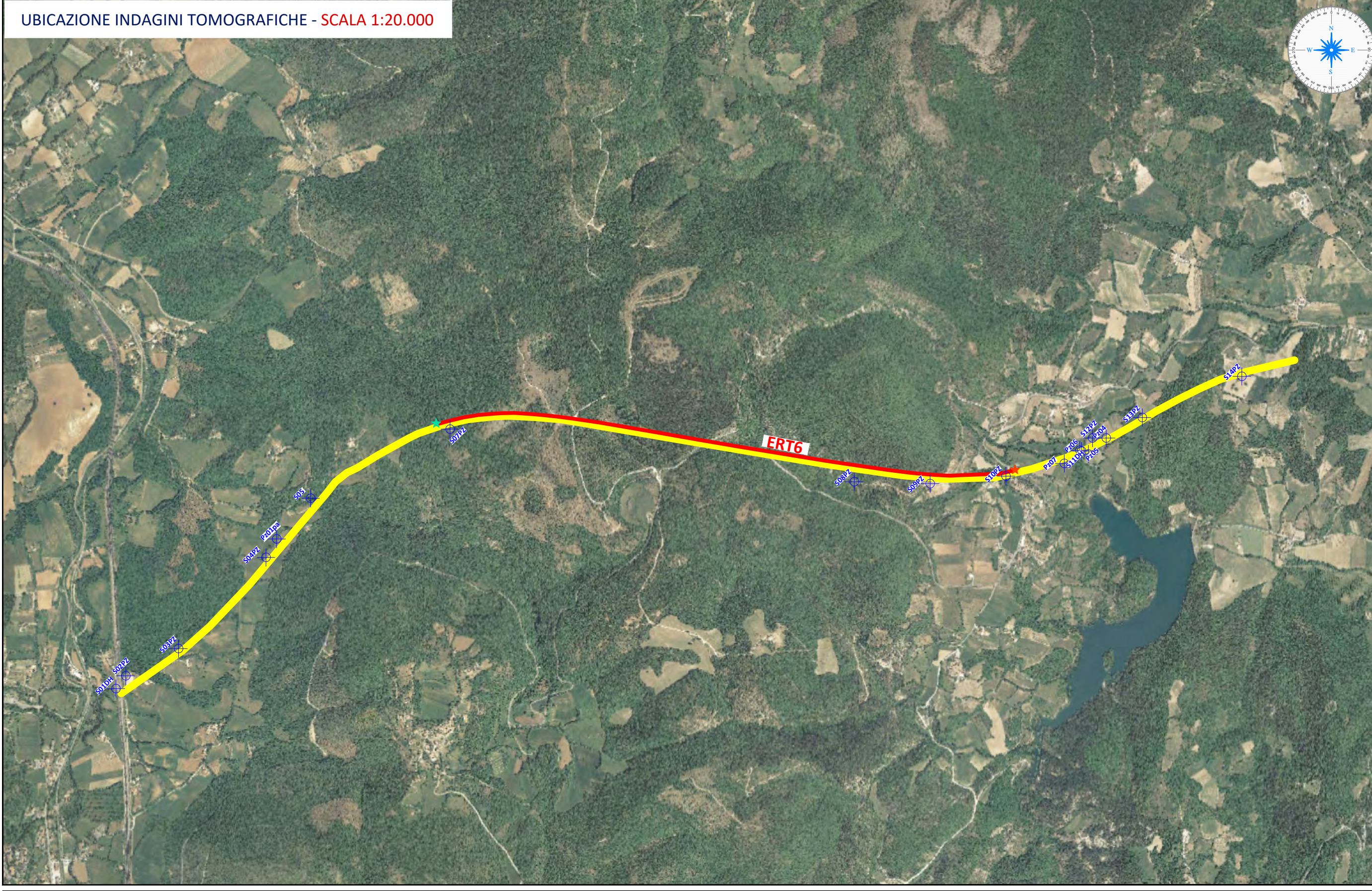
CLIENT:
ANAS S.p.A.

OBJECT:
INDAGINI GEOELETTRICHE
TOMOGRFIA ELETTRICA GALLERIA DELLE ROSE

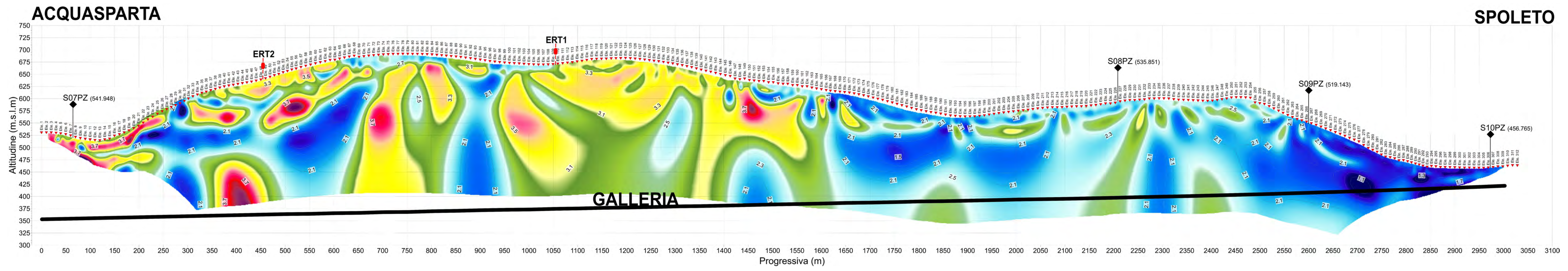


Tecno In Ref. R.C. 343/22
Revision n.: 00
Date: marzo 2023
Description: Prima emissione
Scale: varie

Redacted by: Dr. Luciano Nicotri
Reviewed by: Dr. Geol. Giovanni Antonucci
Approved by: Dr. Geol. Lucio Amato
Document code: 343/22_Anas_Acquasparta_Geoeltrica_Tavola 3
Attached: 3



PROFILO ERT6 INDAGINE TOMOGRAFICA
SCALA 1:4000



INDAGINI GEOFISICHE



PROJECT:
SERVIZI DI INDAGINI GEOGNOSTICHE E MONITORAGGIO GEOTECNICO ANTE OPERAM PER IL PROGETTO DEFINITIVO DELL'INTERVENTO: S.S N.685 "DELLE TRE VALLI UMBRE". TRATTO SPOLETO - ACQUASPARTA.

LOCATION:
ACQUASPARTA (TR)

