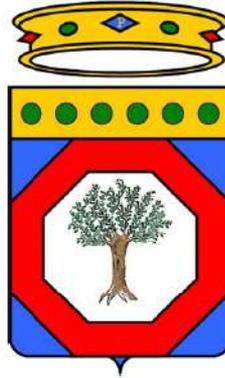




Comune di Lucera



Comune di San Severo



Provincia di Foggia



PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO AGROVOLTAICO DENOMINATO "PALMO", SITO NEL COMUNE DI SAN SEVERO (FG) IN LOCALITA' "BASTIOLA", DI POTENZA AC PARI A 75 MW E POTENZA DC PARI A 71,938 MW, CON IMPIANTO STORAGE DA 18 MW, E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA RETE ELETTRICA NAZIONALE (RTN) NEI COMUNI DI SAN SEVERO E LUCERA (FG)

Proponente:

SOLAR CENTURY FVGC 9 S.R.L.
 Via Caradosso, 9 – 20123 Milano
 PEC: sc-fvgc9@pec.it

Progettista:

np enne. pi. studio s.r.l.
 Lungomare IX Maggio, 38 - 70132 Bari
 Tel/Fax +39 0805346068 - 0805346888
 e-mail: pietro.novielli@ennepistudio.it

Identificativo AU:

17KS710_Relazionegeotecnica

Nome elaborato interno:

PAL_16.1 – Relazione geotecnica

Tecnici e Specialisti:

- Dott.ssa Paola D'Angela: studi e indagini archeologiche;
- Dott.ssa Sara Di Franco: studio d'impatto acustico;
- Dott. Antonello Fabiano: studi e indagini geologiche e idrogeologiche;
- Dott. Gianluca Fallacara: rilievo planoaltimetrico e indagini sismiche
- Floema S.r.l.: progetto agricolo, studio pedoagronomico, piano di monitoraggio ambientale e rilievo essenze e paesaggio agricolo;
- Dott. Gabriele Gemma: elaborati grafici, documentazione tecnica, studio ambientale e paesaggistico
- INSE Srl : progettazione opere elettriche di connessione ad alta tensione

Descrizione Elaborato:

Relazione geotecnica per le opere relative al campo agrovoltaiico, al cavodotto di connessione e alla stazione di elevazione in progetto

Timbro e firma



0 3					Scala: varie
0 2					
0 1					
0 0	Agosto 2023	Dott. Antonello Fabiano	Enne Pi Studio Srl	Solar Century FVGC 9 Srl	
Rev	Data	Redatto	Verificato	Approvato	

Sommario

Indice delle tavole	1
Premessa	3
1. Ubicazione dell'area oggetto di studio	4
2. Inquadramento geologico generale	6
2.1. Inquadramento geologico di dettaglio	8
3. Piano stralcio per la difesa dal rischio idrogeologico (PAI).....	9
4. Indagini eseguite.....	12
7.1. Risultati derivanti dalle indagini eseguite	13
5. Sismicità del territorio	18
6. Pericolosità sismica di base	22
9.1. Vita nominale, classi d'uso e periodo di riferimento	22
9.2 Stati limite, probabilità di superamento e periodo di ritorno.....	24
9.3 Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche	26
9.4 Definizione della pericolosità sismica di base	29
9.5 Pericolosità sismica di sito.....	33
7. Caratterizzazione geotecnica dei litotipi	40
8. Opere di Connessione alla RTN.....	41
Conclusioni	41
TAVOLE IN ALLEGATO E RELAZIONE SULLE INDAGINI ESEGUITE.....	43

Indice delle tavole

Tavola 1 – Cartografia amministrativa

Tavola 2 – Carta topografica d'Italia IGM 1:25.000

Dott. Geol. Antonello Fabiano – Via San Lorenzo 209, 72021 Francavilla Fontana (BR)

Cell: 3497892919

E-Mail: antonello.fabiano@libero.it

Sito Web: www.antonellofabiano.it

Tavola 3 – Ortofoto (Google 2020)

Tavola 4 – Carta geologica di dettaglio

Tavola 5 – Digital Terrain Model (DTM)

Tavola 6 – Reticolo Idrografico – Carta idrogeomorfologica (Foglio 396-408)

Tavola 7A - Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) – Aree a Pericolosità Inondazione

Tavola 7B - Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) Aree a pericolosità Geomorfologica

Premessa

Lo scrivente **dott. Geol. Antonello Fabiano**, iscritto all'Ordine dei Geologi della Regione Puglia al n. 675, su incarico della **Enne.Pi Studio srl** e per conto della proponente Società **Solar Century FVGC 9 Srl**, ha redatto la presente relazione tecnica che intende esaminare ed evidenziare le caratteristiche geotecniche relative all'area di sedime interessata dall'intervento di realizzazione di un impianto agrovoltaiico denominato "Palmo" in agro di San Severo (FG) alla Loc. "Bastiola" e delle relative opere di connessione alla rete di trasmissione elettrica nazionale (RTN).

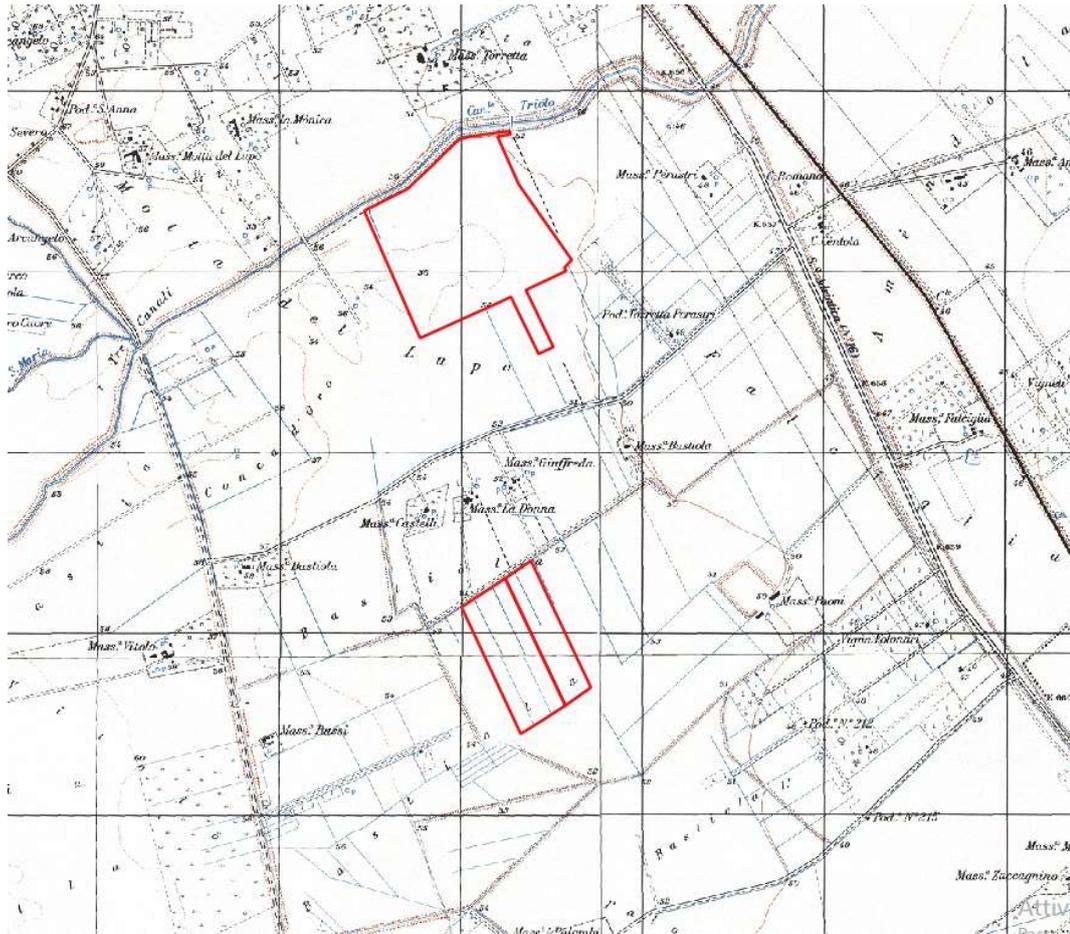
Lo studio è stato svolto secondo quanto prescritto dalle disposizioni delle nuove Norme Tecniche sulle Costruzioni D.M. del 17/01/2018 e dall'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n°3274 del 20/03/2003. L'area oggetto di studio è stata inquadrata in relazione al Piano di Assetto Idrogeologico della Regione Puglia (PAI) mediante la perimetrazione delle aree a pericolosità idraulica, geomorfologica e definendo la relativa classe di rischio così come previsto dal DPCM 29 settembre 1998 "Atto di indirizzo e coordinamento per l'individuazione dei criteri relativi agli adempimenti di cui all'art. 1, commi 1 e 2, del decreto legge 11 giugno 1998, n. 180."

È stata valutata anche la compatibilità dell'intervento con le indicazioni del Piano di Tutela della Acque della Regione Puglia. Le indicazioni qui raccolte derivano da un rilevamento geologico di dettaglio, dalle conoscenze geologiche dello scrivente, da ricerche cartografiche e bibliografiche e dalle indagini sismiche eseguite in sito. In una prima fase, quindi, si è provveduto all'acquisizione di tutte le cartografie esistenti, generali e tematiche, per precisare le caratteristiche e le configurazioni naturali dei luoghi. In particolare è stata consultata la documentazione cartografica riportata sulla tavoletta I.G.M. "Masseria Faralla" I NE (scala 1:25000) del foglio "Lucera" n. 163 (scala 1:100000), ortofoto a colori della zona, CTR Regione Puglia in scala 1:5000, la cartografia tematica relativa alla geologia e quindi la Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100000 del foglio "Lucera"

n. 163, note illustrative del foglio n. 163 "Lucera" della Carta Geologica d'Italia. Si precisa, infine, che laddove non opportunamente esplicitato, tutte le informazioni contenute nella presente si riferiscono all'area di installazione dei moduli fotovoltaici, al percorso del cavidotto di connessione nonché all'area di sedime della stazione di trasformazione.

1. Ubicazione dell'area oggetto di studio

L'area di studio è situata nel Comune di San Severo (FG), in territorio agricolo, nella parte Sud-Est rispetto al centro abitato e precisamente alla Loc. "Bastiola". I lotti, con accesso da strade interpoderali, si trovano ad una quota compresa tra i 49 ed i 53 m s.l.m. Topograficamente ricade nel foglio 163 "Lucera" Tavoletta "Masseria Faralla" I NE ed il punto centrale del sito è identificato dalle coordinate: 41.60521° N - 15.44371° E.



5

Ubicazione su stralcio del F. 163 IGM – Masseria Faralla I NE in scala 1:25000 nell'originale



Ripresa fotografica Area ubicazione intervento

A tal proposito si rimanda alle seguenti tavole in allegato:

- Tavola 1 Cartografia amministrativa
- Tavola 2 Carta topografica d'Italia IGM 1:25.000
- Tavola 3 Ortofoto (Google 2020)

2. Inquadramento geologico generale

L'area ricade nel Foglio 163 "Lucera" della Carta Geologica d'Italia 1:100.000.

All'interno del Foglio Lucera, le facies si alternano in modo vario e nell'ambito di un unico ciclo di sedimentazione ove la definizione dell'età dei singoli complessi litostratigrafici che lo costituiscono non può essere ovviamente stabilita se non tenendo in giusto conto le faune più giovani ed i reali rapporti di giacitura fra i vari complessi stessi.

Come conseguenza di quanto detto si è tracciato quello schema dei rapporti stratigrafici, inserito nel F° « Lucera », dal quale risulta: 1) un primo ciclo di sedimentazione miocenica, interessato da differenziazione dei rapporti

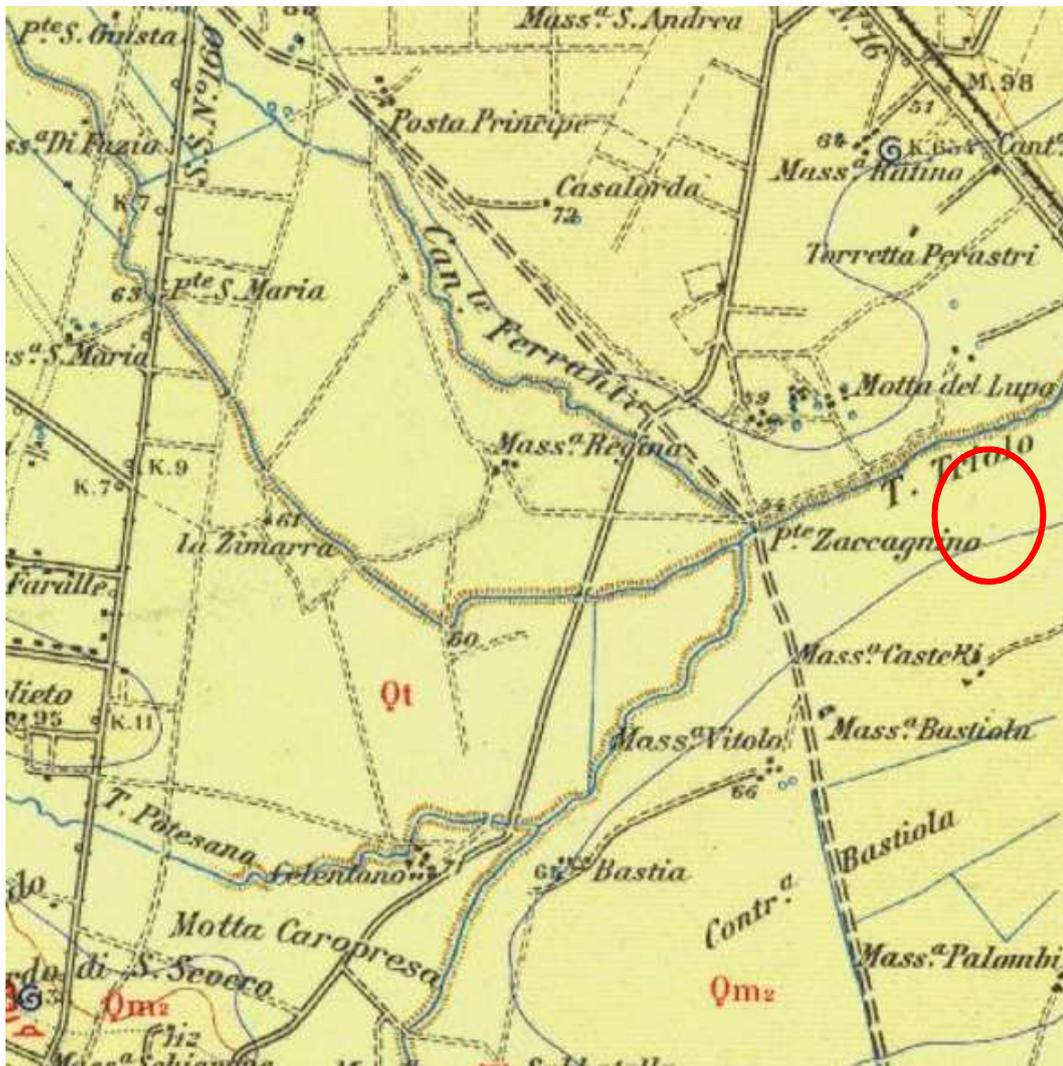
Dott. Geol. Antonello Fabiano – Via San Lorenzo 209, 72021 Francavilla Fontana (BR)
Cell: 3497892919

E-Mail: antonello.fabiano@libero.it
Sito Web: www.antonellofabiano.it

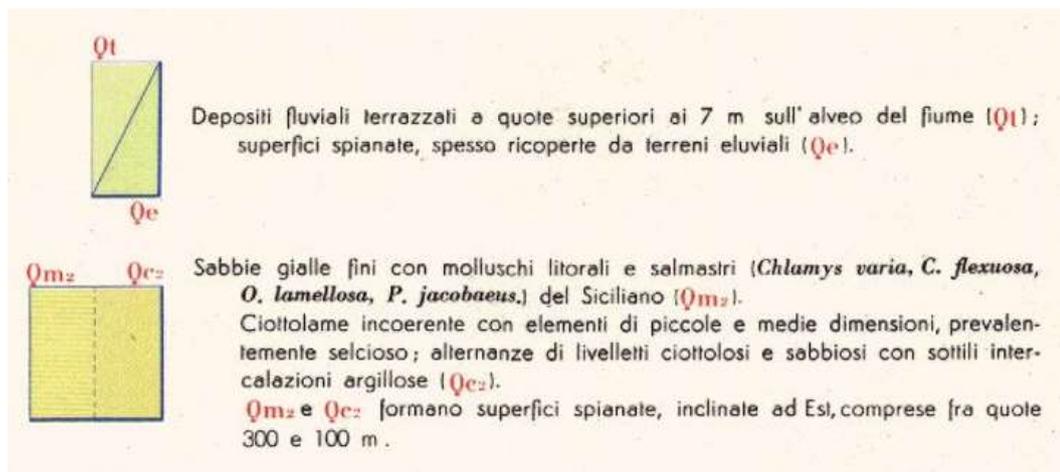
quantitativi delle associazioni litologiche e da una probabile, piccola fase orogenica, come quella indicata alla base di Msa; 2) un secondo ciclo di sedimentazione, indicato dai terreni pliocenici e pleistocenici depositati in continuità fino alla emersione della regione; 3) un ciclo di attività continentale con limitate deposizioni e con intense erosioni delle formazioni più antiche, erosioni manifestatesi ovunque a partire dalla fine del Pleistocene antico.

7

Nell'immagine seguente si mostra l'ubicazione dell'area d'intervento in riferimento alla Carta Geologica d'Italia in scala 1:100000



Ubicazione su Carta Geologica d'Italia foglio 163 "Lucera" – 1:100000 nell'originale



2.1. Inquadramento geologico di dettaglio

Dal punto di vista geologico, al di sotto della copertura di terreno vegetale (circa 2 m), localmente l'area in esame è caratterizzata dalla presenza di sabbie appartenenti alla coltre alluvionale sabbiosa (Q^t) e sabbie fini di colore prevalentemente giallastro (Q_{m2}).

In particolare, sulla base del rilevamento geologico in situ, dalle conoscenze dello scrivente e dalle indagini eseguite, la stratigrafia del sito sottostante l'area oggetto di studio si caratterizza nella seguente maniera partendo dall'alto verso il basso:

- Terreno vegetale (spessore circa 2 m)
- Depositi della coltre alluvionale, prevalentemente sabbiosi, che si attestano ad una profondità di circa 3 m dal p.c.
- Sabbie fini giallastre

A tal proposito si rimanda ai seguenti elaborati grafici:

Tavola 4 Carta geologica di dettaglio



Ubicazione dell'area di studio sulla Carta Idrogeomorfologica della Regione Puglia (SIT) – Foglio 396 e 408

3. Piano stralcio per la difesa dal rischio idrogeologico (PAI)

L'area di che trattasi rientra nel territorio di competenza dell'Autorità di Bacino della Puglia del quale è stato consultato il relativo piano stralcio, per verificare se i terreni in oggetto ricadessero nelle relative perimetrazioni.

Con deliberazione del comitato istituzionale Autorità di Bacino della Puglia del 30/11/2005 è avvenuta l'approvazione del Piano di Bacino della Puglia, Stralcio "Assetto Idrogeologico" e delle relative misure di salvaguardia – L.R. n.19 del 9/12/2002. La legge nazionale 183/1989 sulla difesa del suolo ha stabilito che il bacino idrografico debba essere l'ambito fisico di pianificazione che consente di superare le frammentazioni prodotte dall'adozione di aree di riferimento aventi confini solamente amministrativi. Strumento di governo del bacino idrografico è appunto il Piano di Bacino, ovvero il documento attraverso il quale sono pianificate le azioni e le norme d'uso volte alla conservazione e valorizzazione del suolo e alla corretta utilizzazione delle acque.

Il Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) della Regione Puglia si pone quindi, come obiettivo, la conoscenza del territorio di competenza dell'autorità di bacino in termini di caratteristiche morfologiche, geologiche e idrologiche, effettuando al contempo un'analisi storica degli eventi critici (frane e alluvioni).

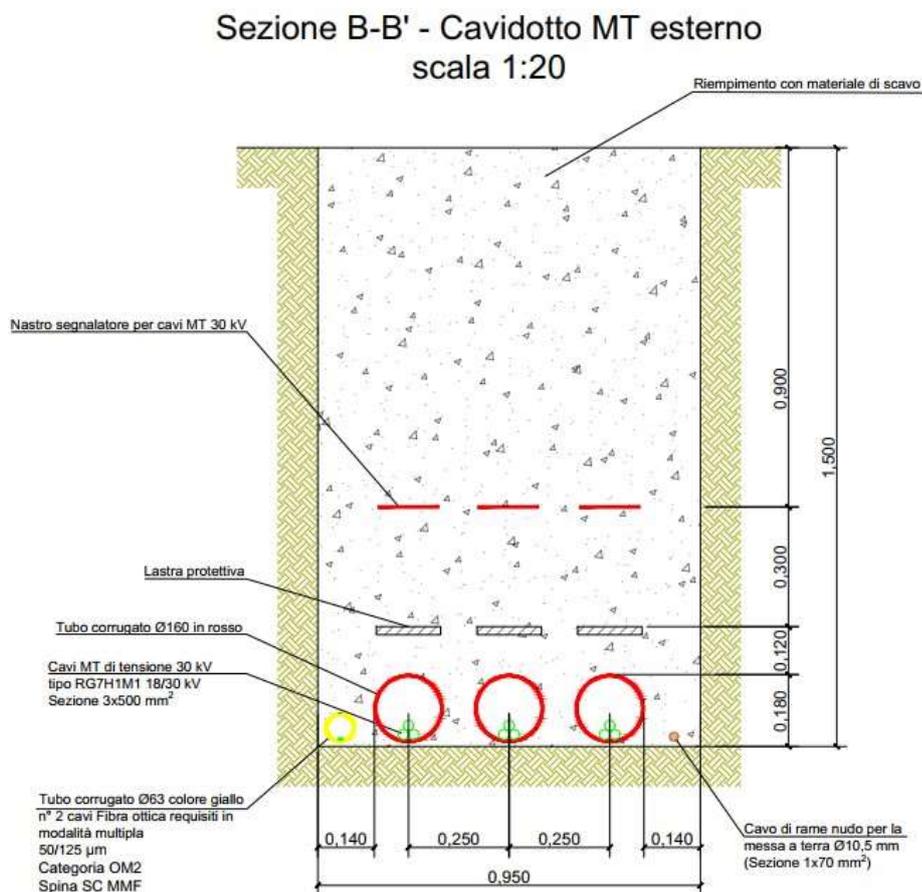
In tal modo il PAI individua sul territorio regionale le aree soggette a dissesto idrogeologico e gli interventi da realizzare per la mitigazione dei dissesti. In particolare vengono individuate le zone soggette a rischio da frana e/o idraulico e le zone a diversa pericolosità idraulica.

Dall'analisi delle cartografie ufficiali, si può desumere quanto segue:

- L'area di progetto nonché il cavidotto e la stazione di trasformazione, **non ricadono** nell'ambito delle fasce di pericolosità geomorfologica così come individuate dal P.A.I.
- Le particelle interessate dal progetto nonché il percorso in progetto del cavidotto **ricadono** nell'ambito di zone a rischio di allagamento ovvero in aree ad alta, media e bassa pericolosità idraulica, così come individuate dal P.A.I.

In riferimento alle interferenze con le perimetrazioni di Alta, Media e Bassa pericolosità idraulica, si sottolinea che nel layout dell'impianto, tali porzioni non sono interessate da alcuna opera progettuale. Anche l'area di sedime della stazione di trasformazione è fuori da aree ad Alta, Media o Bassa pericolosità idraulica. Rispetto, invece, al percorso del cavidotto si utilizzerà la metodologia di posa in opera "NO DIG" nei tratti in cui lo stesso interseca il reticolo idrografico trasversalmente e ad una profondità non inferiore ai 1.5 m al di sotto dell'alveo dei corsi d'acqua intersecati garantendo, allo stesso tempo, un ampio margine di sicurezza idraulica sia nei confronti dei deflussi superficiali che di quelli (eventuali) sotterranei. (Si rimanda alla relazione idrologica ed idraulica per maggiori dettagli). Nelle restanti porzioni interferenti con pericolosità idraulica Alta, Media e Bassa, nelle fasi successive allo scavo verranno ripristinate le condizioni morfologiche

originarie e pertanto non si modificherà in alcuna maniera l'attuale assetto idrologico ed idraulico dell'area. Segue sezione tipo.



Sezione tipo scavo cavidotto in scala 1:20 nell'originale

Per la rappresentazione cartografica vedansi Tavola 7A - Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) – Aree a Pericolosità Inondazione e Tavola 7B - Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) Aree a pericolosità Geomorfologica.

4. Indagini eseguite

Al fine di procedere ad una caratterizzazione geologica, dell'area in esame sono state eseguite dal dott. Geol. Gianluca Fallacara di Bitonto (BA), le seguenti indagini geofisiche:

12

- n°2 prospezioni di sismica a rifrazione in onde P (REF01)
- n°2 prospezioni Multichannel analysis of Surface Waves (MASW01)

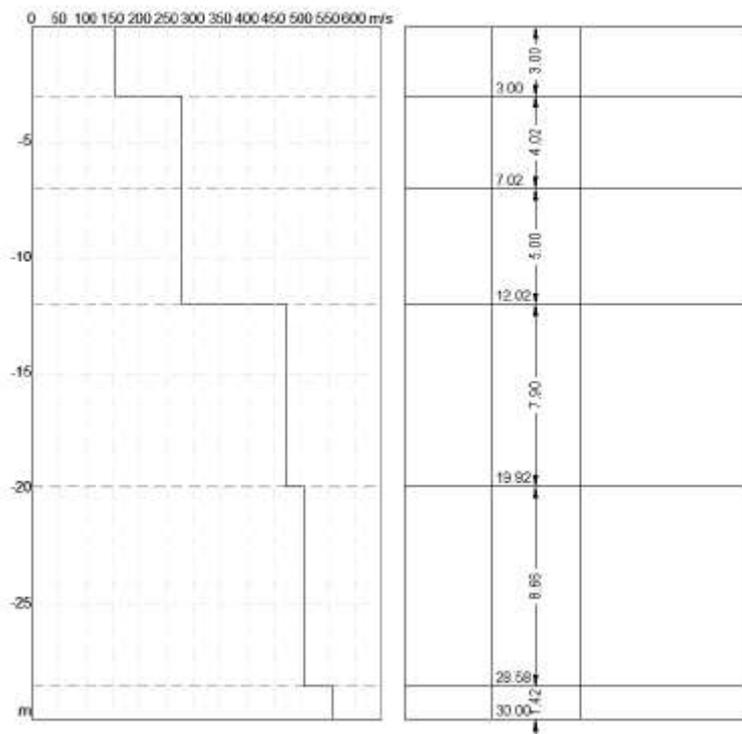
Le caratteristiche di ciascuna indagine, la strumentazione utilizzata, le operazioni di esecuzione, l'esatta ubicazione ed i relativi risultati sono dettagliatamente descritti nella relazione in allegato alla presente.



