



Nuovo impianto per la produzione di  
energia da fonte eolica nel comune di  
Maracalagonis (CA)

RELAZIONE SULLA PERICOLOSITA' SISMICA  
DI BASE EX NTC 2018

Rev. 0.0

Data: Giugno 2022

WIND003.REL003c

ECOWIND 2 S.r.l.

Via Alessandro Manzoni 30,  
20121 Milano (MI)

P.IVA: 12071590967

PEC: [ecowind2srl@legalmail.com](mailto:ecowind2srl@legalmail.com)

Incaricato:

**Queequeg Renewables, ltd**  
Unit 3.03, 1110 Great West Road  
TW80GP London (UK)  
Company number: 111780524  
email: [mail@queenter.co.uk](mailto:mail@queenter.co.uk)

---

## SOMMARIO

1. Premessa.....	3
2. Ubicazione e caratteristiche generali dell'intervento .....	3
2.1 Studi ed indagini di riferimento .....	3
2.2 Inquadramento geografico generale .....	4
3. Inquadramento Geologico .....	7
3.1 Descrizione del contesto geologico dell'area vasta oggetto di intervento.....	7
4. Inquadramento Geomorfologico .....	10
4.1 Lineamenti geomorfologici generali .....	17
5. Inquadramento sismico .....	18
5.1 Azione sismica.....	19
5.2 Vita nominale, classi d'uso e periodo di riferimento.....	20
5.3 Amplificazione stratigrafica e topografica.....	21
6. Indagini Geognostiche .....	22
6.1 Categorie del sottosuolo.....	35
6.1.1 Parametri di pericolosità sismica .....	41

## 1. Premessa

La presente relazione è parte integrante del procedimento di **Valutazione d'Impatto Ambientale** ai sensi del Decreto Legislativo numero 152 del 2006, e di Autorizzazione Unica Regionale ai sensi dell'articolo 12 del Decreto Legislativo numero 387 del 2003 e del D. G. R. 3/15 del 23 Gennaio 2018.

Nell'ambito della redazione del **Progetto Definitivo** che prevede la realizzazione di un impianto eolico per la produzione di energia elettrica, di potenza nominale pari a 92.400 kW denominato "Bruncu de Lianu" e dislocato nel territorio comunale di Maracalagonis nella Provincia di Cagliari, al fine di avere un quadro completo del contesto geologico e geotecnico è stata redatta la presente **Relazione sulla Pericolosità Sismica di Base** in supporto al progetto, la cui stesura ottempera quanto previsto dal D.M. del 17/01/2018 recante le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (di seguito NTC).

In data **03.03.2021 e 11.03.2021** è stata eseguita una prospezione sismica eseguita con la tecnica MASW (stendimenti denominati M1 – M2 – M3 – M4 – M5) al fine di determinare la categoria di sottosuolo.

La presente è redatta in ottemperanza a quanto stabilito dalla vigente normativa in materia, con particolare riferimento a:

- D.M LL.PP. 11.03.1988 "Norme Tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione in applicazione della Legge 02.02.1974 n°64.
- Circ. Min. LL.PP. n° 30483 del 24.09.1988 – Istruzioni per l'applicazione del D.M. LL.PP.11.03.1988.
- Raccomandazioni, programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, 1975 – Associazione Geotecnica Italiana.
- D.M. Infrastrutture 17.01.2018 - Norme Tecniche per le Costruzioni. (§3.2. – Azione Sismica).

## 2. Ubicazione e caratteristiche generali dell'intervento

### 2.1 Studi ed indagini di riferimento

Le informazioni topografiche e geologiche dell'area oggetto della presente sono state ricavate dalle pubblicazioni ufficiali e cartografia tematica esistente. Si elencano di seguito:

- Carta Topografica I.G.M. scala in 1:25000
- Carta Tecnica Regionale in scala 1:10000 sezione 558130 "Bruncu de su Soli", 558140 "Castiadas", 567010 "Geremeas" e 567120 "Santa Barbara".
- Carta Geologica dell'Italia in scala 1:100000, nel foglio n°234 "Cagliari"
- Carta Geologica dell'Italia in scala 1:50.000 (CARG) nel foglio n°557 "Cagliari" e 549 "Muravera".

- Cartografia Geologica di base della R.A.S. in scala 1:25.000
- RAS - Carta dell'Uso del Suolo della Regione Sardegna, 2008
- I.S.P.R.A. - Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo (legge 464/84)
- RAS – Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna, annali idrologici 1922-2009
- RAS – Autorità di Bacino - Piano Stralcio d'Assetto Idrogeologico
- RAS – Autorità di Bacino - Piano di Tutela delle Acque
- RAS – Autorità di Bacino - Piano Stralcio delle Fasce Fluviali
- Foto aeree, Regione Sardegna

I dati a disposizione sono stati integrati con le informazioni derivanti dai sopralluoghi effettuati e dagli esiti della campagna delle indagini geologico-geostrutturali e geofisiche eseguita in data 10-15 e 16/03/2021 nella zona di interesse.

## 2.2 Inquadramento geografico generale

Maracalagonis è un Comune italiano di 7 922 abitanti della città metropolitana di Cagliari, che si trova a 82 metri sul livello del mare.

L'inquadramento cartografico di riferimento è il seguente:

- Cartografia ufficiale dell'Istituto Geografico Militare I.G.M scala 1:25 000. Serie 25 –Fogli: 558 "Castiadas" sez. III, e sez. I, 567 "Geremeas" sez. IV.
- Carta Tecnica Regionale in scala 1:10000 sezione 558130 "Brunco de su Soli", 558140 "Castiadas", 567010 "Geremeas" e 567120 "Santa Barbara".



Figura 1- Panoramica dal lato occidentale dell'area di studio

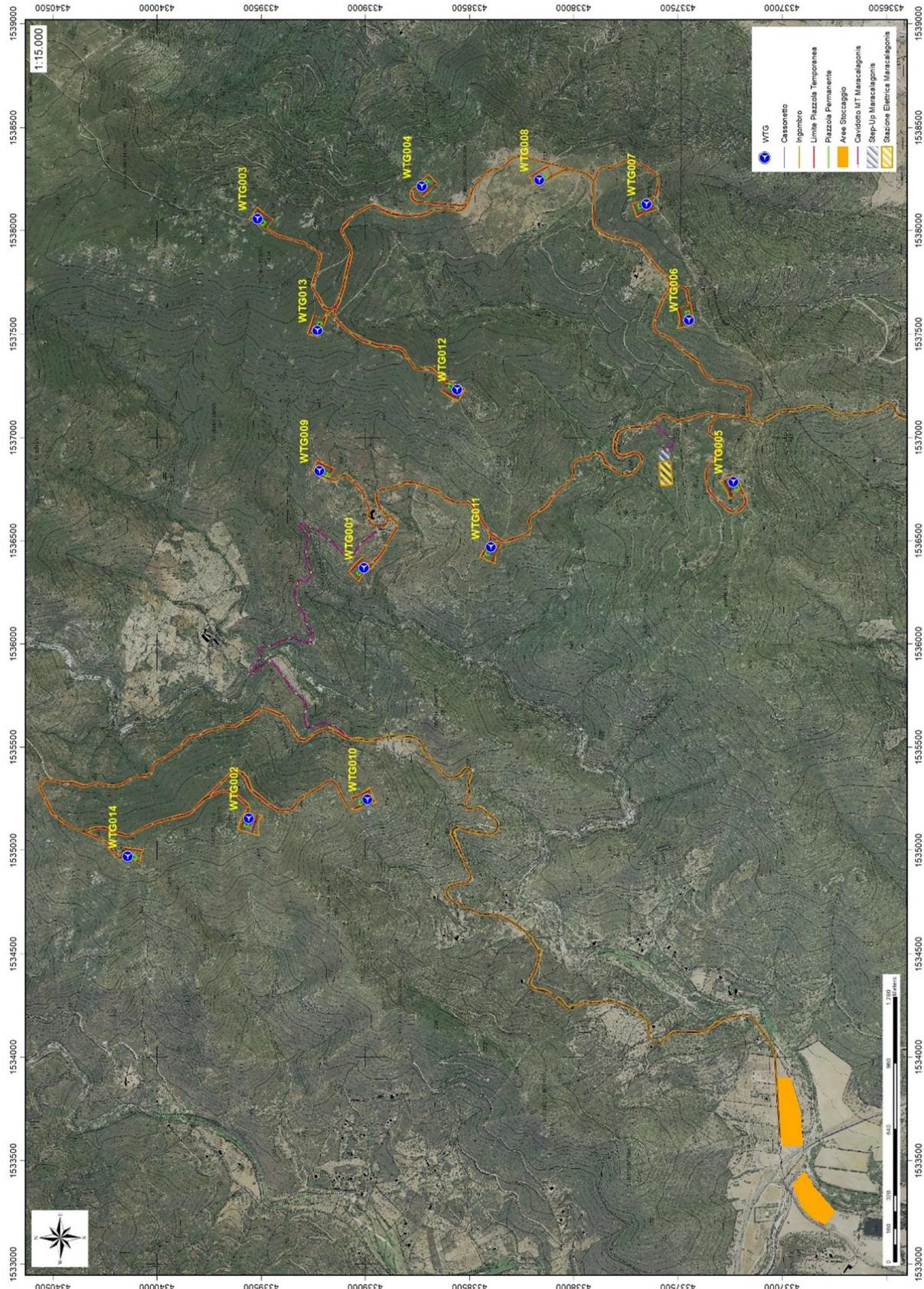


Figura 2 Localizzazione dell'area - (Google Earth)