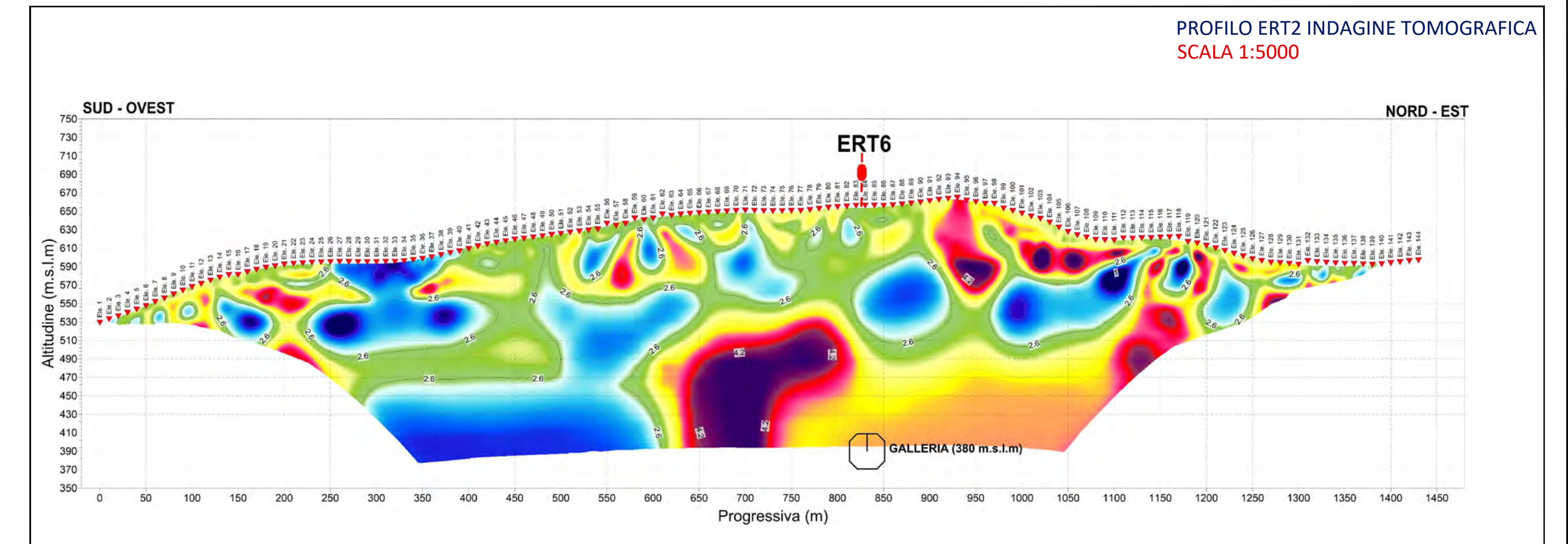
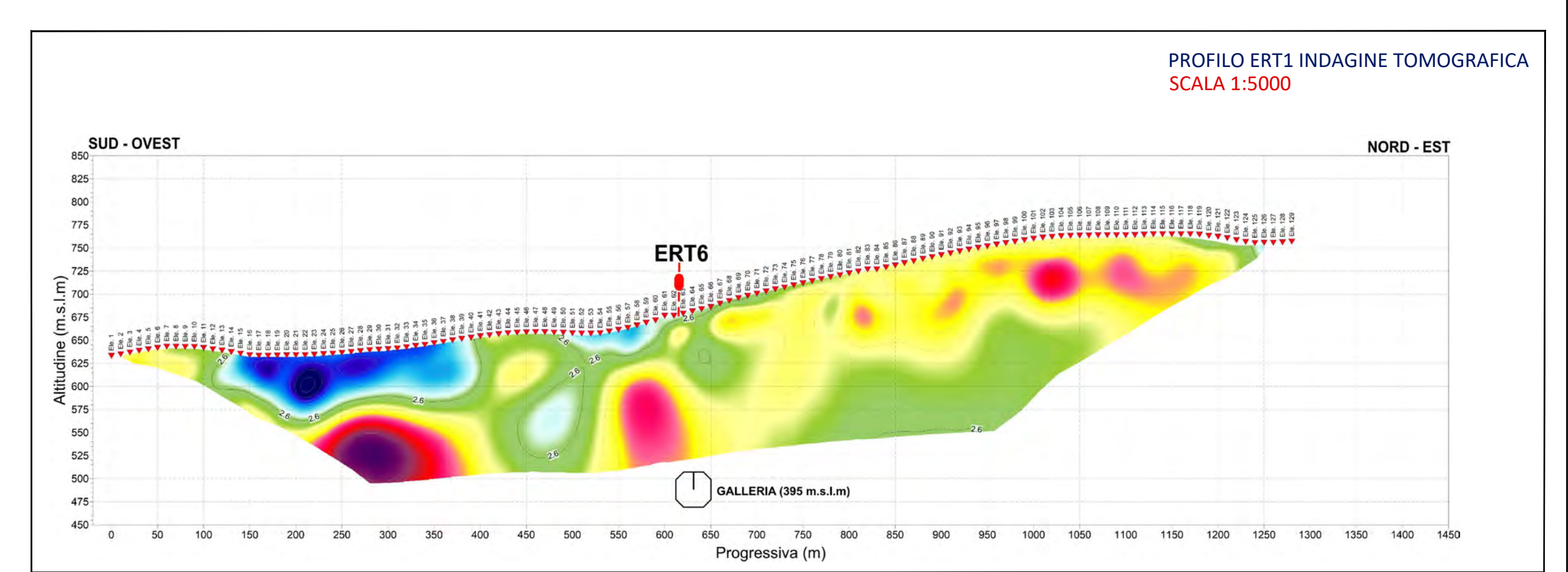
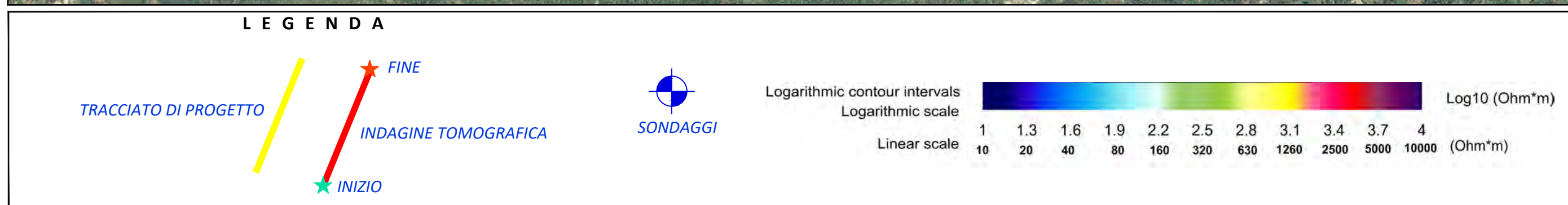
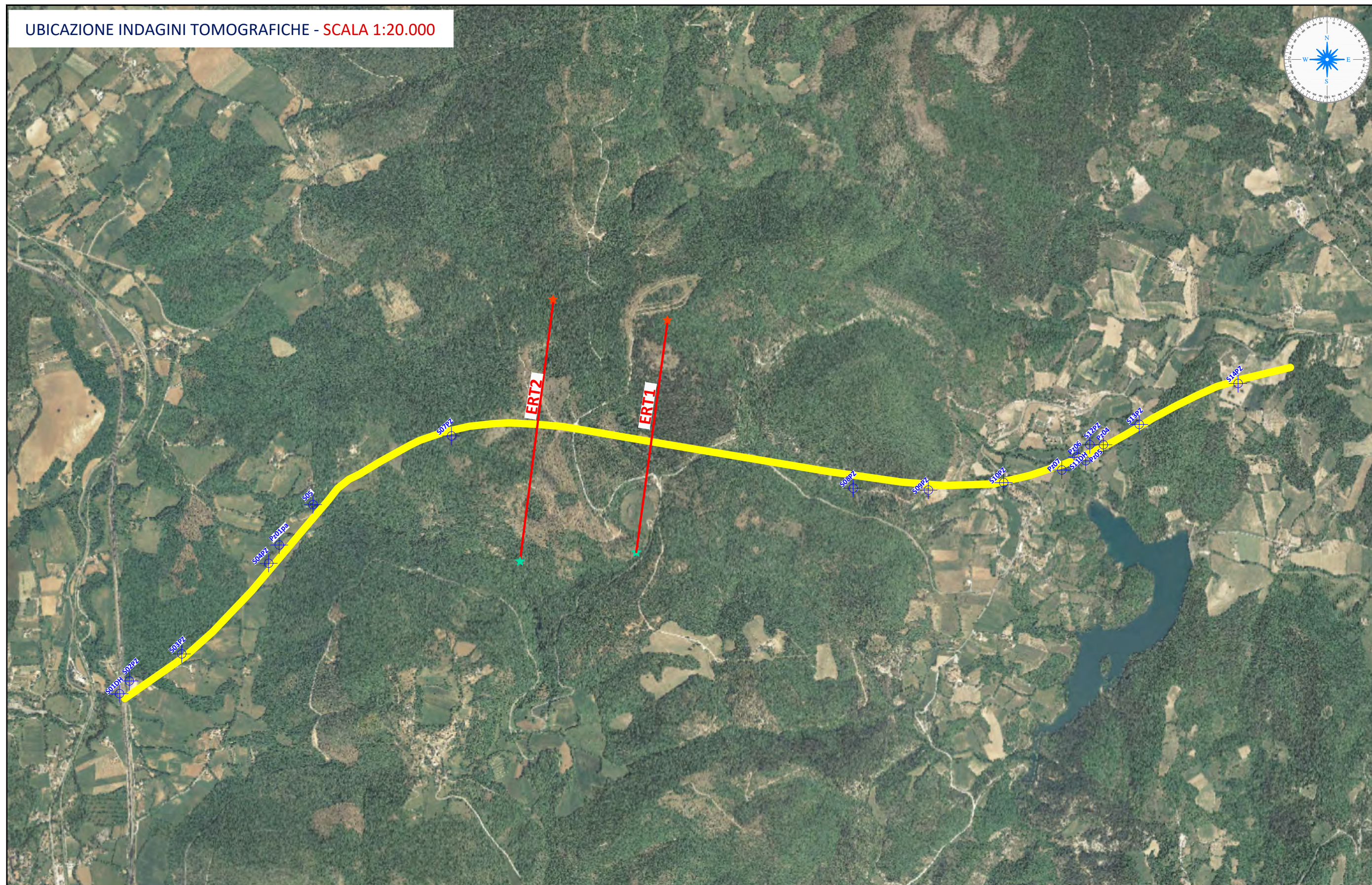
CLIENT:
ANAS S.p.A.

OBJECT:
INDAGINI GEOELETTRICHE
TOMOGRFIE ELETTRICHE TRASVERSALI



Tecno In Ref.: R.C. 343/22
Revision n.: 00
Date: marzo 2023
Description: Prima emissione
Scale: varie

Redacted by: Dr. Luciano Nocerino
Reviewed by: Dr. Geol. Giovanni Antonucci
Approved by: Dr. Geol. Lucio Amato
Document code: 343-22_Anas_Acquasparta_Geoelétrica_Tavola 2
Attached: 2



INDAGINI GEOFISICHE



PROJECT:
SERVIZI DI INDAGINI GEOGNOSTICHE E MONITORAGGIO GEOTECNICO ANTE OPERAM PER IL PROGETTO DEFINITIVO DELL'INTERVENTO: S.S N.685 "DELLE TRE VALLI UMBRE". TRATTO SPOLETO - ACQUASPARTA.

