

REGIONE SARDEGNA
Provincia di Sassari
COMUNE DI NULVI

PROGETTO

PROGETTAZIONE PARCO EOLICO "MATTESUIA"



PROGETTO DEFINITIVO

COMMITTENTE

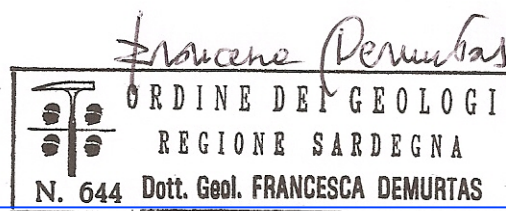


edp
Renewables

SPV EDPR Sardegna S.r.l.
Via Lepetit 8/10
20124 - Milano

PROGETTISTA

DOTT. GEOL. Francesca DEMURTAS
ORDINE DEI GEOLOGI DELLA REGIONE SARDEGNA
POSIZIONE N. 644



OGGETTO DELL'ELABORATO

RELAZIONE GEOLOGICA

REV.	DATA	ATTIVITA'	REDATTO	VERIFICATO	APROVATO		
0	dicembre 2022	PRIMA EMISSIONE					
CODICE ELABORATO		DATA	SCALA	FORMATO	FOGLIO	CODICE COMMITTENTE	
OW32349050040BW01		DIC 2022	-		1 di 1		



INDICE

1. PREMESSA	2
2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E MORFOLOGICO	3
3. DESCRIZIONE DEL PROGETTO	5
4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA	6
4.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE	6
4.2 SITUAZIONE LITOSTRATIGRAFICA LOCALE	8
5. CARATTERI STRUTTURALI	9
6. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO	11
7. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO DEL SITO	11
7.1 CENNI METEO – CLIMATICI	11
7.2 CARATTERI IDROGEOLOGICI DEI TERRENI	12
7.3 SCHEMA DELLA IDROGRAFIA SUPERFICIALE E SOTTERRANEA.....	12
7.4 INTERFERENZA DELLE OPERE STRADALI DEL PROGETTO SUL RETICOLO IDROGRAFICO.....	13
8. INDAGINE GEOGNOSTICA	13
8.1 SONDAGGIO GEOGNOSTICO.....	14
8.2 ANALISI GEOTECNICHE DI LABORATORIO	19
8.3 INDAGINE GEOFISICA MEDIANTE METODOLOGIA MASW.....	19
8.4 STIMA DELLA RESISTENZA DELL'AMMASSO ROCCIOSO.....	21
8.5 PARAMETRI GEOMECCANICI DI PROGETTO	24
9. MODELLO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO	25
10. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	26

ALLEGATI

- ALLEGATO 1 – Estratto della Carta geologica Foglio 180 "Sassari" –
- ALLEGATO 2 – Relazione sulle indagini geognostiche –
 - 1) Planimetria ubicazioni indagini
 - 2) Report fotografico
 - 3) Stratigrafie sondaggi
 - 4) Certificati prove di laboratorio geotecnico
 - 5) Indagine geofisica



1. PREMESSA

La presente relazione geologica è stata redatta su incarico della società EDPR Sardegna S.r.l in relazione al progetto di un nuovo impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica denominato "Mattesua" della potenza totale di 48 MW, equivalenti all'installazione di n. 8 aerogeneratori di potenza nominale pari a 6 MW, da realizzarsi in agro di Nulvi (SS), a nord est del centro abitato, nelle località *Ruspina, Sa Marchesa, Pintasi, Mura Bianca e Monte Palmas.*

Lo studio ha lo scopo di caratterizzare il sito dal punto di vista geologico, geomorfologico ed idrogeologico evidenziando eventuali aspetti che possano pregiudicare l'intervento previsto o che comunque necessitino di particolari accorgimenti in fase di realizzazione dell'opera.

La presente relazione è basata sulla ricerca e l'analisi di dati geologici ed idrogeologici esistenti, di buon dettaglio (Mazzei & Oggiano, 1990; Funedda et al., 2000; Funedda et al., 2003; Carta Geologica d'Italia – Foglio 180 Sassari in scala 1:100.000), integrati con un rilevamento geologico di un intorno significativo dell'area e da indagini geognostiche eseguite in situ e analisi di laboratorio.

I rilievi e le osservazioni dirette sul terreno hanno permesso di chiarire la situazione geologica di superficie e di definire i caratteri geomorfologici dell'area. I dati raccolti sono stati restituiti in forma cartografica, utilizzando come base la cartografia tecnica della Regione Sardegna alla scala 1: 10.000.

Lo studio dell'area è stato eseguito a norma di quanto richiesto dal Testo Unico "Norme tecniche per le costruzioni" NTC 2018, al paragrafo 6.2.1. che individua le fasi riguardanti la caratterizzazione e modellazione geologica del sito, nonché dalla Circolare esplicativa del Consiglio Sup. dei LL PP del 21 gennaio 2019 "Istruzioni per l'Applicazione delle NTC 2018".

La caratterizzazione e la modellazione geologica del sito consistono nella ricostruzione dei caratteri litologici, stratigrafici, strutturali, idrogeologici, geomorfologici e, più in generale, di pericolosità geologica del territorio, descritti e sintetizzati dal modello geologico di riferimento, il quale costituirà un elemento di riferimento per la progettazione delle opere.

L'areale oggetto di intervento non ricade all'interno di aree perimetrate dal PAI (Piano Assetto Idrogeologico), sia per quanto riguarda gli aerogeneratori, sia le opere accessorie, in particolare il tracciato del cavidotto.



2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E MORFOLOGICO

L'area di intervento ricade nel Foglio 442 Sez. III della cartografia IGMI alla scala 1:25.000 (Figura 2). Nella Cartografia Tecnica Regionale alla scala 1:10.000 l'area è individuata nella sezione 442_140 "Su Sassu".

Dal punto di vista morfologico il sito è rappresentato da un altopiano con superficie regolare sub pianeggiante, interessando una fascia di circa 2 km di larghezza e 4,7 km di lunghezza tra *Nuraghe Terri Ruju* a sud e *Monte Nigolosu* a nord.

Dal punto di vista morfologico gli 8 siti delle torri eoliche si collocano alla quota massima attestata sui 570 – 560 m degli aerogeneratori NU 5 e NU 6, e quota minima di 470 m dell'aerogeneratore NU 8, collocandosi su colline che presentano all'incirca una superficie regolare sub-pianeggiante. L'alto morfologico risulta modellato dolcemente dalla rete idrografica superficiale che rientra nel Bacino del Fiume Coghinas, e costituisce lo spartiacque di alcuni corsi d'acqua che drenano l'area verso nord secondo direttrici SW-NE verso il Rio Silanus, ed in particolare il Riu Sa Raighina / Badu de Cerbos a nord, ed un secondo corso d'acqua ad est (Fiume_82804 così come censito dal reticolo idrografico regionale), mentre verso sud i corsi d'acqua rappresentano le zone di testata del bacino del Rio Triulintas, che scorre sempre in direzione SW-NE verso il Fiume Coghinas.