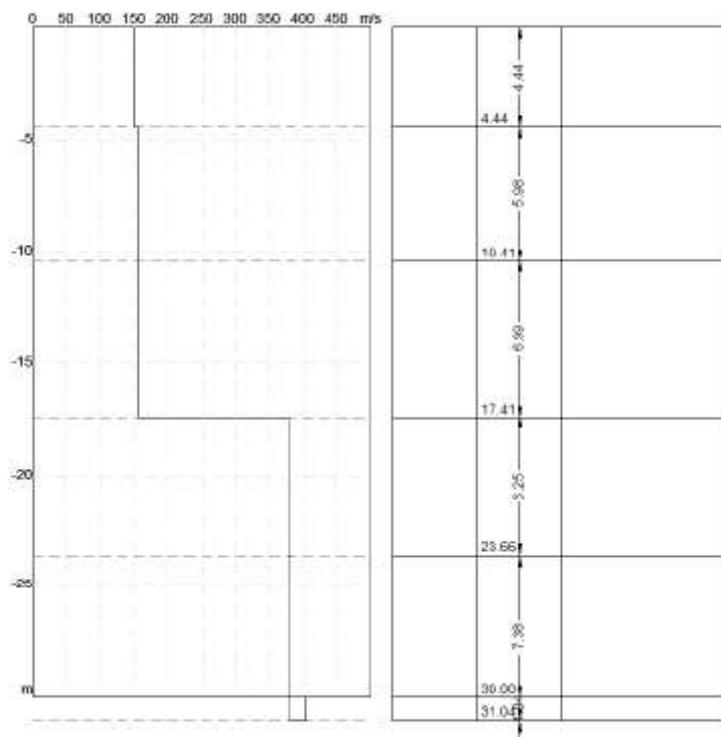
7.1. Risultati derivanti dalle indagini eseguite

L'indagine MASW, così come riportato nella relazione in allegato, ha consentito di ottenere tramite l'inversione della curva di dispersione il seguente modello medio di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità:

13



Sito 1



Sito 2

Secondo la normativa vigente (D.M. 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni) “... per la definizione dell’azione sismica si può fare riferimento a un approccio semplificato, che si basa sull’individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento”. Fatta salva la necessità della caratterizzazione geotecnica dei terreni nel “volume significativo”, ai fini della identificazione della categoria di sottosuolo, la classificazione si effettua in base ai valori della velocità equivalente V_{seq} di propagazione delle onde di taglio entro gli strati con velocità inferiore agli 800 m/s. Per le fondazioni superficiali, tale profondità è riferita al piano di imposta delle stesse. Pertanto se si considerano i valori della velocità di propagazione delle onde “S”, misurata da p.c., è possibile evidenziare che **il valore V_{seq} è risultato essere pari a 339.19 m/s per il Sito 1 e 212.76 m/s per il Sito 2**. Pertanto per le NTC 2018 il valore V_{Seq} è assimilabile, nell’approccio semplificato, alla **categoria C**.

Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato. NTC 2018 Cap 3.2.2.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
-----------	--

A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 m/s e 180 m/s
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30m

Si precisa che la sola indagine sismica, ai fini della definizione inconfutabile delle litologie, consente solo di avere un'idea della stratigrafia del sottosuolo, delle sue caratteristiche geotecniche e della profondità della falda. Ulteriori indagini di tipo diretto ed indiretto, potranno definire ulteriormente e con maggior definizione i rapporti stratigrafici dei terreni costituenti il sedime dell'area di progetto.

Seguono foto delle indagini eseguite.



16

Sito 1

Dott. Geol. Antonello Fabiano – Via San Lorenzo 209, 72021 Francavilla Fontana (BR)
Cell: 3497892919
E-Mail: antonello.fabiano@libero.it
Sito Web: www.antonellofabiano.it



Sito 2

5. Sismicità del territorio

L'O.P.C.M. 3274 del 20 Marzo 2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica" hanno determinato una nuova classificazione sismica del territorio italiano. Per quanto riguarda l'area provinciale di Foggia, la nuova situazione è la seguente:

18

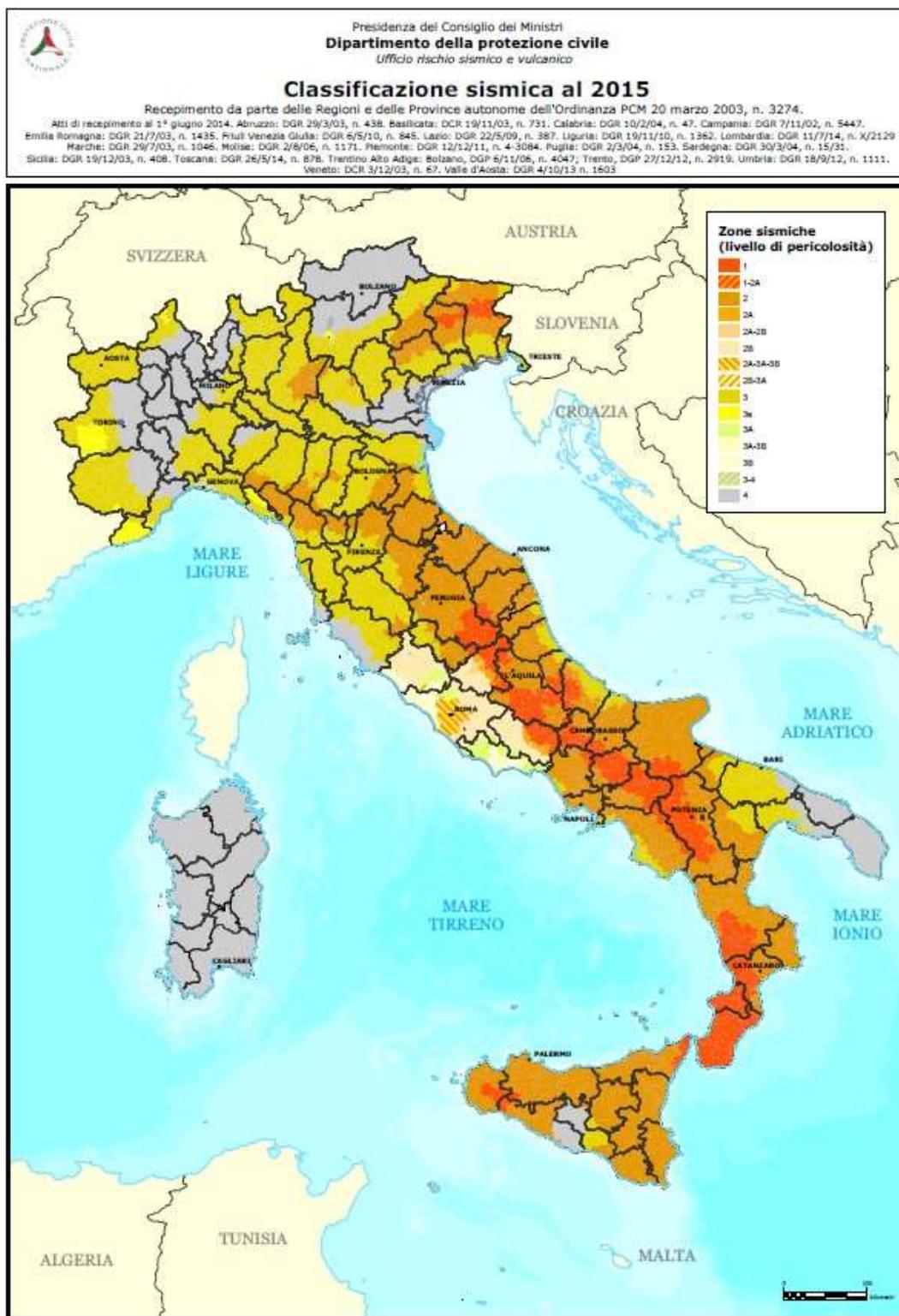
CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL TERRITORIO REGIONALE PUGLIESE						
ALLEGATO 1						
Provincia	Codice Istat 2001	Denominazione	Categoria classificazione precedente (Decreti fino al 1984)	Categoria secondo la proposta del GdL del 1988	Zona prevista dall'O.P.C.M. n. 3274/03	Classificazione Regionale
FOGGIA						
	16071001	Accadia	I	II	1	1
	16071002	Alberona	II	II	2	2
	16071003	Anzano di Puglia	I	I	1	1
	16071004	Apricena	II	II	2	2
	46071005	Ascoli Satriano	I	II	1	1
	16071006	Biccarì	II	II	2	2
	16071007	Bovino	I	II	1	1
	16071008	Cagnano Varano	II	II	2	2
	16071009	Candela	I	II	1	1
	16071010	Carapelle	II	II	2	2
	16071011	Carlantino	III	II	2	2
	16071012	Carpino	II	II	2	2
	16071013	Casalnuovo Monterotaro	II	II	2	2
	46071014	Casalvecchio di Puglia	II	II	2	2
	16071015	Castelluccio dei Sauri	II	II	2	2
	16071016	Castelluccio Valmaggiore	II	II	2	2
	16071017	Castelnuovo della Daunia	II	II	2	2
	16071018	Celenza Valfortore	III	II	2	2
	16071019	Celle di San Vito	II	II	2	2
	16071020	Cerignola	II	II	2	2
	16071021	Chieuti	II	II	2	2
	16071022	Deliceto	I	II	1	1
	16071023	Faeto	II	II	2	2
	16071024	Foggia	II	II	2	2
	16071025	Ischitella	II	II	2	2
	16071026	Isole Tremiti	II	III	2	2
	16071027	Lesina	II	II	2	2
	16071028	Lucera	II	II	2	2
	16071029	Manfredonia	II	II	2	2
	16071030	Margherita di Savoia	II	III	2	2
	16071031	Mattinata	II	II	2	2
	16071032	Monteleone di Puglia	I	II	1	1
	16071033	Mnte Sant'Angelo	II	II	2	2
	16071034	Motta Montecorvino	II	II	2	2
	16071035	Orsara di Puglia	II	II	2	2
	16071036	Orta Nova	II	II	2	2
	16071037	Panni	I	II	1	1
	16071038	Peschici	II	III	2	2
	16071039	Pietramontecorvino	II	II	2	2
	16071040	Poggio Imperiale	II	II	2	2
	16071041	Rignano Garganico	II	II	2	2
	16071042	Rocchetta Sant'Antonio	I	II	1	1
	16071043	Rodi Garganico	II	II	2	2
	16071044	Roseto Valfortore	II	II	2	2
	16071045	San Ferdinando di Puglia	II	III	2	2

FOGGIA						
16071046	San Giovanni Rotondo	II	II	2	2	
16071047	San Marco in Lamis	II	II	2	2	
16071048	San Marco la Catola	II	II	2	2	
16071049	Sannicandro Garganico	II	II	2	2	
16071050	San Paolo di Civitate	II	II	2	2	
16071051	San Severo	II	II	2	2	
16071052	Sant'Agata di Puglia	I	II	1	1	
16071053	Serracapriola	II	II	2	2	
16071054	Stornara	II	II	2	2	
16071055	Stornarella	II	II	2	2	
16071056	Torremaggiore	II	II	2	2	
16071057	Trinitapoli	II	III	2	2	
16071058	Troia	II	II	2	2	
16071059	Vico del Gargano	II	II	2	2	
16071060	Vieste	II	III	2	2	
16071061	Volturara Appula	II	II	2	2	
16071062	Volturino	II	II	2	2	
16071063	Ortona	II	II	2	2	
16071064	Zapponeta	II	III	2	2	

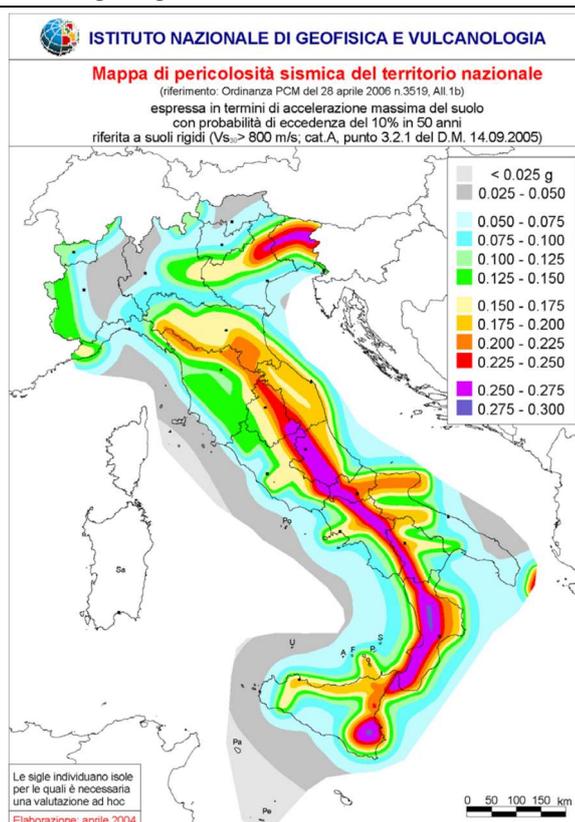
Fig. 12: Classificazione sismica dei Comuni della Provincia di Foggia

Dalla tabella si evince che al Comune di S. Severo è stata attribuita la Categoria 2 ovvero a **sismicità media**. Si riporta la tabella ove ciascuna zona è individuata secondo valori di accelerazione di picco orizzontale del suolo a_g , con probabilità di superamento del 10% in 50 anni.

zona sismica	Accelerazione orizzontale con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni [a_g/g]	Accelerazione orizzontale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico [a_g/g]
1	> 0.25	0.35
2	0.15 – 0.25	0.25
3	0.05 – 0.15	0.15
4	< 0.05	0.05



Classificazione sismica (OPCM n.ro 3274)



Mapa di pericolosità sismica del territorio nazionale espressa in termini di accelerazione massima del suolo (Ordinanza 3519-06)

L'Ordinanza su indicata individua le nuove zone sismiche (quattro) nelle quali è suddiviso l'intero territorio nazionale (ivi compreso il territorio regionale pugliese), classificando sismicamente ciascun Comune in una delle quattro zone e comparando detta nuova classificazione con quella previgente. A tal proposito, si evidenzia che l'ordinanza 3274/03 attribuisce alle singole Regioni la facoltà di introdurre o meno l'obbligo della progettazione antisismica per quelle costruzioni da edificare sui rispettivi territori in zona sismica classificata 3.

A livello regionale la normativa vigente è rappresentata dalla "DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA REGIONALE 2 marzo 2004, n. 153 - L.R. 20/00 - O.P.C.M. 3274/03 – Individuazione delle zone sismiche del territorio regionale e delle tipologie di edifici ed opere strategici e rilevanti - Approvazione del programma temporale e delle indicazioni per le verifiche tecniche da effettuarsi sugli stessi." Che, come si evince dalla tabella precedente, identifica l'area d'intervento come zona 2.

6. Pericolosità sismica di base

Per valutare se un'opera strutturale è sicura bisogna far riferimento a degli *stati limite*, che possono verificarsi durante un determinato *periodo di riferimento* della stessa opera. Quindi per poter stimare l'azione sismica che dovrà essere utilizzata nelle verifiche agli stati limite o nella progettazione, bisognerà stabilire:

- in primo luogo la *vita nominale* dell'opera, che congiuntamente alla *classe d'uso*, permette di determinare il *periodo di riferimento*;
- una volta definito il periodo di riferimento e i diversi stati limiti da considerare, dopo aver definito le relative *probabilità di superamento* è possibile stabilire il *periodo di ritorno* associato a ciascun stato limite;
- a questo punto è possibile definire la **pericolosità sismica di base** per il sito interessato alla realizzazione dell'opera, facendo riferimento agli studi condotti sul territorio nazionale dal Gruppo di Lavoro 2004 nell'ambito della convenzione-progetto S1 DPC-INGV 2004-2006 e i cui risultati sono stati promulgati mediante l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri (OPCM) 3519/2006.

9.1. Vita nominale, classi d'uso e periodo di riferimento

Nel **DM 17 gennaio 2018**-Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» il periodo di riferimento, che non può essere inferiore a 35 anni, è dato dalla seguente relazione:

$$V_R = V_N \cdot C_U \quad (2.1)$$

dove:

VR = periodo di riferimento

VN = vita nominale

CU = coefficiente d'uso

La vita nominale di un'opera strutturale VN, secondo le NTC 2018, è definita come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata e viene definita attraverso tre diversi valori, a seconda dell'importanza dell'opera e perciò

delle esigenze di durabilità. I valori minimi di VN da adottare per i diversi tipi di costruzione sono riportati nella Tab. 2.1. Tali valori possono essere anche impiegati per definire le azioni dipendenti dal tempo.

Tab. 2.1 – Valori minimi della Vita nominale VN di progetto per i diversi tipi di costruzioni

TIPI DI COSTRUZIONI		Valori minimi di VN (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

Nel caso specifico **VN = 50 anni**.

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso. Le NTC 2018 prevedono quattro classi d'uso a ciascuna delle quali è associato un valore del coefficiente d'uso:

Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli. CU = 0.7;

Classe II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti. CU = 1.0;

Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso. CU = 1.5;

Classe IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al DM 5/11/2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica. CU = 2.0;

Nel caso in esame viene presa in considerazione la **classe d'uso II** a cui è associato il coefficiente d'uso **CU = 1**.

Ricavati i valori di VN e CU, è possibile calcolare il periodo di riferimento VR, che qui vale:

$$VR = 50 * 1 = 50 \text{ anni.}$$

9.2 Stati limite, probabilità di superamento e periodo di ritorno

Le NTC 2018 prendono in considerazione 4 possibili *stati limite* (SL) individuati facendo riferimento alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti: due sono *stati limite di esercizio* (SLE) e due sono *stati limite ultimi* (SLU). Uno stato limite è una condizione superata la quale l'opera non soddisfa più le esigenze per la quale è stata progettata. Più in particolare le opere e le varie tipologie strutturali devono essere dotate di capacità di garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio (sicurezza nei confronti di SLE) e di capacità di evitare crolli, perdite di equilibrio e di dissesti gravi, totali o parziali, che possano compromettere l'incolumità delle persone o comportare la perdita di beni, oppure provocare gravi danni ambientali e sociali, oppure mettere fuori servizio l'opera (sicurezza nei confronti di SLU).

Gli stati limite di esercizio sono:

- **Stato Limite di Operatività (SLO)**: a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;
- **Stato Limite di Danno (SLD)**: a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidezza nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

Gli stati limite ultimi sono:

- **Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV)**: a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidezza nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidezza per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- **Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC)**: a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

Ad ogni stato limite è associata una *probabilità di superamento PVR* (Tabella 3.1), ovvero la probabilità che, nel periodo di riferimento VR, si verifichi almeno un evento sismico ($n \geq 1$) di **ag** prefissata (**ag** = accelerazione orizzontale massima del suolo) avente frequenza media annua di ricorrenza $\lambda = 1/TR$ (**TR** = periodo di ritorno).

Tabella 3.1- Stati limite e rispettive probabilità di superamento, nel periodo di riferimento VR

Stato limite di esercizio: operatività	SLO	PVR = 81%
Stato limite di esercizio: danno	SLD	PVR = 63%
Stati limite ultimo: salvaguardia della vita	SLV	PVR = 10%
Stati limite ultimo: di prevenzione del collasso	SLC	PVR = 5%

Fissati VR e PVR associata ad ogni stato limite, è possibile calcolare il periodo di ritorno dell'azione sismica TR, espresso in anni, mediante l'espressione:

26

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})} \quad (3.1)$$

Tale relazione tra PVR (probabilità) e TR (statistica) risulta biunivoca poiché utilizza la distribuzione discreta Poissoniana.

Poiché è **VR = 50 anni**, il tempo di ritorno TR sarà:

Tabella 3.2- Stati limite e rispettivi tempi di ritorno, nel periodo di riferimento VR

Stato limite di esercizio: operatività	SLO	TR = 30
Stato limite di esercizio: danno	SLD	TR = 50
Stati limite ultimo: salvaguardia della vita	SLV	TR = 475
Stati limite ultimo: di prevenzione del collasso	SLC	TR = 975

9.3 Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3 delle NTC 2018. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II delle stesse NTC, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, VS.

Sulla base delle risultanze del rilevamento geologico condotto e dalle indagini eseguite nell'area oggetto di studio, i terreni caratterizzanti l'area di sedime dell'opera da realizzare, si può ipotizzare essere rappresentati da depositi sabbiosi e pertanto compatibili con la descrizione stratigrafica secondo la tab. 3.2.II delle NTC 2018 e quindi, ricadenti nella **categoria di sottosuolo C:**

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Per condizioni topografiche complesse è necessario predisporre specifiche analisi di risposta sismica locale. Per configurazioni superficiali semplici si può adottare la seguente classificazione:

Tab. 3.2.III – *Categorie topografiche*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Tali categorie topografiche si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali, creste o dorsali allungate, e devono essere considerate nella definizione dell'azione sismica se di altezza maggiore a 30 m.

Nel caso in esame, si considera come categoria topografica la categoria T1. Per tener conto delle condizioni topografiche e in assenza di specifiche analisi di risposta sismica locale, si utilizzano i valori del **coefficiente topografico ST** riportati nella Tab. 3.2.V, in funzione delle categorie topografiche sopra riportate e dell'ubicazione dell'opera o dell'intervento.

Tab. 3.2.V – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S_T

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1,4

Il valore S_T si utilizza solo se $H > 30$ m, in ogni caso nel sito di studio tale coefficiente è pari a 1,0.

Per poter definire l'amplificazione stratigrafica, occorre tener conto di due coefficienti:

- S_s : coefficienti di amplificazione topografica;
- C_c : coefficiente funzione della categoria di sottosuolo.

Per sottosuolo di categoria A ($V_{s30} > 800$ m/s) i coefficienti S_s e C_c valgono 1. Per le categorie di sottosuolo B, C, D ed E i coefficienti S_s e C_c possono essere calcolati, in funzione dei valori di F_0 e TC^* , mediante le espressioni fornite nella Tab. 3.2.IV, nelle quali g è l'accelerazione di gravità ed il tempo è espresso in secondi.

Tab. 3.2.IV – Espressioni di S_s e di C_c

Categoria sottosuolo	S_s	C_c
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (TC^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (TC^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (TC^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (TC^*)^{-0,40}$

F_0 è un fattore che quantifica l'amplificazione spettrale massima, su sito di riferimento rigido orizzontale ed ha valore minimo pari a 2,2. TC^* rappresenta il Tratto Spettrale a Periodo Costante per un Periodo di Ritorno determinato.

9.4 Definizione della pericolosità sismica di base

La pericolosità sismica di base, cioè le caratteristiche del moto sismico atteso al sito di interesse, nelle NTC 2018, per una determinata probabilità di superamento, si può ritenere definita quando vengono designati un'accelerazione orizzontale massima (a_g) ed il corrispondente spettro di risposta elastico in accelerazione, riferiti ad un suolo rigido e ad una superficie topografica orizzontale. Per poter definire la pericolosità sismica di base le NTC 2018 si rifanno ad una procedura basata sui risultati disponibili anche sul sito web dell'INGV <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>, nella sezione "Mappe interattive della pericolosità sismica". Secondo le NTC 2018 le forme spettrali sono definite per 9 differenti periodi di ritorno TR (30, 50, 72, 101, 140, 201, 475, 975 e 2475 anni) a partire dai valori dei seguenti parametri riferiti a terreno rigido orizzontale, cioè valutati in condizioni ideali di sito, definiti nell'**Allegato A** alle NTC08:

a_g = accelerazione orizzontale massima;

Fo = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

TC* = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

I tre parametri si ricavano per il 50° percentile ed attribuendo a:

a_g , il valore previsto dalla pericolosità sismica S1

Fo e **TC*** i valori ottenuti imponendo che le forme spettrali in accelerazione, velocità e spostamento previste dalle NTC08 scartino al minimo dalle corrispondenti forme spettrali previste dalla pericolosità sismica S1 (il minimo è ottenuto ai minimi quadrati, su valori normalizzati).

I valori di questi parametri vengono forniti in tabella (Tabella 4.1), contenuta nell'**Allegato B** delle NTC08 (a cui le NTC 2018 fanno riferimento), per i 10751 punti di un reticolo di riferimento in cui è suddiviso il territorio nazionale, identificati dalle coordinate geografiche longitudine e latitudine.

Tabella 4.1- *Stralcio della tabella contenuta nell'Allegato B delle NTC08, che fornisce i 3 parametri di pericolosità sismica, per diversi periodi di ritorno e per ogni nodo del reticolo che viene identificato da un ID e dalle coordinate geografiche.*

Dott. Geol. Antonello Fabiano – Via San Lorenzo 209, 72021 Francavilla Fontana (BR)
Cell: 3497892919

E-Mail: antonello.fabiano@libero.it

Sito Web: www.antonellofabiano.it

ID	LON	LAT	TR = 30			TR = 50			TR = 72			TR = 101		
			ag	FO	T*c	ag	FO	T*c	ag	FO	T*c	ag	FO	T*c
13111	6.5448	45.1340	0.263	2.500	0.180	0.340	2.510	0.210	0.394	2.550	0.220	0.469	2.490	0.240
13333	6.5506	45.0850	0.264	2.490	0.180	0.341	2.510	0.210	0.395	2.550	0.220	0.469	2.490	0.240
13555	6.5564	45.0350	0.264	2.500	0.180	0.340	2.510	0.200	0.393	2.550	0.220	0.466	2.500	0.240
13777	6.5621	44.9850	0.263	2.500	0.180	0.338	2.520	0.200	0.391	2.550	0.220	0.462	2.510	0.240
12890	6.6096	45.1880	0.284	2.460	0.190	0.364	2.510	0.210	0.431	2.500	0.220	0.509	2.480	0.240
13112	6.6153	45.1390	0.286	2.460	0.190	0.366	2.510	0.210	0.433	2.500	0.220	0.511	2.480	0.240
13334	6.6210	45.0890	0.288	2.460	0.190	0.367	2.510	0.210	0.434	2.500	0.220	0.511	2.490	0.240
13556	6.6268	45.0390	0.288	2.460	0.190	0.367	2.510	0.210	0.433	2.510	0.220	0.510	2.490	0.240
13778	6.6325	44.9890	0.288	2.460	0.190	0.366	2.520	0.210	0.430	2.510	0.220	0.507	2.500	0.240
14000	6.6383	44.9390	0.286	2.470	0.190	0.363	2.520	0.210	0.426	2.520	0.220	0.502	2.500	0.240
14222	6.6439	44.8890	0.284	2.470	0.190	0.360	2.530	0.210	0.421	2.530	0.220	0.497	2.500	0.240
12891	6.6803	45.1920	0.306	2.430	0.200	0.389	2.500	0.210	0.467	2.470	0.230	0.544	2.490	0.230
10228	6.6826	45.7940	0.283	2.420	0.200	0.364	2.460	0.220	0.430	2.460	0.240	0.505	2.440	0.250
13113	6.6860	45.1430	0.309	2.430	0.200	0.391	2.510	0.210	0.470	2.470	0.230	0.546	2.490	0.230
10450	6.6885	45.7450	0.278	2.440	0.200	0.356	2.480	0.220	0.415	2.500	0.230	0.485	2.470	0.250
13335	6.6915	45.0930	0.310	2.430	0.200	0.392	2.510	0.210	0.470	2.480	0.230	0.546	2.500	0.230
10672	6.6942	45.6950	0.275	2.450	0.200	0.351	2.490	0.210	0.406	2.520	0.230	0.475	2.490	0.250
13557	6.6973	45.0430	0.311	2.440	0.200	0.392	2.520	0.210	0.469	2.480	0.230	0.545	2.500	0.230
13779	6.7029	44.9930	0.310	2.440	0.200	0.391	2.520	0.210	0.467	2.480	0.230	0.543	2.500	0.230

Qualora la pericolosità sismica del sito sul reticolo di riferimento non consideri il periodo di ritorno TR corrispondente alla VR e PVR fissate, il valore del generico parametro p ad esso corrispondente potrà essere ricavato per interpolazione (Figura 4.1), a partire dai dati relativi ai tempi di ritorno previsti nella pericolosità di base, utilizzando la seguente espressione dell'Allegato A alle NTC08:

$$\log(p) = \log(p_1) + \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \cdot \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \cdot \left[\log\left(\frac{TR_2}{TR_1}\right)\right]^{-1} \quad (4.1)$$

nella quale p è il valore del parametro di interesse (ag , FO , TC^*) corrispondente al periodo di ritorno TR desiderato, mentre p_1 , p_2 è il valore di tale parametro corrispondente al periodo di ritorno TR_1 , TR_2 .