LOCATION:
ACQUASPARTA (TR)

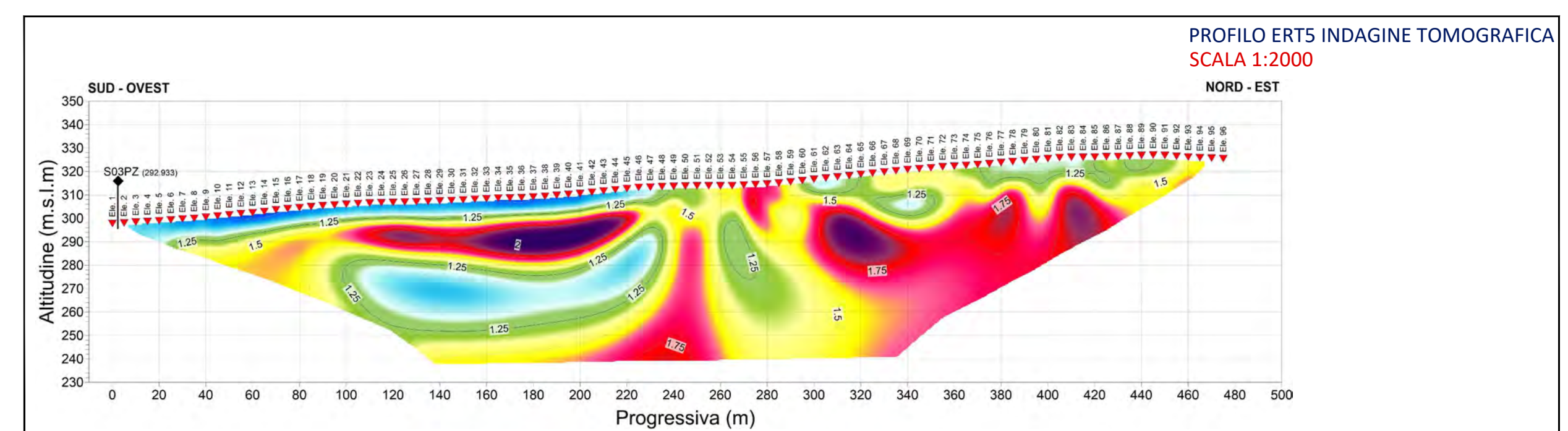
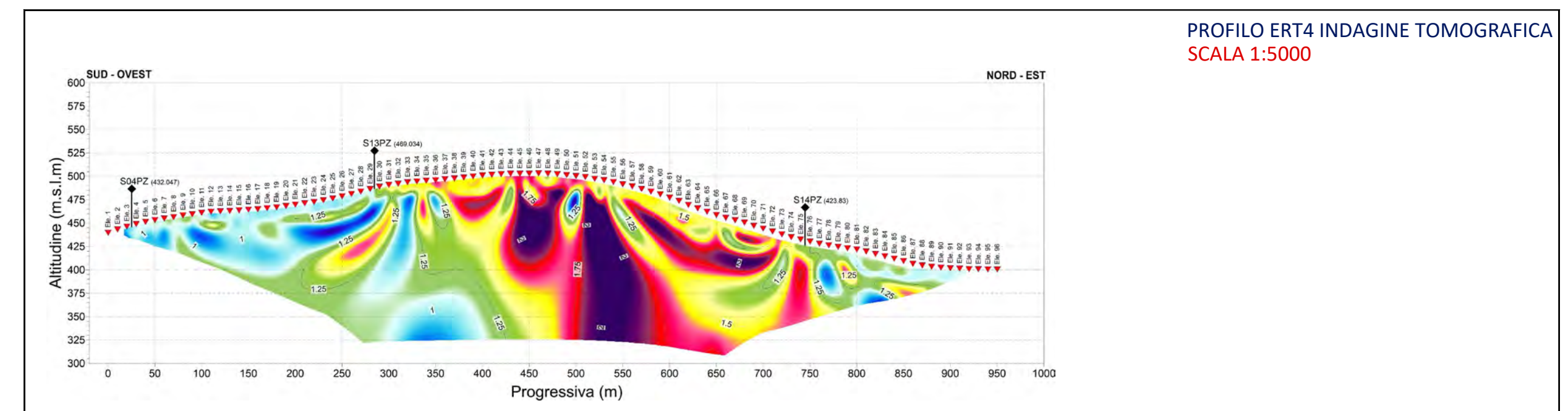
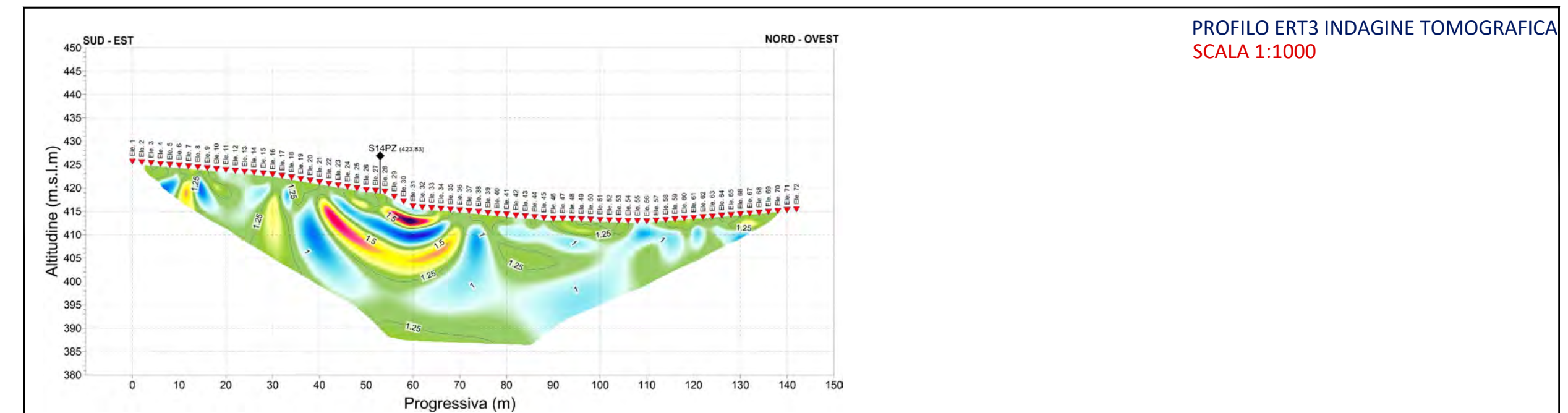
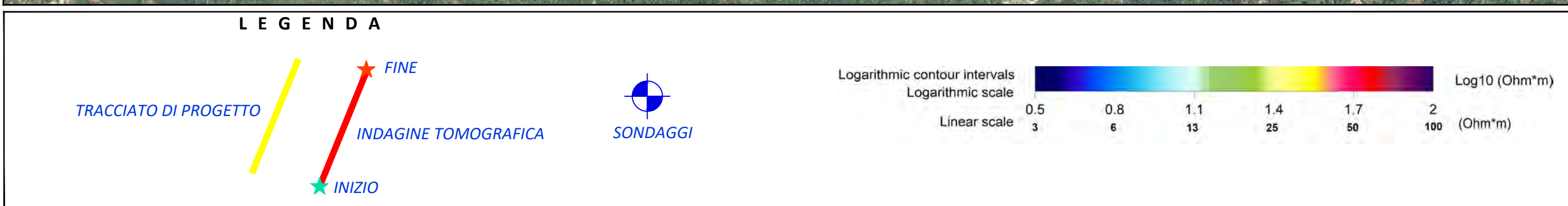
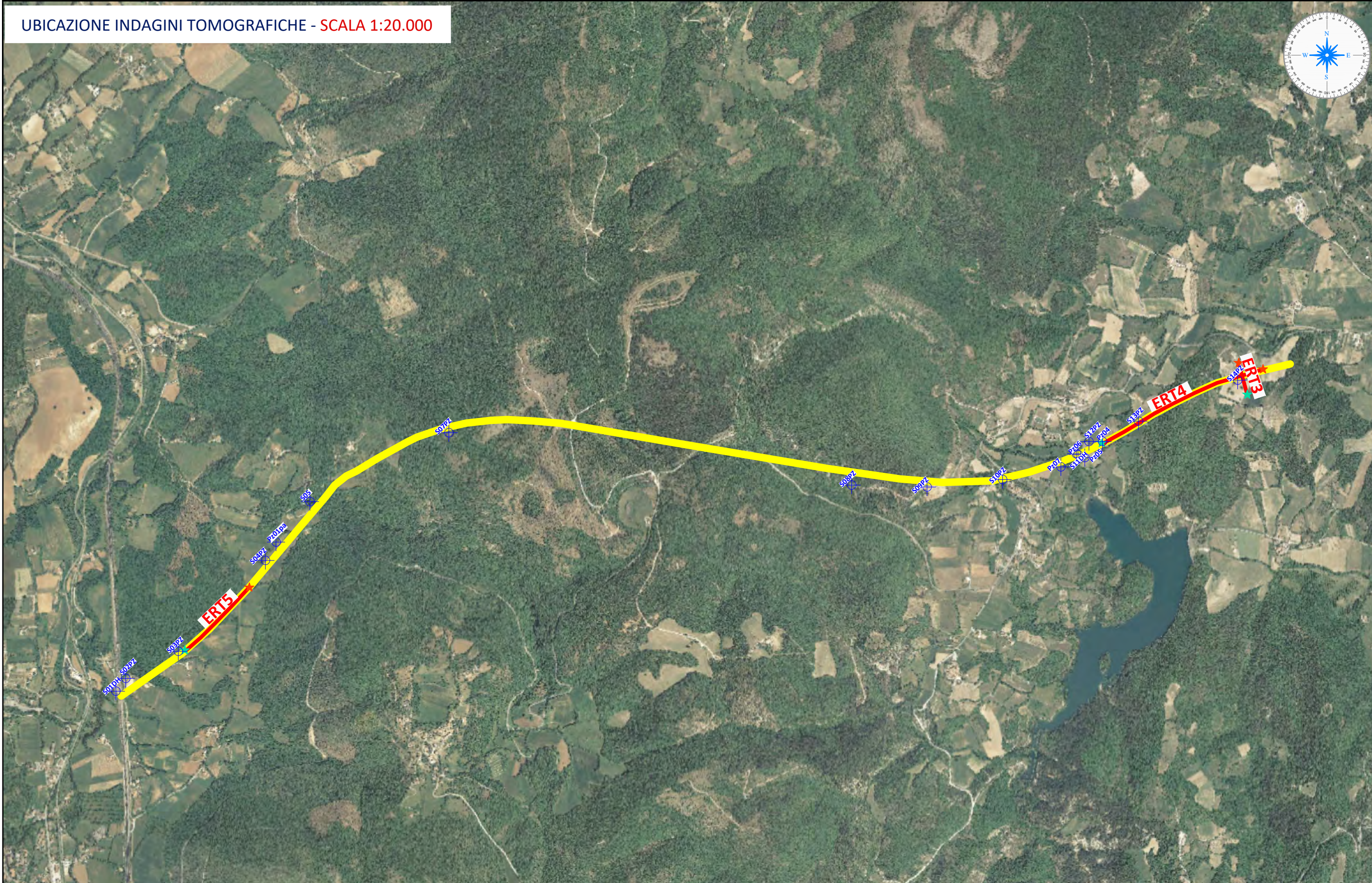
CLIENT:
ANAS S.p.A.