Nel lato orientale l'altopiano degrada dolcemente, con minime pendenze, verso i territori comunali di Martis e Laerru, dove i corsi d'acqua si fanno via via più sviluppati e articolati e si apre la valle alluvionale

La zona indagata ricade in un'area con roccia semi-affiorante, caratterizzata da scarsa vegetazione con rari alberi sparsi, ed uso del suolo di tipo pascolativo.

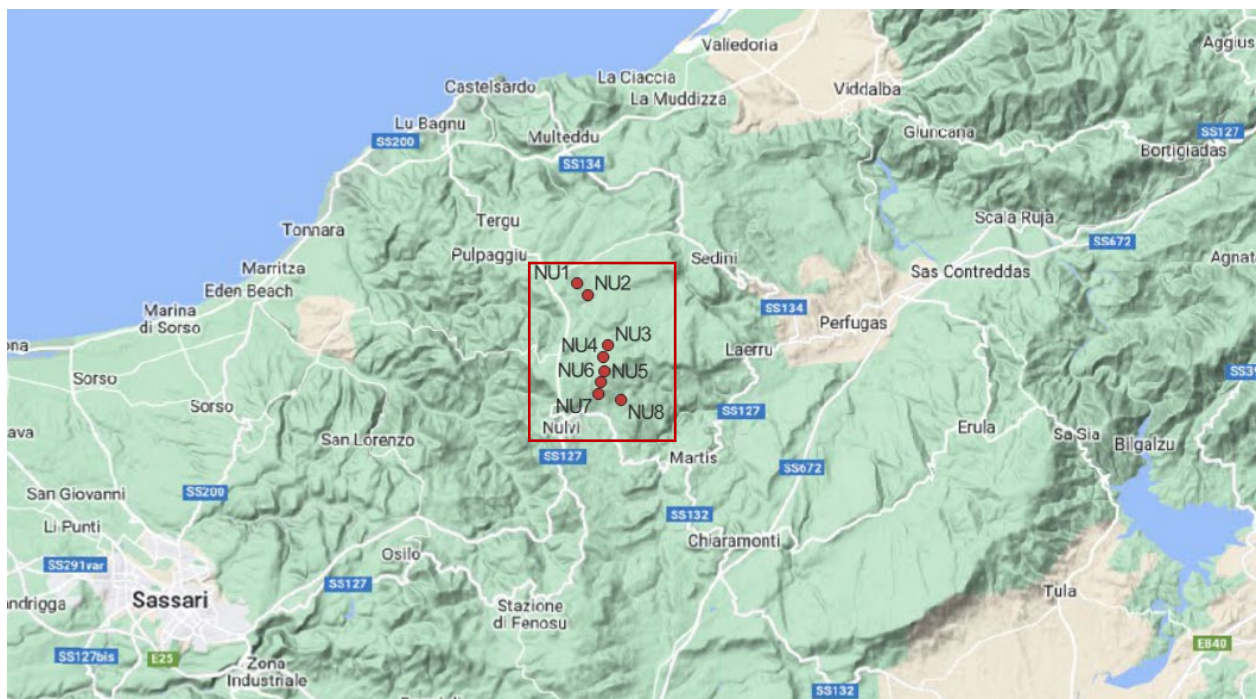


Figura 1 – Inquadramento del sito di intervento su corografia generale.

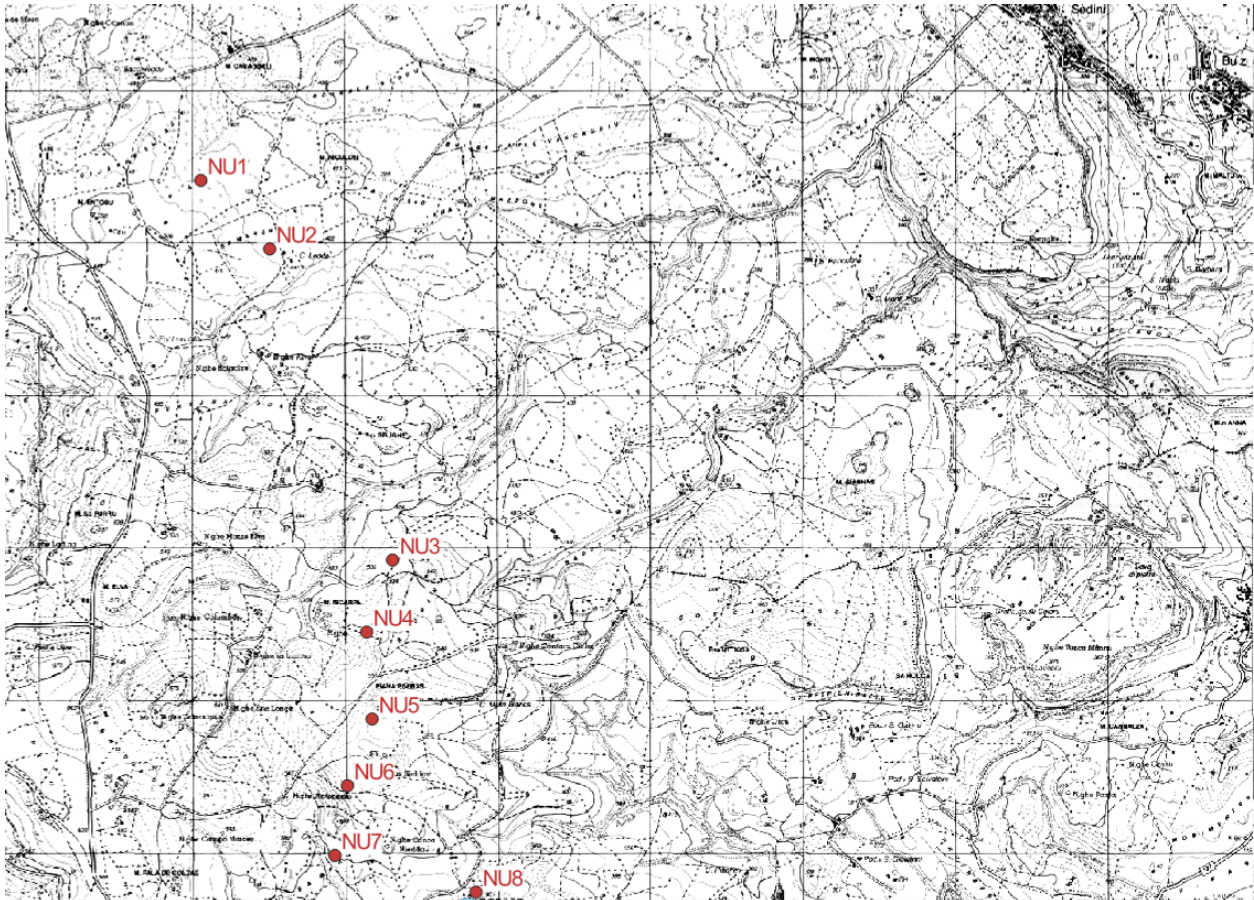


Figura 2 – Inquadramento del sito di intervento nella Carta Topografica d'Italia IGM 1:25.000, non in scala (Foglio 442 sez. III).