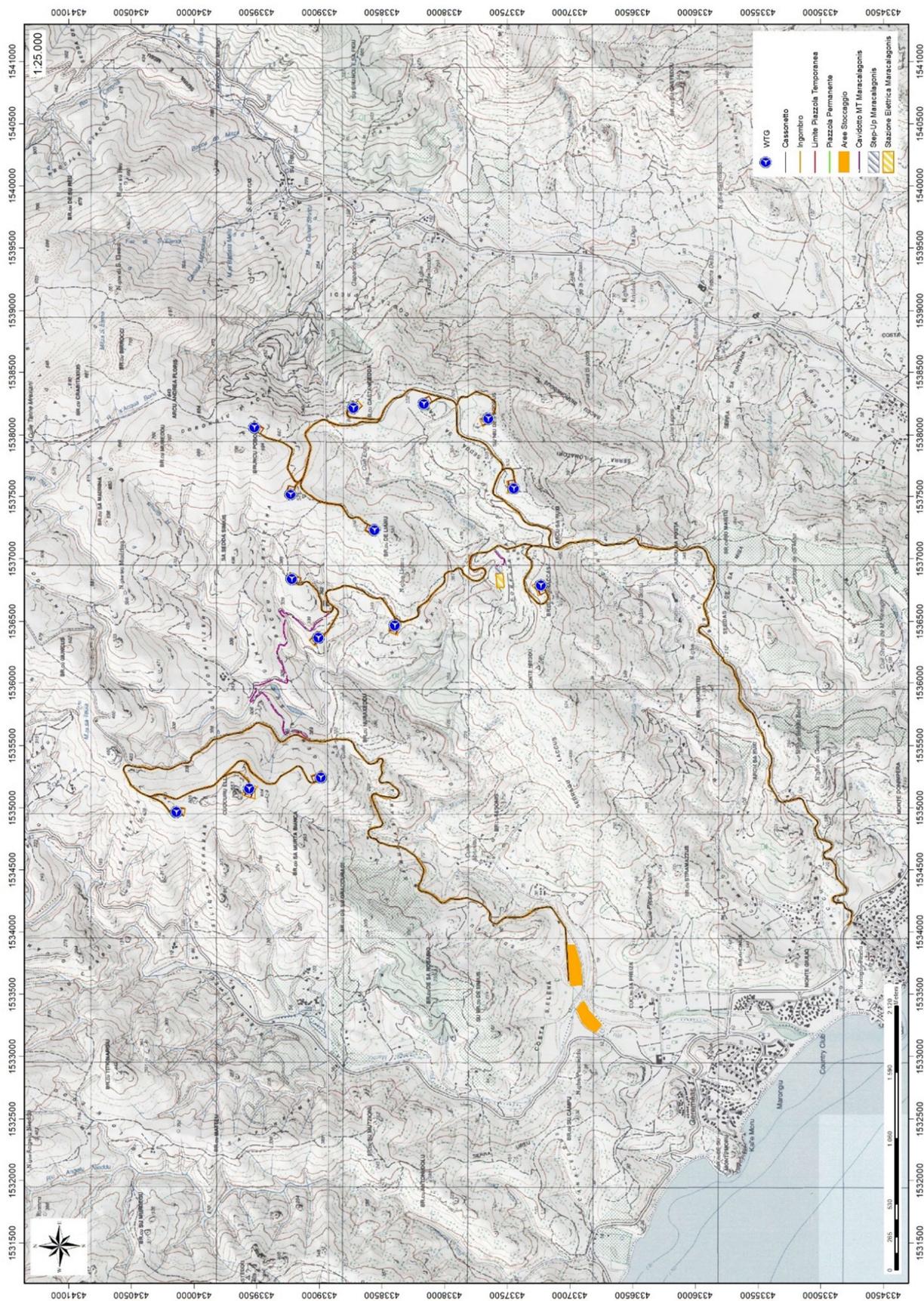


Figura 3- Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000

Le turbine verranno posizionate nelle sommità dei colli situati circa 5Km a NE di Geremeas. L'area del Parco eolico in progetto è delimitata da *Cuccuru Ella, Sa Sedda Simius, Bruncu Posolu, Br.cu Castangedda*, cava di pietra di *Bacci Ingroneddus, Monte Nieddu e Br.cu Sa Murta Bianca*.

### 3. Inquadramento Geologico

#### 3.1 Descrizione del contesto geologico dell'area vasta oggetto di intervento

A partire dal Paleozoico si sono susseguiti una serie di eventi geologici sviluppatasi nell'arco di circa mezzo miliardo di anni, che hanno reso la Sardegna una delle regioni geografiche più antiche del Mediterraneo centrale e, morfologicamente e cronologicamente eterogenea.

L'isola riflette pertanto una storia geologica molto articolata, che testimonia, in maniera più o meno completa, alcuni dei grandi eventi geodinamici degli ultimi 400 milioni di anni.

L'orogenesi Caledoniana, la più antica, le cui tracce si rinvengono principalmente nel nord della Gran Bretagna e nella Scandinavia occidentale, fu causata dalla progressiva chiusura dell'oceano Giapeto, a seguito della collisione dei continenti Laurentia, Baltica e Avalonia, dando così origine al super continente Laurussia.

La successiva fase dell'orogenesi Ercinica (o Varisica) ha avuto corso a partire dal Carbonifero, circa 350 Ma fa e si è protratta fino al Permiano determinando un'estesa catena montuosa ubicata tra il Nord America e l'Europa.

Quest'orogenesi ha prodotto in Sardegna tre zone metamorfiche principali. Procedendo dal nucleo orogenetico verso l'avanfossa si trovano le zone dette: Assiale (Sardegna NE) – a Falde interne (Sardegna centrale) - a Falde esterne (Sardegna SW).

Successivamente, tra il Carbonifero Sup. e il Permiano Inf., il basamento paleozoico è soggetto magmatismo, intrusioni di differente composizione, che danno luogo a un batolite granitico composito, la cui ossatura fondamentale affiora in continuità nella Sardegna Settentrionale e nella Corsica Occidentale.

Nel resto dell'Isola affiorano plutoni isolati, anch'essi compositi, di minori dimensioni, quali quelli dell'Iglesiente e del Sarrabus, settore di interesse della presente relazione.

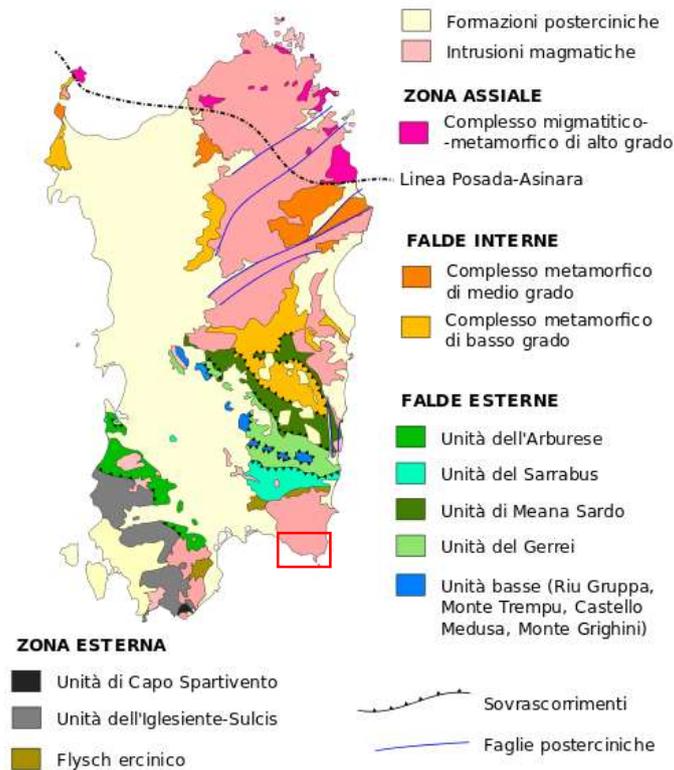


Figura 4– Schema tettonico-strutturale della Sardegna

Tale complesso è costituito da prodotti intrusivi ed effusivi che si sono messi in posto tra il Carbonifero superiore e il Permiano, contemporaneamente al sollevamento, al collasso e allo spianamento della catena ercinica. Tra i granitoidi nell'aria di interesse affiorano litologie appartenenti all' *Unità Intrusiva di Geremeas (GEA)* e all'*Unità Intrusiva di S. Gregorio (GGO)*.

La prima è costituita da granodioriti da inequigranulari a fortemente inequigranulari a grana grossa, con megacristalli di K-feldspato bianchi o rosati che vanno dai 2-3cm ai 6-7cm, e da granodioriti equigranulari mesocrate a grana media grossa.

La seconda è costituita sia da monzograniti biotici a struttura equigranulare e tessitura isotropa, sia da monzograniti biotici a struttura inequigranulare in genere microporfirica.

Nei corpi granitoidi sono frequenti filoni basici e filoni aplitici, che presentano direzioni comprese fra nord ovest - sud est e nord - sud. Tali masse granitiche hanno indotto sulle formazioni che hanno intruso un'aureola metamorfica più o meno estesa.

Sono poi presenti talvolta depositi recenti rappresentati dai prodotti di disfacimento della roccia madre e dei suoi derivati che vanno a colmare le vallecole e/o i piccoli impluvi presenti.

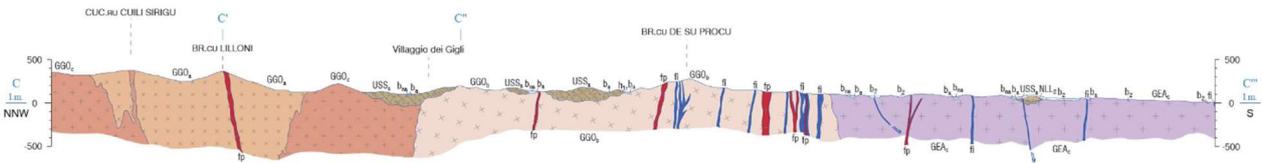


Figura 5: Sezione geologica rappresentativa dell'area vasta (da Foglio CARG 557)

In particolare, nell'area vasta affiorano le seguenti litologie, di seguito riportate con la nomenclatura adottata dalla RAS nella stesura della cartografia geologica in scala 1:25000:

#### DEPOSITI QUATERNARI DELL'AREA CONTINENTALE

**ba-** Depositi alluvionali. Ghiaie da grossolane a medie. OLOCENE

**baa-** Depositi alluvionali terrazzati. Ghiaie con subordinate sabbie. OLOCENE

**PVM2a - Litofacies nel Subsistema di Portoscuso (SINTEMA DI PORTOVESME).** Ghiaie alluvionali terrazzate da medie a grossolane, con subordinate sabbie. PLEISTOCENE SUP.

#### CORTEO FILONIANO

**fq-** Filoni idrotermali di Quarzo, spesso mineralizzati a Barite

**fp-** Filoni ed ammassi acidi, porfidi riolitici e dacitici

**fa-** Filoni acidi: aplo-pegmatiti

**fi-** Filoni intermedio-basici da andesitici a basaltici indistinti CARBONIFERO SUP.-PERMIANO

#### GRANITOIDI E PLUTONITI BASICHE

##### UNITA' INTRUSIVA DI SAN GREGORIO

**GGOc - Micro-sienograniti** a biotite a carattere leucocrato, a struttura microporfirica, talora microgranulare a grana fine.

**GGOb Leuco-sienograniti biotitici** a grana medio-grossa, struttura equigranulare

**GGOa Monzograniti biotitici** a grana media, struttura equigranulare, localmente microporfirica.

#### CARBONIFERO SUP.-PERMIANO

##### UNITA' INTRUSIVA DI GEREMEAS

**GEAc Granodioriti biotitico-anfiboliche** con accessori allanite e titanite, a grana grossa, struttura inequigranulare localmente faneroporfirica per feldspati pluricetimetri.

**GEAb Masse gabbriche,** gabbri anfibolici e pirossenico anfibolici grigio verdastri a struttura equigranulare.

**GGOa** **Episieniti** a grana medio fine, struttura inequigranulare per cristalli di plagioclasio (albite) di taglia massima di 1cm, solitamente molto alterati.

CARBONIFERO SUP.-PERMIANO

#### 4. Inquadramento Geomorfologico

L'evoluzione geomorfologica dell'area di studio è influenzata dalle caratteristiche del substrato litoide, costituito da rocce del complesso intrusivo e filoniano. I caratteri strutturali hanno svolto un ruolo importante nel modellamento dell'area legato all'approfondimento delle valli lungo le faglie e le fratture tettoniche principali. La mancanza di sedimenti più antichi attribuibili al Pleistocene medio impedisce di valutare le dinamiche quaternarie di questi elementi e la presenza di eventuali riattivazioni anche locali. L'area in esame è caratterizzata da una morfologia irregolare, in cui i processi di alterazione sulle rocce intrusive e successivamente la rielaborazione da parte delle acque superficiali, giocano un ruolo predominante.



Figura 6 - Monte Nieddu 586 m s.l.m.



Figura 7 - Cuccuru Ella 558 m s.l.m.

Il paesaggio è caratterizzato da morfologia montuosa, tra i rilievi più importanti ricordiamo: Bruncu Posulu 694 m s.l.m.; Bruncu Castangiedda 602 m s.l.m.; M. Nieddu 586 m s.l.m.; Su Niu Des Crobus 574 m s.l.m.; Cuccuru Ella 558 m s.l.m.