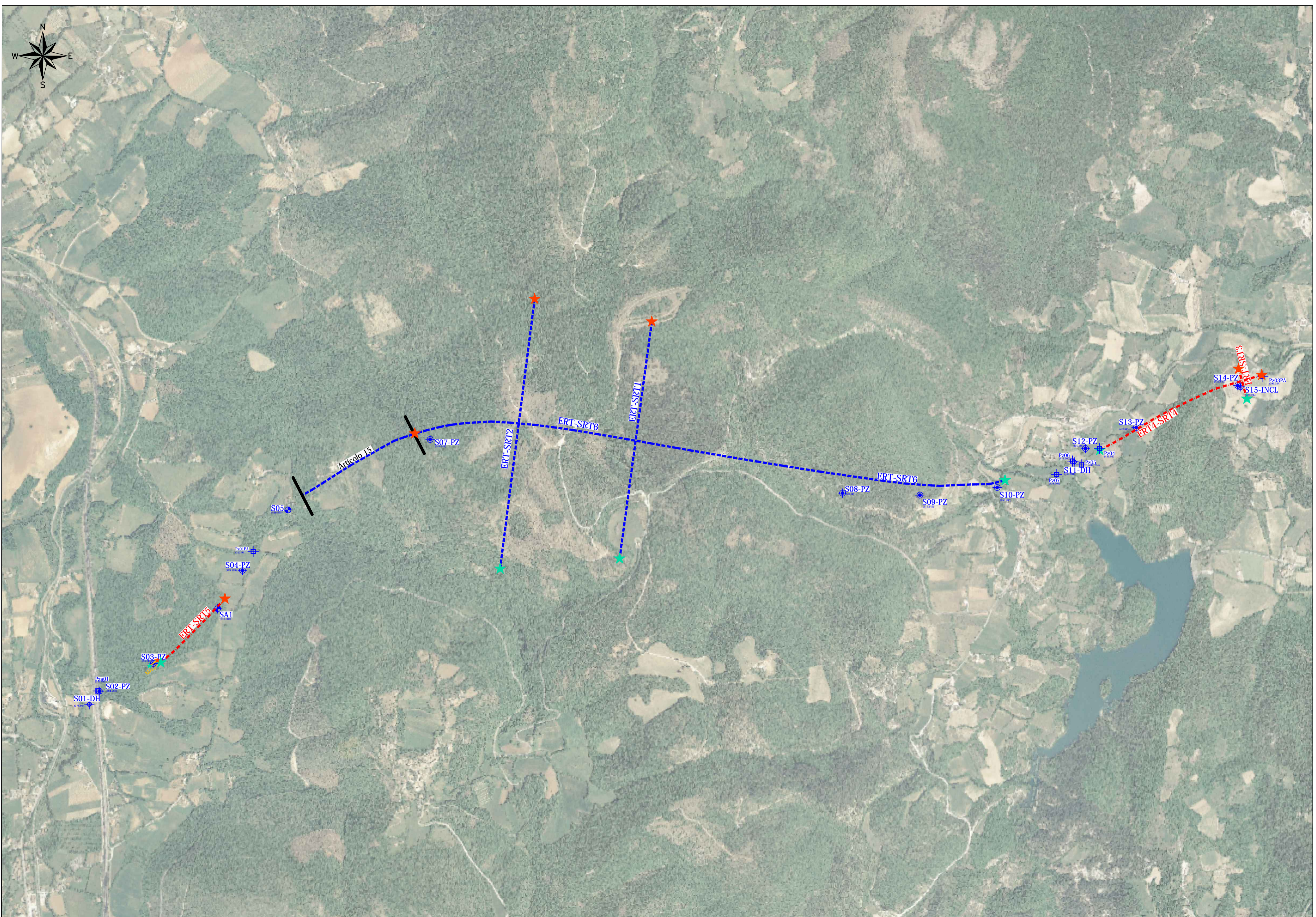
OBJECT:
INDAGINI GEOELETTRICHE
TOMOGRFIE ELETTRICHE "IMBOCCHI GALLERIE"



Tecno In Ref.: R.C. 343/22
Revision n.: 00
Date: marzo 2023
Description: Prima emissione
Scale: varie

Redacted by: Dr. Luciano Nocerino
Reviewed by: Dr. Geol. Giovanni Antonucci
Approved by: Dr. Geol. Lucio Amato
Document code: 343-22_Anas_Acquasparta_Geoelétrica_Tavola 1
Attached: 1





LEGENDA

	Sn (0.00)	Sondaggio a Carotaggio Continuo Quota rilevata (s.l.m.)
	Sn-DH (0.00)	Sondaggio a c.c. con Down-Hole Quota rilevata (s.l.m.)
	Sn-PZ (0.00)	Sondaggio a c.c. con Piezometro Quota rilevata (s.l.m.)
	Sn-INCL (0.00)	Sondaggio a d.n. con Inclinometro Quota rilevata (s.l.m.)
	Pzn/PznPA (0.00)	Pozzetto esplorativo o archeologico Quota rilevata (s.l.m.)
	ERT-SRT6	Indagini ERT - SRT e Sismica a Riflessione
	ERT-SRT4	Indagini ERT e SRT
	MASW	Indagini MASW
		Stesa Inizio
		Stesa Fine

PLANIMETRIA UBICAZIONI INDAGINI

TECNO IN
GEO SOLUTIONS

PROJECT:
PROGETTO DEFINITIVO DELL'INTERVENTO S.S. N.685
"DELLE TRE VALLI UMBRE", TRATTO SPOLETO -
ACQUASPARTA, 2° STRALCIO:
FIORENZUOLA-ACQUASPARTA

LOCATION:
COMUNE DI ACQUASPARTA (TR) E SPOLETO (PG)

CLIENT:
ANAS S.p.A.

OBJECT:
INDAGINI GEOGNOSTICHE, GEOFISICHE E AMBIENTALI



INDAGINI GEOFISICHE



PROJECT:
SERVIZI DI INDAGINI GEOGNOSTICHE E MONITORAGGIO GEOTECNICO ANTE OPERAM PER IL PROGETTO DEFINITIVO DELL'INTERVENTO: S.S N.685 "DELLE TRE VALLI UMBRE". TRATTO SPOLETO - ACQUASPARTA.

LOCATION:
ACQUASPARTA (TR)

CLIENT:
ANAS S.p.A.

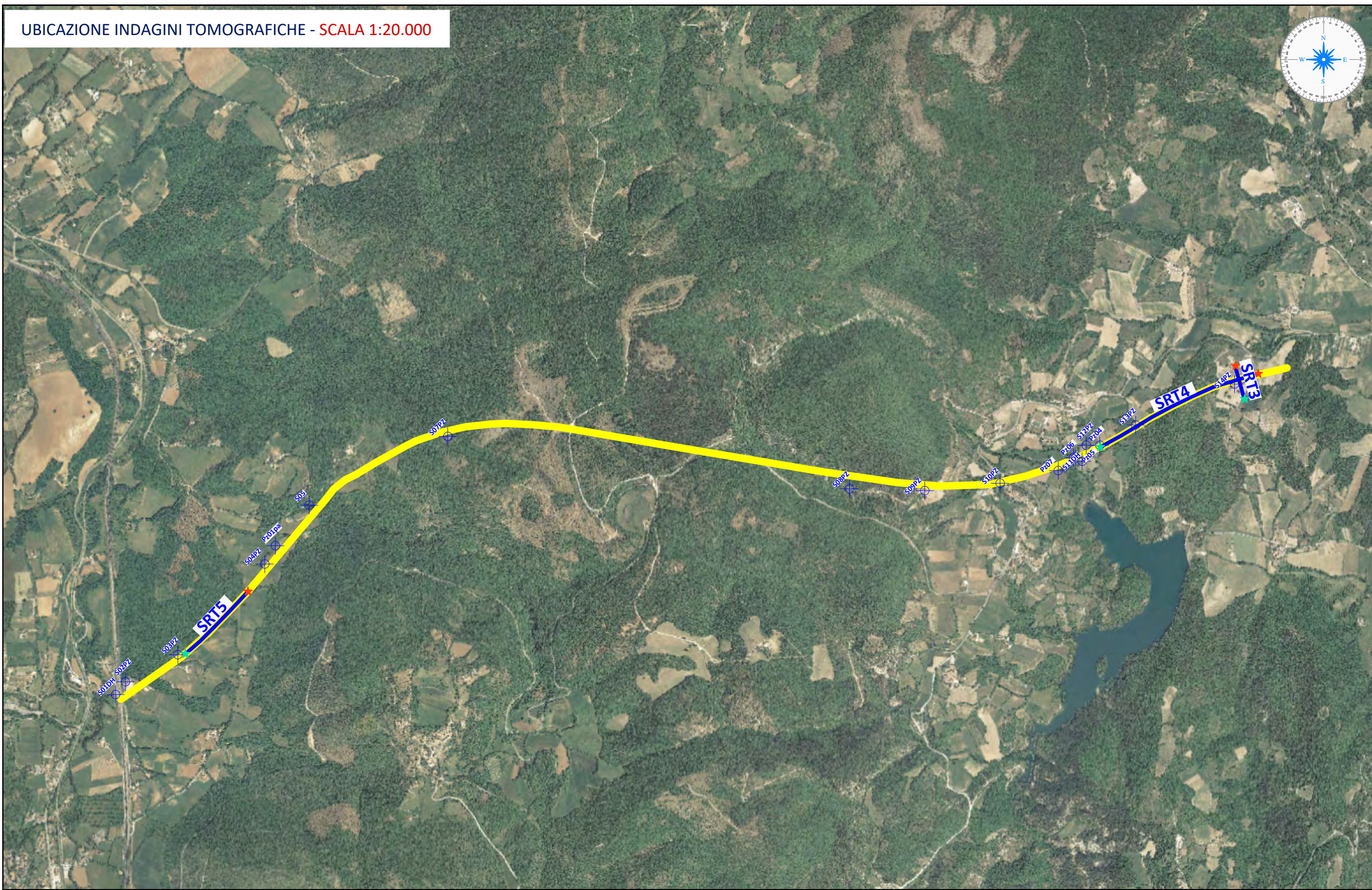
OBJECT:
INDAGINI GEOFISICHE
TOMOGRFIE SISMICHE "IMBOCCHI GALLERIA"