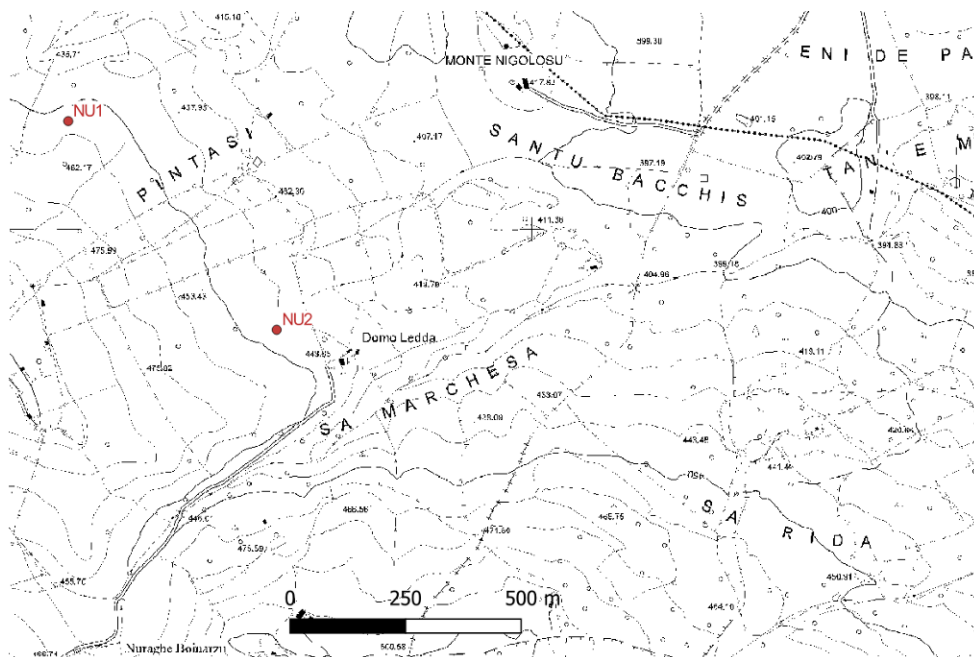


Figura 3 – Inquadramento del sito di intervento su Cartografia CTR 1:10.000 (sezione 442 140) – settore Nord.

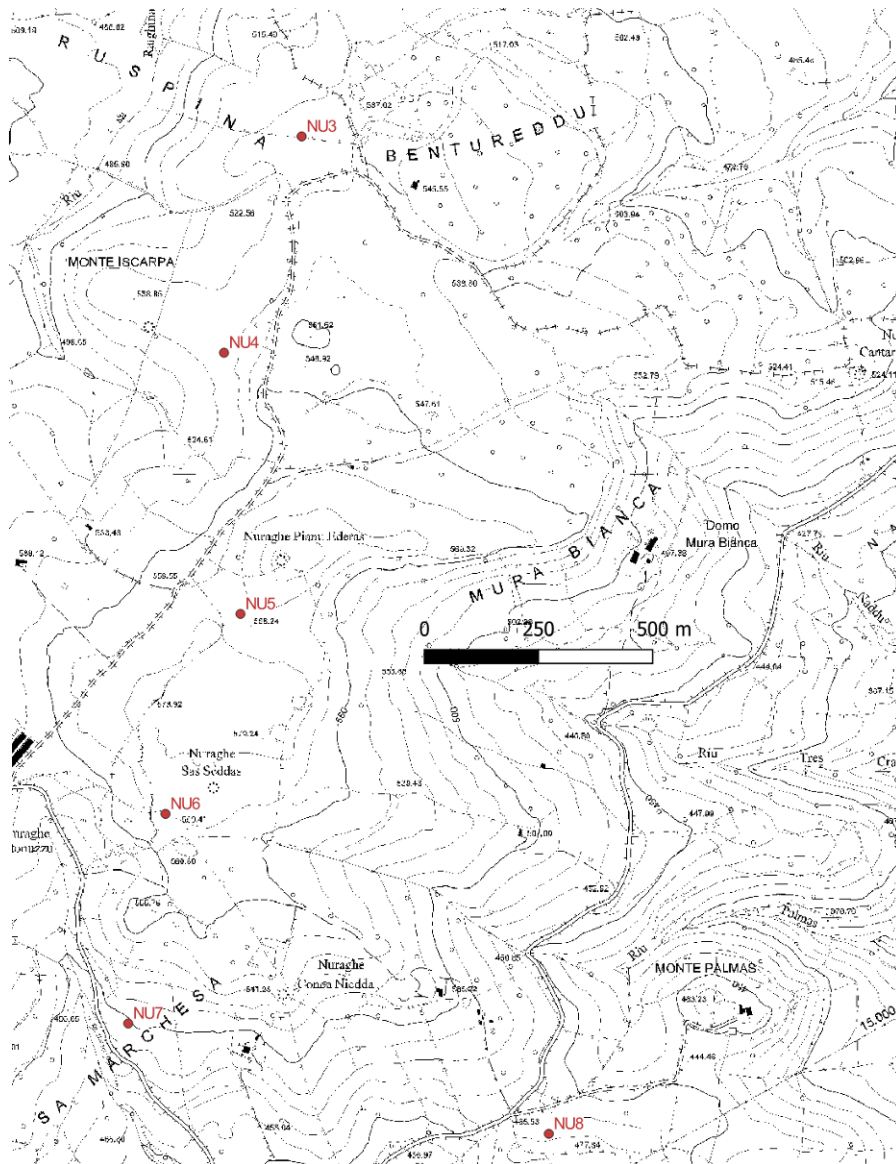


Figura 4 – Inquadramento del sito di intervento su Cartografia CTR 1:10.000 (sezione 442 140) – settore Sud.

3. DESCRIZIONE DEL PROGETTO

Il parco eolico in progetto, da realizzarsi in comune di Nulvi, provincia di Sassari, sarà costituito da 8 aerogeneratori, ciascuno di potenza nominale pari a 6 MW, per una potenza complessiva di 48 MW. Gli aerogeneratori saranno collegati attraverso 2 linee elettriche in cavo a media tensione (circuiti) ad un quadro di media tensione ubicato nella stazione di trasformazione nel Comune di Tergu. I circuiti saranno costituiti da cavi interrati il cui percorso ricalcherà i tracciati di viabilità esistente e/o quelli di nuova realizzazione per l'accesso agli aerogeneratori stessi.

La stazione elettrica di trasformazione 30/150 kV (SSE) consentirà la raccolta dell'energia prodotta dagli aerogeneratori della centrale eolica, la trasformazione dal livello di tensione a 30 kV a quello di 150 kV e la



consegna dell'energia alla linea attraverso un breve cavo interrato AT a 150 kV lungo circa 20 m alla stazione elettrica di Terna (SE) "Tergu" lì adiacente.