Per un qualunque punto del territorio non ricadente nei nodi del reticolo di riferimento, i valori dei parametri p possono essere calcolati come media pesata dei valori assunti da tali parametri nei quattro vertici della maglia elementare del

reticolo di riferimento contenente il punto in esame, utilizzando l'espressione dell'Allegato A alle NTC08:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^4 p_i d_i}{\sum_{i=1}^4 d_i} \quad (4.2)$$

nella quale p è il valore del parametro di interesse (ag, Fo, TC^*) corrispondente al punto considerato, p_i è il valore di tale parametro nell' i -esimo vertice della maglia elementare contenente il punto in esame e d_i è la distanza del punto in esame dall' i -esimo vertice della suddetta maglia.

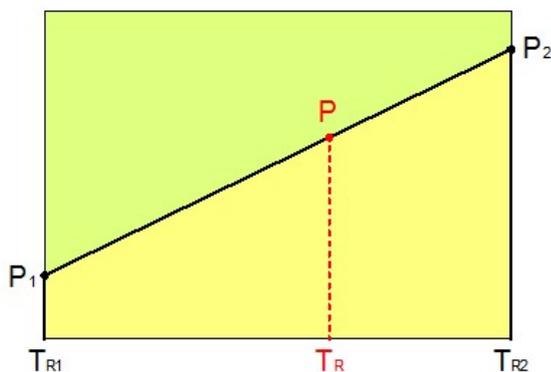


Figura 4.1 - Interpolazione dei periodi di ritorno, per ottenere i parametri di pericolosità sismica, in accordo alla procedura delle NTC08.

La procedura per interpolare le coordinate geografiche è schematizzata nella Figura 4.2

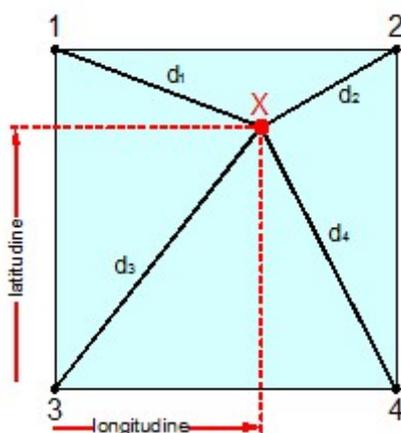


Figura 4.2 - Interpolazione delle coordinate geografiche, per ottenere i parametri di pericolosità sismica, in accordo alla procedura delle NTC08.

Pertanto per poter procedere all'interpolazione delle coordinate geografiche, in accordo alla procedura delle NTC08, bisogna calcolare le distanze che intercorrono tra i 4 punti del reticolo e il punto di interesse. Questo calcolo può essere eseguito approssimativamente utilizzando le formule della trigonometria sferica, che danno la distanza geodetica tra due punti, di cui siano note le coordinate geografiche. Utilizzando quindi il teorema di Eulero, la distanza d tra due punti, di cui siano note latitudine e longitudine, espresse però in radianti, si ottiene dall'espressione seguente:

$$d = R \cdot \arccos[\sin(\text{lat}\beta) \cdot \sin(\text{lat}\alpha) + \cos(\text{lat}\beta) \cdot \cos(\text{lat}\alpha) \cdot \cos(\text{lon}\alpha - \text{lon}\beta)] \quad (4.3)$$

dove $R = 6371$ è il raggio medio terrestre in km, mentre $\text{lat}\alpha$, $\text{lon}\alpha$, $\text{lat}\beta$ e $\text{lon}\beta$ sono la latitudine e la longitudine, espresse in radianti, di due punti A e B di cui si vuole calcolare la distanza. La formula di interpolazione sopra proposta, semplice da usare, presenta però l'inconveniente di condurre a valori di pericolosità lievemente diversi per punti affacciati ma appartenenti a maglie contigue. La modestia delle differenze (scostamenti in termini di PGA dell'ordine di $\pm 0,01g$ ossia della precisione dei dati) a fronte della semplicità d'uso, rende tale stato di cose assolutamente accettabile. Qualora si vogliano rappresentazioni continue della funzione interpolata, si dovrà ricorrere a metodi di interpolazione più complessi, ad esempio i polinomi di Lagrange.

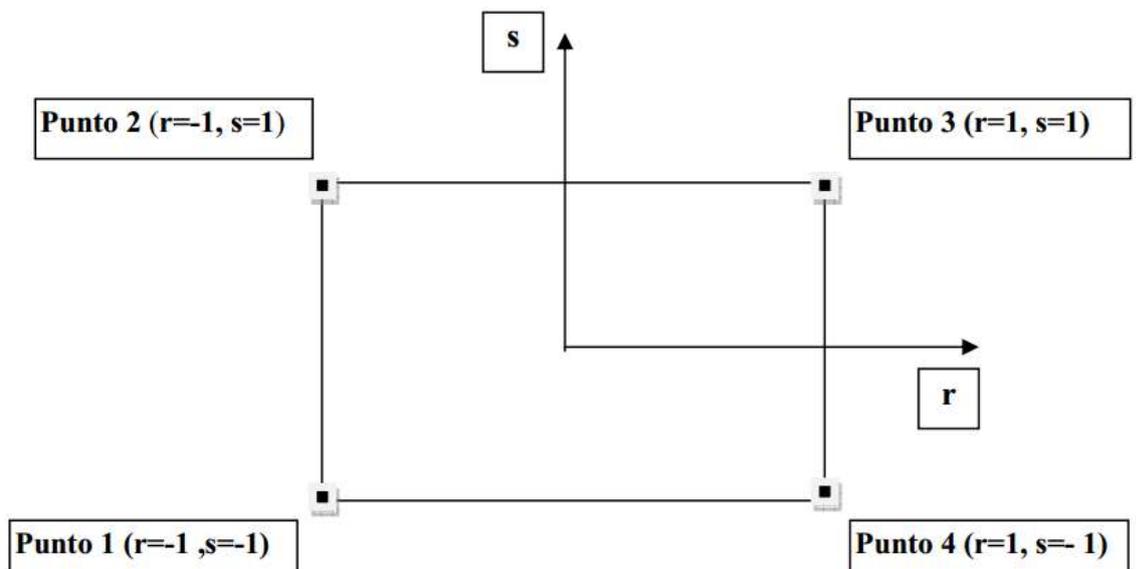


Figura 4.3 - Applicazione dell'interpolazione bilineare.

Definiti i 4 vertici di una generica maglia i polinomi di Lagrange sono così determinati:

$$h_1 = (1-r) \cdot (1-s)/4 \quad (4.4)$$

$$h_2 = (1-r) \cdot (1+s)/4 \quad (4.5)$$

$$h_3 = (1+r) \cdot (1+s)/4 \quad (4.6)$$

$$h_4 = (1+r) \cdot (1-s)/4 \quad (4.7)$$

Tra le coordinate x, y di un punto generico e le coordinate r, s dello stesso punto valgono le seguenti relazioni:

$$4x = \sum_{i=1}^4 h_i \cdot x_i = [(1-r) \cdot (1-s) \cdot x_1 + (1-r) \cdot (1+s) \cdot x_2 + (1+r) \cdot (1+s) \cdot x_3 + (1+r) \cdot (1-s) \cdot x_4] \quad (4.8)$$

$$4y = \sum_{i=1}^4 h_i \cdot y_i = [(1-r) \cdot (1-s) \cdot y_1 + (1-r) \cdot (1+s) \cdot y_2 + (1+r) \cdot (1+s) \cdot y_3 + (1+r) \cdot (1-s) \cdot y_4] \quad (4.9)$$

La soluzione del sistema di equazioni non lineari è ottenuta iterativamente e, tramite i valori di r ed s , si determinano i parametri a_g, F_0, T_c^* dall'equazione:

$$4p = \sum_{i=1}^4 h_i \cdot p_i = [(1-r) \cdot (1-s) \cdot p_1 + (1-r) \cdot (1+s) \cdot p_2 + (1+r) \cdot (1+s) \cdot p_3 + (1+r) \cdot (1-s) \cdot p_4] \quad (4.10)$$

Dove p rappresenta il parametro cercato.

9.5 Pericolosità sismica di sito

Il moto generato da un terremoto in un sito dipende dalle particolari condizioni locali, cioè dalle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono. Per la singola opera o per il singolo sistema geotecnico la risposta sismica locale consente di definire le modifiche che un segnale sismico subisce, a causa dei fattori anzidetti, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (sottosuolo di categoria A, definito al § 3.2.2). I coefficienti sismici orizzontale k_h e verticale k_v dipendono del punto in cui si trova il sito oggetto di analisi e del tipo di opera da calcolare. Il parametro di entrata per il calcolo è il tempo di ritorno (TR) dell'evento sismico che è valutato come segue:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})} \quad (5.1)$$

Con V_R vita di riferimento della costruzione e P_{VR} probabilità di superamento, nella vita di riferimento, associata allo stato limite considerato. La vita di riferimento dipende dalla vita nominale della costruzione e dalla classe d'uso della costruzione (in linea con quanto previsto al punto 2.4.3 delle NTC). In ogni caso V_R non può essere inferiore a 35 anni.

34

Stabilità dei pendii e fondazioni

Nel caso di stabilità dei pendii i coefficienti k_h e k_v sono così determinati:

$$k_h = \beta_s \cdot \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \quad (5.2)$$

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h \quad (5.3)$$

Con

β_s coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;

a_{\max} accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

g accelerazione di gravità.

I valori di β_s sono riportati nella tabella 5.1.

Tabella 5.1- Coefficienti di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito.

	Categoria di sottosuolo	
	A	B, C, D, E
	β_s	β_s
$0.2 < ag(g) \leq 0.4$	0.30	0.28
$0.1 < ag(g) \leq 0.2$	0.27	0.24
$ag(g) \leq 0.1$	0.20	0.20

Tutti i fattori presenti nelle precedenti formule dipendono dall'accelerazione massima attesa al sito di riferimento rigido e dalle caratteristiche geomorfologiche del territorio.

$$a_{\max} = S_S \cdot S_T \cdot a_g \quad (5.4)$$

SS (effetto di amplificazione stratigrafica) ($0.90 \leq S_s \leq 1.80$) è funzione di **F0** (Fattore massimo di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale) e della categoria di suolo (A, B, C, D, E). e del rapporto ag/g . **ST** (effetto di amplificazione topografica), varia con il variare delle quattro categorie topografiche: **T1**: $ST = 1.0$; **T2**: $ST = 1.20$; **T3**: $ST = 1.20$; **T4**: $ST = 1.40$.

35

Per il sito d'indagine l'analisi della pericolosità sismica di base è la seguente.

Vita nominale (Vn): 50 [anni]

Classe d'uso: II

Coefficiente d'uso (Cu): 1

Periodo di riferimento (Vr): 50 [anni]

Periodo di ritorno (Tr) SLO: 30 [anni]

Periodo di ritorno (Tr) SLD: 50 [anni]

Periodo di ritorno (Tr) SLV: 475 [anni]

Periodo di ritorno (Tr) SLC: 975 [anni]

Tipo di interpolazione: Media ponderata

Coordinate geografiche del punto

Latitudine (WGS84): 41.8121490 [°]

Longitudine (WGS84): 15.0801201 [°]

Latitudine (ED50): 41.8131218 [°]

Longitudine (ED50): 15.0809860 [°]

Coordinate dei punti della maglia elementare del reticolo di riferimento che contiene il sito e valori della distanza rispetto al punto in esame

Punto	ID	Latitudine (ED50) [°]	Longitudine (ED50) [°]	Distanza [m]
1	28772	41.824660	15.033510	4138.21
2	28773	41.823750	15.100560	2006.91
3	28995	41.773750	15.099310	4634.01
4	28994	41.774670	15.032290	5880.34

Parametri di pericolosità sismica per TR diversi da quelli previsti nelle NTC, per i nodi della maglia elementare del reticolo di riferimento

Punto 1

Stato limite	Tr	ag	F0	Tc*
--------------	----	----	----	-----

Realizzazione di impianto agrovoltaiico denominato "PALMO" – San Severo (FG) - Relazione Geologica, Geotecnica ed Idrogeologica

	[anni]	[g]	[-]	[s]
SLO	30	0.054	2.341	0.301
SLD	50	0.071	2.445	0.306
	72	0.084	2.495	0.300
	101	0.099	2.509	0.317
	140	0.115	2.509	0.320
	201	0.135	2.512	0.326
SLV	475	0.195	2.468	0.338
SLC	975	0.258	2.445	0.346
	2475	0.363	2.435	0.358

36

Punto 2

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
SLO	30	0.054	2.413	0.287
SLD	50	0.072	2.452	0.303
	72	0.086	2.495	0.299
	101	0.100	2.509	0.315
	140	0.116	2.508	0.318
	201	0.137	2.505	0.324
SLV	475	0.198	2.463	0.335
SLC	975	0.262	2.440	0.343
	2475	0.368	2.431	0.357

Punto 3

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
SLO	30	0.057	2.451	0.281
SLD	50	0.075	2.480	0.294
	72	0.090	2.489	0.299
	101	0.105	2.498	0.314
	140	0.121	2.508	0.317
	201	0.143	2.501	0.324
SLV	475	0.206	2.459	0.337
SLC	975	0.271	2.438	0.345
	2475	0.379	2.429	0.360

Punto 4

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
SLO	30	0.056	2.444	0.286
SLD	50	0.075	2.455	0.302
	72	0.089	2.486	0.300
	101	0.105	2.497	0.315
	140	0.121	2.508	0.318
	201	0.142	2.505	0.325

Dott. Geol. Antonello Fabiano – Via San Lorenzo 209, 72021 Francavilla Fontana (BR)

Cell: 3497892919

E-Mail: antonello.fabiano@libero.it

Sito Web: www.antonellofabiano.it

Realizzazione di impianto agrovoltaiico denominato "PALMO" – San Severo (FG) - Relazione Geologica, Geotecnica ed Idrogeologica

SLV	475	0.205	2.462	0.338
SLC	975	0.270	2.441	0.346
	2475	0.377	2.431	0.361

Punto d'indagine

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
SLO	30	0.055	2.409	0.289
SLD	50	0.073	2.457	0.302
SLV	475	0.200	2.463	0.337
SLC	975	0.264	2.441	0.345

37

Coefficiente di smorzamento viscoso ξ : 5 %

Fattore di alterazione dello spettro elastico $\eta=[10/(5+\xi)]^{(1/2)}$: 1,000

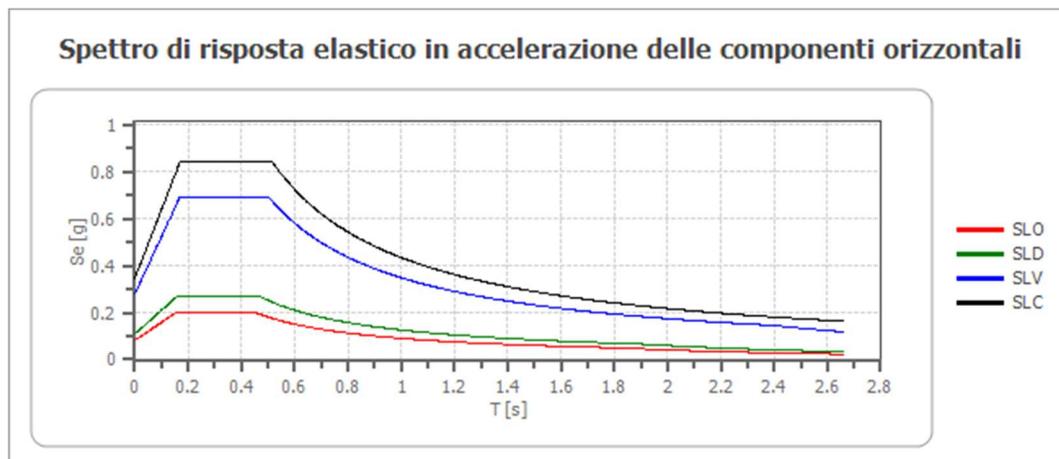
Categoria sottosuolo: C

Categoria topografica: T1

Coefficienti sismici stabilità di pendii e fondazioni

Coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0.016	0.022	0.067	0.097
kv	0.008	0.011	0.034	0.048
amax [m/s ²]	0.806	1.067	2.744	3.395
Beta	0.200	0.200	0.240	0.280

Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali



	cu	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	Ss [-]	Cc [-]	St [-]	S [-]	η [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]
SLO	1.0	0.055	2.409	0.289	1.500	1.580	1.000	1.500	1.000	0.152	0.457	1.819	0.082	0.198
SLD	1.0	0.073	2.457	0.302	1.500	1.560	1.000	1.500	1.000	0.157	0.471	1.890	0.109	0.267
SLV	1.0	0.200	2.463	0.337	1.400	1.500	1.000	1.400	1.000	0.168	0.505	2.399	0.280	0.689

Dott. Geol. Antonello Fabiano – Via San Lorenzo 209, 72021 Francavilla Fontana (BR)

Cell: 3497892919

E-Mail: antonello.fabiano@libero.it

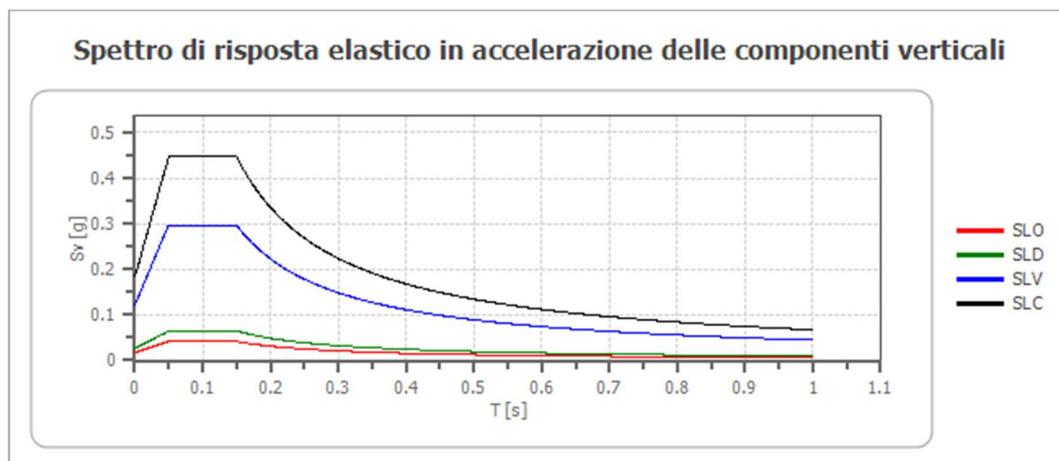
Sito Web: www.antonellofabiano.it

SLC	1.0	0.264	2.441	0.345	1.310	1.490	1.000	1.310	1.000	0.171	0.513	2.657	0.346	0.845
-----	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti verticali

Coefficiente di smorzamento viscoso ξ : 5 %

Fattore di alterazione dello spettro elastico $\eta=[10/(5+\xi)]^{(1/2)}$: 1,000



38

	cu	ag [g]	FO [-]	Tc* [s]	Ss [-]	Cc [-]	St [-]	S [-]	η [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]
SLO	1.0	0.055	2.409	0.289	1	1.580	1.000	1.000	1.000	0.050	0.150	1.000	0.017	0.042
SLD	1.0	0.073	2.457	0.302	1	1.560	1.000	1.000	1.000	0.050	0.150	1.000	0.026	0.065
SLV	1.0	0.200	2.463	0.337	1	1.500	1.000	1.000	1.000	0.050	0.150	1.000	0.121	0.297
SLC	1.0	0.264	2.441	0.345	1	1.490	1.000	1.000	1.000	0.050	0.150	1.000	0.183	0.448

Spettro di progetto

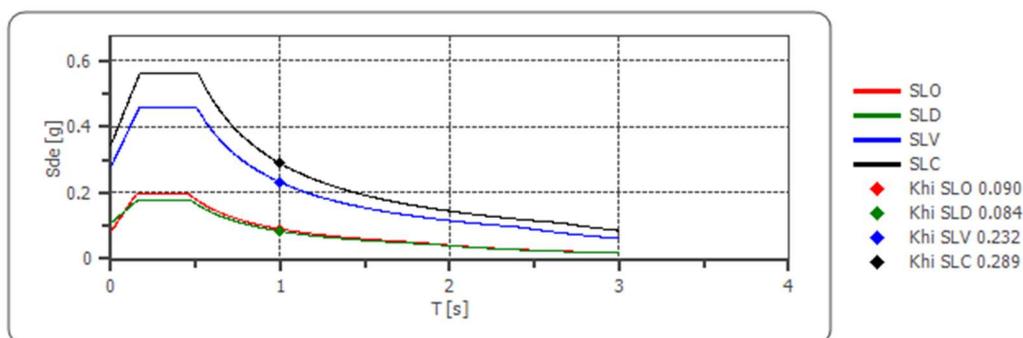
Fattore di struttura spettro orizzontale q: 1,50

Fattore di struttura spettro verticale q: 1,50

Periodo fondamentale T: 1,00 [s]

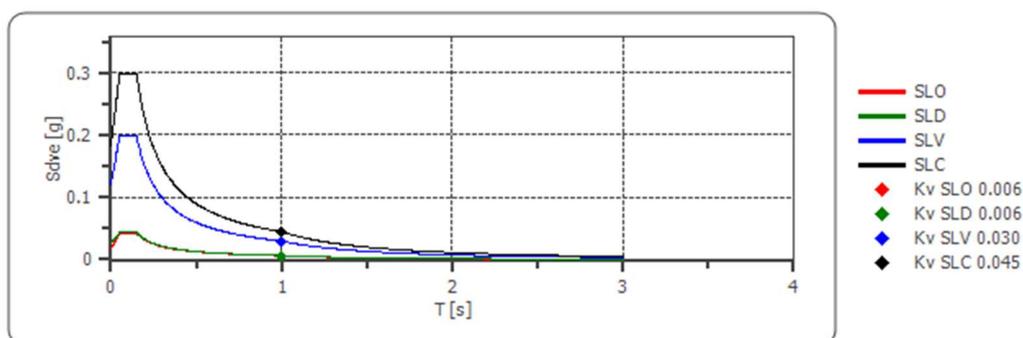
	SLO	SLD	SLV	SLC
khi = Sde(T) Orizzontale [g]	0.090	0.084	0.232	0.289
kv = Sdve(T) Verticale [g]	0.006	0.006	0.030	0.045

Spettro di progetto delle componenti orizzontali



39

Spettro di progetto delle componenti verticali



	cu	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	Ss [-]	Cc [-]	St [-]	S [-]	q [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Sd(0) [g]	Sd(TB) [g]
SLO orizzontale	1.0	0.055	2.409	0.289	1.500	1.580	1.000	1.500	1.000	0.152	0.457	1.819	0.082	0.198
SLO verticale	1.0	0.055	2.409	0.289	1.500	1.580	1.000	1.000	1.000	0.050	0.150	1.000	0.017	0.042
SLD orizzontale	1.0	0.073	2.457	0.302	1.500	1.560	1.000	1.500	1.500	0.157	0.471	1.890	0.109	0.178
SLD verticale	1.0	0.073	2.457	0.302	1.500	1.560	1.000	1.000	1.500	0.050	0.150	1.000	0.026	0.043
SLV orizzontale	1.0	0.200	2.463	0.337	1.400	1.500	1.000	1.400	1.500	0.168	0.505	2.399	0.280	0.459
SLV verticale	1.0	0.200	2.463	0.337	1.400	1.500	1.000	1.000	1.500	0.050	0.150	1.000	0.121	0.198
SLC orizzontale	1.0	0.264	2.441	0.345	1.310	1.490	1.000	1.310	1.500	0.171	0.513	2.657	0.346	0.563
SLC verticale	1.0	0.264	2.441	0.345	1.310	1.490	1.000	1.000	1.500	0.050	0.150	1.000	0.183	0.298

Si precisa che data l'accelerazione massima attesa al piano campagna, in corrispondenza dello stato limite SLC ai sensi delle NTC 2018 (cfr. § 7.11.3.4.2 del DM 17 gennaio 2018), in caso di progettazione delle strutture fondali, si dovrà tener conto della necessità di effettuare una verifica alla liquefazione dei terreni di fondazione.

7. Caratterizzazione geotecnica dei litotipi

La raccolta dei dati dei principali parametri geotecnici, si è basata su dati derivanti della bibliografia riguardante i caratteri geotecnici dei terreni della Città di San Severo e dalle indagini eseguite. A tal proposito è doveroso sottolineare che i parametri che verranno di seguito illustrati, sono del tutto indicativi e che solo un'adeguata campagna di indagini dirette in sito con prelievo di campioni da sottoporre ad opportune analisi di laboratorio può fornire valori esatti quanto inconfutabili e indiscutibilmente riferibili alle litologie caratterizzanti l'area di progetto.

Si possono considerare i seguenti valori indicativi riferiti alle unità sismostratigrafiche individuate dall'indagine sismica eseguita:

ONDE P	ONDE S	Poisson	Young (MPa)	Taglio (MPa)	Bulk (MPa)	Young STATICO (MPa)	γ (kN/m ³)	φ (°)
Velocità (m/sec)	Velocità (m/sec)							
324	152	0,36	94,22	34,67	111,29	30,34	15,0	25,0
1326	455	0,43	1163,87	406,02	2906,98	91,61	19,6	30,0

SITO 1

ONDE P	ONDE S	Poisson	Young (MPa)	Taglio (MPa)	Bulk (MPa)	Young STATICO (MPa)	γ (kN/m ³)	φ (°)
Velocità (m/sec)	Velocità (m/sec)							
402	152	0,42	102,33	36,12	204,48	30,34	15,6	25,0
983	381	0,41	759,31	268,95	1431,72	91,61	18,5	30,0

SITO 2

8. Opere di Connessione alla RTN

L'impianto agrovoltaiico sarà collegato tramite cavidotto interrato MT alla stazione di trasformazione da ubicarsi nel comune di Lucera (FG) a circa 9 km più a Sud rispetto all'area dell'impianto. (Vedasi Tavole in allegato nonché progettuali)

Dal punto di vista delle caratteristiche geologiche, geotecniche ed idrogeologiche dell'area di sedime del cavidotto nonché della stazione di trasformazione, si ribadisce quanto già indicato nei paragrafi precedenti e nella relazione geologica.