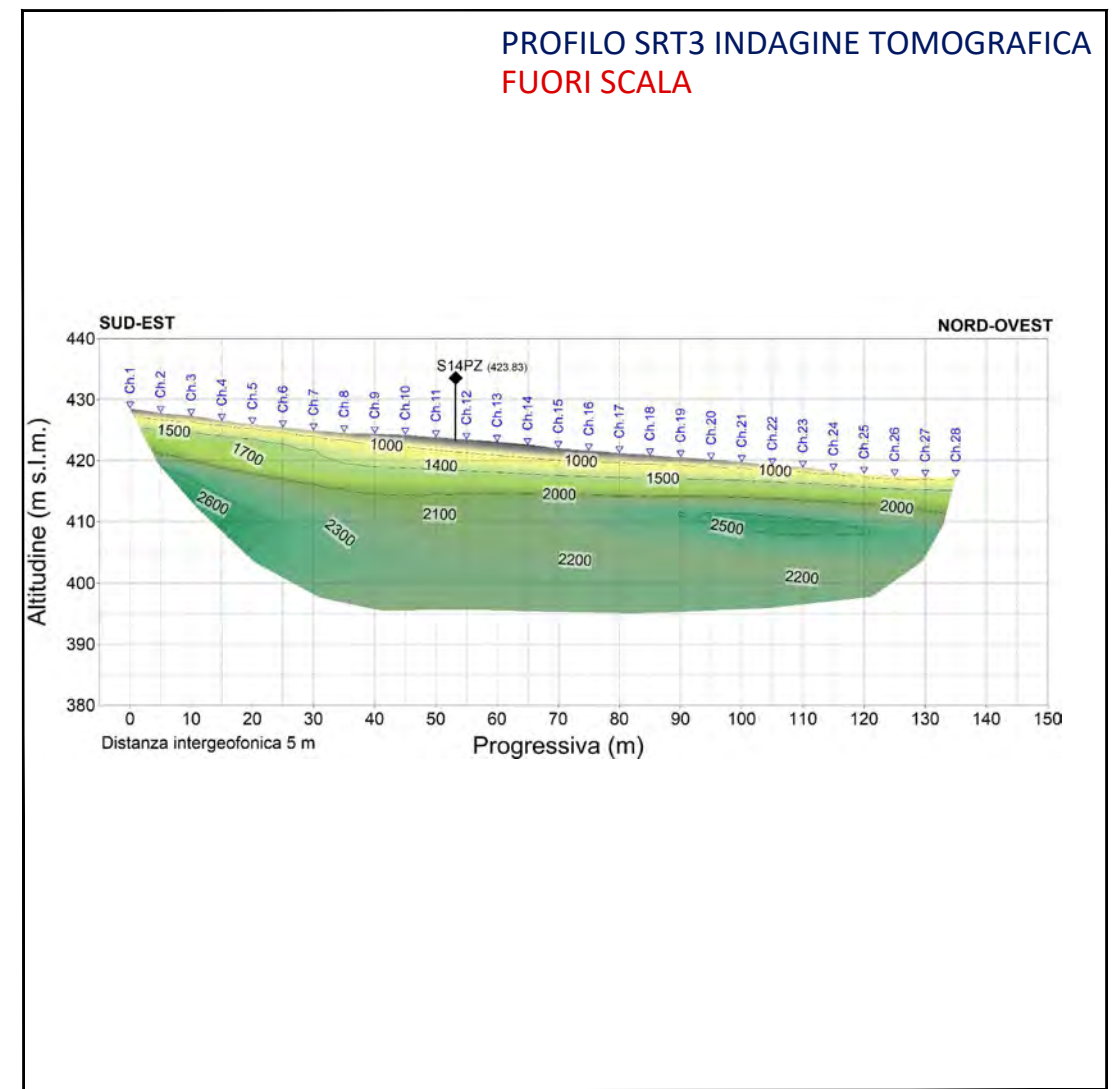
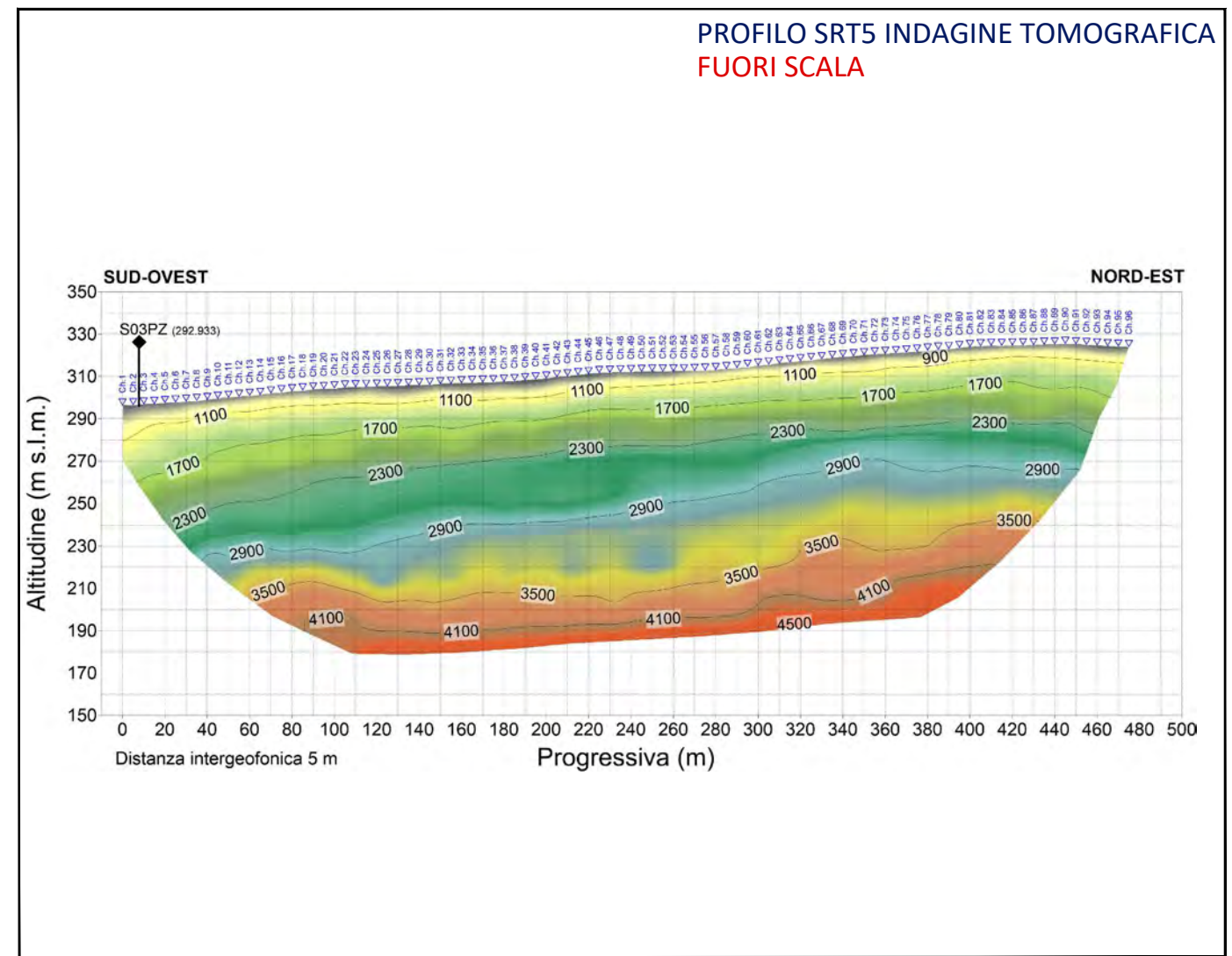
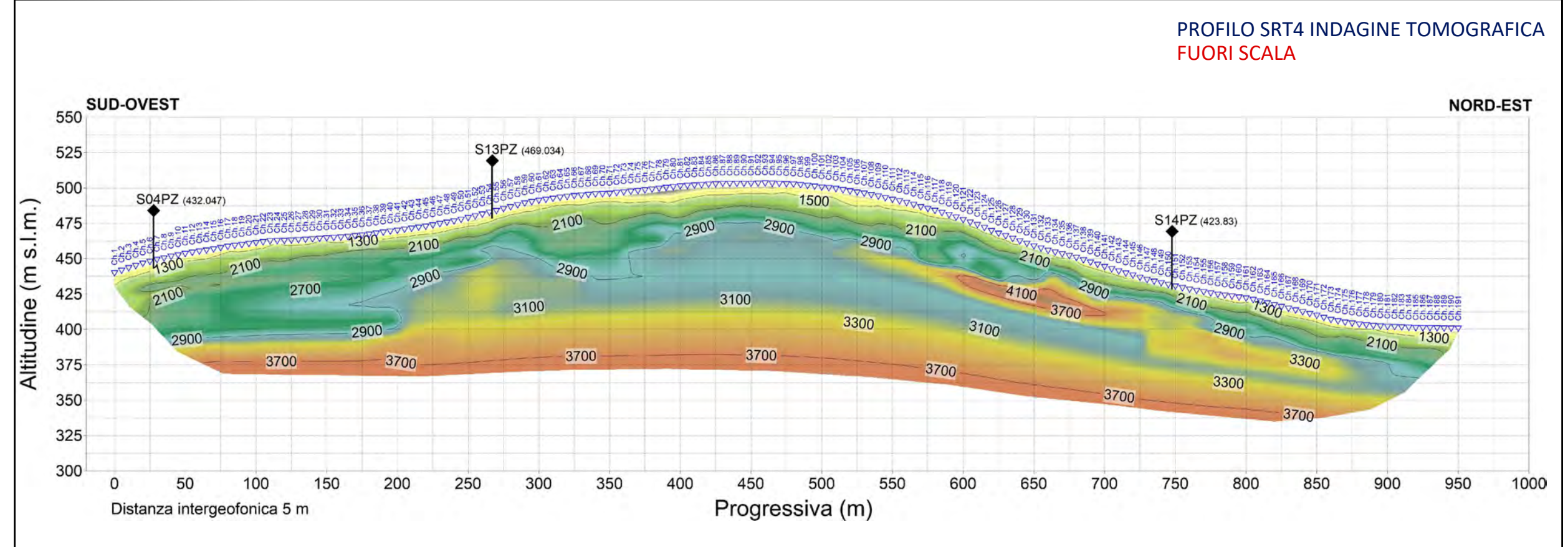
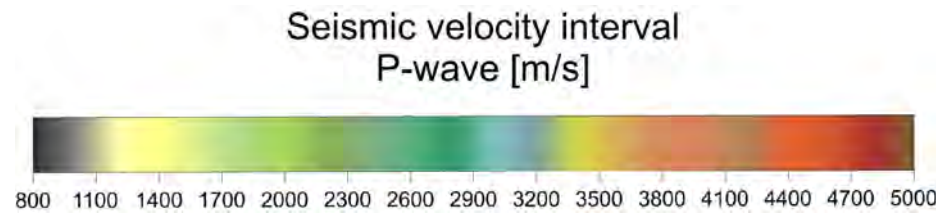
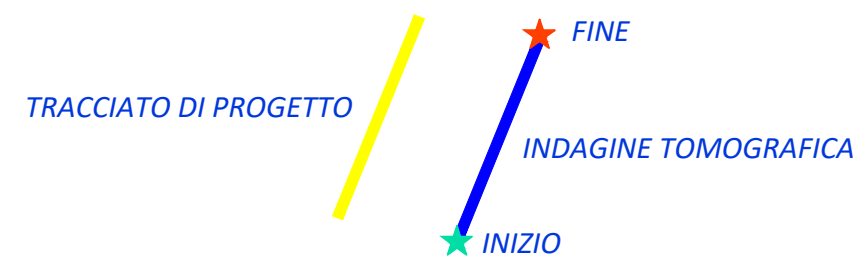
Tecno In Ref.: R.C. 343/22
Revision n.: 00
Date: marzo 2023
Description: Prima emissione
Scale: varie