4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA

4.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE

L'area investigata è individuata nella regione storica della Anglona, nella Sardegna Settentrionale. Il sito costituisce il bordo orientale dell'alto strutturale caratterizzato dalle rocce vulcaniche afferenti al Ciclo vulcanico calcareo Oligo miocenico (Aquitano – Burdigaliano), che interessa in modo esteso tutta la Sardegna centro occidentale, e si presenta con cospicui spessori che raggiungono parecchie centinaia di metri. Il settore indagato è rappresentato da serie di riolitiche e subordinatamente dacitiche, principalmente in espandimenti ignimbritici, con struttura porfirica per fenocristalli di plagioclasio e biotite, interessate da intensa fratturazione. Alla scala dell'affioramento si presentano di colore rossastro.

Da un punto di vista geodinamico questo ciclo vulcanico è comunemente associato ad un modello di subduzione oceanica con formazione di un bacino di retroarco che sarebbe rappresentato dal Bacino balearico, sintettonico alla rotazione del blocco Sardo-corso associata alla fase post collisionale dell'orogenesi Appenninica (Miocene inf.). Durante tali movimenti si è avuta la formazione di locali zone di compressione e distensione, quali il bacino di Chilivani-Berchidda e il bacino di Porto Torres. Tra le varie colate sono intercalati livelli di tufo di colore grigio chiaro, talvolta argillificati.

Nelle aree più depresse o di raccordo tra l'alto strutturale vulcanico e l'area di valle sono presenti depositi detritici legati alla gravità: si tratta di depositi di frana e di versante, e coltri eluvio – colluviali la cui messa in posto è da ricondursi al tardo periodo Quaternario (OLOCENE); sono in genere depositi eterometrici con clasti spigolosi o scarsamente elaborati immersi in matrice fine prevalente, accumulati essenzialmente per gravità alla base dei versanti.

L'assetto strutturale dell'area è costituito da lineamenti tettonici, con direzioni principali NNW-SSE e ortogonale SW-NE, che hanno scomposto l'altipiano vulcanico, le cui lineazioni hanno definito il reticolo idrografico principale della zona.

Sinteticamente, l'Unità litologica predominante, così come individuata dalla Cartografia geologica ufficiale, è data da:

- *Ciclo Vulcanico Calco alcalino (OLIGO – MIOCENE)*

Le rocce vulcaniche, rappresentate in prevalenza da Depositi di flusso piroclastico in facies ignimbritica, sono presenti in modo esteso in tutta l'area. Nel complesso mostrano una facies in prevalenza rocciosa, con giacitura tipica delle formazioni di copertura suborizzontale, piana, talvolta frastagliata dalle intersezioni dei tagli erosivi, ma con pendici marginali a ripida scarpata. Alla scala del rilevamento si presentano fratturate in superficie, talvolta ricoperte da un debole strato pedogeneizzato. Petrograficamente presentano una notevole omogeneità di tipi, a composizione prevalente riolitica e dacitica; la struttura è di tipo porfirico a fenocristalli spesso corrosi, con tessiture fluidali e vetrosità abbondante; saldati, di colore rossastro, e vengono distinte le seguenti Unità:



- *Unità di Logulentu*: Affiora in prevalenza nei settori orientali del rilievo e interessa il sito di posa degli aerogeneratori NU1, NU2, NU3, NU7. È rappresentata da depositi di flusso piroclastico in facies ignimbratica, pomiceo cineritici, saldati, di colore rossastro con tessitura macroeutattica (Burdigaliano);

- *Unità di Osilo*: Affiora nel settore occidentale dell'area e interessa i settori di posa degli aerogeneratori NU4, NU5, NU6. Essa è rappresentata da Andesiti porfiriche, per fenocristalli di Pl, Am, e Px, in cupole di ristagno e colate (Acquitano - Burdigaliano).

- ***Depositi detritici colluviali e di versante (OLOCENE)***

Sono costituiti da depositi di versante e cumuli di materiale eluvio colluviale proveniente dal disfacimento della roccia madre sottostante (coperture recenti). Essi presentano in genere modesto spessore, e non sono presenti nell'area indagata, ma sono presenti nelle aree morfologicamente più depresse ed in corrispondenza delle aree di raccordo tra l'altipiano e la valle.

Sono costituiti in prevalenza da detriti immersi in matrice fine, talora con intercalazioni di suoli più o meno evoluti, arricchiti in frazione organica.

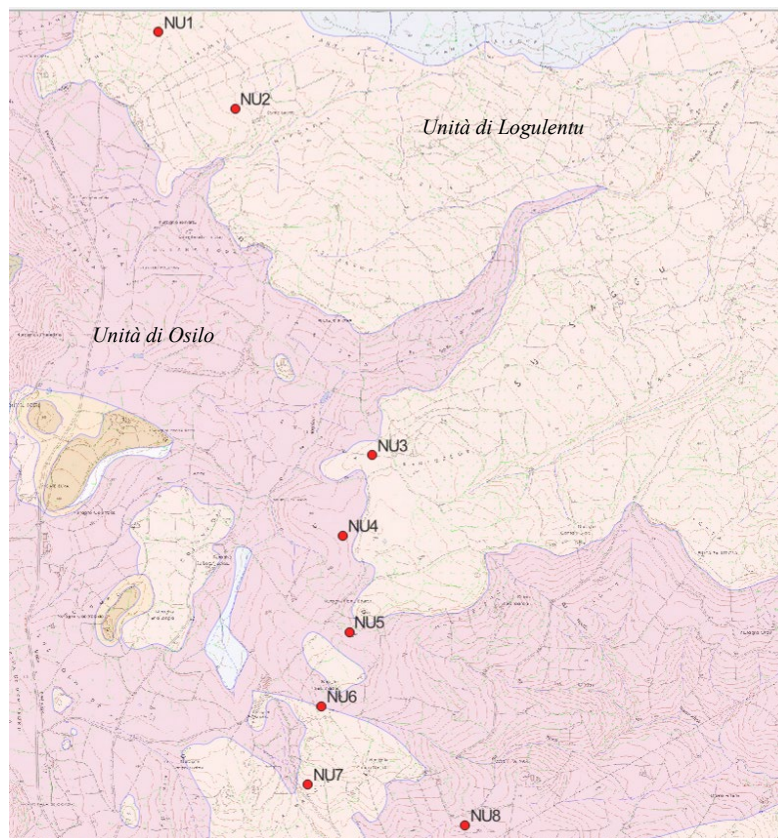


Figura 5 – Schema litologico generale del Ciclo vulcanico Calco – alcalino Miocenico in affioramento nel sito di indagine: in giallo l'Unità delle Ignimbriti, in rosa l'Unità delle Andesiti.



4.2 SITUAZIONE LITOSTRATIGRAFICA LOCALE

Le rocce vulcaniche afferenti al "Ciclo vulcanico calcoalcalino (Oligo – Miocene)" interessano l'area di posa degli aerogeneratori in progetto, e sono presenti in modo esteso in tutta l'area. Nel complesso mostrano una facies in prevalenza rocciosa sin dal piano campagna, intensamente fratturata, talvolta con un primo strato da poco a molto alterato superficiale, in cui i processi pedogenetici in atto hanno permesso la formazione di un suolo, rinvenibile fino alla profondità massima di – 1 m, con tessitura limoso sabbiosa, che sfuma nella coltre intensamente alterata del substrato lapideo.