41

Conclusioni

Nell'ambito del progetto di realizzazione di un impianto fotovoltaico denominato "Palmo" in agro di San Severo (FG) alla Loc. "Bastiola", è stata redatta la presente relazione al fine di individuare preliminarmente le caratteristiche geotecniche dell'area d'intervento. Il sito di progetto è situato alla quota compresa tra i 49 ed i 53 m s.l.m. Nel sottosuolo sono presenti sabbie appartenenti alla coltre alluvionale sabbiosa e sabbie fini di colore prevalentemente giallastro.

Trattandosi di un terreno granulare con bassi valori di coesione, la stabilità di eventuali pareti scavo dovrà essere assicurata, anche in fase di realizzazione, da idonee opere di sostegno. Nella classificazione sismica nazionale, l'area ricade nella zona 2 e sulla scorta delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni la Classe d'uso è la Classe II. Le indagini sismiche eseguite hanno rilevato un valore di V_{Seq} **339.19 m/s** per il Sito 1 e **212.76 m/s** per il Sito. Pertanto per le NTC 2018 il valore V_{Seq} è assimilabile, nell'approccio semplificato, alla **categoria C**. Si precisa che la sola indagine sismica, ai fini della definizione inconfutabile delle litologie, consente solo di avere un'idea della stratigrafia del sottosuolo, delle sue caratteristiche geotecniche e della profondità della falda. Ulteriori indagini di tipo diretto ed indiretto, potranno definire ulteriormente e con maggior definizione i rapporti stratigrafici dei terreni costituenti il sedime dell'area di progetto. Inoltre, si ritiene di evidenziare che data l'accelerazione massima attesa al piano campagna, in corrispondenza dello stato limite SLC ai sensi delle NTC 2018 (cfr. § 7.11.3.4.2 del DM 17 gennaio 2018), nella fase di progettazione di eventuali strutture fondali, si

dovrà tener conto della necessità di effettuare una verifica alla liquefazione dei terreni di fondazione.

Dalle tavole del PAI l'area di intervento è situata al di fuori da zone perimetrare dall'Autorità di Bacino della Puglia quali zone a pericolosità geomorfologica risulta invece interferire con zone ad Alta, Media e Bassa pericolosità idraulica. In riferimento alle interferenze con le perimetrazioni di Alta, Media e Bassa pericolosità idraulica, si sottolinea che nel layout dell'impianto, tali porzioni non sono interessate da alcuna opera progettuale. Anche l'area di sedime della stazione di trasformazione è fuori da aree ad Alta, Media o Bassa pericolosità idraulica. Rispetto, invece, al percorso del cavidotto si utilizzerà la metodologia di posa in opera ("NO DIG".) nei tratti in cui lo stesso interseca il reticolo idrografico trasversalmente e ad una profondità non inferiore ai 1.5 m al di sotto dell'alveo dei corsi d'acqua intersecati garantendo, allo stesso tempo, un ampio margine di sicurezza idraulica sia nei confronti dei deflussi superficiali che di quelli (eventuali) sotterranei. Nelle restanti porzioni interferenti con pericolosità idraulica Alta, Media e Bassa, nelle fasi successive allo scavo verranno ripristinate le condizioni morfologiche originarie e pertanto non si modificherà in alcuna maniera l'attuale assetto idrologico ed idraulico dell'area.

In ogni caso, ulteriori elementi potranno essere assunti in corso d'opera considerando i dati ottenuti con osservazioni e misurazioni nel corso dei lavori, allo scopo di ottenere il migliore adeguamento dell'opera alla situazione riscontrata. Infatti va comunque effettuata la verifica costante in fase di realizzazione dell'opera per intervenire su qualsiasi tipologia di nuovi elementi che dovessero evidenziarsi nell'esecuzione dei lavori quali, ad esempio, problematiche legate alle caratteristiche geotecniche del terreno costituente l'area di sedime dell'opera.

FrancaVilla Fontana, 18/07/2023

dott. Geol. Antonello FABIANO


Dott. Geol. Antonello Fabiano – Via San Lorenzo 209, 72021 Francavilla
Cell: 3497892919
E-Mail: antonello.fabiano@libero.it
Sito Web: www.antonellofabiano.it



TAVOLE IN ALLEGATO E RELAZIONE SULLE INDAGINI ESEGUITE

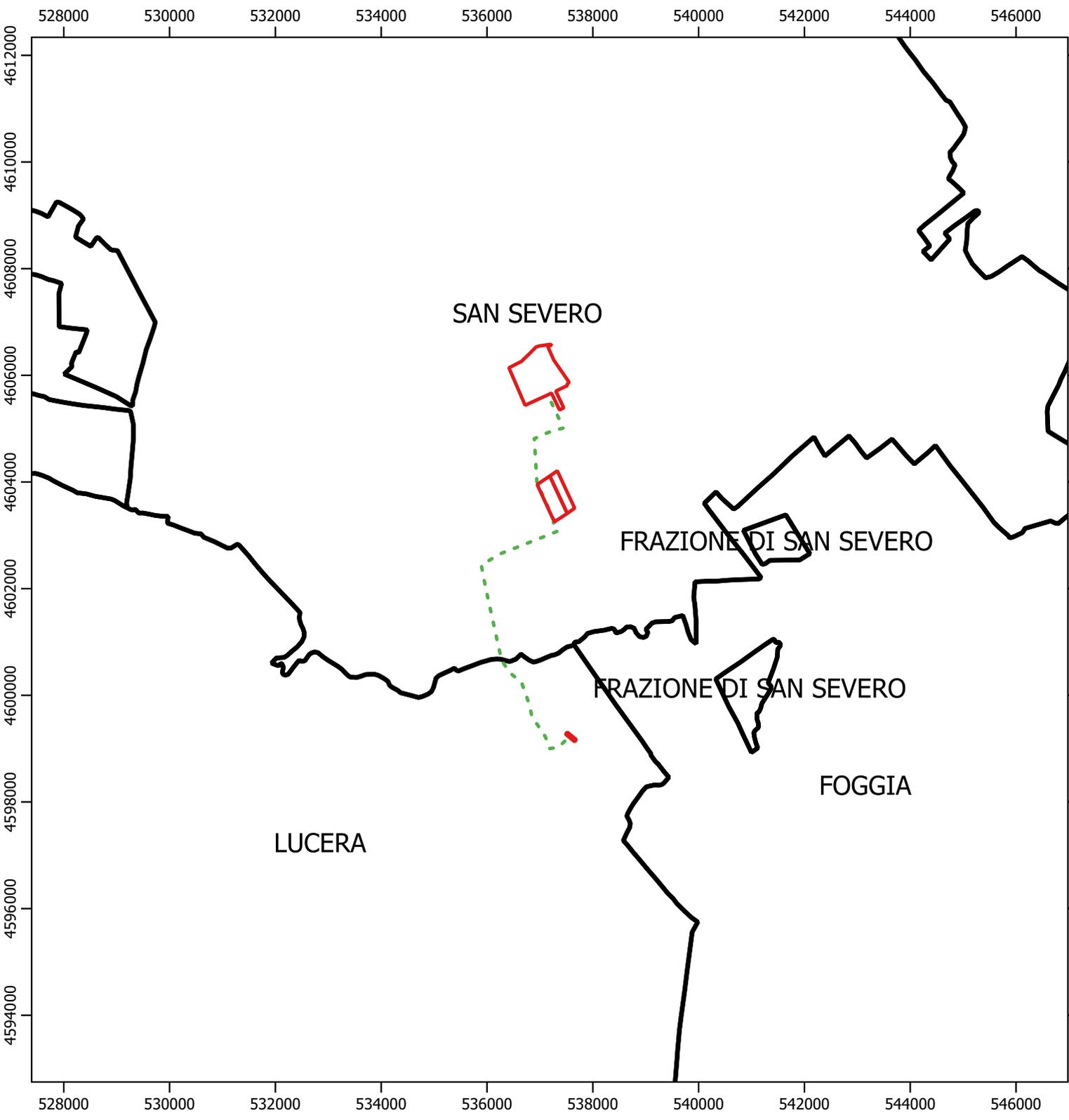


TAVOLA 1 - Cartografia Amministrativa

dott. Geol. Antonello Fabiano

Legenda

-  Ubicazione impianto e stazione trasformazione
-  Cavidotto

 N

Scala 1:100000 - UTM WGS84 Zona 33N

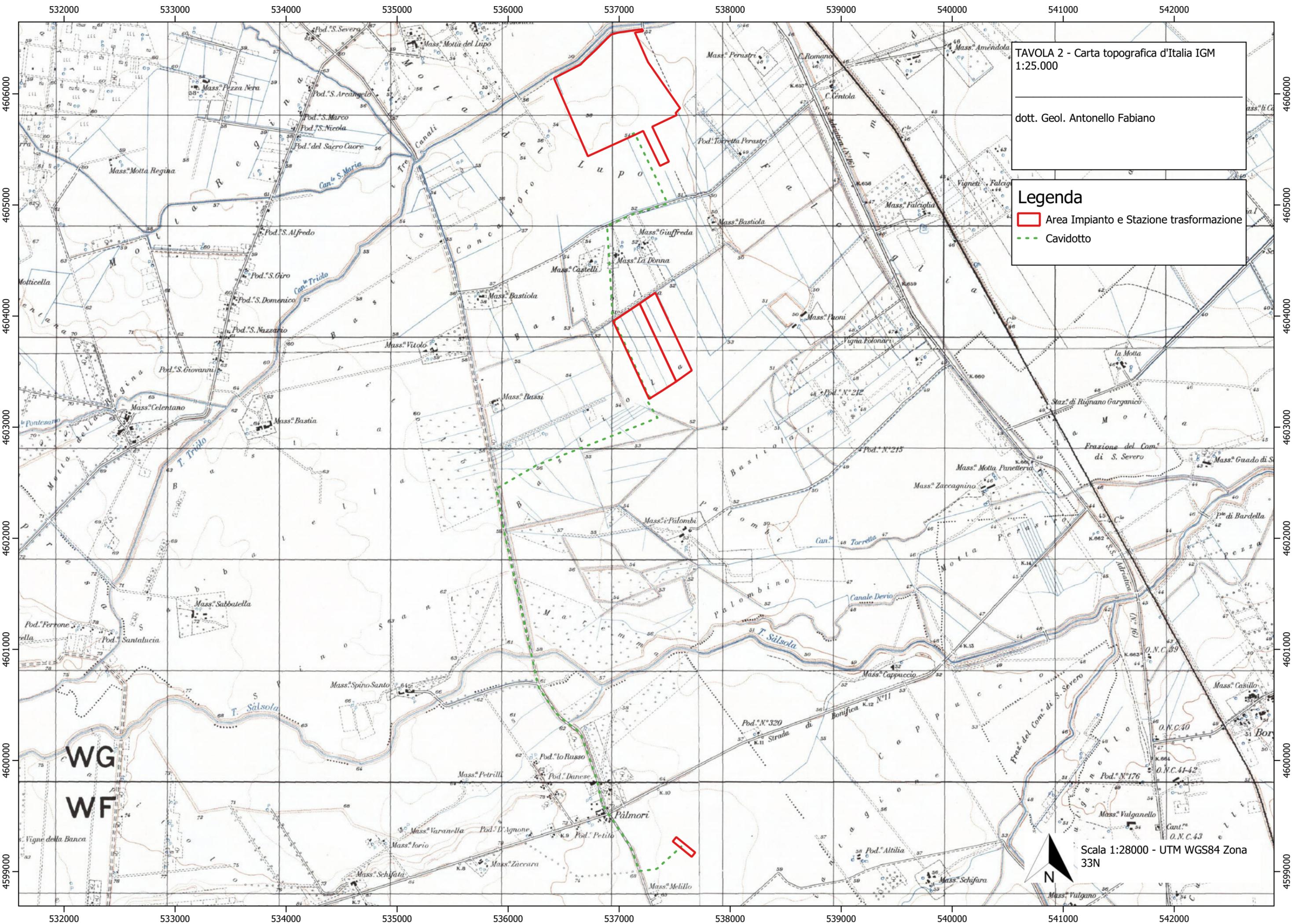


TAVOLA 2 - Carta topografica d'Italia IGM
1:25.000

dott. Geol. Antonello Fabiano

Legenda
[Red Outline] Area Impianto e Stazione trasformazione
[Green Dashed Line] Cavidotto

Scala 1:28000 - UTM WGS84 Zona
33N

WG

WF

532000 533000 534000 535000 536000 537000 538000 539000 540000 541000 542000

4606000
4605000
4604000
4603000
4602000
4601000
4600000
4599000

4606000
4605000
4604000
4603000
4602000
4601000
4600000
4599000



TAVOLA 3 - Ortofoto (Google 2018)

dott. Geol. Antonello Fabiano

Legenda

 Area Impianto e Stazione Trasformazione

 Cavidotto

 Scala 1:28000 - UTM WGS84 Zona 33N



TAVOLA 4 - Carta Geologica di dettaglio

dott. Geol. Antonello Fabiano

Legenda

 Area Impianto

Scala 1:20000 - UTM WGS84 Zona 33N



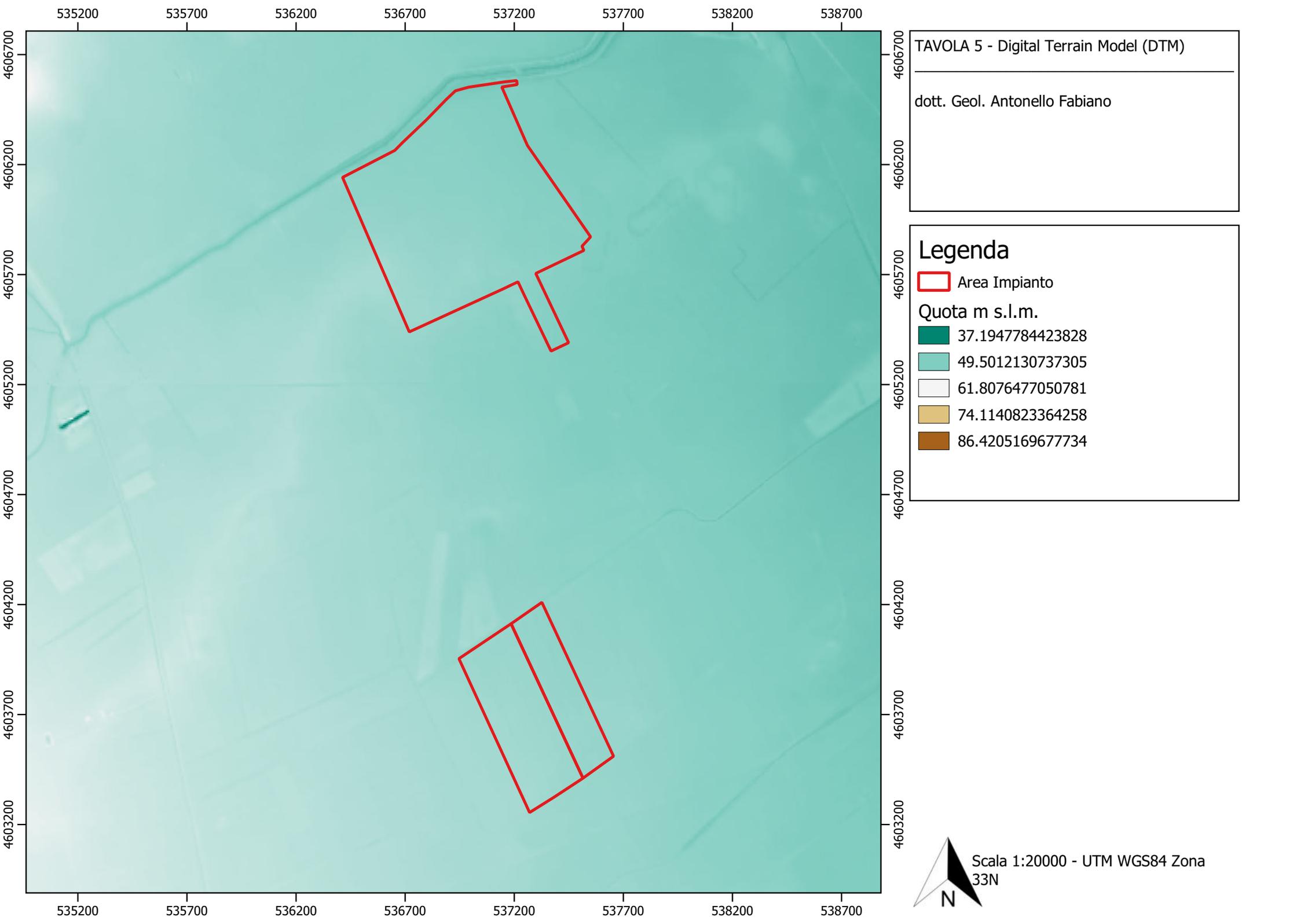


TAVOLA 5 - Digital Terrain Model (DTM)

dott. Geol. Antonello Fabiano

Legenda

Area Impianto

Quota m s.l.m.

- 37.1947784423828
- 49.5012130737305
- 61.8076477050781
- 74.1140823364258
- 86.4205169677734

Scala 1:20000 - UTM WGS84 Zona 33N

N

TAVOLA 6 - Reticolo Idrografico Carta
Idrogeomorfologica (Foglio 396-408)

dott. Geol. Antonello Fabiano

Legenda

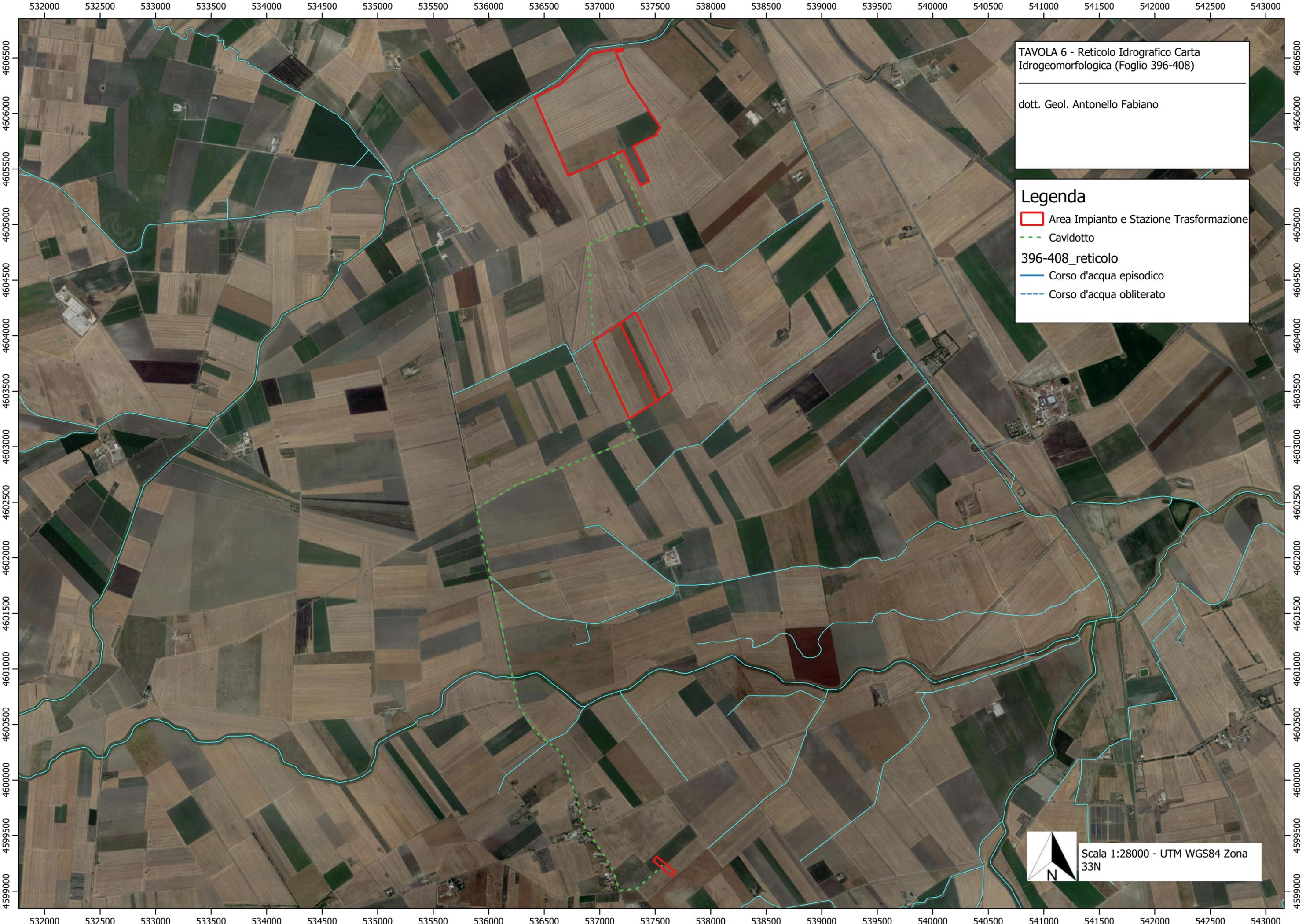
-  Area Impianto e Stazione Trasformazione
-  Cavidotto

396-408_reticolo

-  Corso d'acqua episodico
-  Corso d'acqua obliterato



Scala 1:28000 - UTM WGS84 Zona
33N



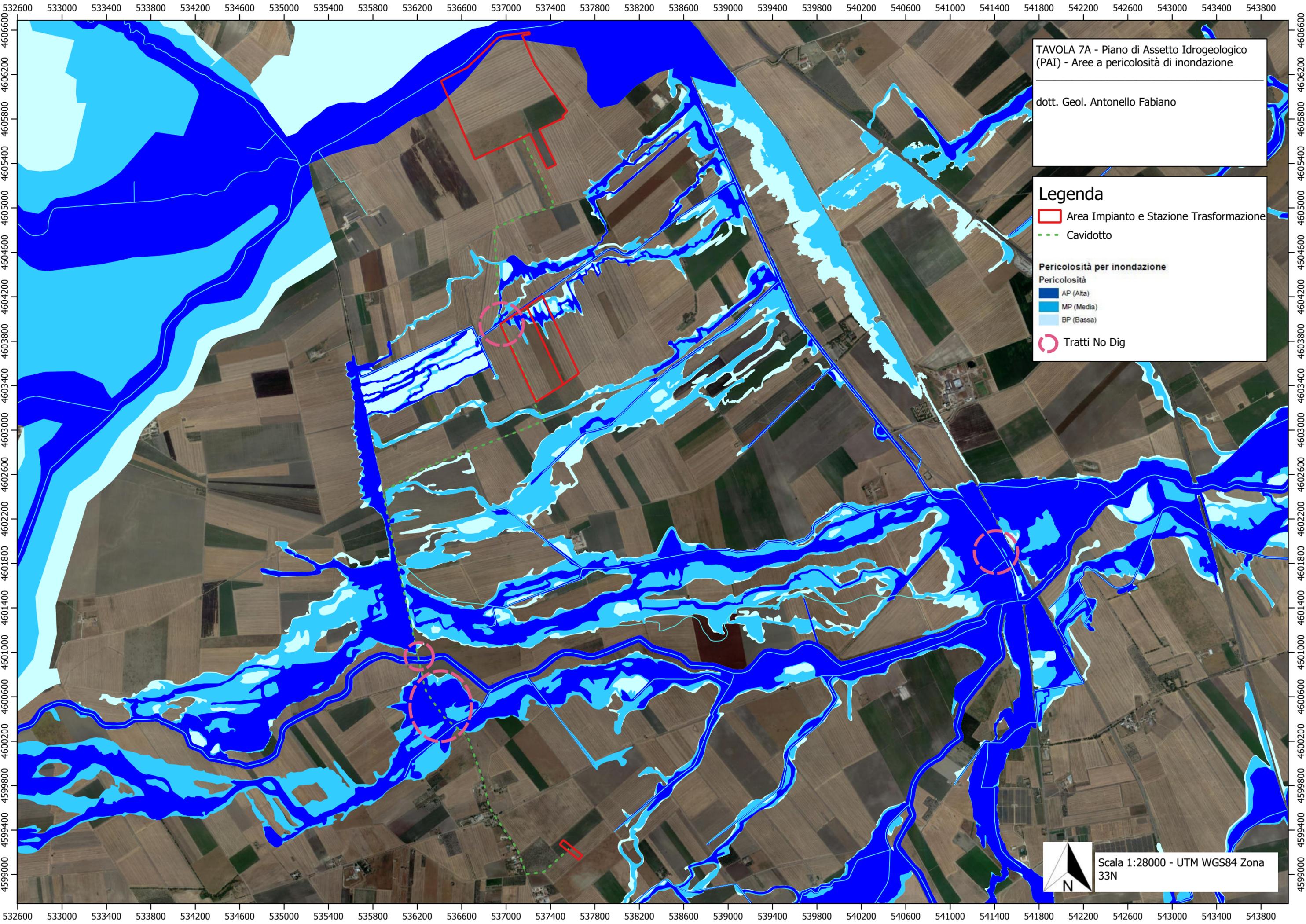


TAVOLA 7A - Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) - Aree a pericolosità di inondazione

dott. Geol. Antonello Fabiano

Legenda

- Area Impianto e Stazione Trasformazione
 - Cavidotto
- Pericolosità per inondazione**
- AP (Alta)
 - MP (Media)
 - BP (Bassa)
- Tratti No Dig



Scala 1:28000 - UTM WGS84 Zona 33N

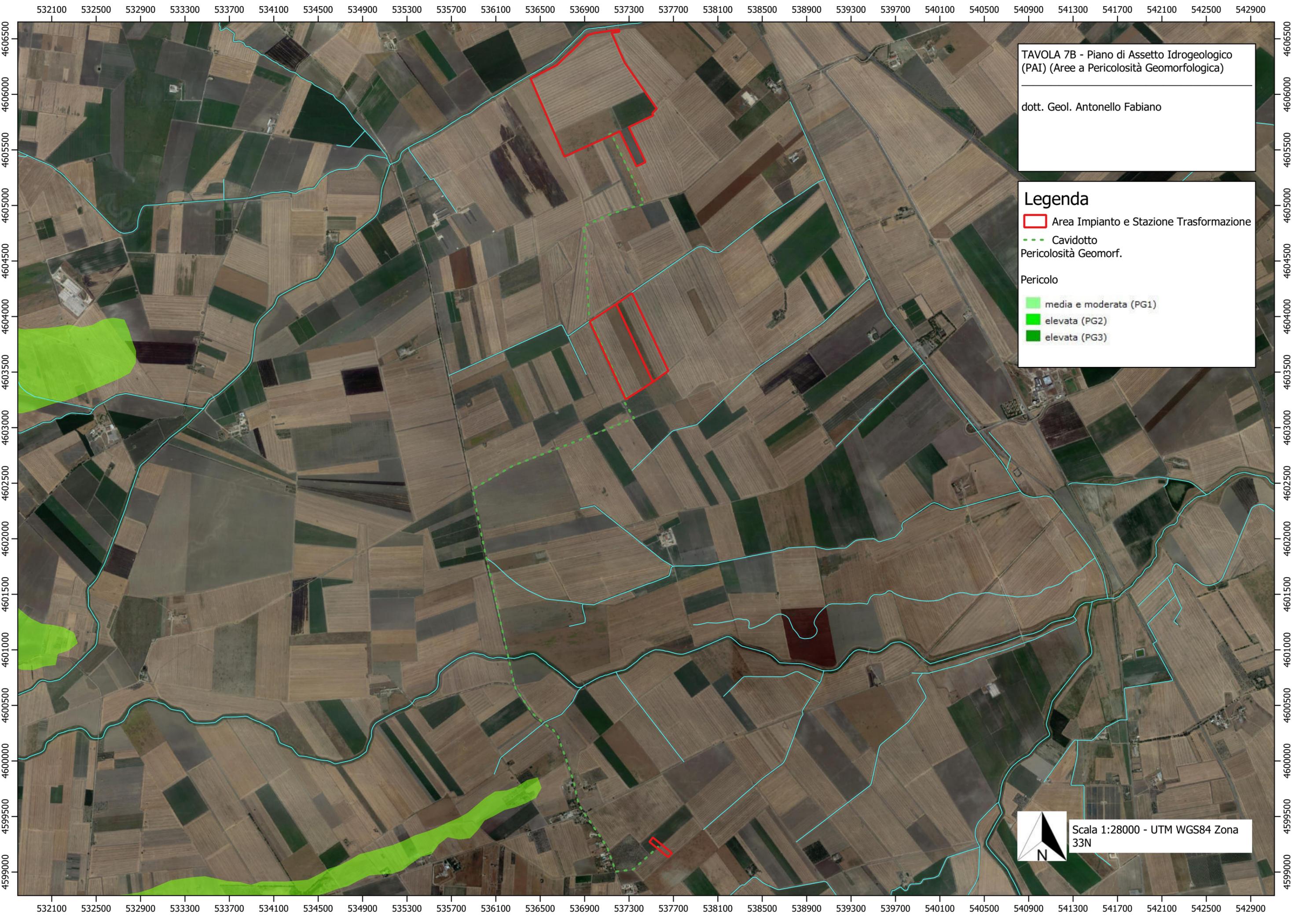


TAVOLA 7B - Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) (Aree a Pericolosità Geomorfologica)

dott. Geol. Antonello Fabiano

Legenda

-  Area Impianto e Stazione Trasformazione
-  Cavidotto

Pericolosità Geomorf.