Redacted by: Dr. Luciano Nocerino
Reviewed by: Dr. Geol. Giovanni Antonucci
Approved by: Dr. Geol. Lucio Amato
Document code: 343-22_Anas_Acquasparta_Sismica a Rifrazione_Tavola 4
Attached: 4

UBICAZIONE INDAGINI TOMOGRAFICHE - SCALA 1:20.000



LEGENDA



INDAGINI GEOFISICHE



PROJECT:
SERVIZI DI INDAGINI GEONOSTICHE E MONITORAGGIO
GEOTECNICO ANTE OPERAM PER IL PROGETTO
DEFINITIVO DELL'INTERVENTO: S.S N.685 "DELLE TRE
VALLI UMBRE". TRATTO SPOLETO - ACQUASPARTA.

LOCATION:
ACQUASPARTA (TR)

CLIENT:
ANAS S.p.A.

OBJECT:
INDAGINI SISMICHE
SISMICA A RIFRAZIONE GALLERIA DELLE ROSE

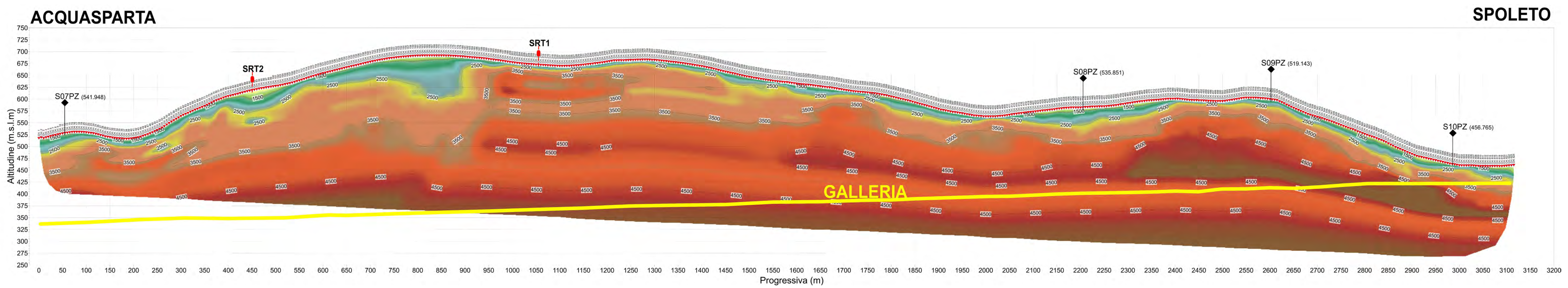


Tecno In. Ref.: R.C. 343/22
Revision n.: 00
Date: marzo 2023
Description: Prima emissione
Scale: varie

Redacted by: Dr. Luciano Nicotri
Reviewed by: Dr. Geol. Giovanni Antonucci
Approved by: Dr. Geol. Lucio Amato
Document code: 343/22_Anas_Acquasparta_Sismica a rifrazione_Tavola 6
Attached: 6



PROFILO SRT6 SISMICA A RIFRAZIONE
SCALA 1:4000



INDAGINI GEOFISICHE



PROJECT:
SERVIZI DI INDAGINI GEOGNOSTICHE E MONITORAGGIO GEOTECNICO ANTE OPERAM PER IL PROGETTO DEFINITIVO DELL'INTERVENTO: S.S N.685 "DELLE TRE VALLI UMBRE". TRATTO SPOLETO - ACQUASPARTA.

LOCATION:
ACQUASPARTA (TR)