Il cavidotto di collegamento che collega gli aerogeneratori con la centrale di trasformazione più a Nord, a circa 3 km di distanza, attraversa anch'esso in massima parte le rocce vulcaniche precedentemente descritte, mentre nell'ultimo tratto (600 m circa) attraversa litologie marnose e sabbiose mioceniche.



Figura 6 – Affioramento delle Andesiti (Unità di Osilo) in prossimità del punto di posa dell'aerogeneratore NU5.



Figura 7 – Affioramento delle Ignimbriti (Unità di Loguentu) in prossimità del punto di posa dell'aerogeneratore NU3.

5. CARATTERI STRUTTURALI

L'assetto strutturale dell'area indagata, riflette gli eventi deformativi legati alle vicende tettoniche occorse durante tutte le fasi deformative che hanno interessato la regione, fin dal Paleozoico e successivamente nel Terziario e Quaternario.

Dalla fase metamorfica nel Paleozoico manifestatasi con il metamorfismo d'alto grado nelle sequenze sedimentarie precambriane, attraverso una elevata scistosità, estremamente varia in termini di inclinazione e direzione, le manifestazioni tettoniche erciniche hanno manifestato nel territorio l'apertura delle fratture post orogeniche, con movimenti distensivi caratterizzati da faglie dirette orientate prevalentemente NW-SE associate all'intrusione del Complesso intrusivo granitoide (non presente nell'area in esame e affiorante nel settore più orientale dell'area).

Successivamente ad una lunga fase di "stasi" tettonica del periodo Mesozoico, che ha caratterizzato il settore di interesse con movimenti di risollevarimento che non hanno lasciato significative evidenze nel territorio, nel periodo Terziario (Cenozoico) si sono succedute diverse fasi tettoniche compressive: la fase pirenaica (Cherchi & Tremolieres 1984¹), che ha prodotto pieghe con direzione assiale N50, e la fase appenninica, che in un contesto più generale ha determinato la fine dell'apertura del Mediterraneo occidentale a causa della collisione del blocco sardo-corso contro il blocco apulo. A questa fase sono attribuite faglie trascorrenti e fasce transtensive nella Sardegna centro-settentrionale.

¹ Cherchi A., Tremolieres P. (1984): Nouvelles données sur l'évolution structurale au mesozoïque et cenozoïque de la Sardaigne et leurs implications Géodynamiques dans le cadre méditerranéen. C.R. Acad. Sc. Paris. Serie 2 298, Paris. .



Segue una fase tettonica transtensiva Oligo-Aquitaniiana, con faglie trascorrenti ENE-WSW e l'importante manifestazione effusiva del vulcanismo oligo-miocenico sardo, caratterizzante il territorio in esame, che rappresenta uno degli eventi geologici terziari più importanti del Mediterraneo occidentale. L'importanza di questo ciclo vulcanico è testimoniata dalla grande estensione degli affioramenti e dai cospicui spessori delle successioni vulcaniche che raggiungono parecchie centinaia di metri. Conseguente alla messa in posto delle vulcaniti si è avuta una fase distensiva legata all'apertura del Bacino di Porto Torres e del Bacino del Logudoro, e quello Balearico (apertura del Mar di Sardegna) nel Burdigaliano con faglie che interagiscono con le precedenti strutture a pieghe realizzando complesse geometrie che hanno un ruolo fondamentale nella circolazione idrica sotterranea.

Al Pliocene infine, viene attribuita una fase tettonica responsabile del sollevamento generale della regione, che si realizza con faglie dirette ad andamento NS e con la riattivazione di strutture preesistenti con direzione ENE, che hanno generato depressioni in cui si conservano le vulcaniti mioceniche e i depositi clastici del Miocene superiore.

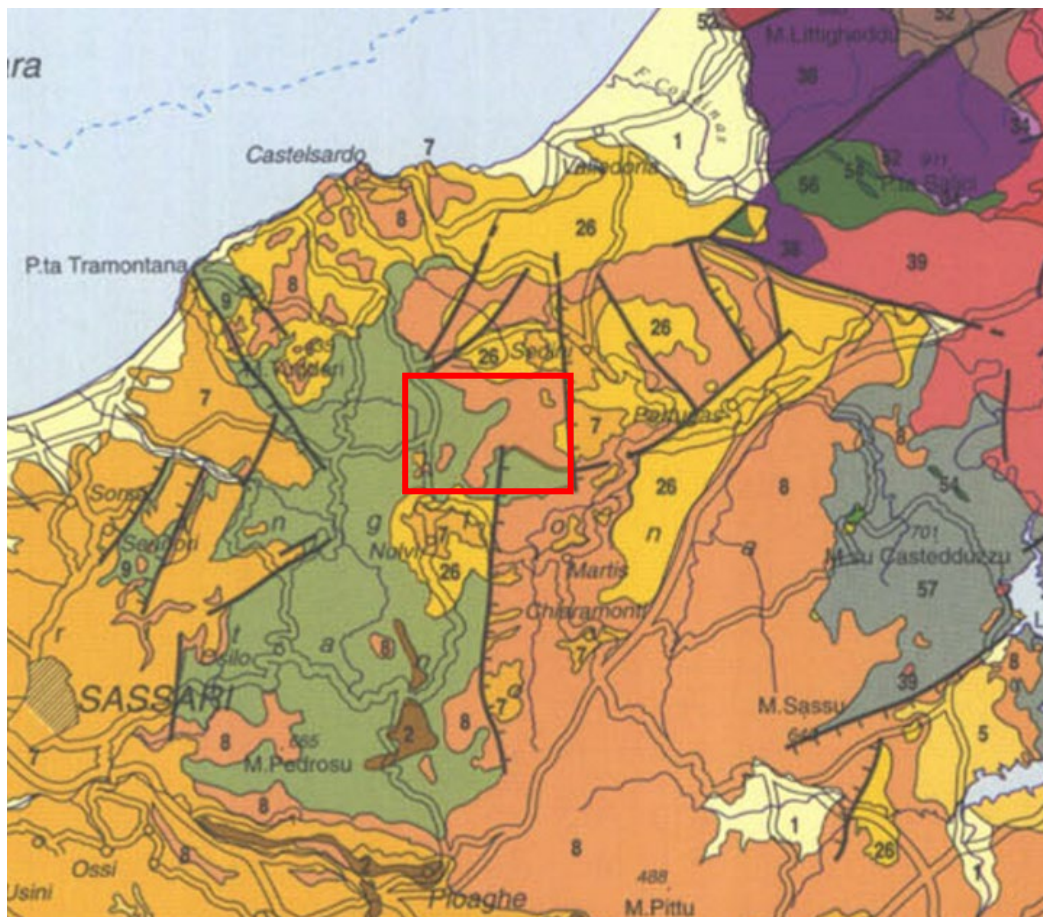


Figura 8 – Estratto della Carta geologica – strutturale della Sardegna non in scala, con in rosso evidenziato il settore in studio ricadente in comune di Nulvi. Si evidenzia come l'area sia interessata pienamente dagli affioramenti vulcanici connessi con l'apertura del Bacino Balearico e del Mar Tirreno Orientale. LEGENDA: 8) Rioliti e riolaciti calcalcaine prevalentemente ignimbratiche ($19 \pm 0,5$ Ma); 9) Andesiti e basalti, da calcalcalini a shoshonitici $28 \pm 1,5$ Ma).



6. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

I fattori che hanno più marcatamente condizionato l'evoluzione del rilievo sono essenzialmente le litologie affioranti e la tettonica post-eocenica connessa all'orogenesi alpina che ha interessato il settore.

Da un punto di vista geomorfologico, l'alto morfologico di natura vulcanica avente quota massima 560 m s.l.m. nel settore meridionale (in corrispondenza delle pale NU5 e NU6), è definito come un altopiano vulcanico di forma allungata, con asse N-S, con deboli pendenze nelle zone sommitali (da 0 a 10%), che degrada lungo i bordi con pendenze da 30 a 50% con scarpate modellate dall'azione erosiva dei corsi d'acqua.

L'area di posa degli aerogeneratori in progetto viene individuata nei settori più pianeggianti dell'altopiano, con pendenze pari allo 0-10%.

La morfologia ad altopiano è estesamente presente in tutto il settore limitrofo, solcato da valli e incisioni torrentizie, che nella parte valliva raggiungono dislivelli rilevanti. Le valli riprendono le fratture tettoniche regionali e i sistemi di faglia principali, aventi direzione NNW-SSE e SW-NE, che hanno scomposto l'ammasso vulcanico definendo l'aspetto del paesaggio collinare e variamente ondulato del settore.

Le parti morfologicamente più aspre si rinvengono in corrispondenza di rocce molto resistenti alla degradazione, quali ad esempio le rocce paleozoiche metamorfiche affioranti nel settore orientale, dove il paesaggio è caratterizzato da rilievi più pronunciati e valli più marcatamente incise.

Il paesaggio si presenta per lo più regolare, caratterizzato in prevalenza da forme sub pianeggianti e dominante rocciosità, dovuta all'affioramento della roccia vulcanica sin dalla superficie: localmente, dove i processi pedogenetici hanno avuto la possibilità di svilupparsi, è presente un suolo poco profondo, ricco in minerali argillosi e ossidi di ferro.

Lungo i versanti esternamente alle aree in studio si rinvengono depositi detritici di versante ed eluvio colluviali, caratterizzati da ciottoli spigolosi immersi in matrice fine, parzialmente compatta o semi-incoerente, talora con intercalazioni di suoli più o meno evoluti ricchi in frazione organica. Nella parte a ridosso dell'abitato di Nulvi sono presenti cumuli di frana eterogenei attribuiti al Pleistocene superiore.

I lineamenti geomorfologici ed i principali processi morfoclimatici in atto nell'area di studio sono riportati nella carta geologica e geomorfologica, nella quale vengono distinte le forme generali del rilievo e i principali processi geomorfologici in atto, elaborata a seguito del rilievo di superficie e ad un'accurata indagine fotointerpretativa.

7. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO DEL SITO

7.1 CENNI METEO – CLIMATICI

Da un punto di vista climatico il settore Nord Occidentale della regione è riconducibile al tipo mediterraneo secco-sub umido, influenzato dalla morfologia e dalla vicinanza dal mare (circa 20km). Le precipitazioni sono

concentrate nei mesi autunnali e invernali, con valori minimi nel periodo estivo, e variano tra 475 e 900 mm nelle aree di altipiano, corrispondenti alle quote più elevate. I venti predominanti sono il maestrale e il grecale².

7.2 CARATTERI IDROGEOLOGICI DEI TERRENI

Come già accennato, il paesaggio che ospita l'intervento di progetto presenta una morfologia ad altipiano, sub pianeggiante e costituente i settori di spartiacque del reticolo idrografico superficiale presente nel sito; esso è di tipo semplice, poco gerarchizzato e a carattere torrentizio, e ricalca le lineazioni tettoniche principali, in prevalenza di tipo rettilineo e parallelo, con direzione NNW-SSE e NE-SW, ortogonali tra loro.

Il ruscellamento idrico superficiale è strettamente condizionato da fattori morfologici e litologici: le litologie vulcaniche presentano infatti una permeabilità per porosità bassa e nulla, i deflussi idrici avvengono quasi esclusivamente per ruscellamento superficiale e spesso sono presenti, soprattutto nella stagione autunno invernale, ristagni idrici, naturali e artificiali.

Tra i corsi d'acqua degni di nota si citano il Riu Sa Rughina / Badu de Regos a nord, ed un secondo corso d'acqua ad est (Fiume_82804 così come censito dal reticolo idrografico regionale), che drenano il settore settentrionale e orientale dell'area in studio verso nord secondo direttrici SW-NE, e costituiscono i bacini di primo ordine del Rio Silanus, corso d'acqua che scorre nel settore settentrionale dell'area, affluente del più ampio Fiume Coghinas. Nel settore meridionale e occidentale si evidenziano corsi d'acqua minori di primo ordine che scorrono su valli rettilinee parallele tra loro con asse NW-SE che confluiscono sul Rio Triulintas, che scorre su un'altra direttrice tettonica con asse SW-NE fino alla confluenza sul Fiume Coghinas.

Le litologie vulcaniche pur essendo impermeabili, presentano una medio-alta permeabilità per fessurazione, strettamente legata ai sistemi di fratturazione e ai rapporti di giacitura delle discontinuità, che costituiscono un serbatoio acquifero importante, funzione del loro spessore, più elevato nel settore orientale e settentrionale dell'area. Le litologie vulcaniche, costituite da flussi piroclastici sovrapposti, immergono verso NE e, verosimilmente, da precedenti studi effettuati nella zona, la circolazione idrica sotterranea tende a far confluire i flussi idrici (isopieze) verso tale direzione, seguendo il gradiente topografico (Carmignani *et alii*, 2001). Localmente, in corrispondenza di faglie, possono essere presenti circuiti preferenziali con elevata portata, spesso sfruttate con alcuni pozzi presenti nelle aziende agricole. Sono presenti nel settore pozzi idrici profondi, che permettono l'utilizzo della falda idrica profonda, attestata a circa -100 m dal p.c. (fonte ISPRA: "Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo (Legge 464/1984)").

7.3 SCHEMA DELLA IDROGRAFIA SUPERFICIALE E SOTTERRANEA

Le litologie vulcaniche affioranti nell'area in studio presentano una permeabilità per porosità bassa o assente: tali terreni non sono interessati dalla presenza di circolazione idrica superficiale, così come confermato dalle indagini geognostiche eseguite, nel corso delle quali non è stata rilevata la presenza della falda.

² Motroni A., Canu S., Bianco G., Loi G. (2003) - *Development of a Geographic Information System for assessing and monitoring Environmentally Sensitive Areas to Desertification in Sardinia*, in "Desertification: actors, research, policies. Comitato Nazionale per la lotta alla siccità e alla desertificazione, Roma.