Il litotipo dominante è la granodiorite, sulla quale i processi di alterazione fisico-chimica e la successivamente rielaborazione da parte delle acque dilavanti, giocano un ruolo predominante nella formazione delle macroforme tipiche dei rilievi granitici. L'erosione selettiva ha giocato un ruolo importante anche nel modellamento subaereo dell'area dato che le valli sono spesso rettilinee ed orientate secondo i principali lineamenti tettonici. Sono inoltre estremamente diffuse tutte le morfologie connesse all'arenizzazione dei graniti ed alla successiva erosione differenziata dei blocchi da parte delle acque superficiali e del ruscellamento diffuso.

L'area di studio è modellata prevalentemente sul complesso intrusivo del Sarrabus, nel quale prevalgono le dinamiche erosive che generano le tipiche forme aspre e rupestri comuni nel paesaggio sui litotipi granitoidi. Sono particolarmente diffuse forme quali inselberg o strutture domiformi con blocchi isolati e monoliti tor variamente scolpiti e modellati dagli agenti esogeni. Sono diffuse tutte le microforme ricorrenti quali tafoni, "nidi d'ape", vacuoli e cavità di varie dimensione, dovute principalmente all'idrolisi, processo di degradazione meteorica per il quale i silicati, componenti essenziali del granito, ed in particolare i feldspati e i minerali ferromagnesiaci, aggrediti dalle acque di precipitazione leggermente acidule per la presenza dell'anidride carbonica dell'atmosfera, si decompongono, con desquamazione ed esfoliazione sferoidale (vedi figura) di superfici compatte, il che può comportare, per erosione selettiva, l'approfondimento e l'allargamento delle discontinuità, costituite da lesioni e fratture di origine meccanica della roccia, prodotte dagli agenti fisici della degradazione (dilatazioni termiche differenziali, azione di cuneo delle radici) e dalle forze tettoniche.



Figura 8 – Granodiorite interessata da processi di alterazione fisico-chimica.



Figura 9-Esfoliazione sferoidale nei pressi di GEAc-2

Il processo dell'idrolisi dei silicati è massimo in condizioni di clima caldo-umido. La deflazione eolica può nel tempo rimuovere le parti rocciose distaccate, determinando nel blocco ancora inalterato la formazione di cavità tipiche, note come tafoni. Numerose sono le torri ed i campi di blocchi connessi con il crollo di prismi di roccia dai quali è stata precedentemente allontanata la frazione alterata.



**Figura 10 - Morfologie a Tor e Inselberg.**

L'assetto strutturale dell'area è caratterizzato dalla sovrapposizione di complessi sistemi di lineazioni tettoniche (faglie e fratture), che spesso costituiscono vie preferenziali di incanalamento e/o infiltrazione delle acque superficiali.



**Figura 11 – Tipica forma di alterazione a Tafone con vacuoli a nidi d'ape.**



Figura 12-Vaschetta di corrosione, l'accumularsi di materia organica favorisce l'attività di microrganismi che porta ad un aumento dell'acidità dell'acqua stagnante favorendo quindi il fenomeno dell'idrolisi.



Figura 13-Tafone visto dall'interno, si può notare come il processo parta da un fenomeno iniziale di alveolizzazione

Le numerose incisioni che solcano i versanti si presentano incassate, spesso colmate, nei tratti meno acclivi, da scariche detritiche riconducibili all'azione dei processi gravitativi. A scala locale si osservano alcune valli più o meno profonde dal profilo simmetrico marcatamente a V, con frequenti meandri incassati, segno di un recente ringiovanimento con tendenza all'approfondimento degli alvei. I depositi alluvionali presentano spessori molto modesti e relegati nel fondo valle spesso costituiti da blocchi di grosse dimensioni che indicano trasporti di massa considerevoli. I corsi d'acqua presentano un regime esclusivamente torrentizio e sono caratterizzati da scarsa permeabilità del substrato, ridotta sezione idraulica ed elevata pendenza media delle aste.

Per quanto riguarda le caratteristiche geomorfologiche dei fenomeni franosi l'area di studio è caratterizzata da processi gravitativi legati a processi di smantellamento delle rocce granitoidi; i processi principali sono dati da frane di crollo per scivolamento e ribaltamento di blocchi, crollo di torrioni e prismi accompagnati da più frequenti rilasci detritici formati da piccoli blocchi in matrice sabbioso-ghiaiosa. Questi ultimi si accumulano entro i compluvi alla base delle pareti rocciose e alla base dei versanti, formando ampie pietraie soggette a locale rimobilizzazione secondaria, in corrispondenza di eventi pluviometrici intensi. I crolli di grosse dimensioni, sono da considerarsi i più pericolosi, la notevole massa con la morfologia acclive dei versanti concorre ad incrementare considerevolmente l'energia potenziale associabile a ciascun blocco e di conseguenza l'energia cinetica dissipabile in fase di crollo e/o rotolamento, con zone di arresto generalmente ubicate nei compluvi.



Figura 14 - Blocco in equilibrio precario con giacitura instabile all'apice di un Tor.

Le frane di crollo attive si concentrano soprattutto alla base delle pareti e dei versanti (versanti occidentali di M. Nieddu e di Currucu Ella, e versanti sud orientali Su Niu des Crobus); sono frequenti anche scariche di detrito che colmano i compluvi costituendo falde di detrito potenzialmente rimobilizzabili in colate durante gli eventi pluviometrici maggiori. Sull'intero versante, si ritrovano vaste aree punteggiate di blocchi isolati, in parte derivanti dai crolli descritti in precedenza, in parte da distacchi da forme residuali in roccia (piccoli Tor) che affiorano sporadicamente con elevazione modesta.



Figura 15 - Deposito di crollo alla base di un dicco basico.

#### 4.1 Lineamenti geomorfologici generali

Nell'area di studio è possibile rinvenire resti di questa superficie 500m a NE della WTG013.

Le valli presentano forma a "V", le principali hanno orientazione NS, sono poi presenti vallette secondarie sub-perpendicolari alle prime; risultano molto incise e con quasi totale assenza di depositi.

Le WTG002, WTG005, WTG006, WTG007, WTG008 saranno situate lungo le vette di una cresta che delimita la parte Sud-Orientale del Parco eolico.

La WTG012 sarà invece situata lungo una cresta poco accentuata al centro dell'area di interesse.

La WTG014 si troverà ad una quota di 470m in una sottocima di *Cuccuru Ella* mentre la WTG010 poggerà su una sella nei pressi di *Bruncu Nuraxeddu*.

Le WTG003, WTG004 e WTG011 saranno situate a mezza costa tra i 350m e i 430m di quota mentre le WTG009 e WTG001 si troveranno nei pressi della valle di *Baccu'e Tramazzana*.



Figura 16- Morfologia del paesaggio.

## 5. Inquadramento sismico

La sismicità indica la frequenza e la forza con cui si manifestano i terremoti, ed è una caratteristica fisica del territorio. Sulla base delle conoscenze relative alla frequenza e all'energia associate ai terremoti che caratterizzano un territorio, si attribuisce un valore di probabilità al verificarsi di un evento sismico di una data magnitudo in un certo intervallo di tempo, possiamo definirne la pericolosità sismica. La pericolosità sismica sarà tanto più elevata quanto più probabile sarà il verificarsi di un terremoto di elevata magnitudo, a parità di intervallo di tempo considerato.

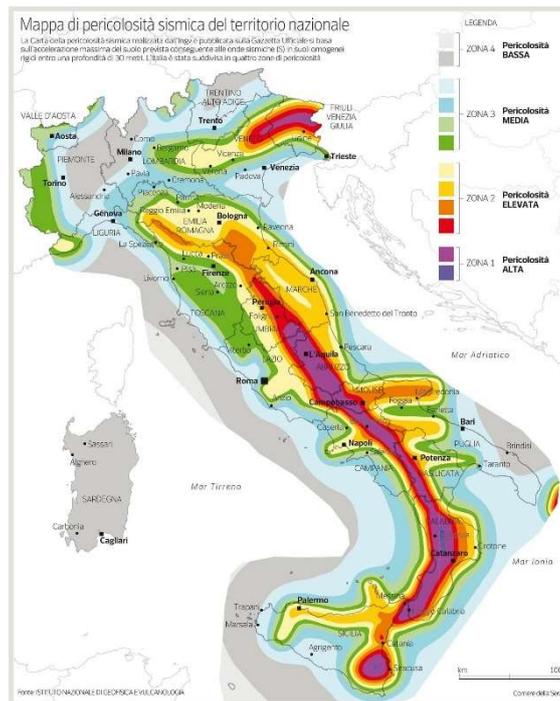


Figura 17: Carta della pericolosità sismica del territorio nazionale.

Le conseguenze di un terremoto dipendono anche dalle caratteristiche di resistenza delle costruzioni alle azioni di una scossa sismica. La predisposizione di una costruzione ad essere danneggiata si definisce vulnerabilità. Quanto più un edificio è vulnerabile (per tipologia, progettazione inadeguata, scadente qualità dei materiali e modalità di costruzione, scarsa manutenzione), tanto maggiori saranno le conseguenze.

Infine, la maggiore o minore presenza di beni esposti al rischio, la possibilità cioè di subire un danno economico, ai beni culturali, la perdita di vite umane, è definita esposizione.

Il rischio sismico, determinato dalla combinazione della pericolosità, dalla vulnerabilità e dall'esposizione, è la misura dei danni attesi in un dato intervallo di tempo, in base al tipo di sismicità, di resistenza delle costruzioni e di antropizzazione (natura, qualità e quantità dei beni esposti).

Per quanto concerne la sismicità, ai sensi della normativa di settore citata in precedenza, il territorio comunale di **Maracalagonis** ricade in Zona 4 a **bassa pericolosità**, vengono indicati i parametri sismici da utilizzare nelle verifiche secondo quanto previsto dalle NTC 2018.

## 5.1 Azione sismica

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla **“pericolosità sismica di base”** del sito di costruzione e sono funzione delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche che determinano la risposta sismica locale.

Dalla normativa vigente NTC2018 si evince che la pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa  $a_g$  in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A come definita al § 3.2.2), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente  $S_e(T)$ , con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza PVR come definite nel § 3.2.1, nel periodo di riferimento  $V_R$ , come definito nel § 2.4. inoltre, in alternativa è ammesso l'uso di accelerogrammi, purché correttamente commisurati alla pericolosità sismica locale dell'area della costruzione.

Le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento PVR nel periodo di riferimento  $V_R$ , a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

$a_g$  accelerazione orizzontale massima al sito;

$F_0$  valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

$T_C^*$  valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.<sup>1</sup>

Per i valori di  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_C^*$  necessari per la determinazione delle azioni sismiche, si fa riferimento agli Allegati A e B al Decreto del Ministro delle Infrastrutture 14 gennaio 2008, pubblicato nel S.O. alla Gazzetta Ufficiale del 4 febbraio 2008, n.29, ed eventuali successivi aggiornamenti.

## 5.2 Vita nominale, classi d'uso e periodo di riferimento

La tipologia di costruzioni previste in progetto (NTC2018 - par.2.4) ha vita nominale  $\geq 50$  anni e appartiene alla classe d'uso IV.

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

Figura 18: Valori minimi della Vita nominale  $V_N$  di progetto per i diversi tipi di costruzioni.

<sup>1</sup> Per i valori di  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_C^*$  necessari per la determinazione delle azioni sismiche, si fa riferimento agli Allegati A e B al Decreto del Ministro delle Infrastrutture 14 gennaio 2008, pubblicato nel S.O. alla Gazzetta Ufficiale del 4 febbraio 2008, n.29, ed eventuali successivi aggiornamenti.