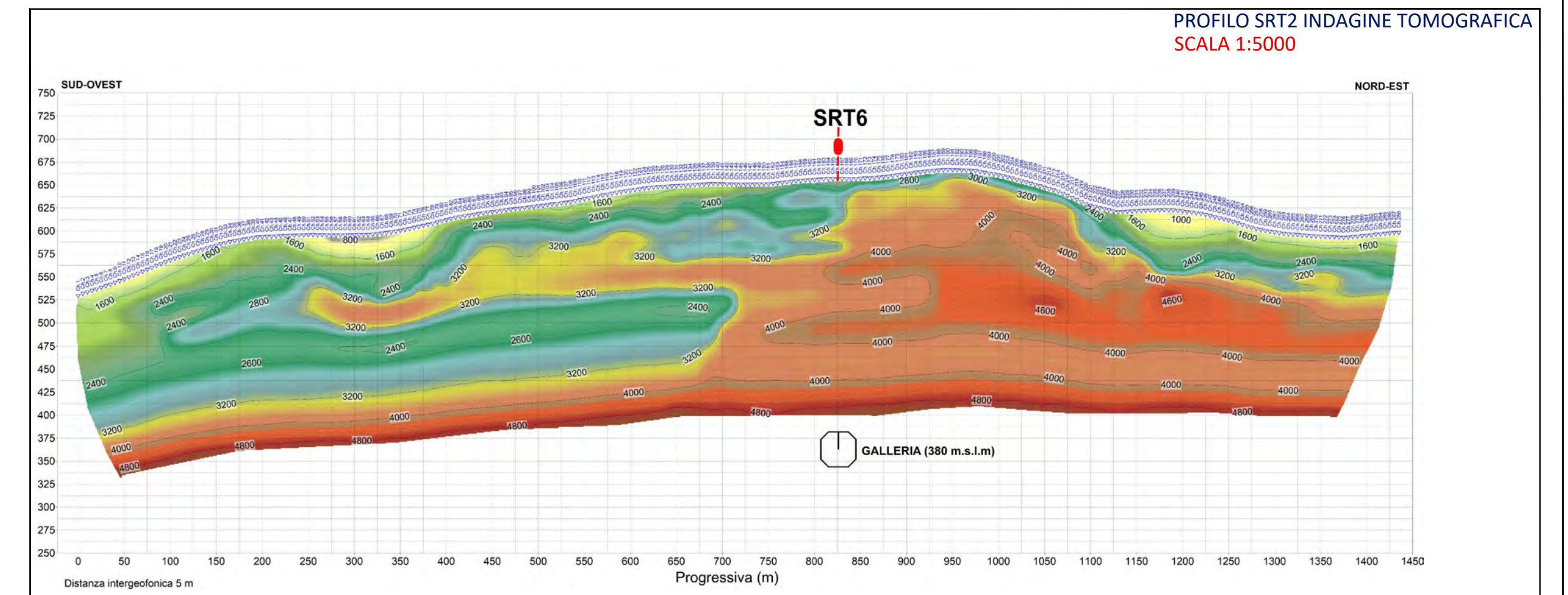
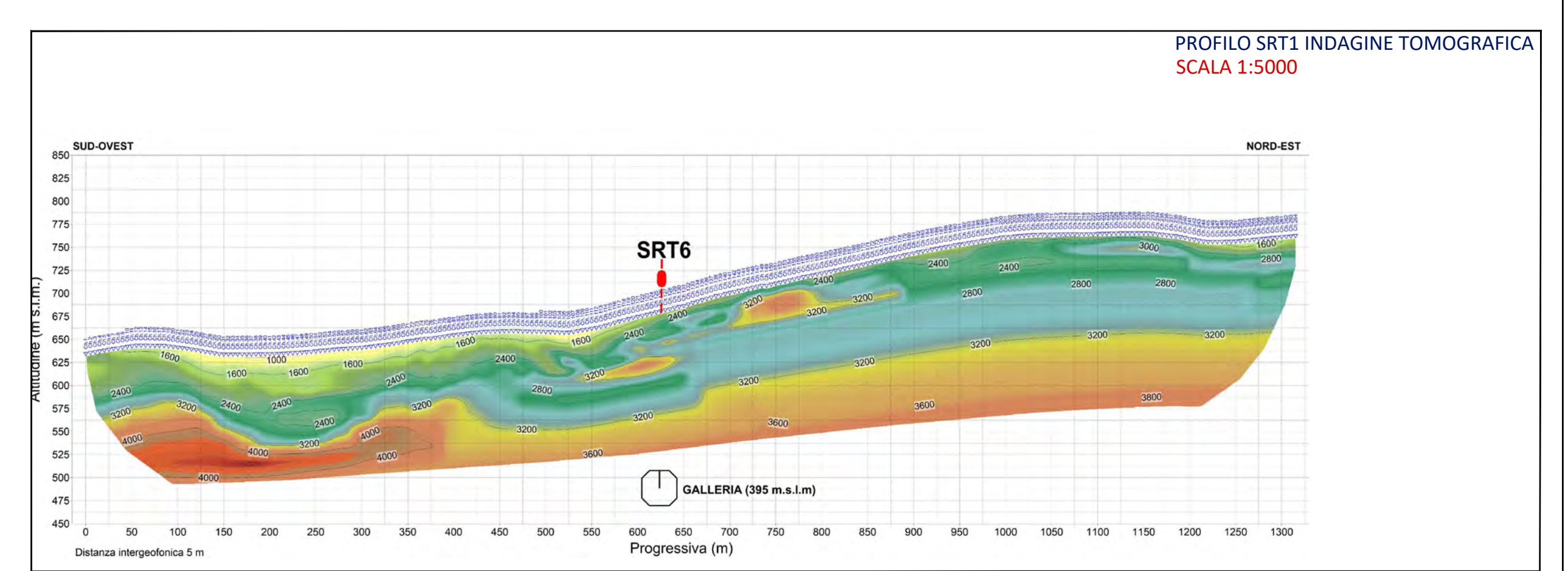
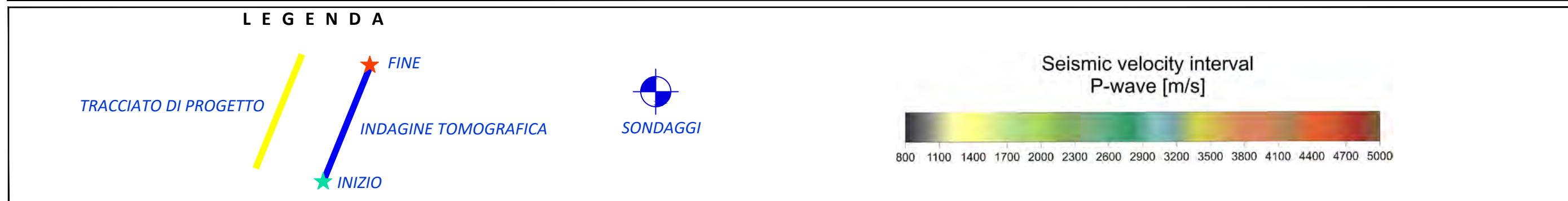
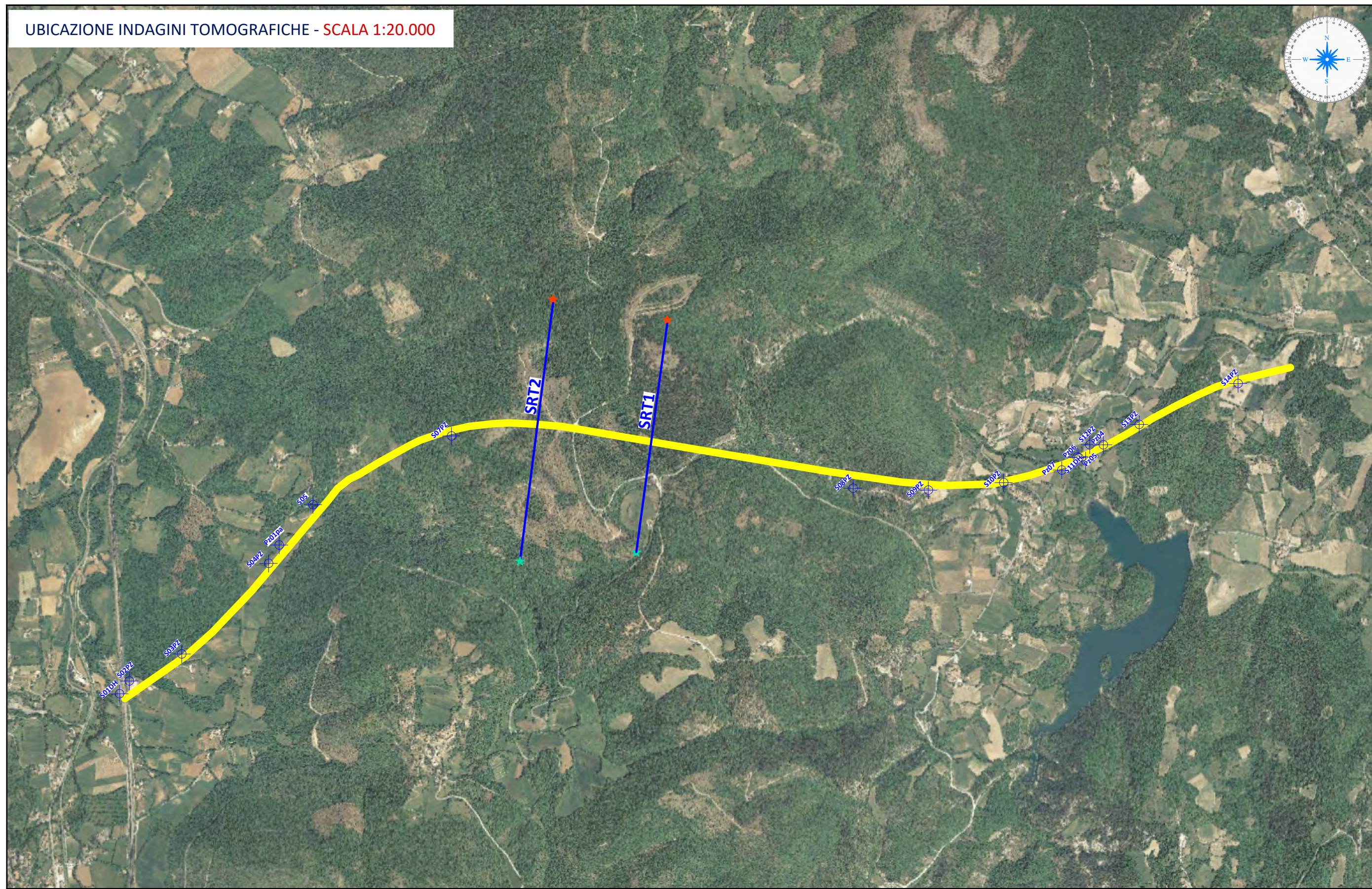
CLIENT:
ANAS S.p.A.

OBJECT:
INDAGINI GEOFISICHE
TOMOGRAFIE SISMICHE TRASVERSALI



Tecno In Ref.: R.C. 343/22
Revision n.: 00
Date: marzo 2023
Description: Prima emissione
Scale: varie

Redacted by: Dr. Luciano Nocerino
Reviewed by: Dr. Geol. Giovanni Antonucci
Approved by: Dr. Geol. Lucio Amato
Document code: 343-22_Anas_Acquasparta_Sismica a Rifrazione_Tavola 5
Attached: 5



INDAGINI GEOFISICHE



PROJECT:
SERVIZI DI INDAGINI GEOGNOSTICHE E MONITORAGGIO
GEOTECNICO ANTE OPERAM PER IL PROGETTO
DEFINITIVO DELL'INTERVENTO: S.S N.685 "DELLE TRE
VALLI UMBRE". TRATTO SPOLETO - ACQUASPARTA.