Il ruscellamento idrico superficiale è limitato lungo le lineazioni tettoniche indicate, aventi direzione NE-SW, che costituiscono la rete principale di drenaggio del pianoro ignimbrico: essi costituiscono la zona di testata del Riu Silanus e del Riu Triulintas, facenti parte del più ampio bacino idrografico del Fiume Coghinas. I corsi d'acqua presenti nell'area presentano un deflusso idrico strettamente legato alle precipitazioni, con picchi di portata e deflusso in corrispondenza degli eventi pluviometrici e assenza di circolazione idrica per la maggior parte dell'anno per le caratteristiche prettamente impermeabili del substrato.

Le discontinuità strutturali del basamento ignimbrico permettono l'infiltrazione delle acque di precipitazione in profondità, garantendo l'alimentazione acquifera di falde idriche profonde. Pertanto, per le caratteristiche idrogeologiche e strutturali dei litotipi affioranti, non è presente nel sito indagato una falda idrica superficiale, mentre è presente una circolazione idrica profonda, il cui livello piezometrico, da fonte ISPRA (Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo (Legge 464/1984)) è attestato a -100 m dal p.c., il cui sviluppo e portata sono strettamente legate ai sistemi di fratturazione e ai rapporti di giacitura delle discontinuità, che costituiscono un serbatoio acquifero importante, funzione del loro spessore, più elevato nel settore orientale e settentrionale dell'area. Il complesso vulcanico affiorante immerge verso NE e, verosimilmente, da precedenti studi effettuati nella zona, la circolazione idrica sotterranea tende a far confluire i flussi idrici (isopieze) verso tale direzione, seguendo il gradiente topografico (Carmignani *et alii*, 2001). Localmente, in corrispondenza di faglie, possono essere presenti circuiti preferenziali con elevata portata, spesso sfruttate con alcuni pozzi presenti nelle aziende agricole.

7.4 INTERFERENZA DELLE OPERE STRADALI DEL PROGETTO SUL RETICOLO IDROGRAFICO

Le opere in progetto, come detto, non ricadono nelle perimetrazioni delle aree caratterizzate né da pericolosità da frana, né da pericolosità idraulica mappate nell'ambito della predisposizione del Piano di Gestione del Rischio da Alluvioni della Regione Sardegna, aggiornate alla data del 31/12/2016.

Tuttavia, le opere stradali, ed in particolare il cavidotto interrato in progetto, che verrà realizzato sulla viabilità già esistente, interferisce in tre punti con gli elementi idrici censiti nel reticolo idrografico della Regione Sardegna:

- la prima interferenza riguarda la S.P. 17 (Km 2,400) con il corso d'acqua denominato FIUME_72124,
- la seconda interferenza si rileva nella strada poderale "Ruspina" a circa 200 m con l'incrocio con la S.P. 17, con il corso d'acqua FIUME_7140,
- la terza interferenza è individuata circa 1,3 km dalla seconda, sulla stessa strada poderale con il RIU SA RAIGHINA.

Per gli interventi in tali aree si dovranno quindi seguire le prescrizioni delle Norme di Attuazione del Piano di Assetto Idrogeologico.

8. INDAGINE GEOGNOSTICA

Sul sito di indagine è stata effettuata una indagine geognostica atta a ricostruire essenzialmente la stratigrafia del sottosuolo e le condizioni litologiche, nonché determinare, attraverso prove geotecniche mediante analisi di laboratorio, i parametri geotecnici di riferimento ai quali attenersi per le verifiche geotecniche di progetto. In



caso di esito positivo di autorizzazione, in fase di progettazione esecutiva sarà necessario effettuare ulteriori indagini puntuali per ciascun punto di posa delle pale eoliche.

L'indagine geognostica è stata articolata come segue:

- Esecuzione di n. 1 sondaggio a rotazione a carotaggio continuo, spinto fino alla profondità di -20.00 m dal p.c., posizionato in prossimità dell'area di posa dell'aerogeneratore NU3;
- Prelievo di n. 2 campioni di rocce da sottoporre a prove di laboratorio geotecnico;
- Prospezione geofisica comprendente n. 1 stendimento con metodologia sismica tipo MASW.

8.1 SONDAGGIO GEOGNOSTICO

Il sondaggio geognostico a rotazione con carotaggio continuo, di diametro 101 mm, è stato realizzato con sonda idraulica cingolata e spinto alla profondità di 20.00 metri dal p.c. e posizionato sull'area di posa dell'aerogeneratore NU3. Per i livelli lapidei è stato utilizzato un carotiere doppio con corona diamantata. Le carote estratte durante le perforazioni sono state riposte in cassette monostampo, opportunamente siglate e fotografate. L'ubicazione del sondaggio è mostrata nella figura seguente.

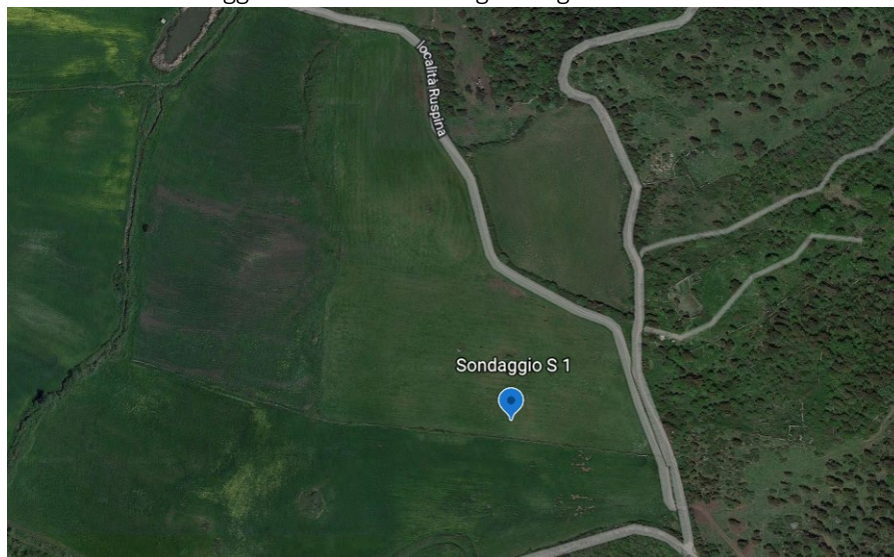


Figura 9 – Ubicazione del sondaggio eseguito in località Ruspina, in prossimità del sito di posa della pala NU3.

Il sondaggio geognostico ha messo in evidenza, al di sotto di un primo strato pedogenetico di profondità 0,90 m, la coltre alterata e decompressa del substrato lapideo, intensamente fratturata, presente fino alla profondità di -3,20 m, al di sotto del quale si evidenzia la presenza della roccia in facies massiva (da semilapidea a lapidea) intensamente fratturata. Da -6,50 m fino a -11,20 m si rinviene uno strato di Piroclastite arenacea, con livelli parzialmente argillificati e conglomerato vulcanico con blocchi decimetrici di basalto, al di sotto del quale, e fino alla profondità di fine foro (-20,00 m) si rinviene la roccia massiva caratterizzata da Piroclastite arenacea e conglomerato vulcanico, grigio integro con un livello parzialmente alterato totalmente fratturato tra 12.0 e 13.30 metri; tra 15.30 e 16.75 metri, e un valore di RQD pari a 90%.