*Classe I:* Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.

*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.

*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.

*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.

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento  $V_R$  che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale  $V_N$  per il coefficiente d'uso  $C_U$  :

$$V_R = V_N \times C_U$$

Il valore del coefficiente d'uso  $C_U$  è definito, al variare della classe d'uso, come mostrato in Tab. 2.4.II (Figura 19). Nel Caso specifico  $C_U = 2$ .

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE $C_U$	0,7	1,0	1,5	2,0

Figura 19: Valori di coefficiente d'uso  $C_U$

Il valore del periodo di riferimento è  $V_r = 100$

### 5.3 Amplificazione stratigrafica e topografica

Nel caso di pendii con inclinazione maggiore di  $15^\circ$  e altezza maggiore di 30 m, l'azione sismica di progetto deve essere opportunamente incrementata o attraverso un coefficiente di amplificazione topografica o in base ai risultati di una specifica analisi bidimensionale della risposta sismica locale, con la quale si valutano anche gli effetti di amplificazione stratigrafica

Per le aree di installazione delle turbine la **categoria topografica è la T1** a cui corrisponde un valore del fattore di amplificazione pari a 1.0.

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 $i > 30^\circ$

Figura 20: Categorie topografiche (NTC 2018 3.2 - Tab. 3.2.II)

**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

**Figura 21- Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$ (NTC 2018 3.2 - Tab. 3.2.V)**

Al fine di definire l'azione sismica di progetto, basata sull'identificazione della categoria del sottosuolo di riferimento, si è voluto definire il parametro fondamentale per la "classificazione sismica dei terreni", e quindi per la determinazione della categoria, **corrispondente alla velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio  $VS_{30}$** , valutata entro i primi 30 m di profondità dal piano campagna ma nel caso specifico relativa alla quota di imposta delle fondazioni.

Per tale scopo, in accordo agli approcci semplificati proposti dal D.M. 17/01/2018 - Tab. 3.2.II (Figura 20) la determinazione del parametro delle onde di taglio  $VS_{30}$  è stato stimato mediante misura delle velocità sismiche attraverso l'esecuzione di una prospezione geofisica MASW di seguito descritta in dettaglio.

## 6. Indagini Geognostiche

Al fine di definire le caratteristiche fisico-meccaniche e sismiche dei terreni di sedime di cui al progetto in data 12.11.2020 dalla ditta GEOSERVICE Snc specializzata nel settore, è stata eseguita una prospezione sismica eseguita con la tecnica MASW.

L'indagine sismica attiva con tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva, che attraverso la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , è in grado di ricostruire una sismo-stratigrafia atta a permettere la definizione della categoria di suolo ai sensi del Decreto 17/01/2018.

Per l'esecuzione del cantiere d'interesse, è stata usata una strumentazione di acquisizione DoReMi, prodotto dalla SARA Electronic Instruments, 24 bit con frequenza di campionamento di 5000 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali SARA Electronics con frequenza propria di 4.5 Hz. Per l'energizzazione è stata usata una mazza battente da 10 kg impattante su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg.

Rimandando le specifiche tecniche dell'indagine alla relazione sulle indagini allegata alla presente si riportano di seguito gli esiti dell'elaborazione del profilo sismico (profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$  rilevato utili ai fini richiesti dal presente studio.

Tipologia Indagine	Sigla Stendimento	Orientamento	Intervallo Geofoni (m)	Lunghezza (m)
MASW	<b>M1</b>	NNW-SSE	3,0	69,0
MASW	<b>M2</b>	SSW-NNE	3,0	69,0
MASW	<b>M3</b>	NE-SW	3,0	69,0
MASW	<b>M4</b>	SW-NE	3,0	69,0
MASW	<b>M5</b>	W-E	3,0	69,0

Figura 22: Schema delle indagini svolte.

La prospezione geofisica integrativa al piano di indagini dirette effettuate tramite l'esecuzione di sondaggi è stata eseguita il giorno 03/03/2021 e 11/03/2021. La prospezione è stata articolata secondo il seguente programma di attività:

1. Verifica preliminare dei luoghi oggetto d'indagine
2. Pianificazione dell'ubicazione delle prospezioni sismiche di concerto con il tecnico responsabile del programma generale delle indagini geognostiche che ha confermato quanto previsto dal programma progettuale.
3. Acquisizione dei dati in campo attraverso l'esecuzione di n° 5 stendimenti di sismica MASW (M1 – M2 – M3– M4– M5) e n° 5 rifrazioni (R1 – R2 – R3– R4– R5). Le basi sismiche MASW ricadono lungo il medesimo allineamento delle Rifrazioni in onde P.
4. Rilievo topografico tramite livella laser di tutti i punti di misura (geofoni, punti di shot, picchetti in acciaio) e restituzione dei profili altimetrici da impiegare nelle sezioni sismiche;
5. Elaborazione dei dati tramite analisi delle prospezioni acquisite in campagna, applicazione filtri, e restituzione grafica delle sezioni sismiche con l'impiego del software ZondST2D.

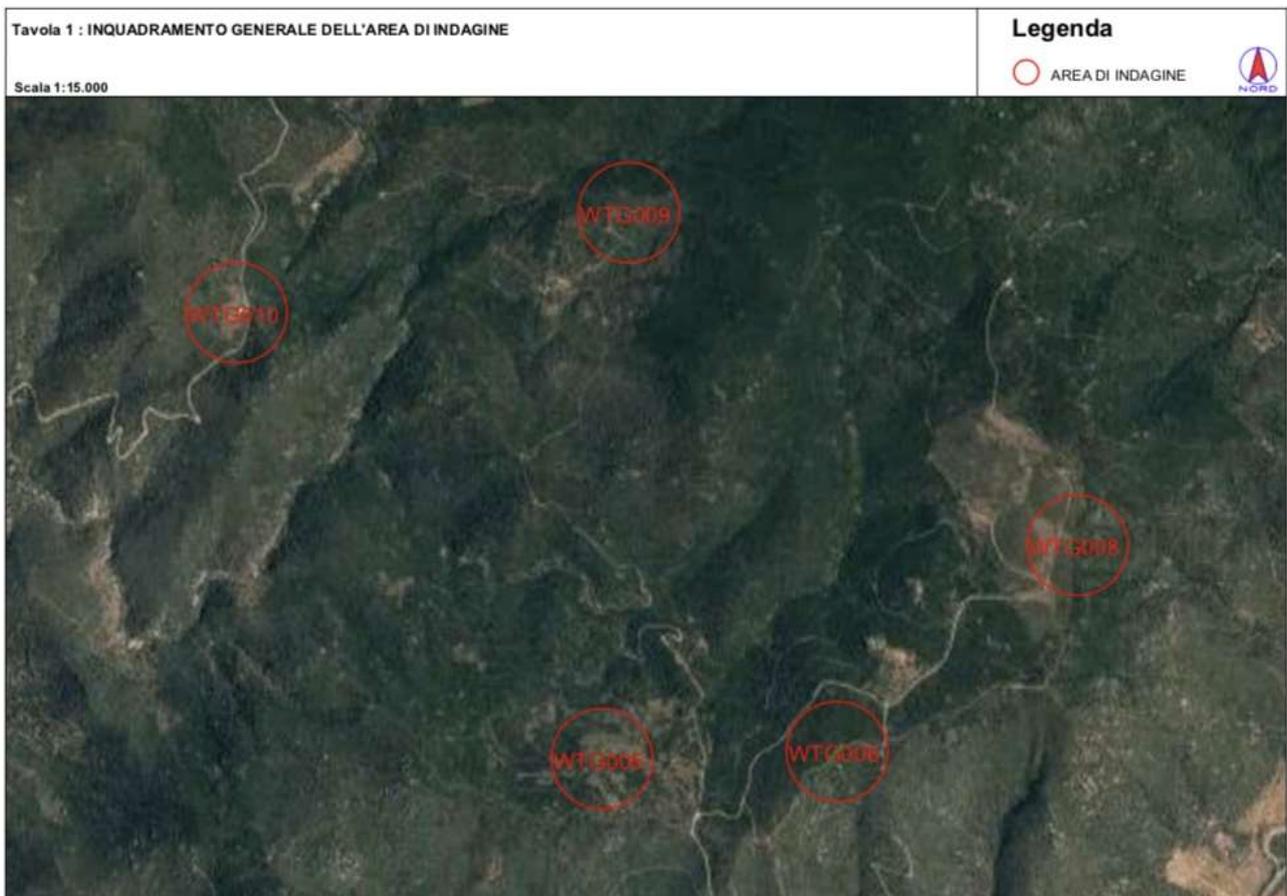


Figura 23: Planimetria ubicazione degli stendimenti

Sono stati realizzati n° 5 stendimenti MASW con 24 geofoni e spaziatura pari a 3,0 metri, e lunghezza totale di 69 m.

Lo stendimento M1 (Figura 24) è stato posizionato nei pressi della turbina WTG008. La litologia prevalente in quest'area è la Formazione di Geremeas GEAd, ovvero granodioriti monzogranitiche a grana media.

Lo stendimento M2 (Figura 25) è stato posizionato vicino all'area prossima alla zona dove verrà installata la turbina WTG005, in un'area dove ugualmente affiorano le granodioriti monzogranitiche GEAd,.

Lo stendimento M3 (Figura 26) è ubicato vicino al sondaggio SN\_01, nei pressi della turbina WTG010, la litologia interessata in questo caso è sempre la Geremeas Fm. ma in facies GEAc, ovvero granodioriti biotitico-anfibolite a grana grossa.

Gli stendimenti M4-M5 sono ubicati rispettivamente vicino alla turbina WTG006 e WTG009, ugualmente nella Geremeas Fm. in facies GEAc.