LOCATION:
ACQUASPARTA (TR)

CLIENT:
ANAS S.p.A.

OBJECT:
INDAGINI SISMICHE
SISMICA A RIFLESSIONE GALLERIA DELLE ROSE



Tecno In. Ref.: E.C. 343/22
Revision n.: 00
Date: marzo 2023
Description: Prima emissione
Scale: varie

Redacted by: Dr. Luciano Nicotri
Reviewed by: Dr. Geol. Giovanni Antonucci
Approved by: Dr. Geol. Lucio Amato
Document code: 343/22_Anas_Acquasparta_Sismica a riflessione_Tavola 8
Attached: 8

UBICAZIONE INDAGINI TOMOGRAFICHE - SCALA 1:20.000



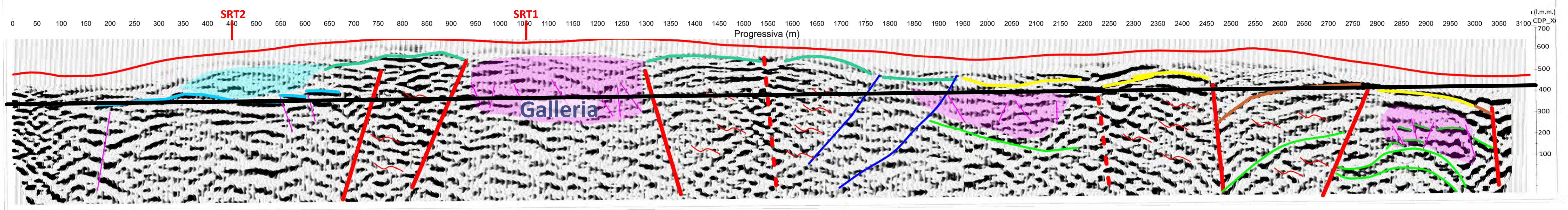
LEGENDA

TRACCIATO DI PROGETTO
INDAGINE SISMICA A RIFLESSIONE
SONDAGGI



LINEA
GALLERIA
SONDAGGI
AREE CAUTELATE DA CARATTERI SPECIFICI

PROFILO SRT6 SISMICA A RIFLESSIONE
SCALA 1:4000



INDAGINI GEOFISICHE

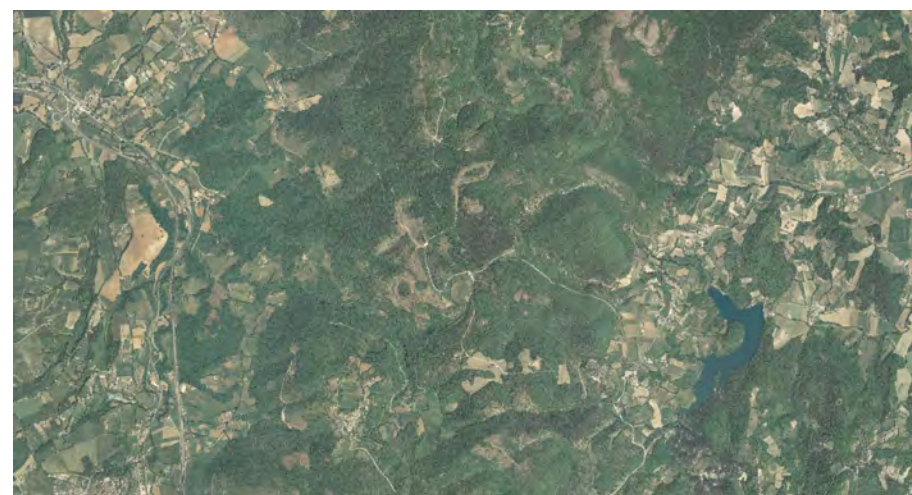


PROJECT:
SERVIZI DI INDAGINI GEOGNOSTICHE E MONITORAGGIO GEOTECNICO ANTE OPERAM PER IL PROGETTO DEFINITIVO DELL'INTERVENTO: S.S N.685 "DELLE TRE VALLI UMBRE". TRATTO SPOLETO - ACQUASPARTA.

LOCATION:
ACQUASPARTA (TR)

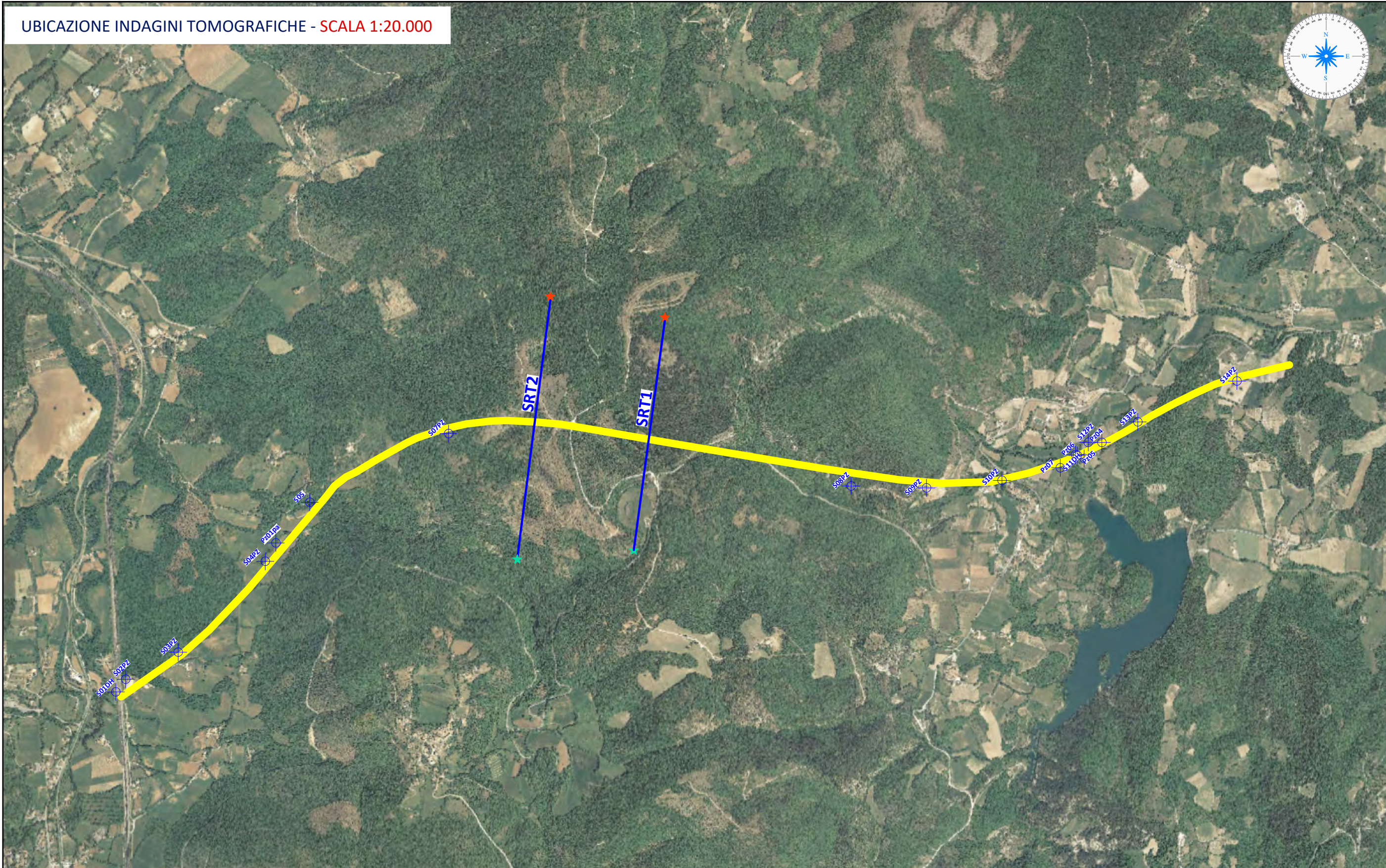
CLIENT:
ANAS S.p.A.

OBJECT:
INDAGINI GEOFISICHE
SISMICA A RIFLESSIONE PROFILI TRASVERSALI



Tecno In Ref.: R.C. 343/22
Revision n.: 00
Date: marzo 2023
Description: Prima emissione
Scale: varie

Redacted by: Dr. Luciano Nocerino
Reviewed by: Dr. Geol. Giovanni Antonucci
Approved by: Dr. Geol. Lucio Amato
Document code: 343-22_Anas_Acquasparta_Sismica a Riflessione_Tavola 7
Attached: 7



LEGENDA

- TRACCIATO DI PROGETTO (Yellow line)
- INDAGINE SISMICA A RIFLESSIONE (Blue line with arrows)
- INIZIO (Green star)
- FINE (Red star)
- FAGLIA (Red dashed line)
- FAGLIA PRESUNTA (Red dashed line with dots)
- FAGLIA INVERSA (Blue dashed line)
- FRATTURE SECONDARIE (Blue dashed line)
- DEPOSITI SACCO DEFORMATI (Blue dashed line)
- AREA CARATTERIZZATA DA FORTE TETTONIZZAZIONE (Pink shaded area)
- AREA CARATTERIZZATA DA CARISMO DIFFUSO (Cyan shaded area)