Pericolo

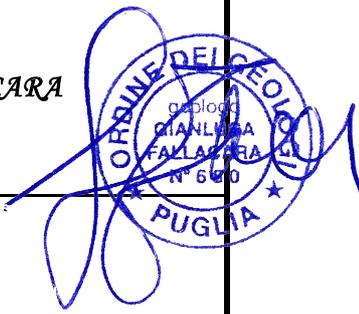
-  media e moderata (PG1)
-  elevata (PG2)
-  elevata (PG3)

 N

Scala 1:28000 - UTM WGS84 Zona 33N



COMUNE DI SAN SEVERO (FG)

PROGETTO	REALIZZAZIONE IMPIANTO FOTOVOLTAICO DENOMINATO "PALMO" NEL COMUNE DI SAN SEVERO (FG)
COMMITTENTE	DOTT. ANTONELLO FABIANO
GEOLOGO	<i>dott. geol. GIANLUCA FALLACARA</i> 
ELABORATO	REPORT INDAGINI GEOFISICHE

dott. geol. Gianluca Fallacara

Via Isonzo n°23 - Bitonto - Bari - 70032

cell. 3393718478, email: geofallacara@yahoo.it

PREMESSA

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati della campagna di indagine geofisica eseguita in data 28/04/2021 mediante l'esecuzione di n.2 profili di sismica a rifrazione in onde P e n.2 profili MASW.

Tali indagini sono state eseguite a supporto del progetto di REALIZZAZIONE IMPIANTO FOTOVOLTAICO DENOMINATO "PALMO" NEL COMUNE DI SAN SEVERO (FG).

INDAGINE MICROSISMICA

Per poter avere una conoscenza delle caratteristiche elastico-meccaniche del terreno di fondazione si riportano le risultanze di un'indagine geofisica eseguita nel sito indagato consistente in n.2 stendimenti di sismica a rifrazione in onde P e n.2 MASW.

Lo studio, come da piano di indagine, ha seguito il seguente sviluppo:

- n°2 prospezione di sismica a rifrazione in onde P (REF).
- n°2 prospezione Multichannel analysis of Surface Waves (MASW)
- Elaborazione dei dati raccolti.

Lo scopo dell'indagine, oltre alla definizione della Categoria di sottosuolo, come prescritto dall'art. 3.2.2 del D.M. 17 gennaio 2018, è quello di offrire un contributo all'implementazione di un modello geologico - geotecnico dell'area di indagine.

Mediante l'indagine di sismica a rifrazione in onde P si è potuto caratterizzare la stratigrafia sismica del sottosuolo in termini di spessori e velocità sismiche in onde P (Vp); è stato inoltre possibile **derivare tramite correlazioni con onde S** i moduli dinamici caratterizzanti i litotipi oggetto di studio.

L'indagine MASW ha reso possibile la valutazione dei valori di velocità delle onde di taglio Vs, così come previsto da:

➤ **D. Min. Infrastrutture 17/01/2018** (Gazzetta Ufficiale n.42 del 20-02-2018 - Suppl. Ordinario n. 8).

➤ **Circ. Min. Infrastrutture e Trasporti 02/02/2009, n. 617 C.S.LL.PP.** (Suppl.Ord. alla G.U. 26.2.2009, n. 47 – *Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008*)

Le indagini sono state condotte seguendo linee guida nazionali ed internazionali:

➤ Linee guida per indagini geofisiche A.S.G (Associazione Società di Geofisica)

➤ ASTM D 5777 - 95 (Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation).

Lo scopo dell'indagine è stato quello di fornire un contributo all'implementazione di un modello geologico dell'area di indagine con particolare riferimento ai litotipi su cui si attesteranno le fondazioni dell'infrastruttura, oltre a verificare al di sotto del piano di fondazione eventuali anomalie.

Le indagini sono state condotte seguendo linee guida nazionali ed internazionali:

➤ Linee guida per indagini geofisiche A.S.G (Associazione Società di Geofisica)

➤ ASTM D6431 (Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation).

Ubicazione indagini

L'ubicazione delle indagini geofisiche è riportata di seguito (fig.1-fig.2).

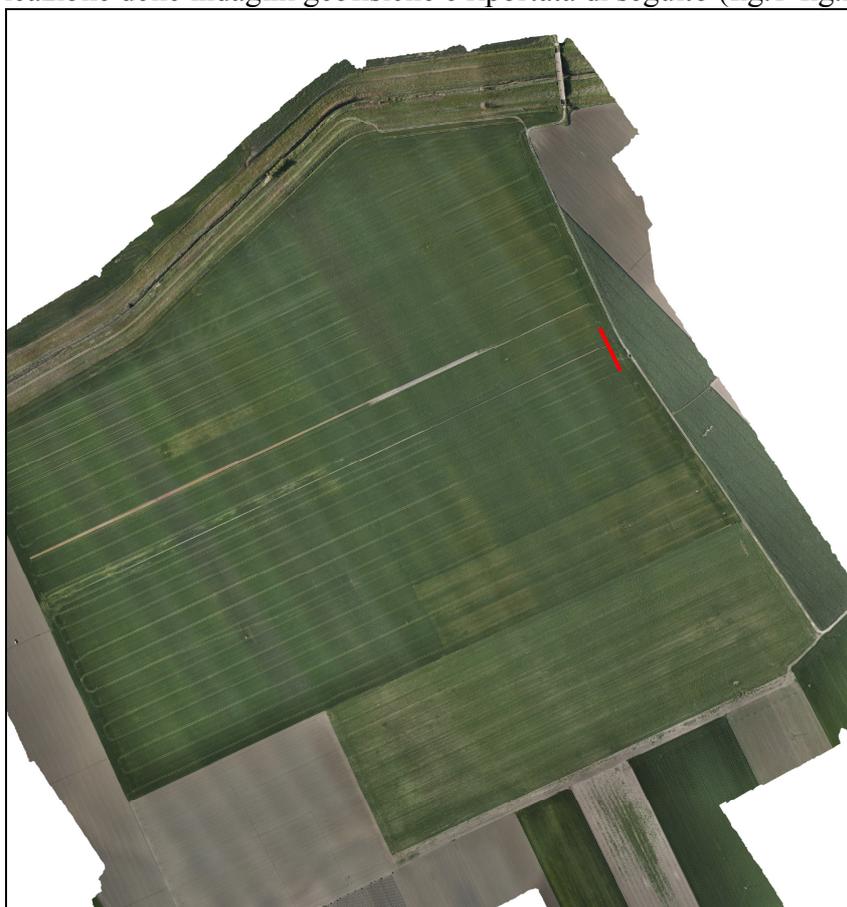


Fig.1 – ubicazione indagini sito 1

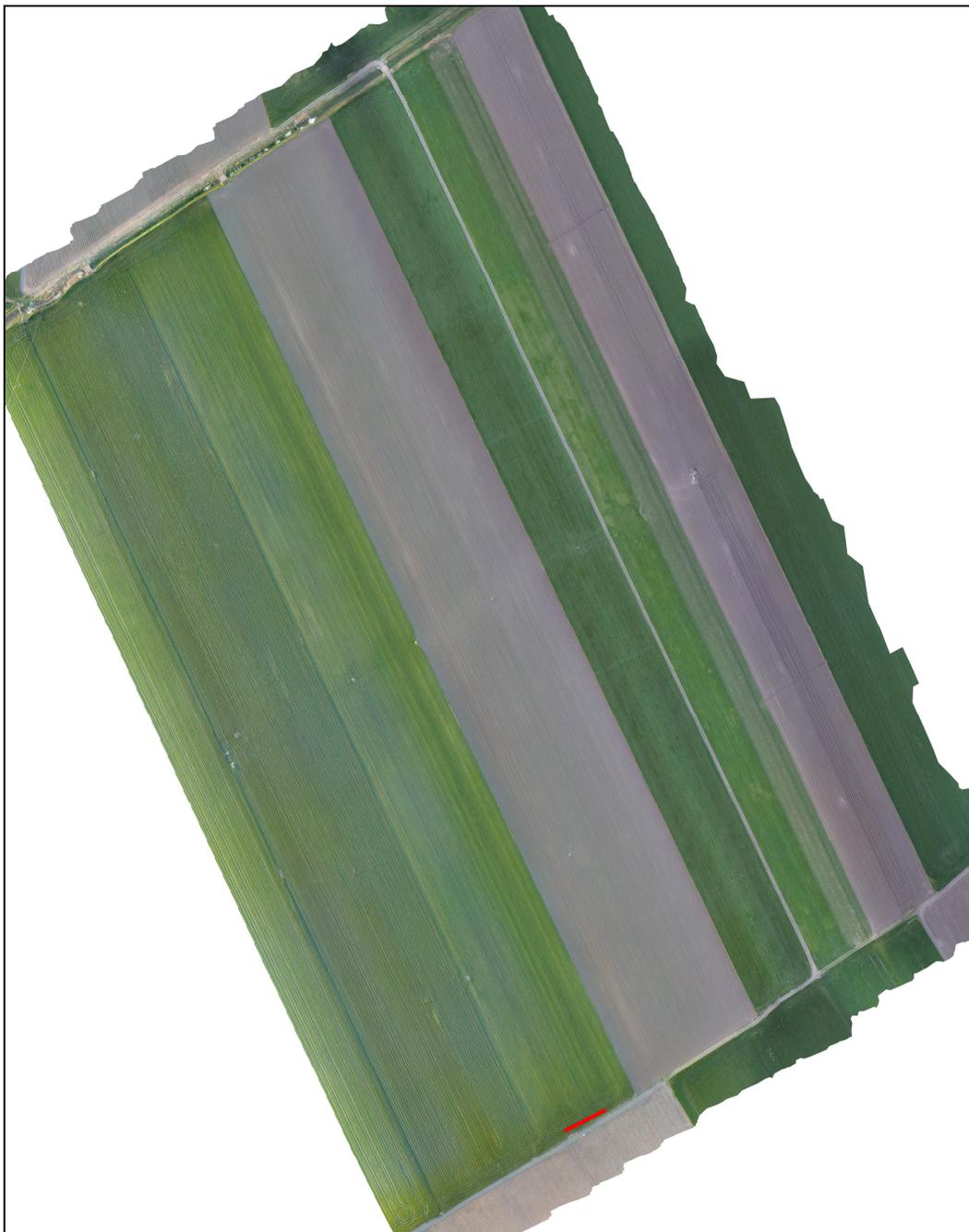


Fig.2 – ubicazione indagini sito 2

Descrizione dei metodi

Sismica 2D in onde P

Le indagini di sismica a rifrazione permettono la ricostruzione delle geometrie e degli spessori dei depositi di copertura, le profondità del substrato (entro i limiti di penetrazione del metodo), la verifica di eventuali discontinuità laterali nonché di determinare le caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali attraverso la determinazione dei moduli elastici dinamici mediante correlazioni tra i valori di V_p e V_s ed i suddetti parametri. Il metodo sismico a rifrazione si basa sul concetto della birifrazione delle onde elastiche a seguito del fronte d'onda conico. Data una sorgente di onde elastiche ed uno stendimento di geofoni lungo un profilo giungeranno in superficie ai geofoni onde dirette, onde riflesse ed onde rifratte. Tali onde giungono sulla superficie rifrangente (discontinuità individuata fra due corpi aventi proprietà meccaniche diverse) con un angolo di incidenza critico (legge di Snell) e vengono quindi rifratte con un angolo di 90° propagandosi parallelamente alla superficie rifrangente e venendo nuovamente rifratte verso la superficie con lo stesso angolo di incidenza. I contrasti di proprietà alla base di tale fenomeno possono essere legati a cause stratigrafiche, strutturali, idrogeologiche. Sulla superficie da investigare si posizionano i trasduttori verticali sensibili al del moto del suolo (velocimetri o accelerometri) ad una certa distanza dalla sorgente sismica che può essere per la generazione di onde P, una massa battente (diversamente applicata e guidata), un fucile sismico o una carica esplosiva a seconda della lunghezza dello stendimento e della profondità di indagine richiesta. Diversamente per le onde SH si utilizzano trasduttori orizzontali e la sorgente viene generata da una piastra di metallo o legno infissa nel suolo e posta perpendicolarmente alla stesa sismica, questa viene pesantemente battuta ai 2 lati, generando impulsi polarizzati. Nell'indagine sismica a rifrazione i trasduttori situati più vicino alla sorgente rilevano prima l'onda diretta che arriva con velocità legata alle caratteristiche meccaniche dello strato di terreno più superficiale, mentre quelli più lontani rilevano le onde rifratte che viaggiano a velocità più elevata. Conoscendo i tempi di primo arrivo e la distanza geofono-sorgente, tramite l'analisi delle curve dei primi arrivi ad ogni trasduttore (dromocrone) si può determinare la velocità dei vari strati; da qui

produrre una stratigrafia sismica da correlare alle formazioni geologiche o discontinuità presenti nella serie investigata nel sottosuolo. L'indagine di sismica a rifrazione si basa sulla determinazione dei primi arrivi (*First Break Picking*) i quali sottoposti ad un apposito algoritmo di inversione, permette di ricostruire la distribuzione bidimensionale delle velocità sismiche.

MASW

Il metodo MASW, Multichannel Analysis of Surface Waves, (Park et al., 1999) è una tecnica di indagine che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo. La determinazione delle V_s viene ottenuta tramite inversione delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione. La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo. A partire dall'intero campo d'onda, acquisito in campagna utilizzando un numero variabile di geofoni allineati a spaziatura regolare (similmente a un classico esperimento di sismica a rifrazione), l'obiettivo del metodo è di derivare una curva di dispersione sperimentale velocità di fase – frequenza ($cf - f$), la cui forma è associata alle proprietà meccaniche del terreno da indagare. Dato che le onde superficiali mostrano le ampiezze e le durate maggiori nel dominio spazio-tempo, anche nel dominio frequenza-velocità di fase, i massimi dello spettro saranno relativi alle differenti frequenze con cui si propagano le onde superficiali stesse. Dall'estrazione delle coppie frequenza velocità di fase corrispondenti ai massimi d'intensità dello spettro si deriva la curva di dispersione sperimentale. In realtà, l'interpretazione degli spettri risulta spesso complicata

dall'intrecciarsi dei modi superiori rispetto a quello fondamentale e/o alla generazione e propagazione di onde guidate. Per la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio è poi necessario procedere alla fase d'inversione della curva di dispersione per ottenere un modello delle proprietà fisiche del sottosuolo. Un miglioramento nell'individuazione di un modello più accurato può essere ottenuto, come è stato fatto nel presente lavoro, utilizzando, nel processo di inversione, curve relative a più modi di vibrazione. Lo scopo della indagine è stato quello di definire la Categoria di sottosuolo, come prescritto dall'art. 3.2.2 del D.M. 17 gennaio 2018.

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, VS. I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità VS per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2.

I valori di VS sono ottenuti mediante specifiche prove oppure, con giustificata motivazione e limitatamente all'approccio semplificato, sono valutati tramite relazioni empiriche di comprovata affidabilità con i risultati di altre prove in sito.

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

con:

h_i spessore dell'i-esimo strato;

$V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite nella Tab. 3.2.II.

Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Per queste cinque categorie di sottosuolo, le azioni sismiche sono definibili come descritto al § 3.2.3 delle presenti norme.

Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche.

Strumentazione utilizzata

Sismica a Rifrazione e MASW

L'attrezzatura utilizzata sia per le indagini di sismica a rifrazione che MASW consta di:

- sistema energizzante per le onde P e Rayleigh: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 8 Kg battente verticalmente su una piastra di materiale plastico resistente (fig.3-fig.4) adagiata opportunamente al suolo, per la generazione prevalente di onde P ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali.



Fig.3 SITO 1



Fig.4 SITO 2

- sistema di ricezione: per le indagini sono stati utilizzati geofoni verticali (onde P) del tipo elettromagnetico a bobina mobile, con frequenza caratteristica di 4.5 Hz ;
- trigger: le metodologie utilizzate, in quanto attive, prevedono che l'inizio della registrazione sia individuato mediante un *trigger* il quale consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui la massa battente colpisce la piastra. L'impulso generato, inviato al sistema di acquisizione, consente di fissare il tempo zero di riferimento per il calcolo dei tempi di percorso delle onde generate ;
- sismografo: nel nostro caso è stato utilizzato un sistema innovativo (DoReMi della **Sara Electronic Instruments**) che incorpora e distribuisce nel cavo sismico un sismografo modulare canale per canale. Ogni elemento contiene tutto l'hardware necessario per l'acquisizione dati per sismica attiva e passiva. La comunicazione digitale evita tutti problemi della strumentazione con cavo analogico.

Modalità di esecuzione dei rilievi: attività di campo

Preliminarmente all'acquisizione dei dati geofisici, è stata condotta una fase operativa riguardante l'organizzazione e l'approntamento delle indagini in sito. In fase di approntamento delle indagini, sono state valutate opportunamente le spaziature geofoniche da utilizzare nell'indagine sismica a rifrazione.

La scelta di tali parametri risulta di notevole importanza in funzione della profondità d'investigazione e della risoluzione desiderata. Infatti la profondità d'investigazione aumenta all'aumentare della lunghezza degli stendimenti sismici, mentre la risoluzione, ossia la minima distanza a cui è possibile distinguere due "oggetti" o "strutture" presenti nel sottosuolo, dipende principalmente dalla spaziatura scelta fra i sensori disposti sulla superficie.

ELABORAZIONE

Sismica in onde P

Il processing dei dataset di sismica a rifrazione in onda P è stato condotto mediante il Software Easy Refract .

Le indagini di sismica a rifrazione consentono di interpretare la stratigrafia del sottosuolo attraverso il principio fisico del fenomeno della rifrazione totale di

un'onda sismica che incide su una discontinuità, individuata fra due corpi aventi proprietà meccaniche diverse (orizzonte rifrattorio). La condizione fondamentale per eseguire studi di sismica a rifrazione è quella per cui la successione di strati da investigare sia caratterizzata da velocità sismiche crescenti all'aumentare della profondità. In questo modo si possono valutare fino a 4 o 5 orizzonti rifrattori differenti.

Le prove si basano sulla misura dei tempi di percorso delle onde elastiche per le quali, ipotizzando le superfici di discontinuità estese rispetto alla lunghezza d'onda o, comunque, con deboli curvature, i fronti d'onda sono rappresentati mediante i relativi raggi sismici. L'analisi si avvale, poi, del principio di Fermat e della legge di Snell.

Il principio di Fermat stabilisce che il raggio sismico percorre la distanza tra sorgente e rilevatore seguendo il percorso per cui il tempo di tragitto è minimo. Per tale principio, dato un piano che separa due mezzi con caratteristiche elastiche diverse, il raggio sismico è quello che si estende lungo un piano perpendicolare alla discontinuità contenente sia la sorgente che il ricevitore.

La legge di Snell è una formula che descrive le modalità di rifrazione di un raggio sismico nella transizione tra due mezzi caratterizzati da diversa velocità di propagazione delle onde o, equivalentemente, da diversi indici di rifrazione. L'angolo formato tra la superficie di discontinuità e il raggio sismico è chiamato angolo di incidenza θ_i mentre quello formato tra il raggio rifratto e la superficie normale è detto angolo di rifrazione θ_r . La formulazione matematica è:

$$v_2 \sin \theta_i = v_1 \sin \theta_r$$

Dove v_1 e v_2 sono le velocità dei due mezzi separati dalla superficie di discontinuità.

Per $v_1 > v_2$ si ha che $\theta_i > \theta_r$ e la sismica a rifrazione non è attuabile poiché il raggio rifratto andrebbe ad inclinarsi verso il basso. Per $v_1 < v_2$ si ha che $\theta_i < \theta_r$ ed esiste un angolo limite di incidenza per cui $\theta_r = 90^\circ$ ed il raggio rifratto viaggia parallelamente alla superficie di discontinuità. L'espressione che definisce l'angolo limite è:

$$\theta_i = \arcsin(v_1 / v_2)$$

Il modo più semplice per analizzare i dati di rifrazione è quello di costruire un diagramma tempi-distanze in cui l'origine del sistema di riferimento è posto in corrispondenza della sorgente di generazione delle onde elastiche. In ascissa sono rappresentate le posizioni dei geofoni ed in ordinata i tempi dei primi arrivi. Ai geofoni più vicini alla sorgente giungono per primi gli impulsi che hanno seguito il percorso diretto in un tempo T dato dalla relazione

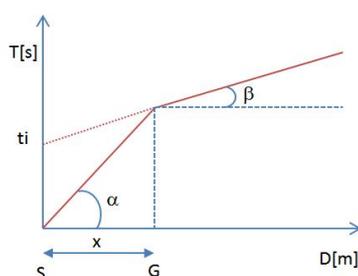
$$T = x_i / V_1$$

dove x_i è la distanza tra il punto di energizzazione e il punto di rilevazione.

L'equazione precedente rappresenta una retta che passa per l'origine degli assi tempi-distanze e il suo coefficiente angolare consente di calcolare la velocità V_1 del primo mezzo come

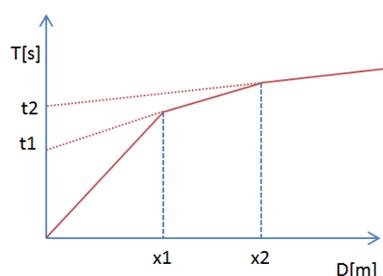
$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

I tempi di arrivo dei raggi rifratti, nel diagramma tempi-distanze, si dispongono secondo una retta che avrà pendenza minore di quella delle onde dirette.



La curva tempi-distanze tende ad avere un andamento regolare secondo una spezzata i cui vertici sono i chiamati *punti di ginocchio* e rappresentano, fisicamente, la condizione in cui si verifica l'arrivo contemporaneo delle onde dirette e rifratte. Per ciascuno di segmenti individuati si determina, dunque, il tempo di ritardo t_i che rappresenta la differenza tra il tempo che il raggio sismico impiega a percorrere un tratto alla velocità propria dello strato in cui si trasmette ed il tempo che impiegherebbe a viaggiare lungo la componente orizzontale di quel tratto alla massima velocità raggiunta in tutto il percorso di rifrazione.

Graficamente il tempo di ritardo è dato dall'intersezione della retta che comprende un segmento della curva tempi-distanze con l'asse dei tempi.

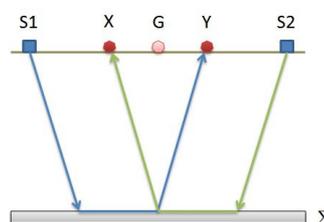


Infine, dalla conoscenza dei tempi t_i è possibile ricavare gli spessori dei rifrattori mediante la relazione:

$$h_{(i-1)} = \frac{V_{(i-1)}V_i}{2\sqrt{V_i^2 - V_{(i-1)}^2}} \left(t_i - \frac{2h_1\sqrt{V_i^2 - V_1^2}}{V_1V_i} - \dots - \frac{2h_{(i-2)}\sqrt{V_i^2 - V_{(i-2)}^2}}{V_1V_{(i-2)}} \right)$$

In situazioni morfologiche complesse può essere utilizzato come metodo di elaborazione il Metodo Reciproco Generalizzato (Generalized Reciprocal Method) discusso da Palmer nel 1980.

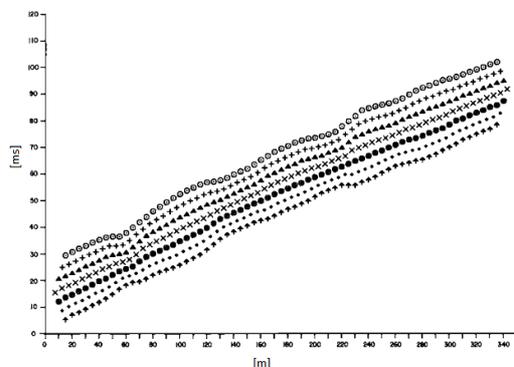
Il metodo è basato sulla ricerca di una distanza intergeofonica virtuale XY tale che i raggi sismici che partono da punti di energizzazione simmetrici rispetto allo stendimento, arrivino al geofono posto in posizione X e a quello posto in posizione Y provenendo da un medesimo punto del rifrattore.



Il primo passo operativo è quello di costruire un diagramma tempi-distanze individuando nei sismogrammi ottenuti dai dati di campagna i primi arrivi delle onde sismiche. Per determinare la distanza XY ottimale è necessario considerare più punti di energizzazione tanto agli estremi quanto all'interno dello stendimento. Ciò permette di individuare con maggiore accuratezza i tempi relativi ad un medesimo rifrattore utili a caratterizzare le dromocrone, fondamentali all'interpretazione. Nelle interpretazioni multi strato, la generazione delle dromocrone può sfruttare tecniche di phantoming per sopperire alla mancanza dei dati per alcuni rifrattori.