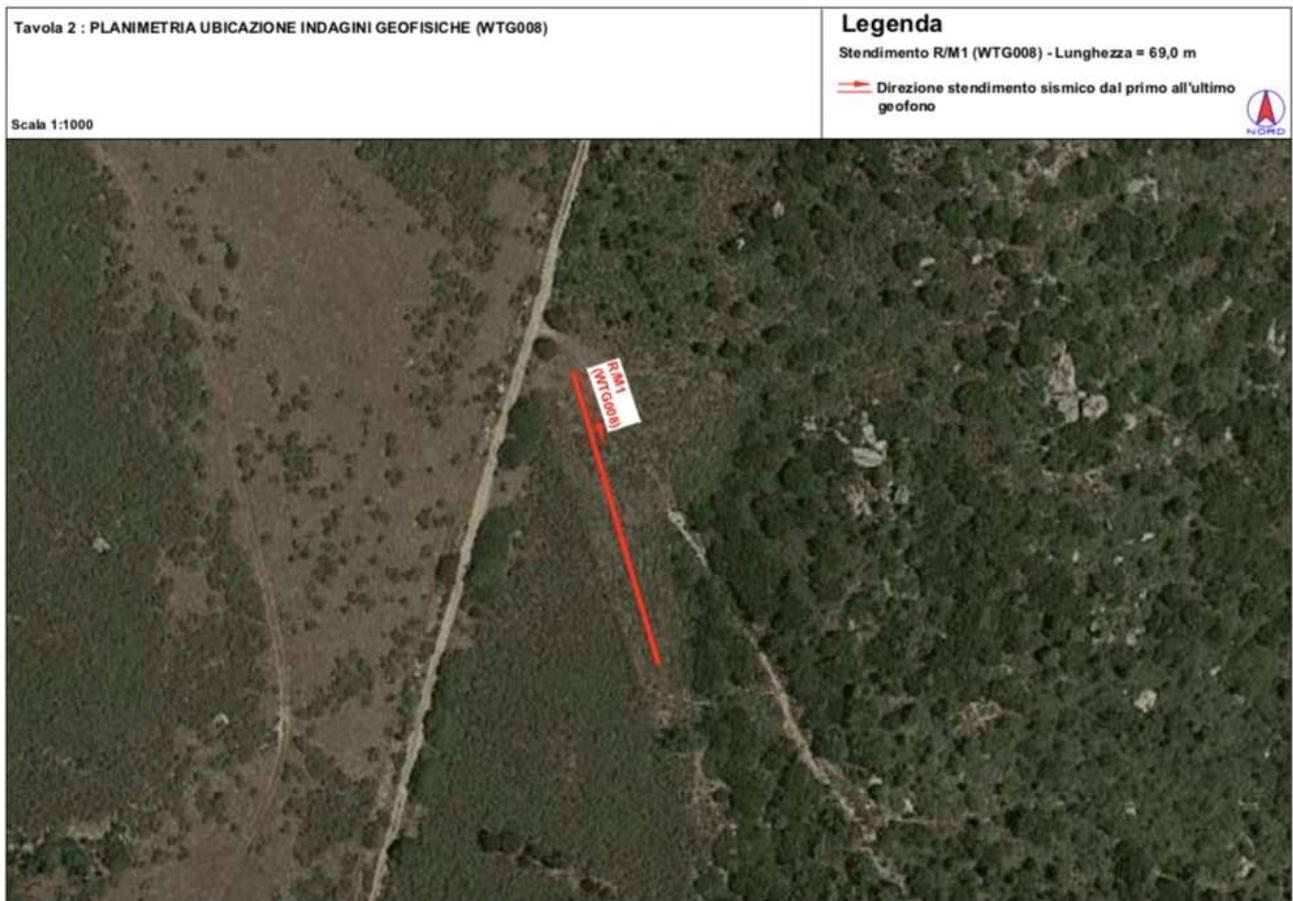


Figura 24: Ubicazione di dettaglio dello stendimento M1 – R1 (BN\_S02 rappresenta un sondaggio)

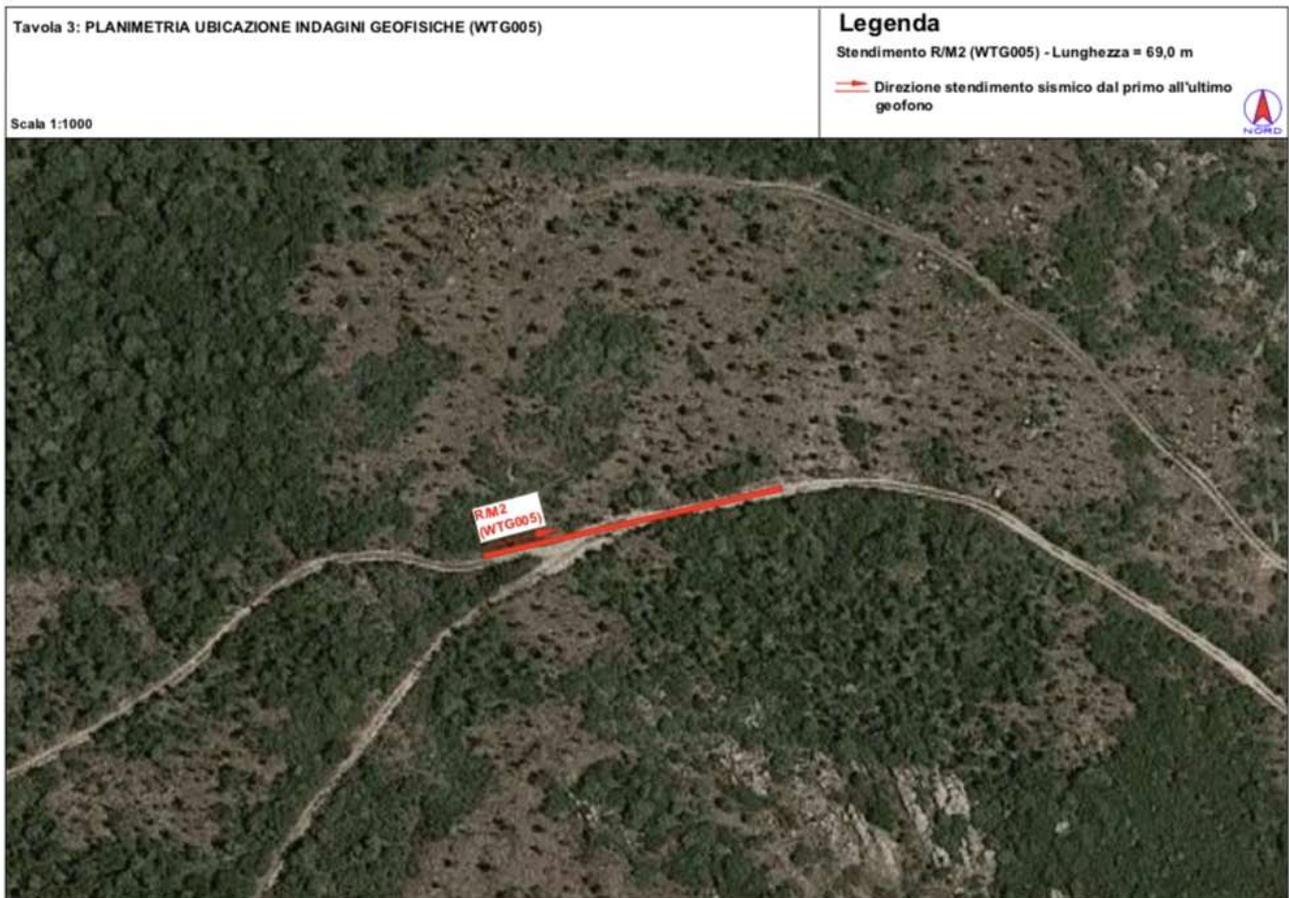


Figura 25: Ubicazione di dettaglio dello stendimento M2–R2



Figura 26: Ubicazione di dettaglio dello stendimento M3 – R3

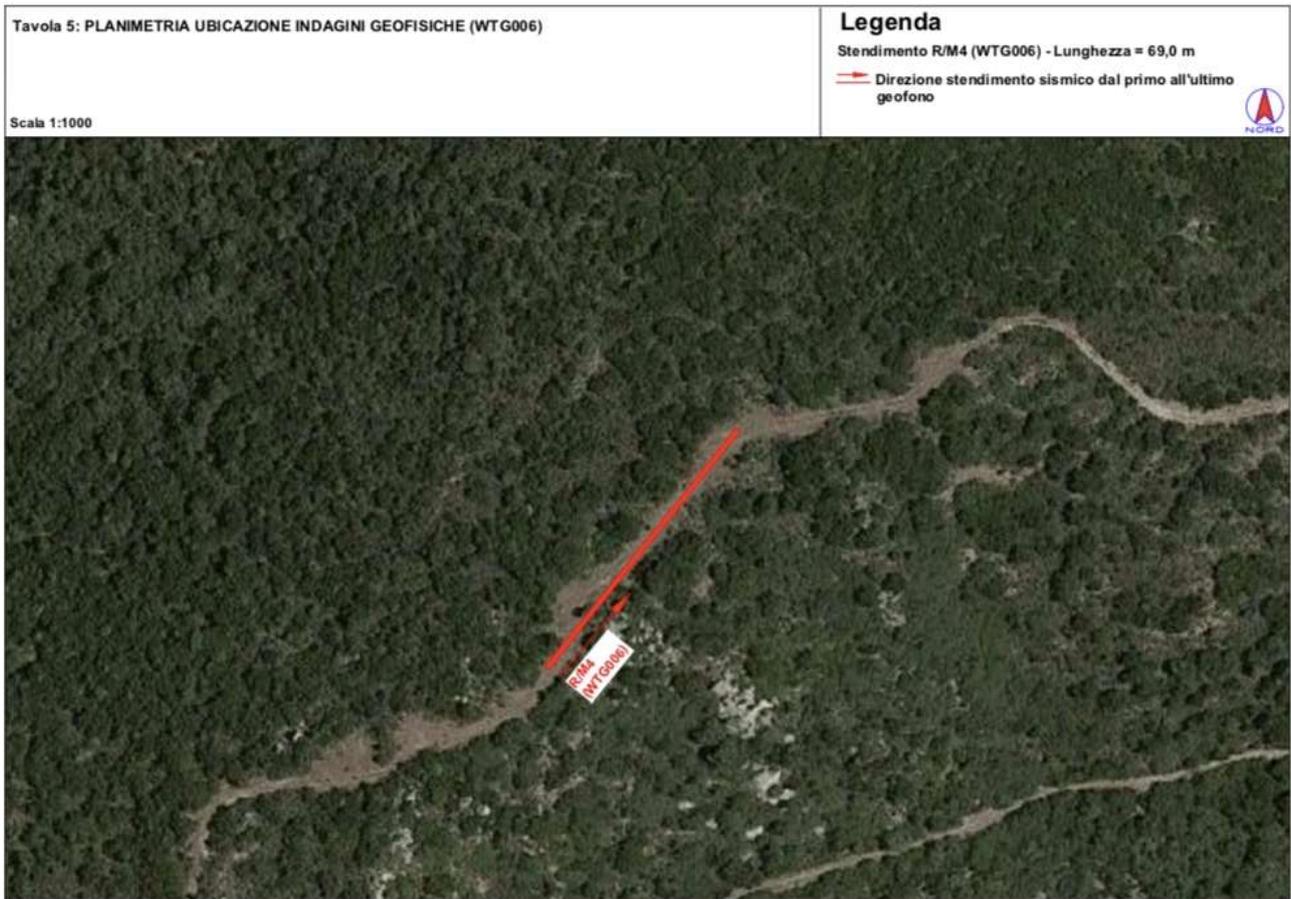


Figura 27 - Localizzazione dello stendimento R4/M4 (WTG006).

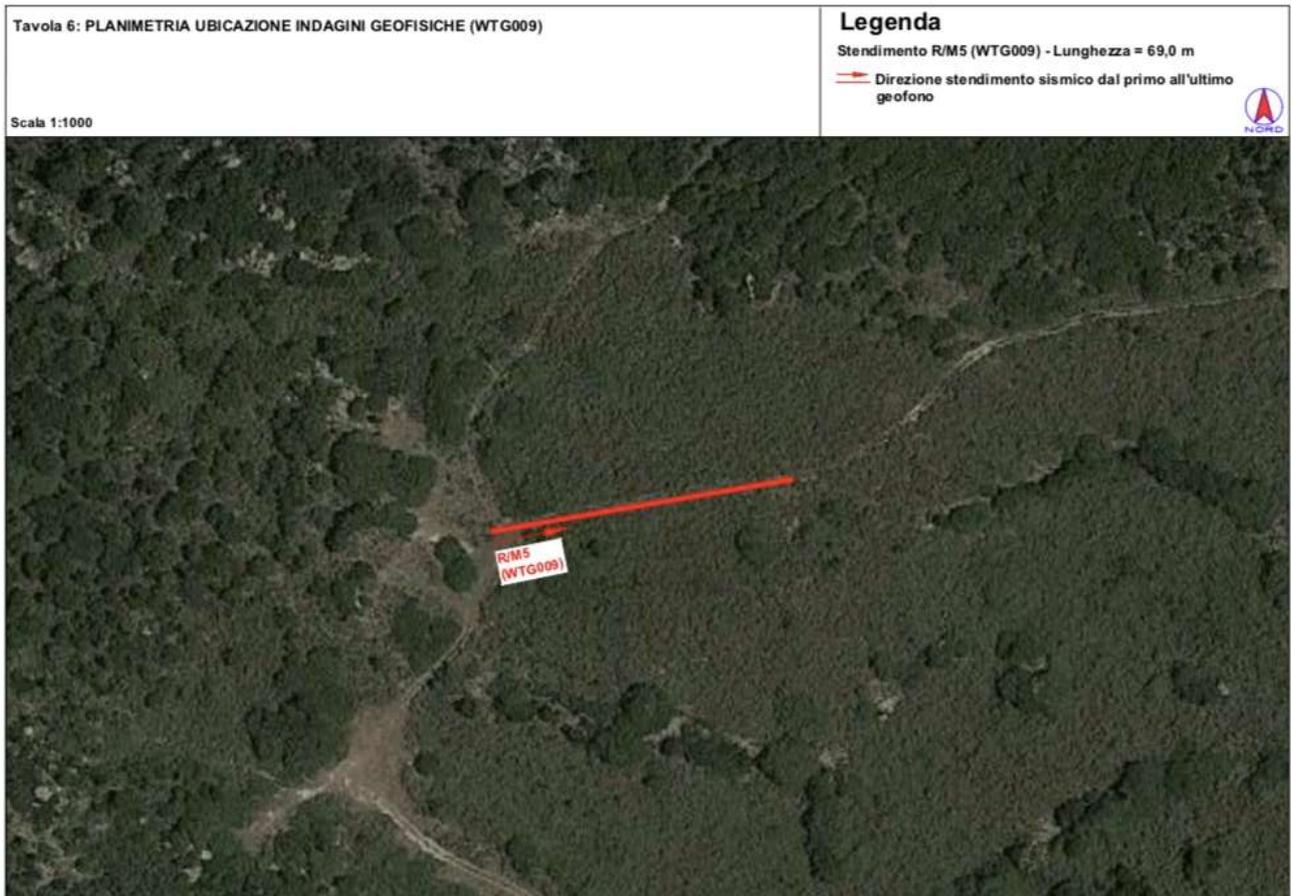


Figura 28 - Localizzazione dello stendimento R5/M5 (WTG009).

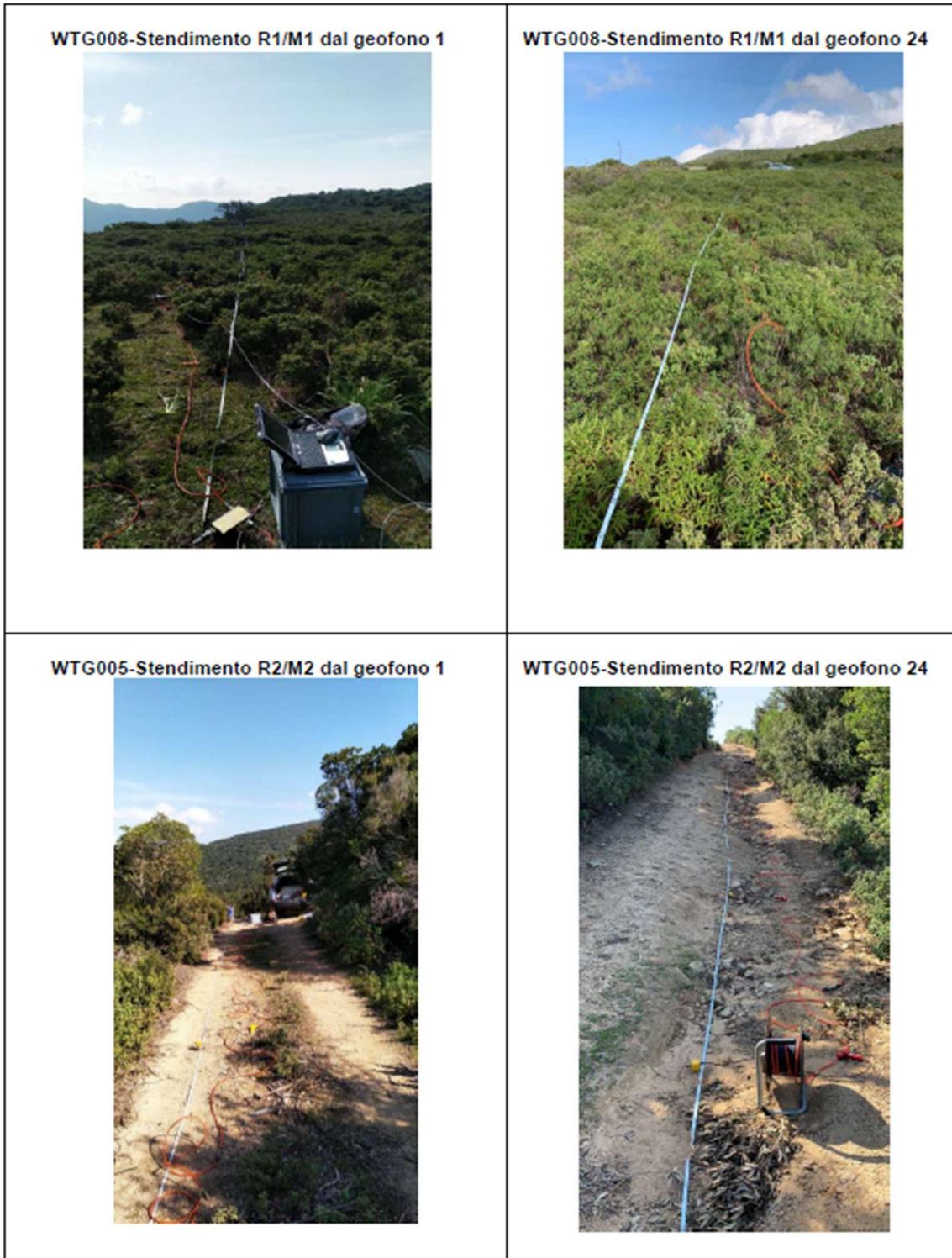


Figura 29: Vista panoramica degli stendimenti M1 – R1 e M2 – R2.

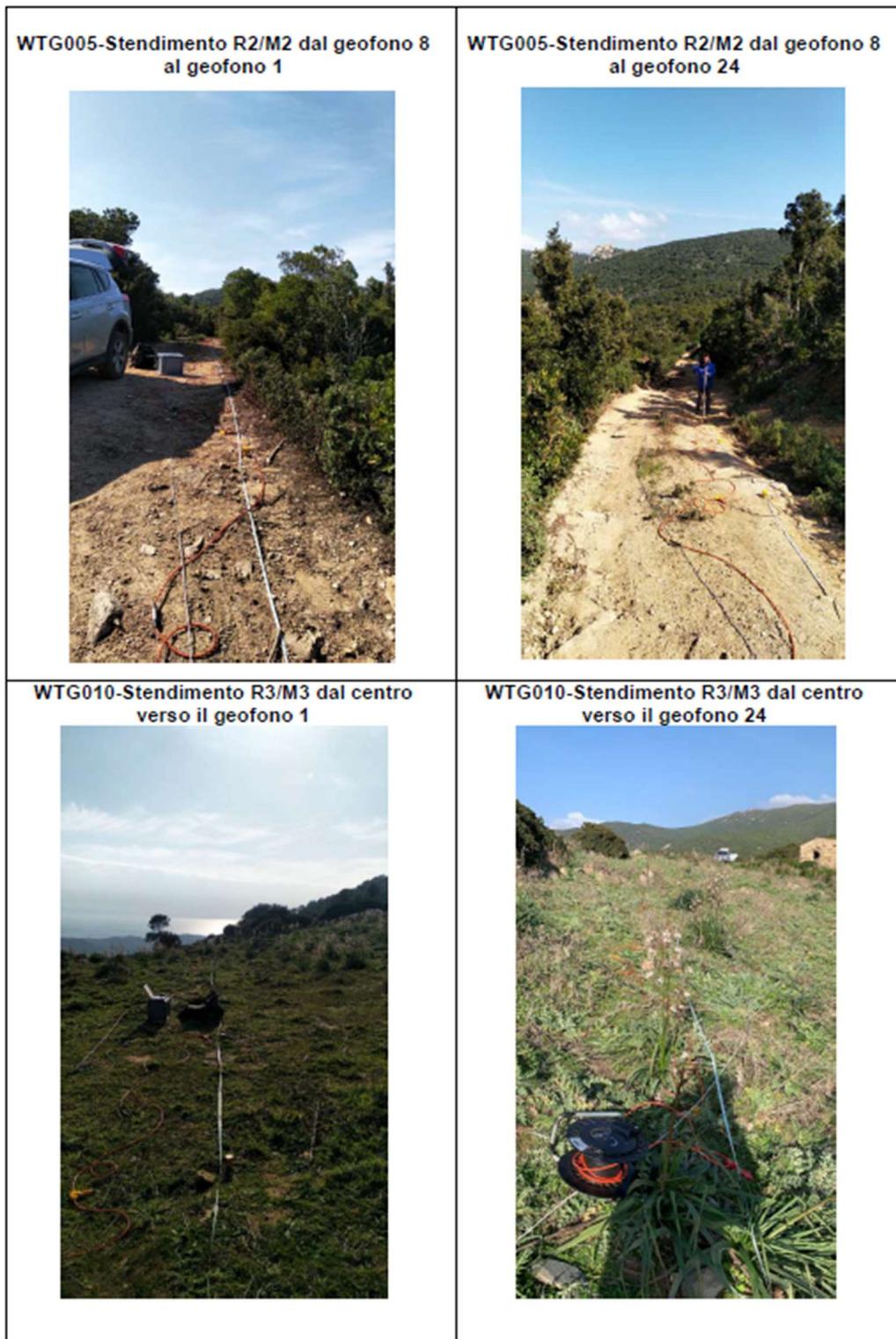


Figura 30: Vista panoramica dello stendimento M2 – R2 e M3 – R3.