Dalla costruzione delle dromocrone è possibile determinare *la funzione velocità* secondo l'equazione

$$T_v = \frac{T_{S_1Y} - T_{S_2X} + T_{S_1S_2}}{2}$$



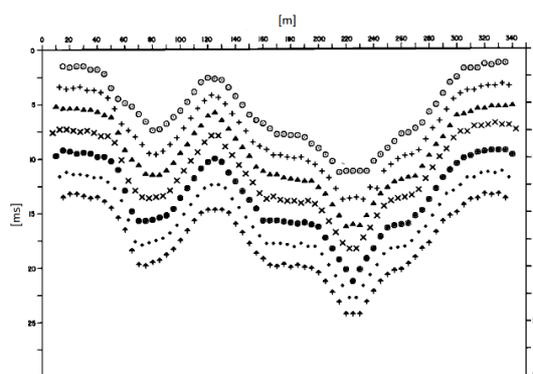
dove T_{S_1Y} e T_{S_2X} sono i tempi di percorrenza dei raggi sismici per giungere, rispettivamente, dalla sorgente S_1 ad X e dalla sorgente S_2 ad Y mentre $T_{S_1S_2}$ è il tempo di tragitto tra i due punti di scoppio S_1 ed S_2 , esternamente simmetrici rispetto allo stendimento. T_v è il tempo calcolato su un geofono G posto tra X ed Y , non necessariamente coincidente con la posizione di un geofono dello stendimento.

Il calcolo della funzione T_v viene eseguito per ogni valore di XY compreso tra zero e metà dello stendimento con variazione pari alla distanza reale tra i geofoni dello stendimento. La migliore retta di regressione delle funzioni velocità ottenute, permette di determinare l' XY ottimo e la velocità del rifrattore che è ricavata dal coefficiente angolare.

Per mezzo della **funzione tempo-profondità** è possibile trovare la profondità del rifrattore espressa in unità di tempo. L'espressione di tale funzione è:

$$T_G = \frac{T_{S_1Y} + T_{S_2X} - \left(T_{S_1S_2} + \frac{XY}{V_n} \right)}{2}$$

Dove V_n è la velocità del rifrattore.



Analogamente a quanto avviene per la funzione velocità si determinano diverse funzioni tempo-profondità per l'insieme dei valori XY di studio. Tra le funzioni trovate, quella che presenta la maggiore articolazione compete al valore di XY ottimo.

Infine, è possibile determinare lo spessore del rifrattore in corrispondenza delle posizioni dei geofoni G mediante la relazione:

$$h = T_G \sqrt{\frac{V_n XY}{2T_G}}$$

h rappresenta la profondità minima dal geofono G dunque la morfologia del rifrattore è definita dall'involuppo delle semicirconferenze di raggio h.

Uno dei principali vantaggi del G.R.M. è che il fattore di conversione della profondità è relativamente insensibile alle inclinazioni fino a circa 20°.

Geometria geofoni

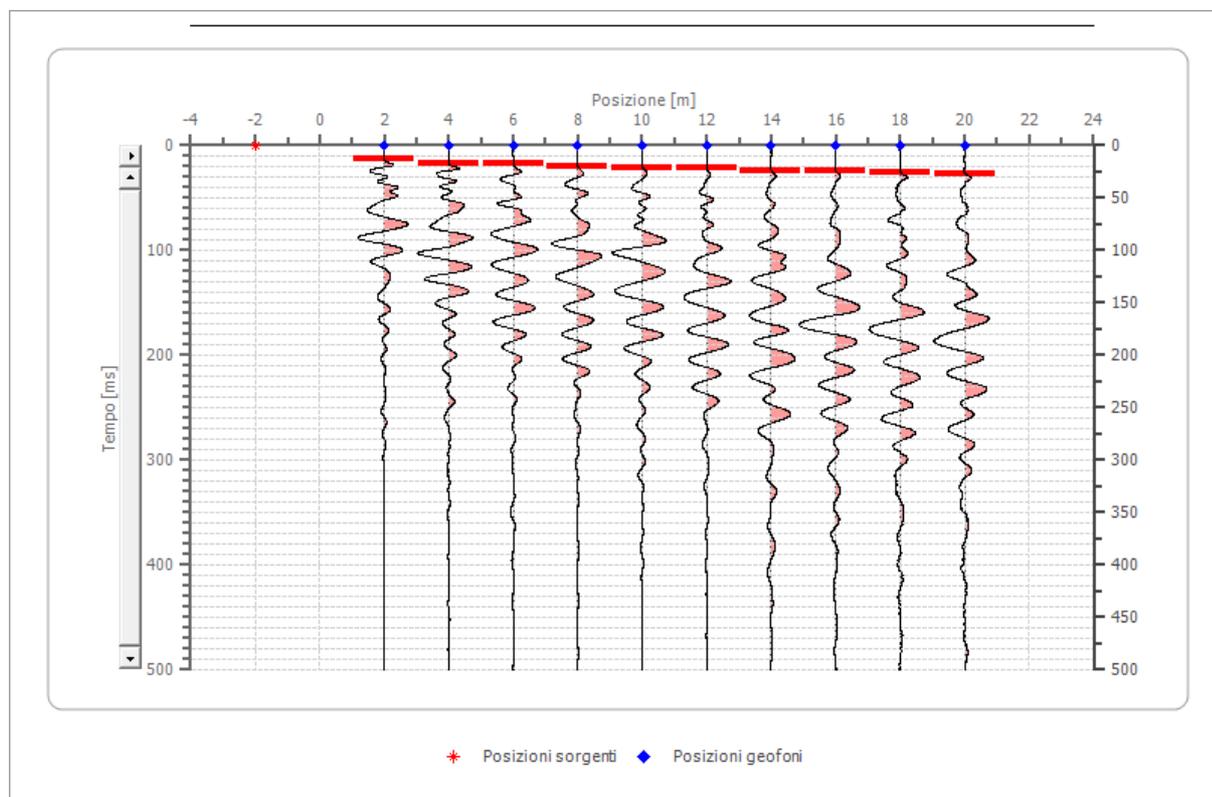
	Posizione X [m]	Posizione Z [m]
1	2.0	0.0
2	4.0	0.0
3	6.0	0.0
4	8.0	0.0
5	10.0	0.0
6	12.0	0.0
7	14.0	0.0
8	16.0	0.0
9	18.0	0.0
10	20.0	0.0

Dati battute SITO 1

Battuta 1

Posizione sorgente X -2 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]

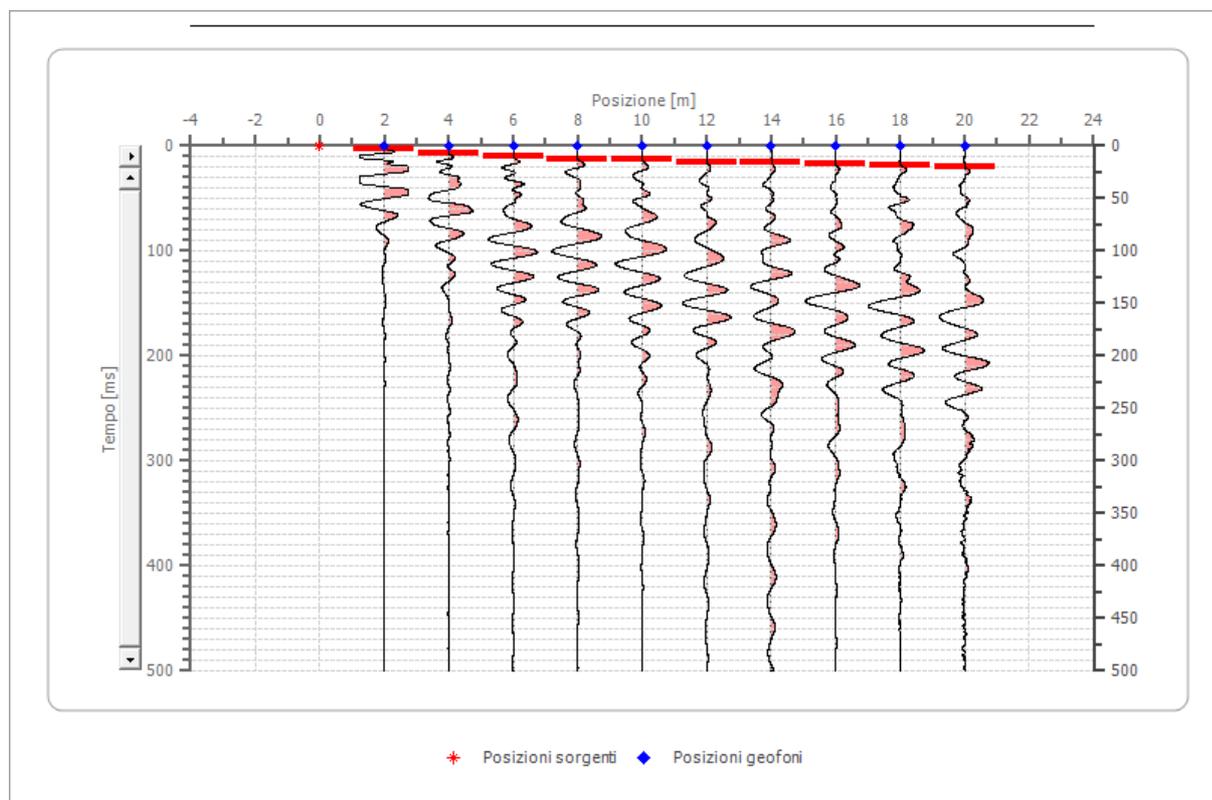


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
2.0	12.9428
4.0	17.5108
6.0	17.5108
8.0	19.7948
10.0	21.3175
12.0	22.0788
14.0	23.6015
16.0	24.3629
18.0	25.1242
20.0	26.6469

Battuta 2

Posizione sorgente X 0 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]

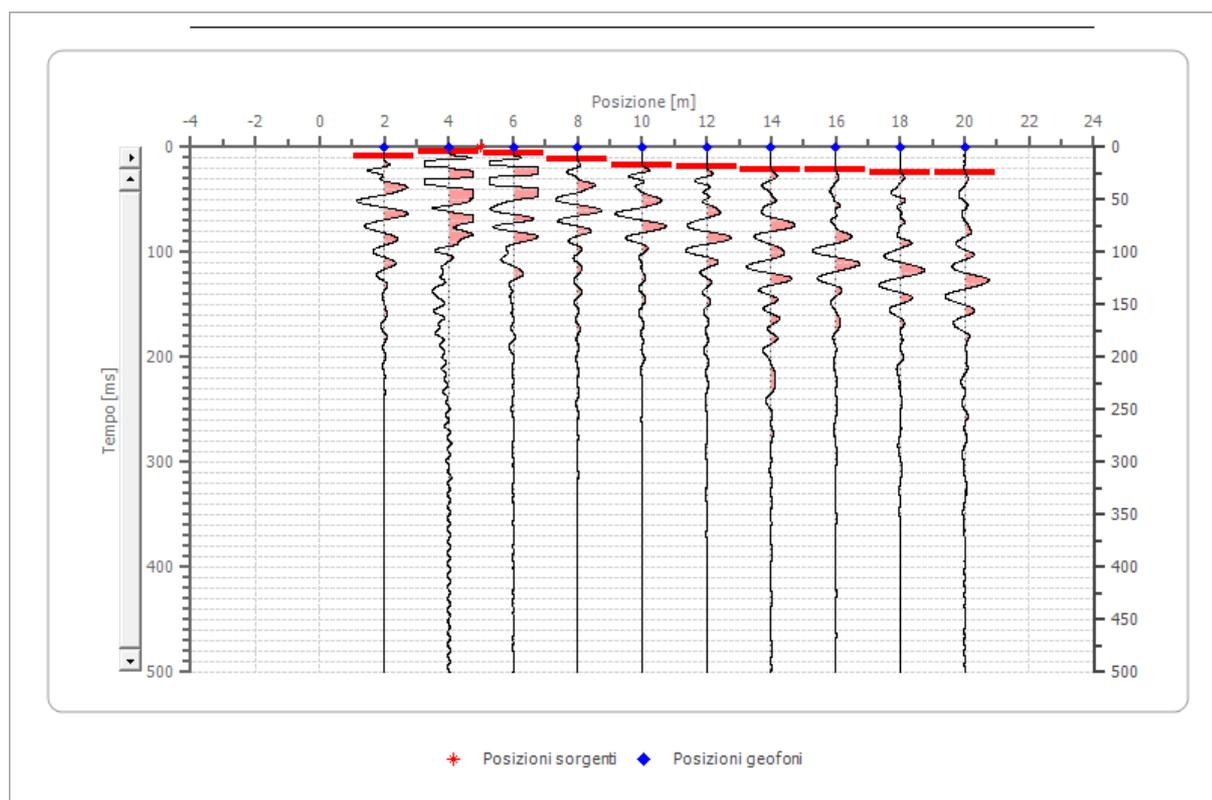


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
2.0	2.2840
4.0	6.8521
6.0	10.6588
8.0	12.1814
10.0	12.9428
12.0	15.2268
14.0	15.9881
16.0	17.5108
18.0	18.2721
20.0	20.5562

Battuta 3

Posizione sorgente X 5 [m]

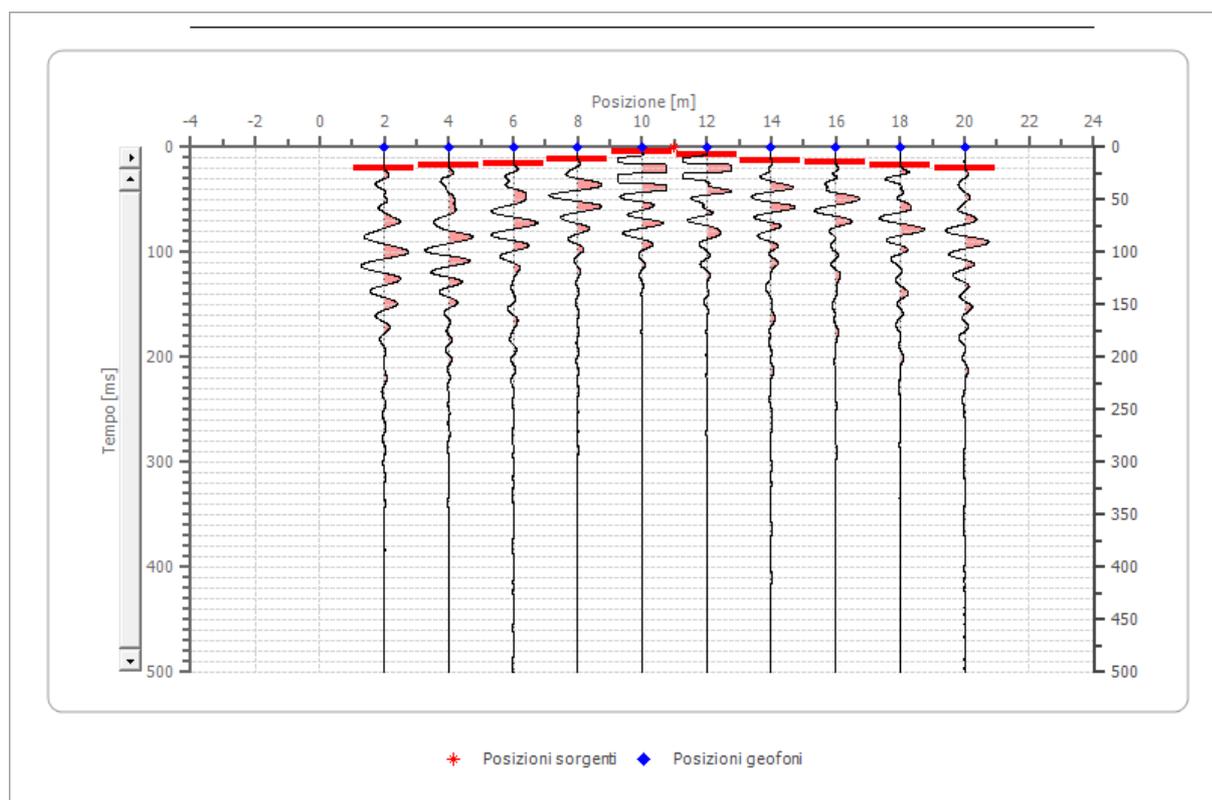
Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
2.0	9.1361
4.0	4.5680
6.0	5.3294
8.0	11.4201
10.0	17.5108
12.0	19.0335
14.0	21.3175
16.0	22.0788
18.0	23.6015
20.0	24.3629

Battuta 4

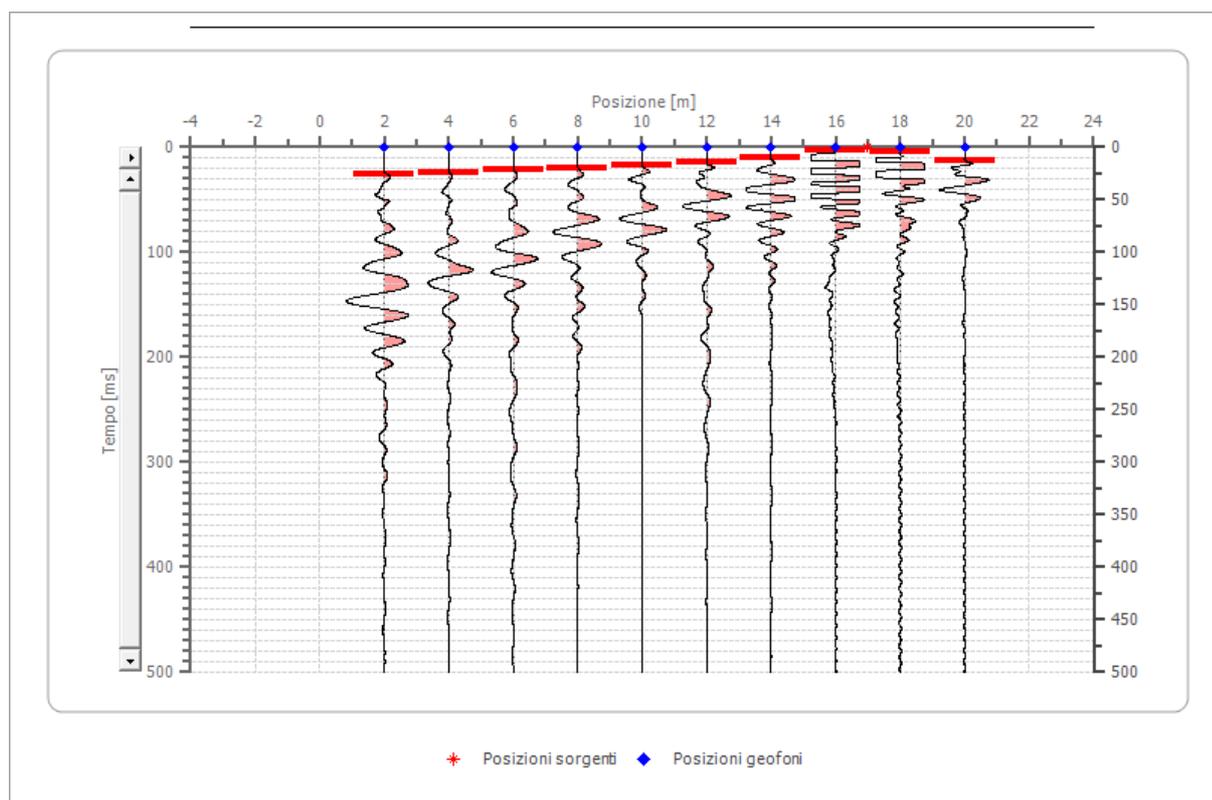
Posizione sorgente X 11 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
2.0	19.7948
4.0	16.7495
6.0	15.2268
8.0	11.4201
10.0	3.8067
12.0	6.8521
14.0	12.9428
16.0	14.4654
18.0	16.7495
20.0	20.5562

Battuta 5

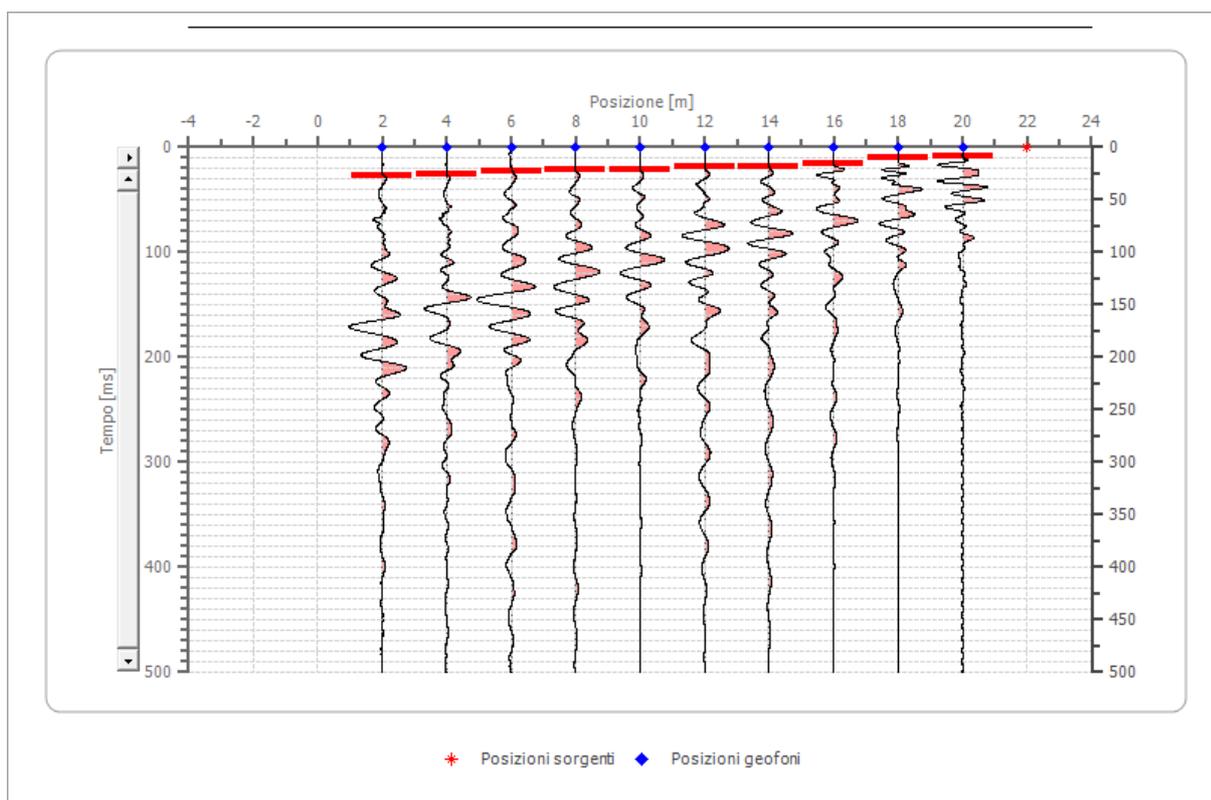
Posizione sorgente X 17 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
2.0	25.8855
4.0	23.6015
6.0	21.3175
8.0	19.7948
10.0	16.7495
12.0	13.7041
14.0	10.6588
16.0	2.2840
18.0	3.8067
20.0	12.1814

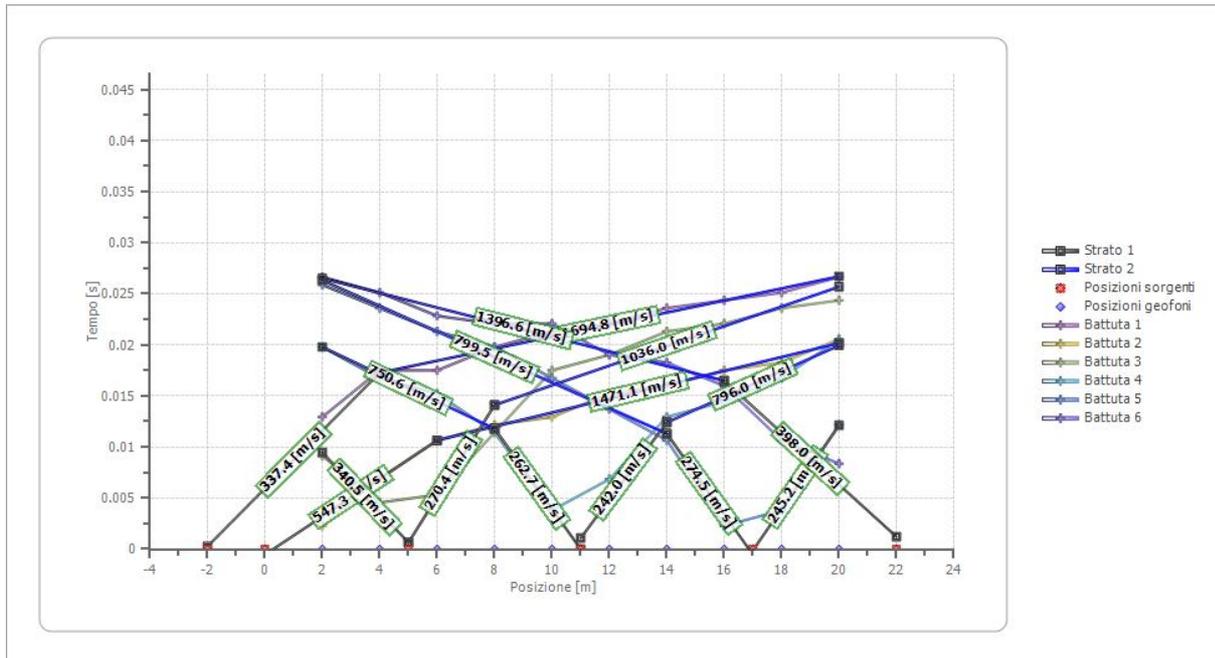
Battuta 6

Posizione sorgente X 22 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]

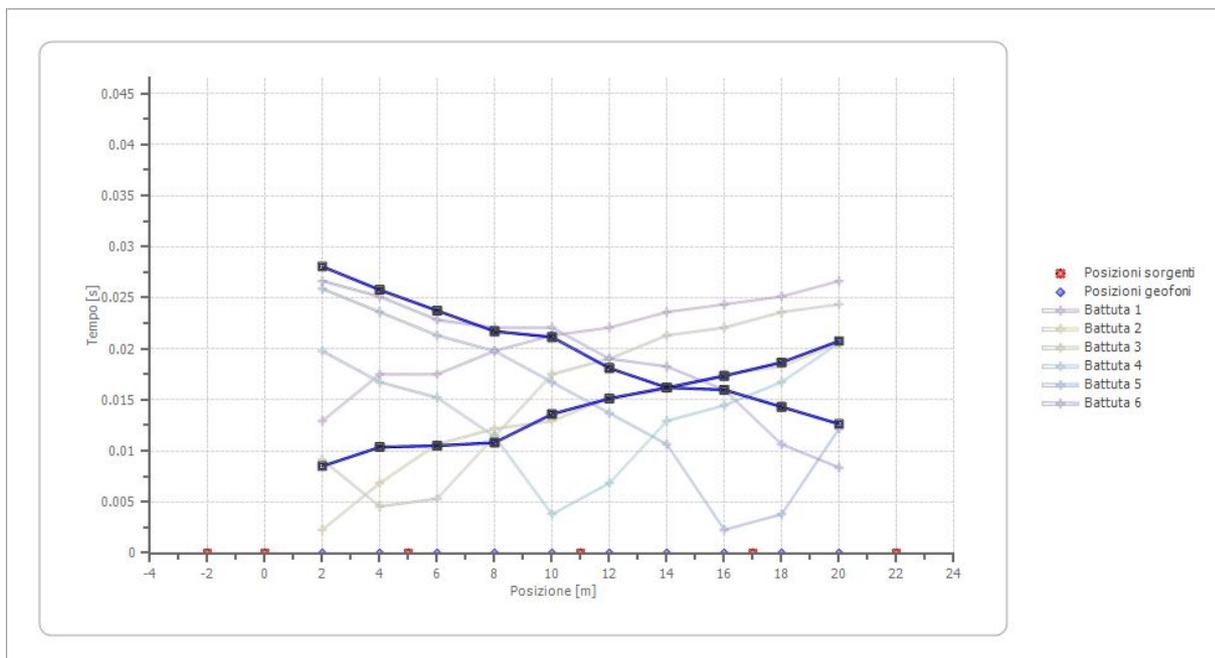


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
2.0	26.6469
4.0	25.1242
6.0	22.8402
8.0	22.0788
10.0	22.0788
12.0	19.0335
14.0	18.2721
16.0	15.9881
18.0	10.6588
20.0	8.3747