Figura 31 Vista panoramica dello stendimento M4-R4

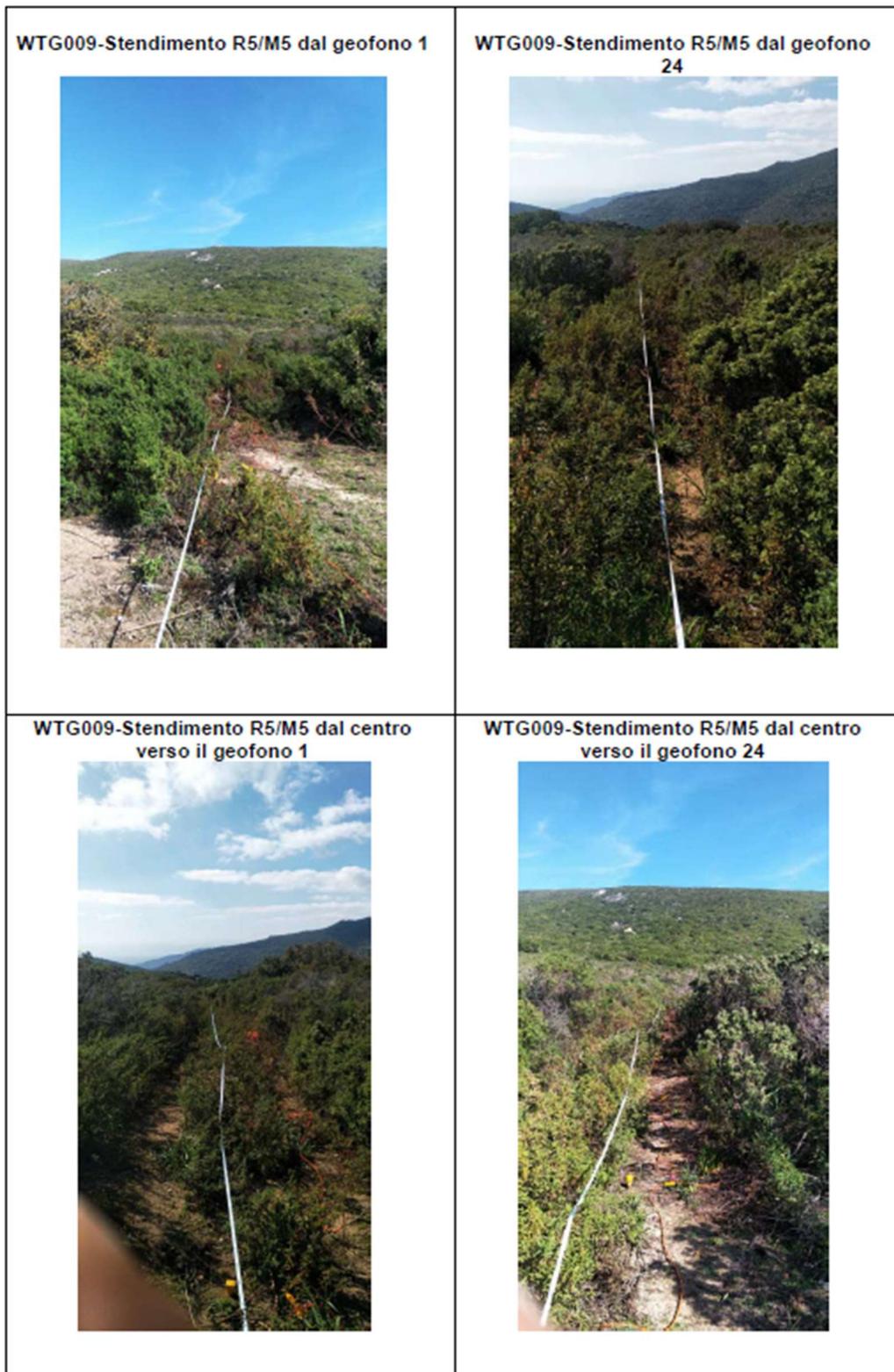


Figura 32 Vista panoramica dello stendimento M5 – R5

Di seguito si riporta la tabella (Figura 33) con i singoli sismostrati identificati nello stendimento M1 – R1:

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0 – 3,9	1° sismostrato con Vs tra <b>180 e 330m/s</b> , Terre da poco a mediamente addensate
3,9 – 6,9	2° sismostrato con Vs di <b>420 m/s</b> , Terre molto addensate
6,9 – 9,8	3° sismostrato con Vs di <b>670 m/s</b> , Roccia fratturata
9,8– 17,5	4° sismostrato con Vs tra <b>1110 e 1670 m/s</b> , Substrato roccioso da fratturato a debolmente fratturato
17,5 – 31,9	5° sismostrato con Vs tra <b>2210 e 2580m/s</b> , Substrato roccioso sano
>31,9	6° sismostrato con Vs di <b>2740 m/s</b> , Substrato roccioso sano

Figura 33: Sismostrati identificati nello stendimento M1.

Di seguito si riporta la tabella con i singoli sismostrati identificati nello stendimento M2 – R2:

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0,0 – 4,0	1° sismostrato con Vs tra <b>250 e 330 m/s</b> , Terre da poco a mediamente addensate
4,0– 6,6	2° sismostrato con Vs di <b>420 m/s</b> , Terre molto addensate
6,6 – 9,4	3° sismostrato con Vs di <b>650 m/s</b> Roccia fratturata
9,4 – 17,6	4° sismostrato con Vs tra <b>1000 e 1390 m/s</b> , Substrato roccioso fratturato
17,6 – 31,9	5° sismostrato con Vs tra <b>1740 e 2030 m/s</b> , Substrato roccioso sano
>31,9	6° sismostrato con Vs di <b>2230 m/s</b> , Substrato roccioso sano

Figura 34: Sismostrati identificati nello stendimento M2.

Di seguito si riporta la tabella con i singoli sismostrati identificati nello stendimento M3 – R3:

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0 – 3,9	1° sismostrato con Vs tra <b>320 e 370m/s</b> , Terre mediamente addensate
3,9– 6,4	2° sismostrato con Vs di <b>420 m/s</b> , Terre molto addensate
6,4– 13,5	3° sismostrato con Vs tra <b>530 e 720 m/s</b> Roccia fratturata
13,5 – 18,1	4° sismostrato con Vs di <b>990 m/s</b> , Substrato roccioso fratturato
18,1 – 23,7	5° sismostrato con Vs di <b>1430 m/s</b> , Substrato roccioso sano
23,7 – 31,2	6° sismostrato con Vs di <b>2110m/s</b> , Substrato roccioso sano
>31,2	7° sismostrato con Vs di <b>2950 m/s</b> , Substrato roccioso sano

Figura 35: Sismostrati identificati nello stendimento M3.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0 – 4,0	1° sismostrato con Vs tra <b>280 e 290 m/s</b> , Terre mediamente addensate
4,0 – 5,8	2° sismostrato con Vs di <b>400 m/s</b> , Terre molto addensate
5,8 – 18,5	3° sismostrato con Vs tra <b>540 e 710 m/s</b> Roccia fratturata
18,5 – 25,4	4° sismostrato con Vs di <b>810 m/s</b> , Substrato roccioso intensamente fratturato
25,4–33,9	5° sismostrato con Vs di <b>1010 m/s</b> , Substrato roccioso fratturato
> 33,9	6° sismostrato con Vs di <b>1540 m/s</b> , Substrato roccioso sano

Figura 36: Sismostrati identificati nello stendimento M4.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0 – 3,8	1° sismostrato con Vs tra 210 e 350 m/s, Terre mediamente addensate
3,8 – 6,6	2° sismostrato con Vs di 430 m/s, Terre molto addensate
6,6 – 9,8	3° sismostrato con Vs di 610 m/s, Roccia fratturata
9,8 – 13,2	4° sismostrato con Vs di 960 m/s, Substrato roccioso fratturato
13,2 – 23,5	5° sismostrato con Vs tra 1400 e 1870 m/s, Substrato roccioso sano
23,5 – 31,9	6° sismostrato con Vs di 2170 m/s, Substrato roccioso sano
>31,9	7° sismostrato con Vs di 2190 m/s, Substrato roccioso sano

Figura 37: Sismostrati identificati nello stendimento M5

### 6.1 Categorie del sottosuolo

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 con:

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

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.

Esaminato il profilo delle Vs per lo stendimento M1 (Figura 38) si pone l'eventuale presenza del substrato a profondità 9,8 m ( $V_s > 800$  m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a profondità 9,8 m di profondità dal p.c. è pari a:

$$V_{s,eq} = 9,8 / 0,027101 = 362 \text{ m/s}$$

Ciò consente di classificare il terreno come **categoria B** (Tab. 3.2.II e 3.2.III): **Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine 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.

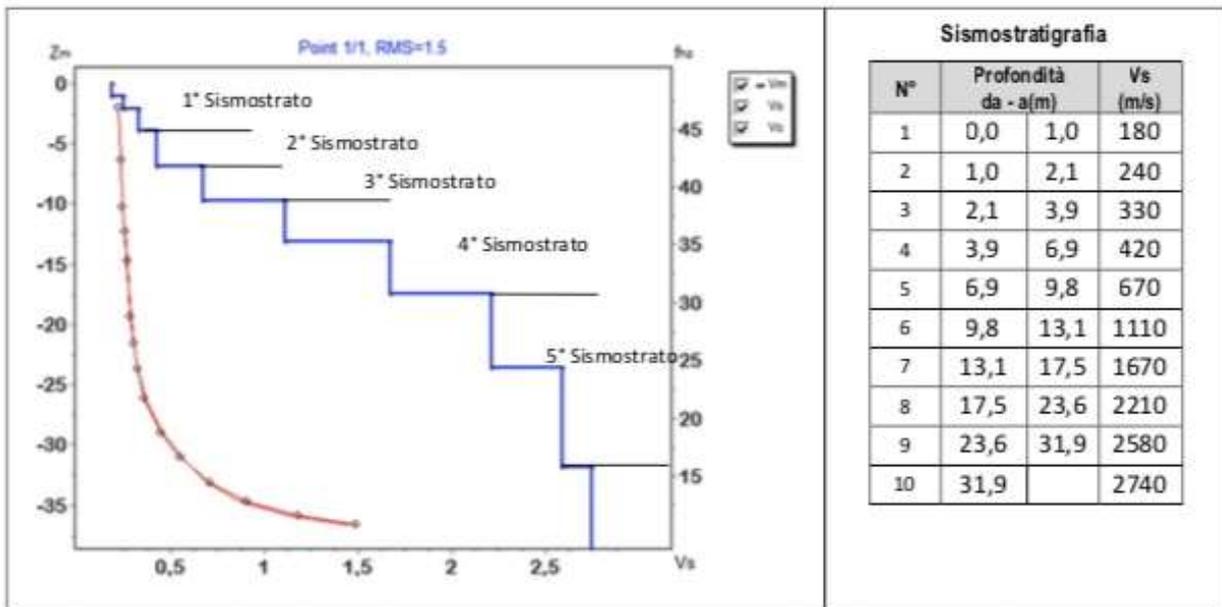


Figura 38: Profilo rilevato per lo stendimento M1.

Nell’ipotesi in cui le fondazioni siano realizzate a profondità maggiori di 6,8 m sotto il p.c. il substrato si troverà a quote < 3 metri per cui la categoria diventa una A.

**Categoria A:** 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.

Esaminato il profilo delle Vs per lo stendimento M2 (Figura 39), si pone come profondità del substrato **9,4 m** (Vs>800 m/s). La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **9,4 m** di profondità dal p.c. è pari a:

$$Vs_{eq} = 9,4/0,024232 = 388 \text{ m/s}$$

che dà luogo ad una categoria B, ossia:

**Categoria B:** 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.

Nell’ipotesi in cui le fondazioni siano realizzate a profondità maggiori di 6,4 m sotto il p.c. il substrato si troverà a quote < 3 metri per cui la categoria diventa una A.