Dromocrone

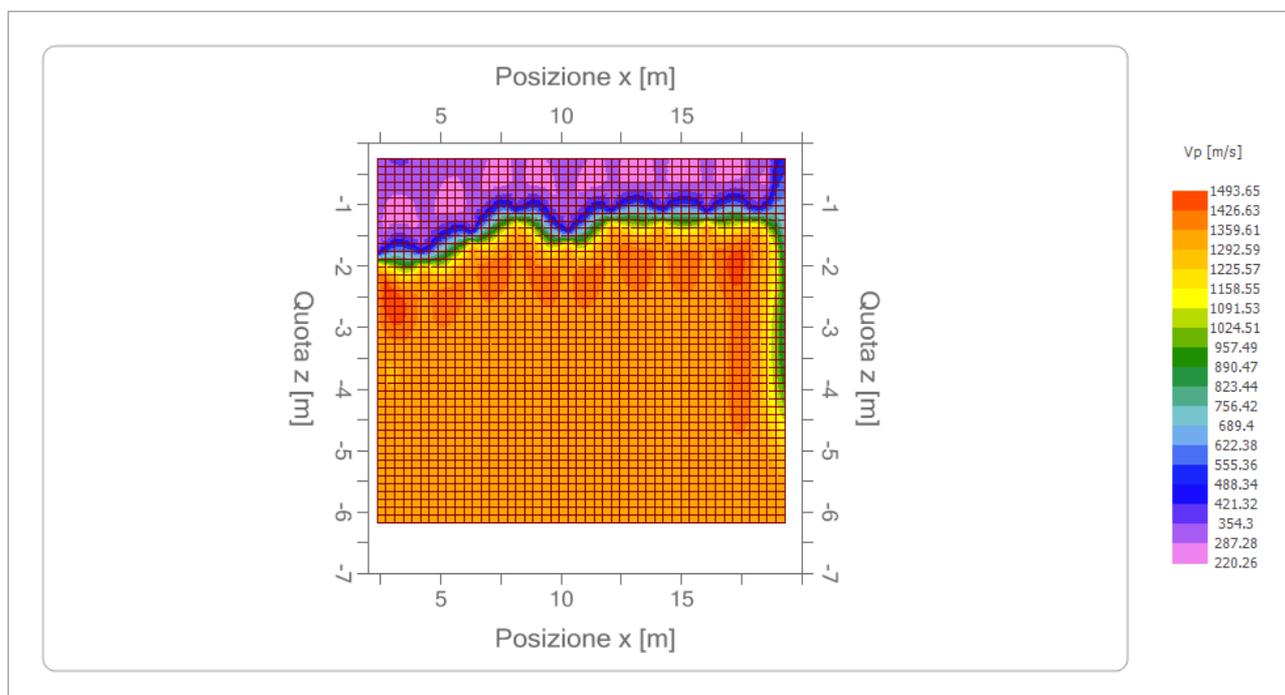
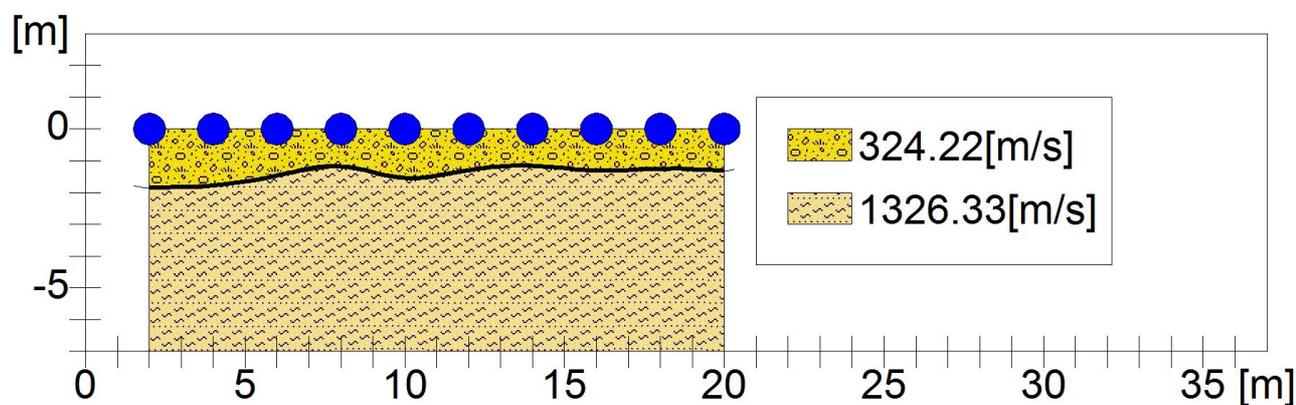


Dromocrone traslate



Interpretazione col metodo G.,R.M.

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 2.0 [m]	1.9	--
G= 4.0 [m]	1.8	--
G= 6.0 [m]	1.5	--
G= 8.0 [m]	1.2	--
G= 10.0 [m]	1.5	--
G= 12.0 [m]	1.3	--
G= 14.0 [m]	1.2	--
G= 16.0 [m]	1.3	--
G= 18.0 [m]	1.3	--
G= 20.0 [m]	1.3	--
Velocità [m/sec]	324.2	1326.3
Descrizione		



MASW

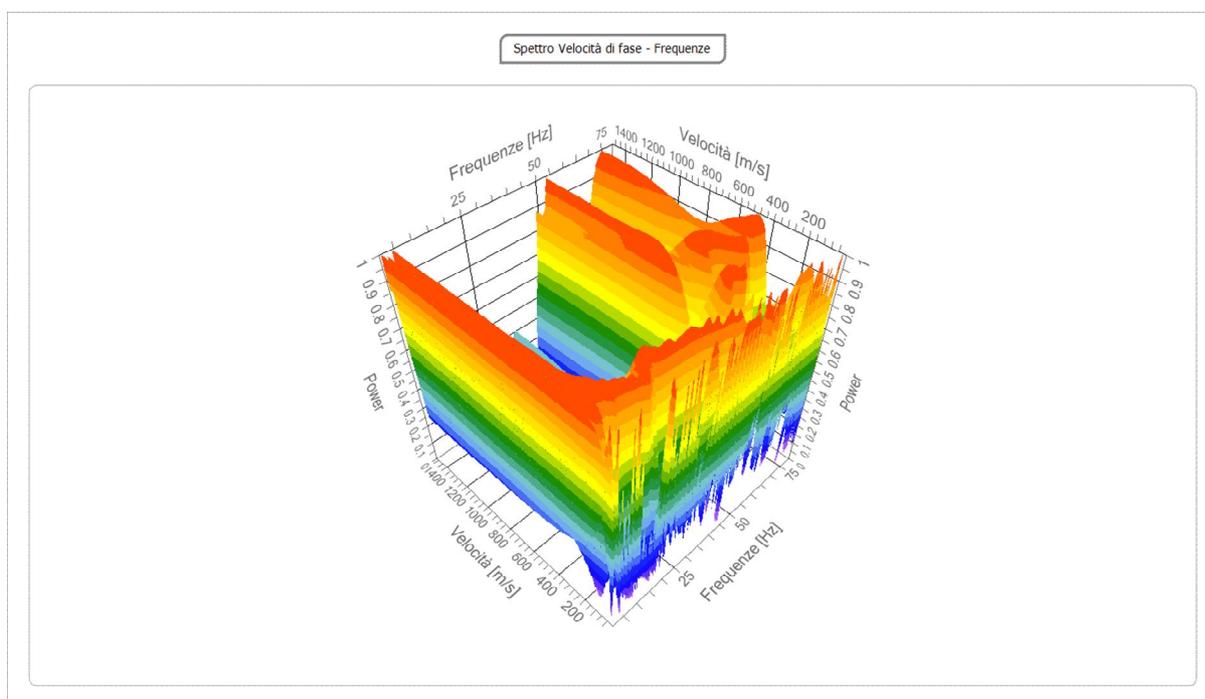
L'indagine MASW è stata effettuata per estrapolare la sismostratigrafia in onde S da poter correlare ai valori di V_p al fine di ottenere una stima dei moduli dinamici relativi ai sismostrati indagati e per la valutazione del parametro V_s eq.

L'analisi in frequenza è stata condotta sino ad una frequenza di 80 Hz sufficiente ad indagare il volume di sottosuolo di interesse.

In tale range di frequenza la curva di dispersione appare dominata dal modo fondamentale e dal I modo di vibrazione e presenta chiari picchi in ampiezza dello spettro frequenza/velocità

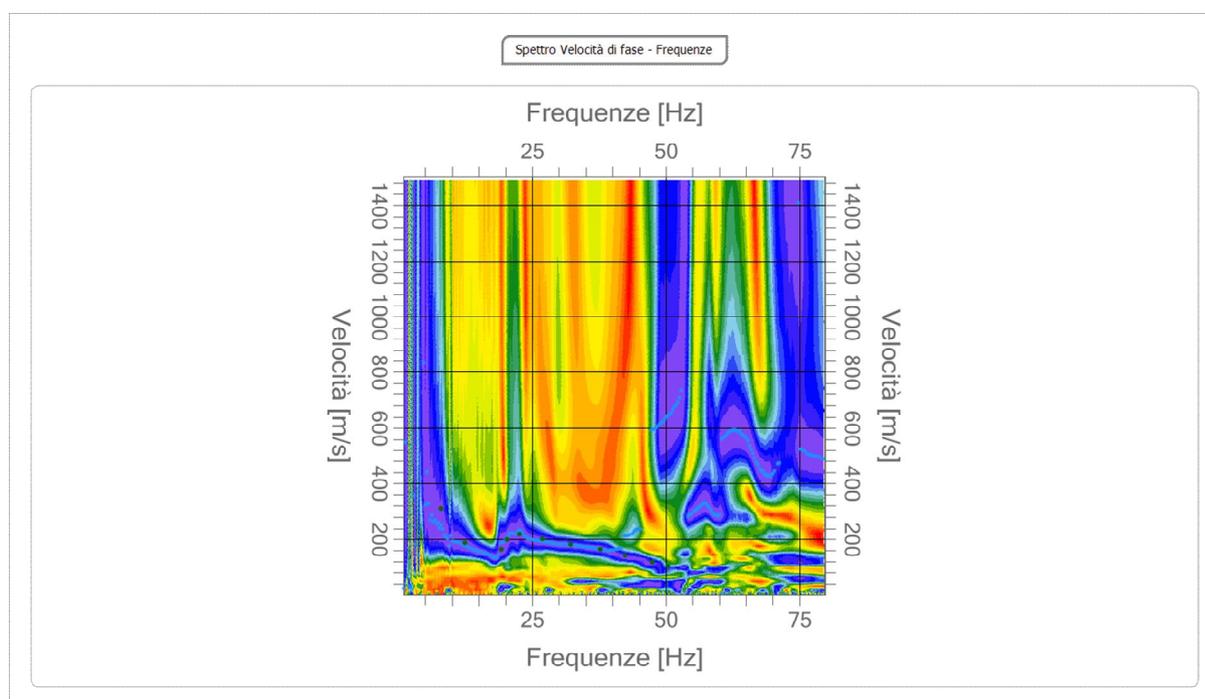
Il software utilizzato per l'elaborazione è Easy MASW.

Frequenza minima di elaborazione [Hz]	1
Frequenza massima di elaborazione [Hz]	80
Velocità minima di elaborazione [m/sec]	1
Velocità massima di elaborazione [m/sec]	1500
Intervallo velocità [m/sec]	1



Curva di dispersione

n.	Frequenza [Hz]	Velocità [m/sec]
1	7.9	310.6
2	12.5	188.0
3	19.2	163.5
4	20.4	200.3
5	22.6	218.6
6	27.0	203.3
7	32.1	181.9
8	37.8	163.5
9	42.3	142.0
10	47.5	117.5
11	50.4	102.2



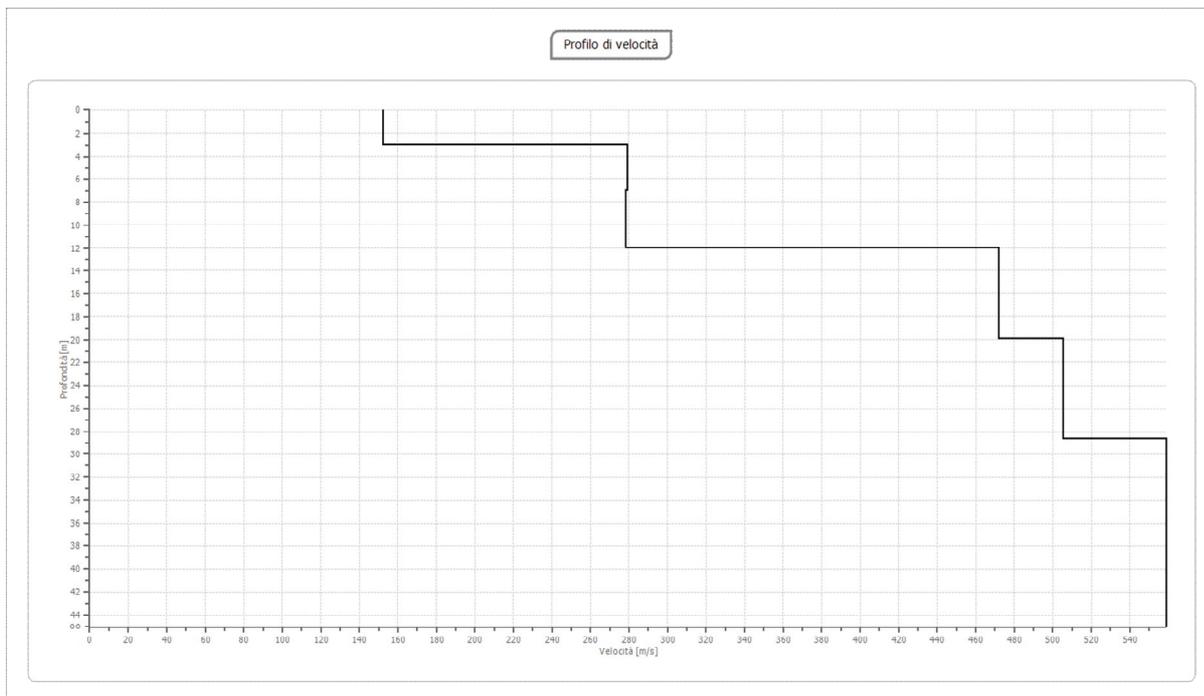
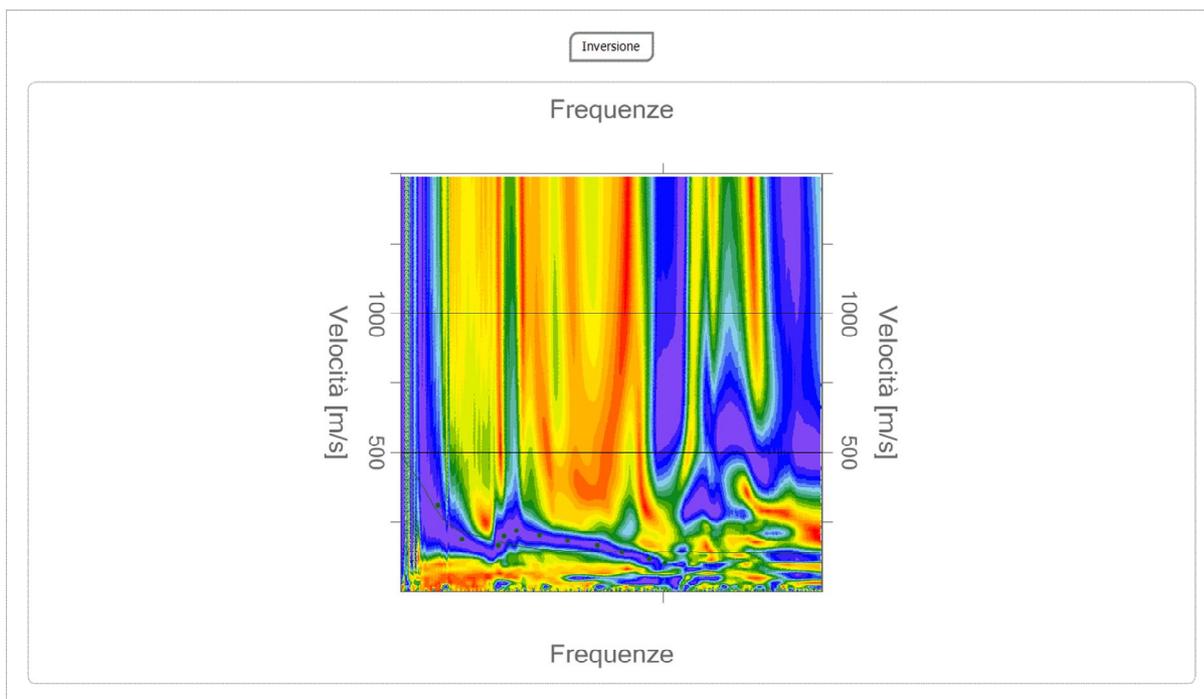
Inversione

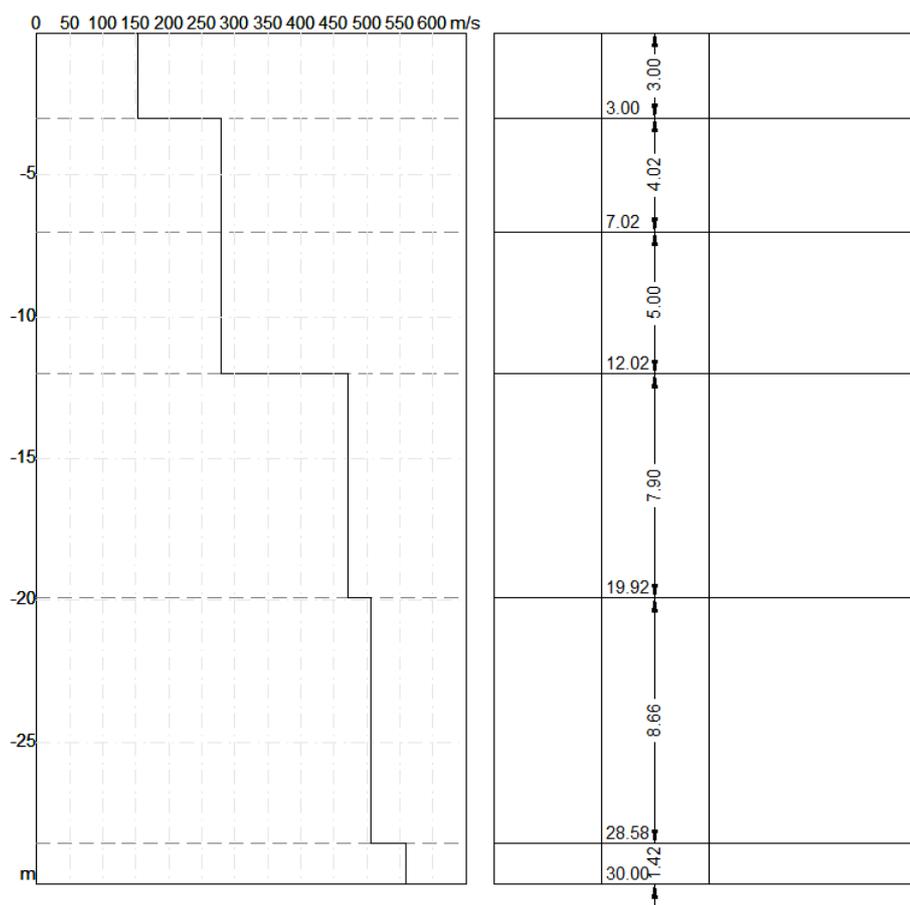
Percentuale di errore

3.107 %

Fattore di disadattamento della soluzione

0.196





Risultati

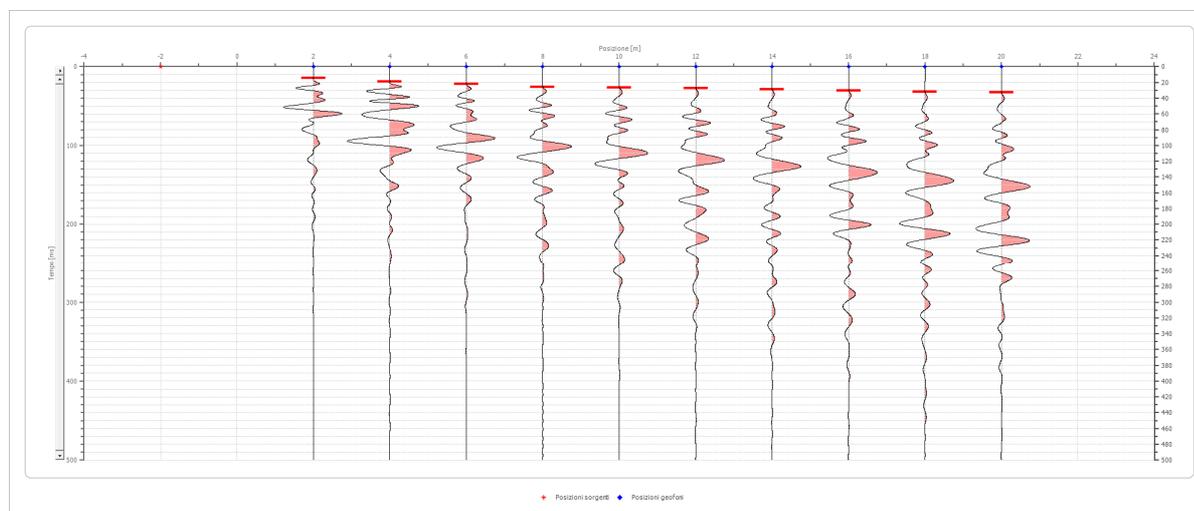
Vs,eq [m/sec]	339.19
(H=30.00 m)	
Categoria del suolo	C

Suolo di tipo C: Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

Dati battute SITO 2

Battuta 1

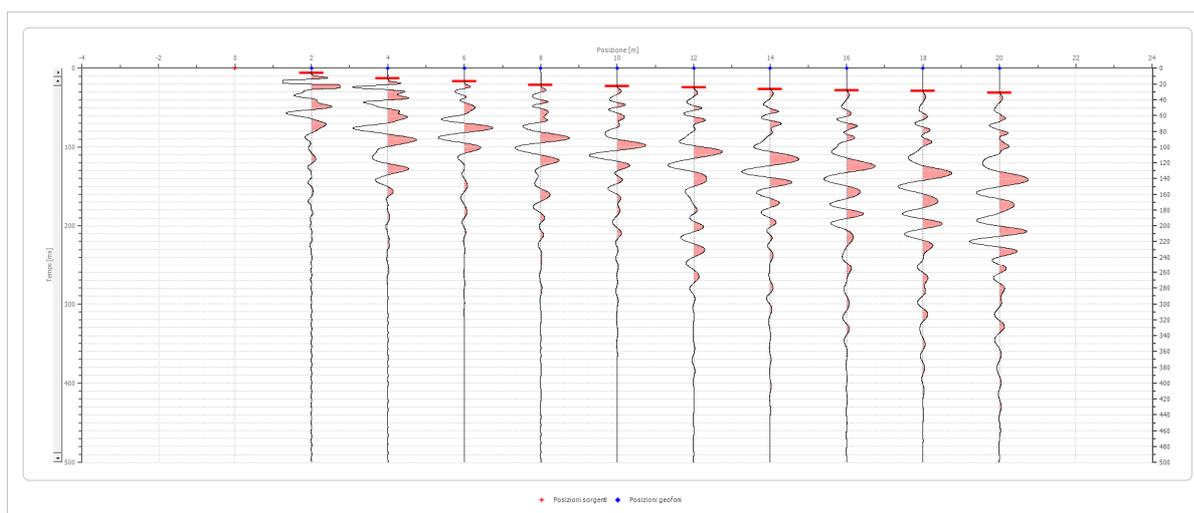
Posizione sorgente X -2 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
2.0	14.4654
4.0	19.0335
6.0	22.0788
8.0	25.8855
10.0	26.6469
12.0	27.4082
14.0	28.9309
16.0	30.4536
18.0	31.9763
20.0	32.7376

Battuta 2

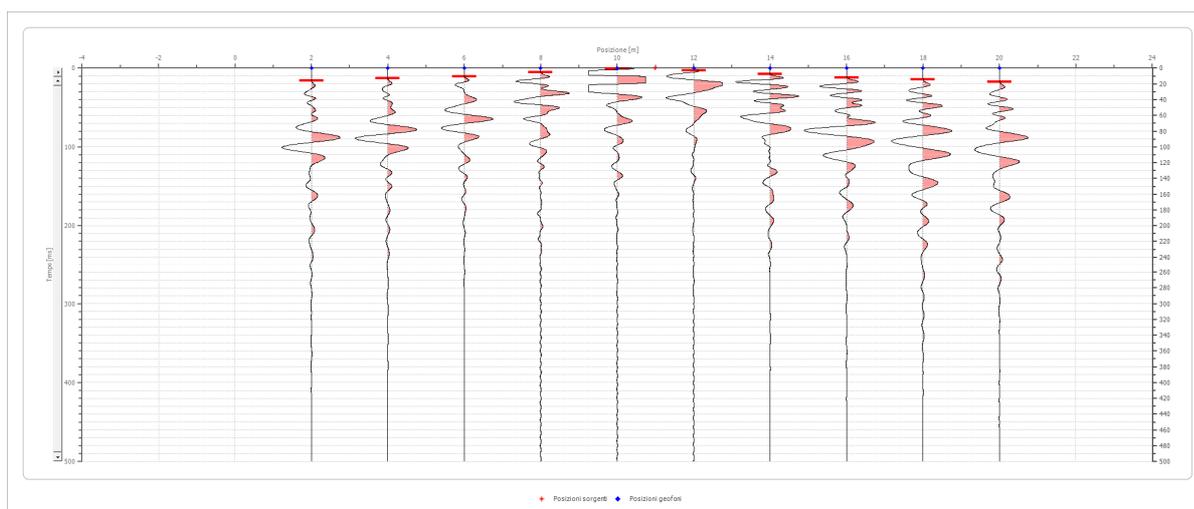
Posizione sorgente X 0 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
2.0	6.0907
4.0	12.9428
6.0	16.7495
8.0	21.3175
10.0	22.8402
12.0	24.3629
14.0	26.6469
16.0	28.1696
18.0	28.9309
20.0	31.2149

Battuta 3

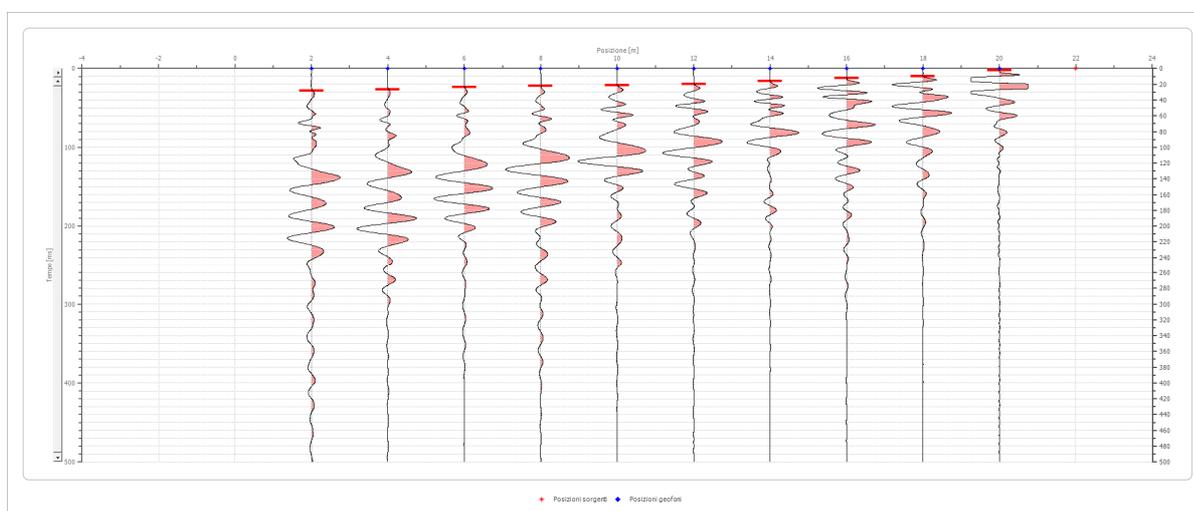
Posizione sorgente X 11 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
2.0	15.9881
4.0	12.9428
6.0	10.6588
8.0	5.3294
10.0	0.7613
12.0	3.0454
14.0	7.6134
16.0	12.1814
18.0	14.4654
20.0	17.5108

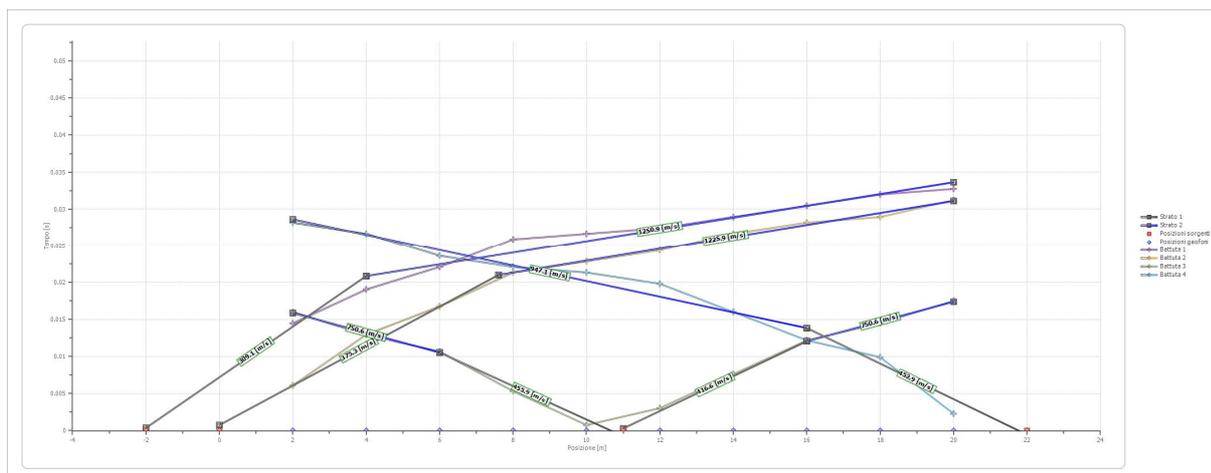
Battuta 4

Posizione sorgente X 22 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]

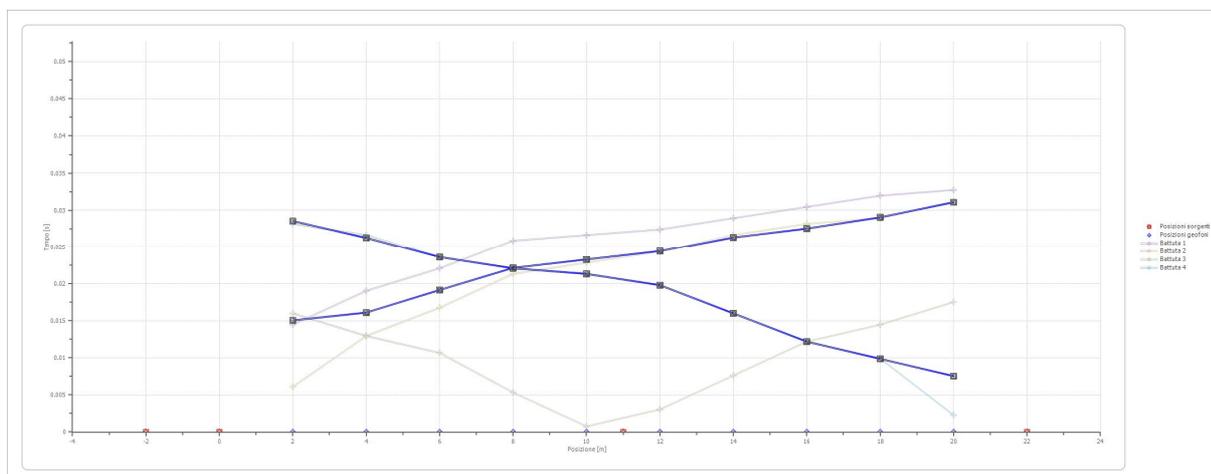


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
2.0	28.1696
4.0	26.6469
6.0	23.6015
8.0	22.0788
10.0	21.3175
12.0	19.7948
14.0	15.9881
16.0	12.1814
18.0	9.8974
20.0	2.2840

Dromocrone

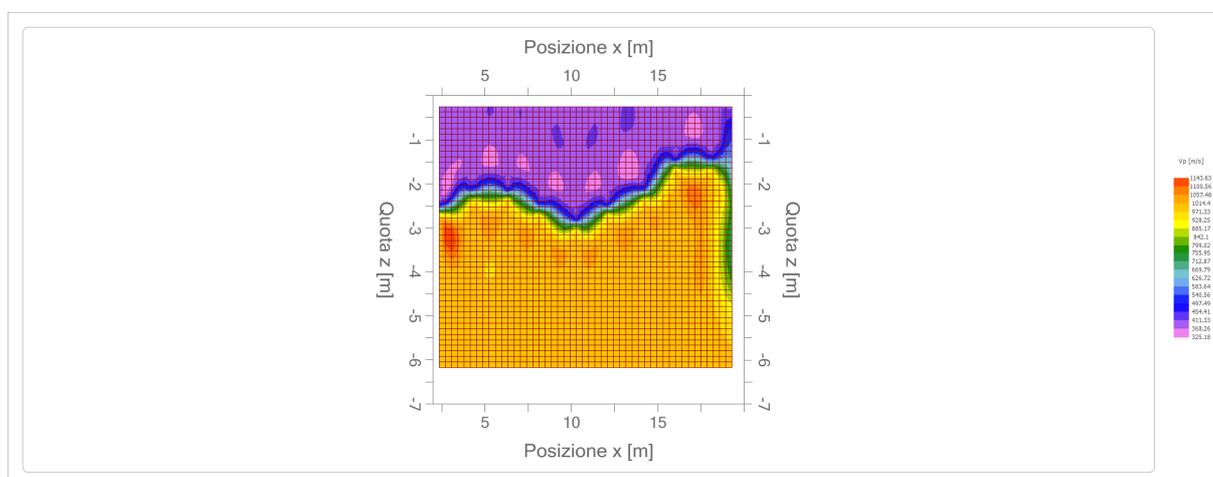
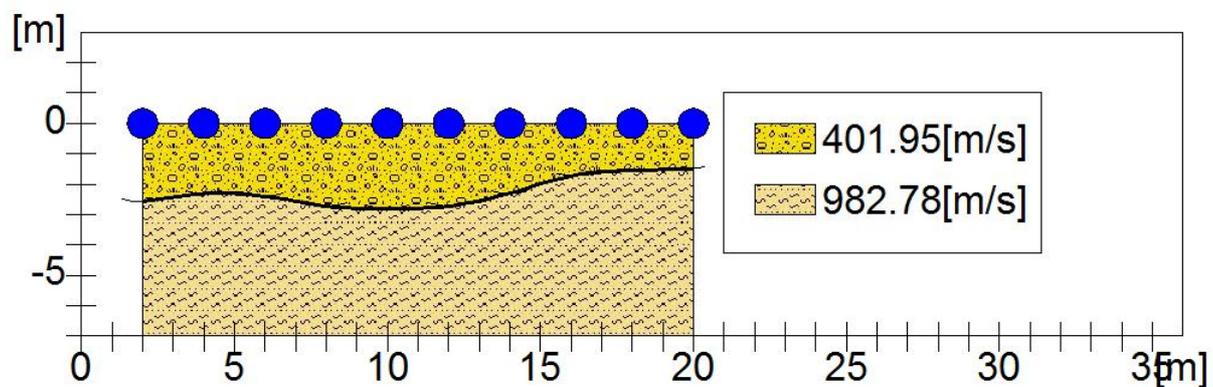


Dromocrone traslate



Interpretazione col metodo G.,R.M.

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 2.0 [m]	2.6	--
G= 4.0 [m]	2.3	--
G= 6.0 [m]	2.4	--
G= 8.0 [m]	2.7	--
G= 10.0 [m]	2.8	--
G= 12.0 [m]	2.7	--
G= 14.0 [m]	2.3	--
G= 16.0 [m]	1.7	--
G= 18.0 [m]	1.6	--
G= 20.0 [m]	1.5	--
Velocità [m/sec]	402.0	982.8
Descrizione		



MASW

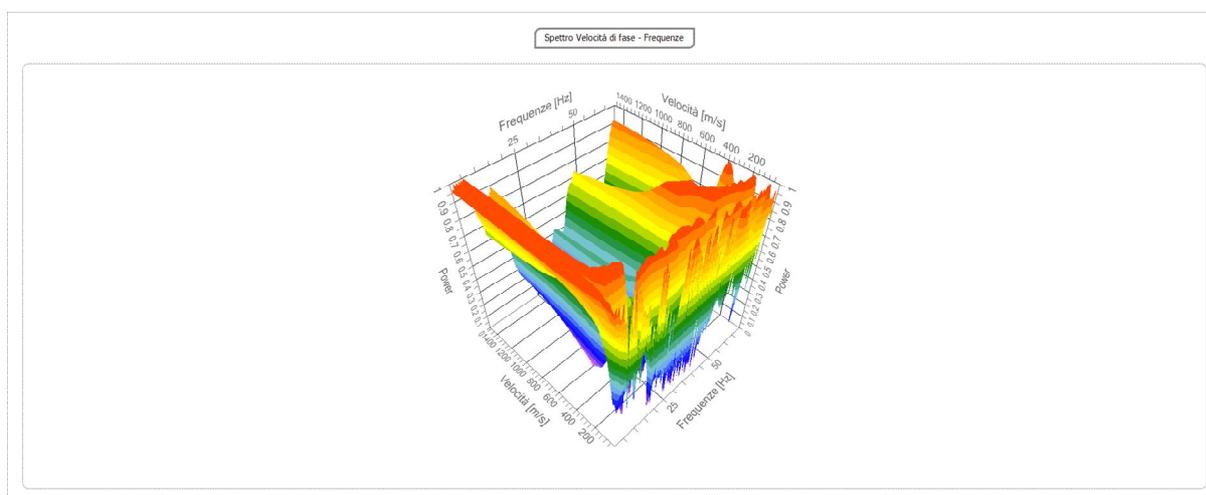
L'indagine MASW è stata effettuata per estrapolare la sismostratigrafia in onde S da poter correlare ai valori di V_p al fine di ottenere una stima dei moduli dinamici relativi ai sismostrati indagati e per la valutazione del parametro V_s eq.

L'analisi in frequenza è stata condotta sino ad una frequenza di 80 Hz sufficiente ad indagare il volume di sottosuolo di interesse.

In tale range di frequenza la curva di dispersione appare dominata dal modo fondamentale e dal I modo di vibrazione e presenta chiari picchi in ampiezza dello spettro frequenza/velocità

Il software utilizzato per l'elaborazione è Easy MASW.

Frequenza minima di elaborazione [Hz]	1
Frequenza massima di elaborazione [Hz]	70
Velocità minima di elaborazione [m/sec]	1
Velocità massima di elaborazione [m/sec]	1500
Intervallo velocità [m/sec]	1



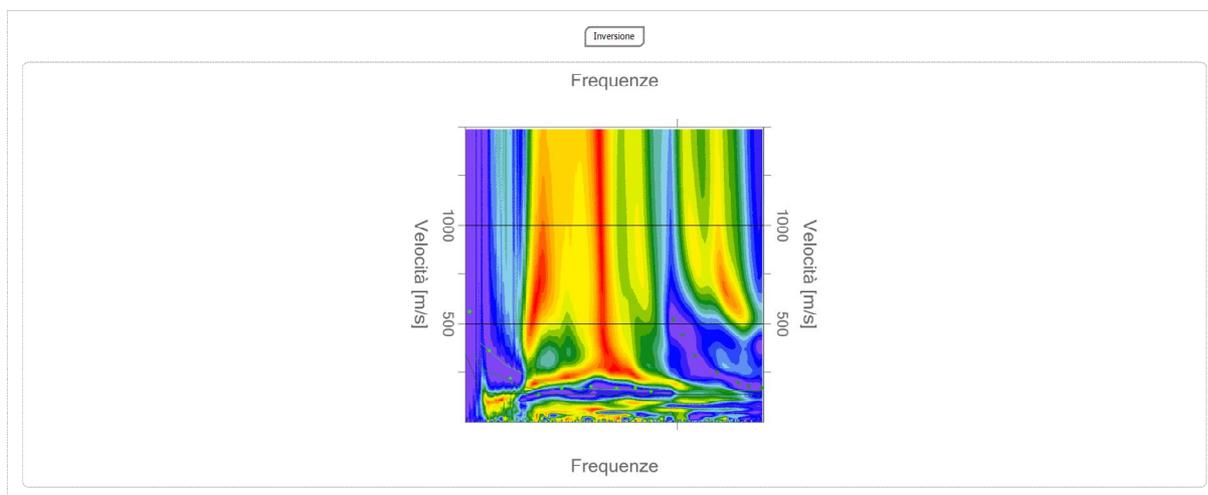
Curva di dispersione

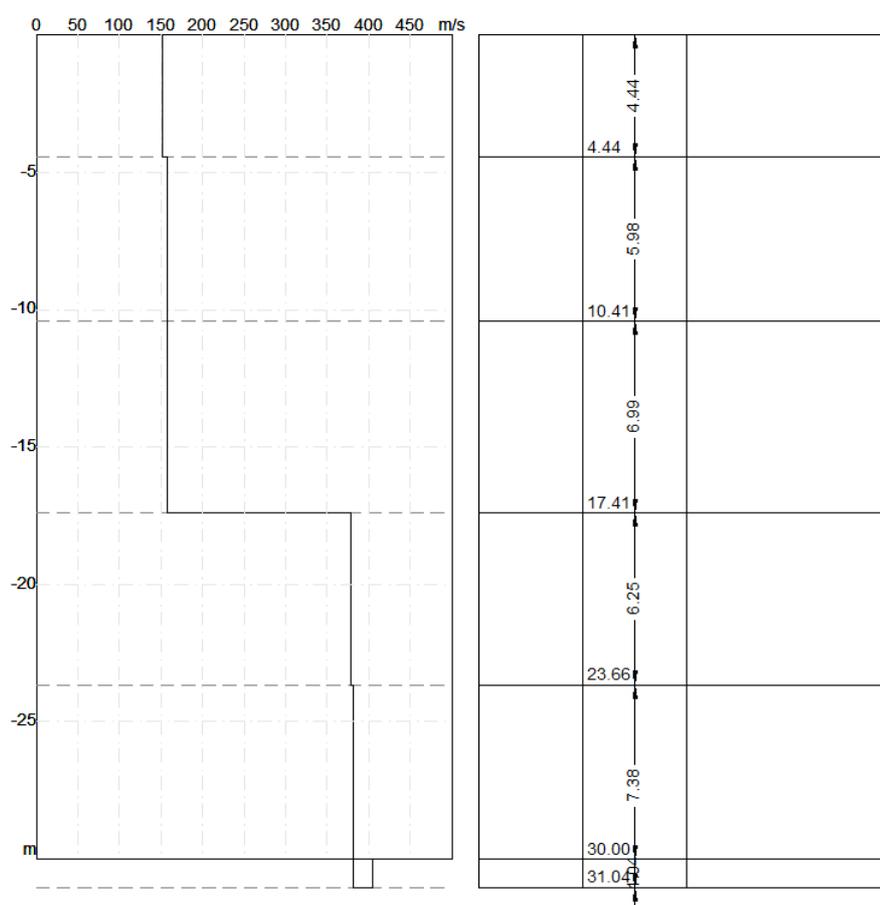
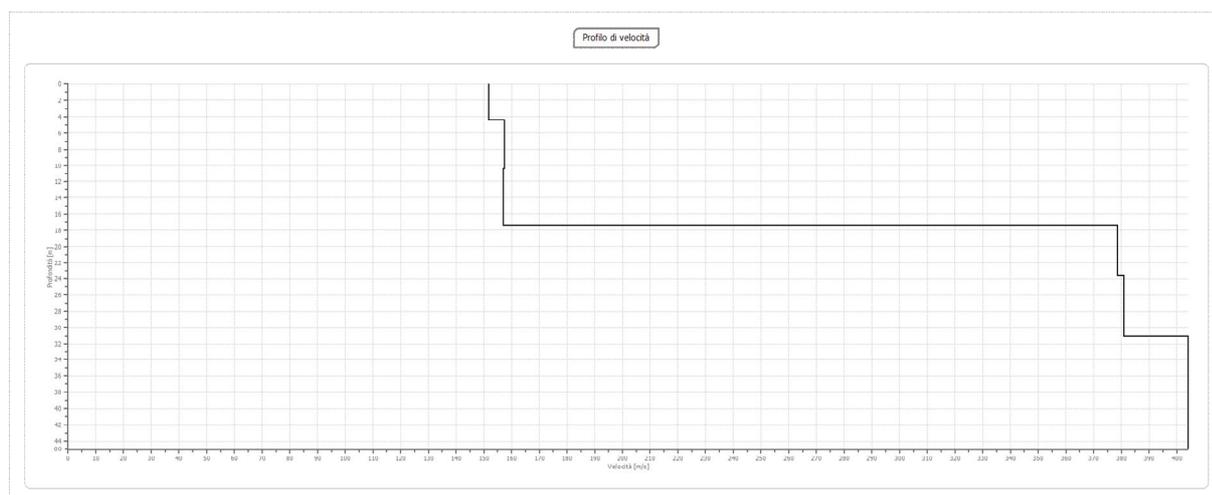
n.	Frequenza [Hz]	Velocità [m/sec]	Modo
1	2.0	562.0	2
2	6.5	359.7	2
3	11.5	218.6	2
4	18.0	138.9	2
5	23.3	169.6	2
6	30.1	178.8	2
7	36.1	169.6	2
8	40.3	172.7	2
9	44.0	151.2	2
10	49.2	519.1	1
11	51.3	439.4	1
12	54.1	335.1	1
13	59.2	249.3	1
14	64.2	197.2	1
15	66.6	181.9	1
16	69.5	172.7	1

Inversione

Fattore di disadattamento della soluzione

0.670





Risultati

$V_{s,eq}$ [m/sec]		212.76
(H=30.00 m)		
Categoria del suolo		C

Suolo di tipo C: Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

Calcolo moduli dinamici

Per il calcolo della densità, fondamentale per la stima dei moduli dinamici, si è optato per la correlazione ben nota in letteratura tra V_p e γ (Nafe & Drake, 1965). In tal modo è stato possibile ottenere una stima del modulo di Poisson e dei moduli dinamici mediante correlazioni tra i valori di V_p (sismica a rifrazione) e V_s (MASW) caratterizzanti i singoli sismostrati individuati.

Normalmente i moduli vengono calcolati sperimentalmente, mediante spessori e valori di V_p e V_s provenienti da sismica a rifrazione in onde P ed SH ottenendo come risultato una mappatura 2D di tali parametri. Nel presente lavoro i valori relativi alla sismostatigrafia in onde S sono stati ottenuti dall'indagine MASW. Si precisa pertanto che tali valori rappresentano una stima monodimensionale dei suddetti moduli.

Il modulo di Young E (o modulo di elasticità longitudinale) è definito a partire dalla legge di Hooke:

$$E = \sigma / \varepsilon$$

σ : sforzo, viene misurato in pascal.
 ε : deformazione, è una grandezza adimensionale, spesso la si esprime in percentuale.

Il modulo di Young viene determinato dal diagramma sforzo-deformazione (fig.5a) mediante la formula appena vista, nel tratto in cui il materiale subisce una deformazione elastica (ovvero rimuovendo lo sforzo il materiale deve essere in grado di ritornare alle dimensioni iniziali).

Il **modulo di taglio μ** , detto anche modulo di scorrimento, di rigidità o di elasticità tangenziale, è una *costante di Lamè* che esprime il rapporto sforzo-deformazione tangenziali (fig.5b).

Data una piastra di lunghezza indefinita di spessore h , perpendicolare all'asse x , sulle cui facce agisce una coppia di tensioni tangenziali (o di taglio) di verso opposto T_1 e $-T_1$, si produrrà uno spostamento $\delta l / 2$ nel senso delle z positive e $\delta l / 2$ nel senso opposto. In pratica è come se una faccia rimanesse ferma e si producesse uno spostamento di δl .

Lo spostamento totale δl sarà in relazione allo sforzo di taglio T_1 e allo spessore h secondo la relazione:

dove μ è il modulo di taglio.

$$\delta l = \frac{1}{\mu} h T_1$$

Considerando lo spostamento angolare α , ponendo l'angolo uguale alla sua tangente, la relazione diventerà semplicemente:

$$\alpha = \frac{T_1}{\mu}$$

Il modulo bulk k (o modulo di compressibilità) di una materiale definisce la capacità della stessa di resistere ad una forza di compressione uniforme. È definito come l'incremento di pressione necessario a causare un relativo decremento di volume (fig.5c) secondo la relazione:

$$K = -V \frac{\partial p}{\partial V}$$

dove K è appunto il modulo di compressibilità, p la pressione e V il volume.

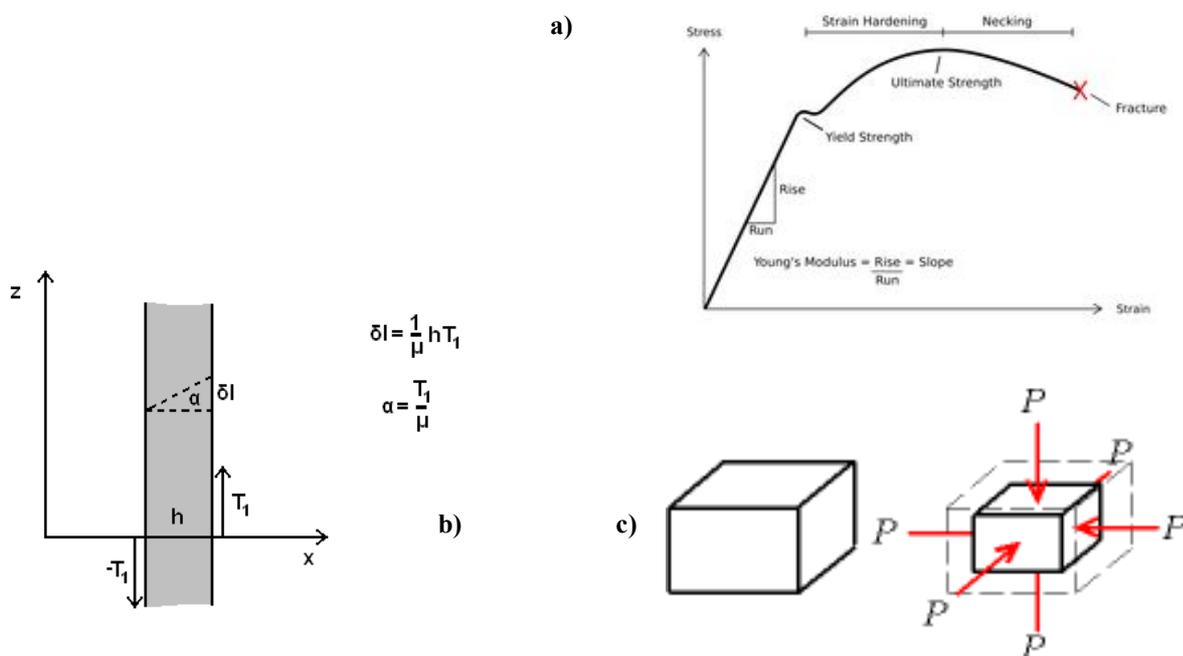


Fig. 5 – a) Diagramma sforzo- deformazione di un materiale duttile, b) Esempio di resistenza al taglio, c) Esempio di compressione uniforme.

Le correlazioni tra V_p , V_s e moduli, utilizzate nel presente lavoro, sono le seguenti:

Poisson $\nu = (V_p^2 - 2 \cdot V_s^2) / 2 \cdot (V_p^2 - V_s^2)$

Young $E = [2 \cdot \gamma \cdot V_s^2 \cdot (1 + \nu)] / 10000$

Shear $G = (\gamma \cdot V_s^2) / 10000$

Bulk $K = [\gamma \cdot V_p^2 - (4/3 \cdot V_s^2)] / 10000$

le quali restituiscono valori dei moduli in MPa. Le formule utilizzate per il calcolo dei parametri elastici si basano essenzialmente sulle proprietà sismiche dei terreni (V_p e V_s).

Inoltre considerando l'analogia tra le unità sismostratigrafiche individuate dai due metodi sismici applicati a tale studio ($V_p - V_s$), in termini di spessori e di coerenza tra i rapporti V_p/V_s è stato possibile effettuare una stima approssimativa dei valori dei moduli dinamici caratterizzanti le unità, riassunti nelle seguenti tabelle.

ONDE P	ONDE S	Poisson	Young (MPa)	Taglio (MPa)	Bulk (MPa)	Young STATICO (MPa)	γ (kN/m^3)	φ (°)
Velocità (m/sec)	Velocità (m/sec)							
324	152	0,36	94,22	34,67	111,29	30,34	15,0	25,0
1326	455	0,43	1163,87	406,02	2906,98	91,61	19,6	30,0

SITO 1

ONDE P	ONDE S	Poisson	Young (MPa)	Taglio (MPa)	Bulk (MPa)	Young STATICO (MPa)	γ (kN/m^3)	φ (°)
Velocità (m/sec)	Velocità (m/sec)							
402	152	0,42	102,33	36,12	204,48	30,34	15,6	25,0
983	381	0,41	759,31	268,95	1431,72	91,61	18,5	30,0

SITO 2

La sequenza litostratigrafica deducibile dalle indagini (quindi dalla massima profondità di indagine a circa 7m) è attribuibile a un modello a due strati.

Bitonto 27/05/2022

il tecnico

(dott. geol. Gianluca Fallacara)