**Categoria A:** 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.

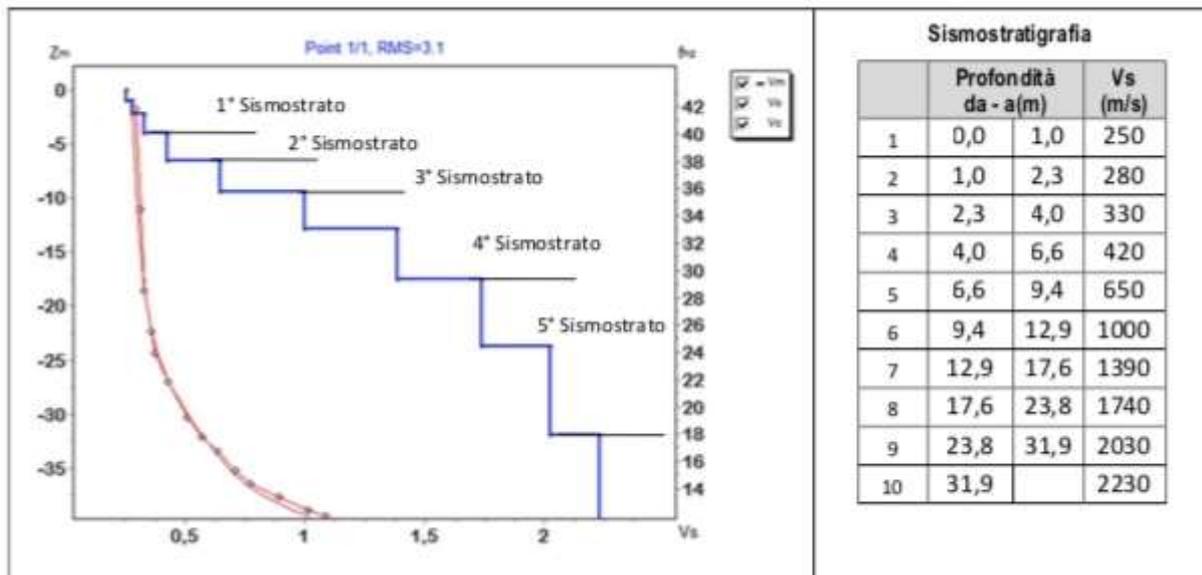


Figura 39: Profilo rilevato per lo stendimento M2.

Esaminato il profilo delle Vs per lo stendimento M3 (Figura 40) si pone come profondità del substrato **13,5 m** ( $V_s > 800$  m/s). La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **13,5 m** di profondità dal p.c. è pari a:

$$V_s eq = 13,5 / 0,028755 = 470 \text{ m/s}$$

che dà luogo ad una categoria B, ossia:

**Categoria B:** 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.

Nell’ipotesi in cui le fondazioni siano realizzate a profondità maggiori di 10,5 m sotto il p.c. il substrato si troverà a quote < 3 metri per cui la categoria diventa una A.

**Categoria A:** 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.

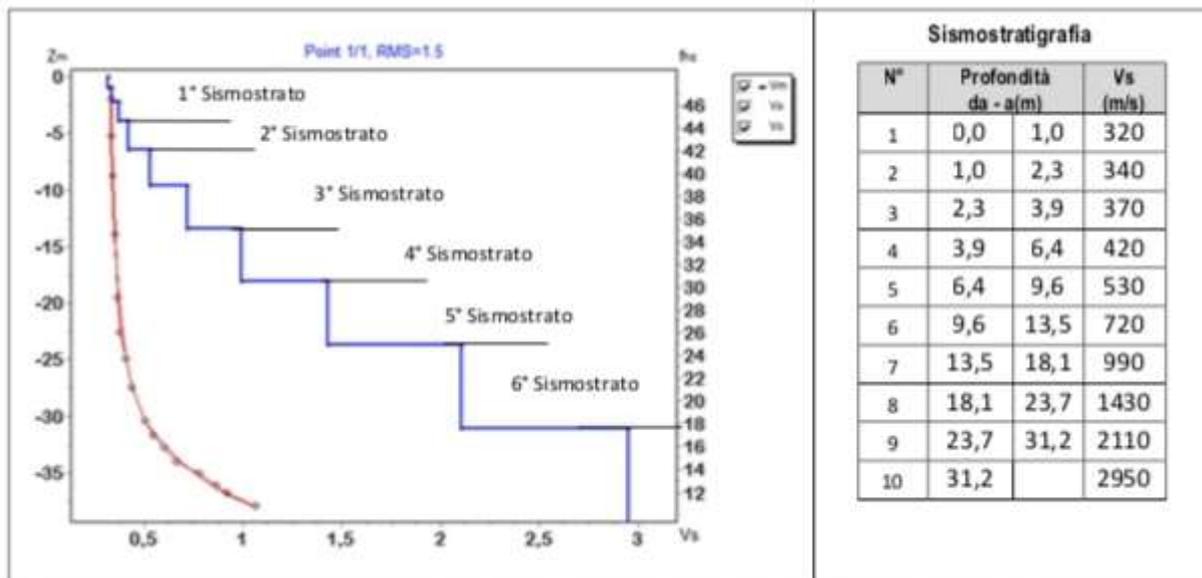


Figura 40: Profilo rilevato per lo stendimento M3.

Esaminato il profilo delle Vs per lo stendimento M4 (Figura 41) si pone come profondità del substrato **18,5 m** ( $V_s > 800$  m/s). La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **18,5 m** di profondità dal p.c. è pari a:

$$V_{s\ eq} = 18,5 / 0,038766 = 477 \text{ m/s}$$

che dà luogo ad una categoria B, ossia:

**Categoria B:** 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.

Nell'ipotesi in cui le fondazioni siano realizzate a profondità maggiori di 15,5 m sotto il p.c. il substrato si troverà a quote < 3 metri per cui la categoria diventa una A.

**Categoria A:** 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.

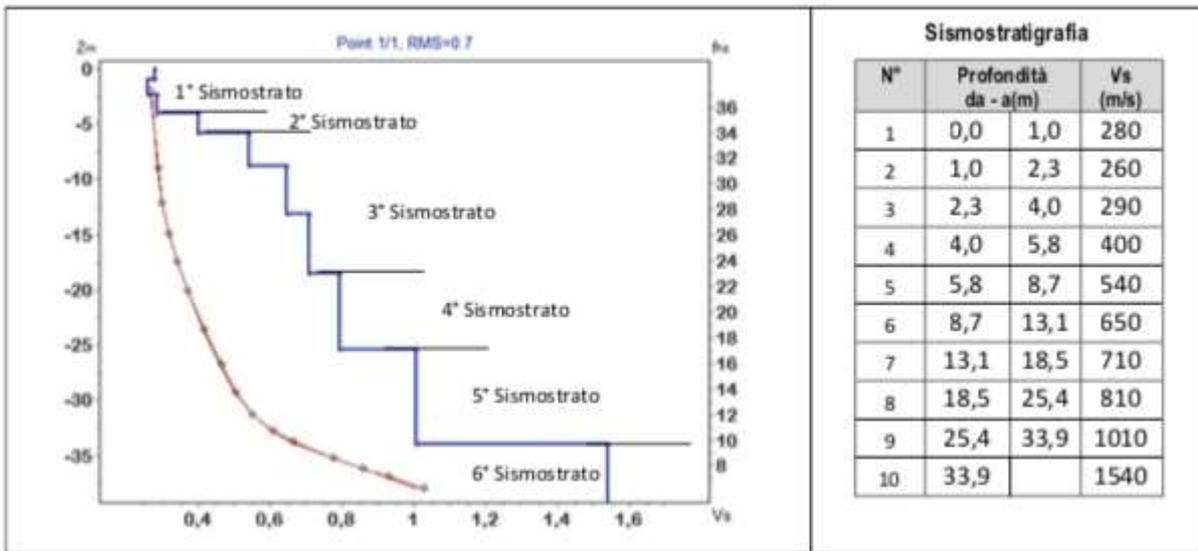


Figura 41: Profilo rilevato per lo stendimento M4.

Esaminato il profilo delle Vs per lo stendimento M4 (Figura 41) si pone come profondità del substrato **9,8 m** ( $V_s > 800$  m/s). La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **9,8 m** di profondità dal p.c. è pari a:

$$V_s \text{ eq} = 9,8 / 0,025398 = 386 \text{ m/s}$$

che dà luogo ad una categoria B, ossia:

**Categoria B:** 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.

Nell'ipotesi in cui le fondazioni siano realizzate a profondità maggiori di 6,8 m sotto il p.c. il substrato si troverà a quote < 3 metri per cui la categoria diventa una A.

**Categoria A:** 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.

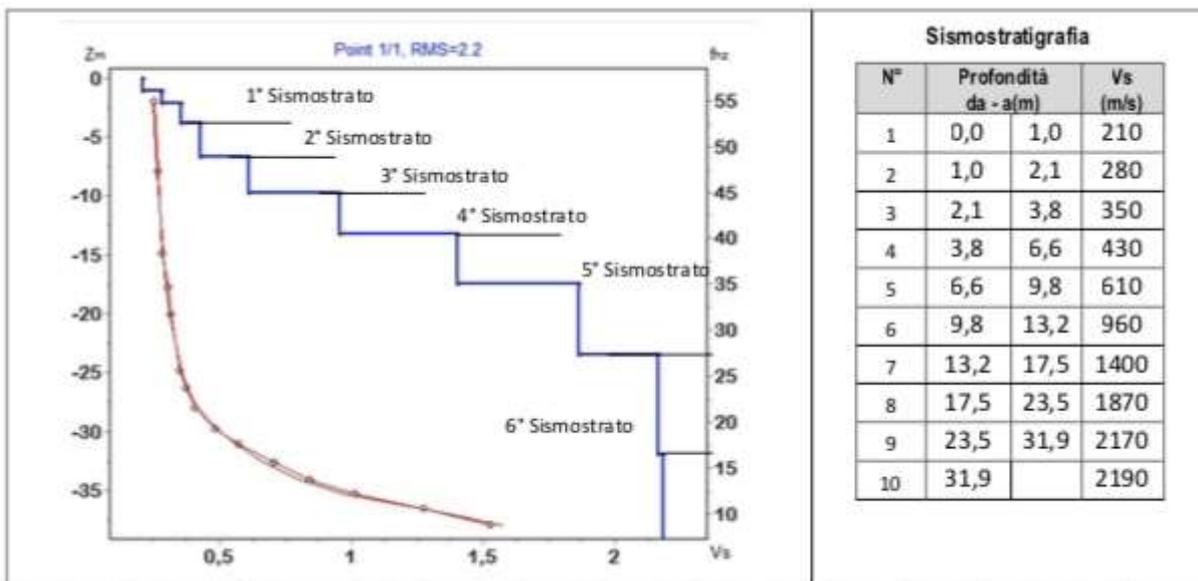


Figura 42: Profilo rilevato per lo stendimento M5.

I terreni analizzati mediante tecnica MASW possono esser classificati come **categoria A** per gli stendimenti M1, M2, M3, M4 e M5 (Figura 42).

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>

Figura 43: Tabella 3.2.II del la NTC 2018.

### 6.1.1 Parametri di pericolosità sismica

In base ai dati di localizzazione, tipologia dell’opera e classe d’uso si quindi sono calcolati i parametri sismici relativi alle verifiche SLO, SLD, SLV e SLC. (SW AZTEC Sisma 10.0):

<b>Parametri sismici</b>				
	$T_R$ [anni]	$\bar{a}_g$ [m/s <sup>2</sup> ]	$F_0$ [--]	$T_C^*$ [s]
<b>SLO</b>	<b>60</b>	<b>0,249</b>	<b>2,685</b>	<b>0,300</b>
<b>SLD</b>	<b>101</b>	<b>0,307</b>	<b>2,730</b>	<b>0,307</b>
<b>SLV</b>	<b>949</b>	<b>0,587</b>	<b>2,976</b>	<b>0,371</b>
<b>SLC</b>	<b>1950</b>	<b>0,693</b>	<b>3,061</b>	<b>0,393</b>

Figura 44: Parametri sismici in funzione delle coordinate geografiche del sito

dove:

Stati limite di esercizio

**Stato Limite di Operatività** (SLO)

**Stato Limite di Danno** (SLD)

Stati limite ultimi

**Stato Limite di salvaguardia della Vita** (SLV)

**Stato Limite di prevenzione del Collasso** (SLC)

**ag** accelerazione orizzontale massima al sito

**F<sub>0</sub>** valore massimo del fattore di ampl. dello spettro in accelerazione orizzontale

**T<sup>\*</sup><sub>C</sub>** periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in acc. orizzontale