Nel corso del sondaggio non è stata rinvenuta la falda idrica.



- -0,00 – 0,90 m Suolo limoso sabbioso;
- -0,90 – 3,20 m Coltre alterata e decompressa del substrato lapideo vulcanico;
- -3,20 - 6,5 m Roccia trachitica da semi lapidea a lapidea con livelli pluridecimetri argillificati. Alla quota di -3,50 m è stato prelevato il primo campione C1 per le prove di laboratorio.
- -6,50 – 11,20 m Piroclastite arenacea con livelli parzialmente argillificati e conglomerato vulcanico con blocchi decimetrici di basalto. A quota -7,40 m è stato prelevato il secondo campione C2.
- -11,20 – 20,00 m Piroclastite arenacea e conglomerato vulcanico, grigio integro con un livello parzialmente alterato totalmente fratturato tra 12.0 e 13.30 metri e tra 15.30 e 16.75 metri.



Figura 10 – Posizionamento del sondaggio eseguito in prossimità del sito di posa dell'aerogeneratore NU3.


 Ditta DR. ANTONELLO ANGIUS Via Italia, 143 Cagliari 09134 angiusgeo@tiscali.it www.angiusgeo.com SONDAGGI GEOGNOSTICI - MONITORAGGIO AMBIENTALE											
Committente		Profondità raggiunta		Quota Ass. P.C.		Certificato n°		Pagina			
Dott.ssa Francesca Demurtas		-20.00				1		1			
Operatore		Indagine		Genere		Inizio/Fine Esecuzione					
Paolo Sals		Geognostica		Nulvi Eolico - Aerogeneratore		06/07.10.2022					
Responsabile		Sondaggio		Tipo Carotaggio		Tipo Sonda		Coordinate X Y			
Dott. Geol. Antonello Angius		S1		Rot. car. cont. 101mm		Deltabase 520					
Scale (mt)	Litologia	Descrizione		Quota	%Carotaggio R.O.D.	S.P.T.	Spocket Test kg/cmq	Venire Test kg/cmq	Campioni	Metodo Perforazione	Falda
1		Suolo limoso sabbioso, marrone, ossidato, asciutto, sfumante nella coltre intensamente alterata del substrato lapideo .		0.90							
2		Coltre alterata e decompressa del substrato lapideo (conglomerato vulcanico), totalmente fratturata, da grigio biancastra a giallastra.		3.20							
3		Trachite da semilapidea a lapidea con livelli pluri decimetrici argillificati, rossastra, poco fratturata.		6.50						Pa. 50	3.70
4		Piroclastite arecea con livelli parzialmente argillificati e conglomerato vulcanico con blocchi decimetrici di basalto, da color ocra a rosata.		11.20						Pa. 40	7.60
5		Piroclastite arenacea e conglomerato vulcanico, grigio integro con un livello parzialmente alterato totalmente fratturato tra 12.0 e 13.30 metri; tra 15.30 e 16.75 metri livello rosato.		20.00							
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											



Figura 11 – Sondaggio S 1: 0,00 – 5,00 m.

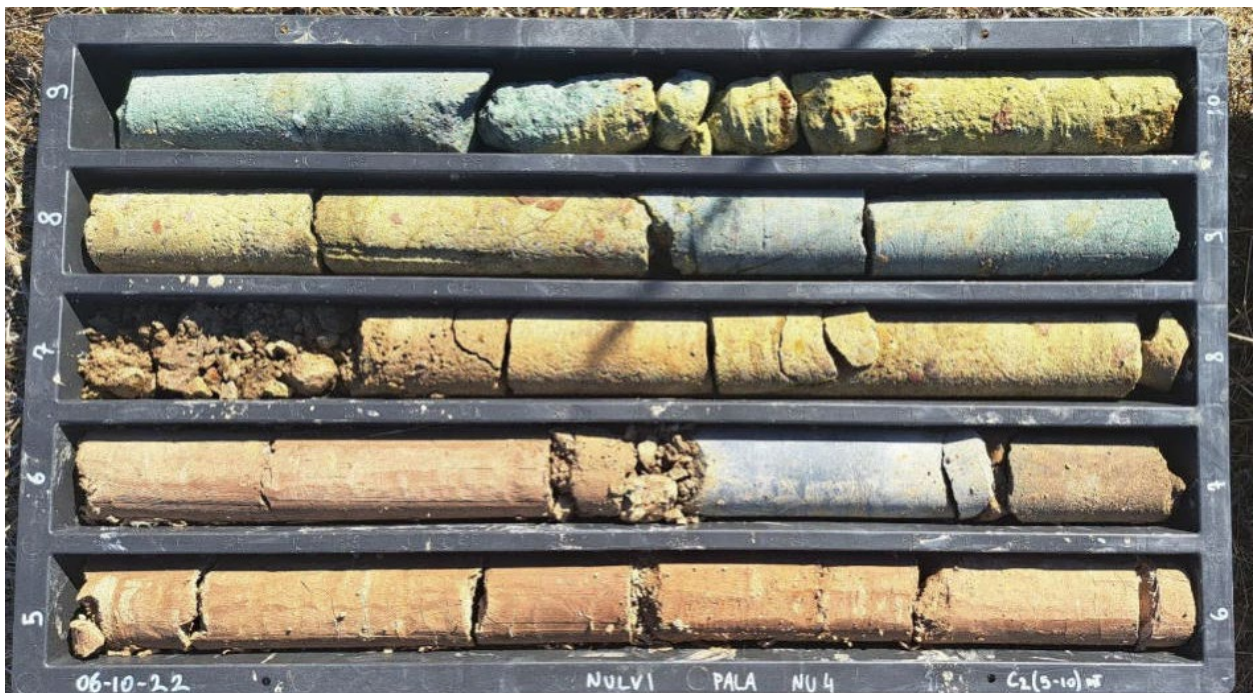


Figura 12 – Sondaggio S 1: -5,00 – 10,00 m.



Figura 13 – Sondaggio S 1: -10,00 – 15,00 m.



Figura 14 – Sondaggio S 1: -15,00 – 20,00 m.



8.2 ANALISI GEOTECNICHE DI LABORATORIO

Nel corso del sondaggio sono stati prelevati come detto n. 2 campioni, sui quali sono state effettuate delle prove geotecniche presso il laboratorio certificato Geosystem di Quartucciu (CA), quali prove di volume e di compressione uniassiale al fine di determinare i parametri di resistenza della roccia.

Nella tabella seguente si riporta il dettaglio delle analisi eseguite.

ID Campione	Quota (m)	Prova
S1 – C1	3.50 – 3.70	Prova di compressione monoassiale, Massa volumica
S1 – C3	7.40 – 7.60	Prova di compressione monoassiale, Massa volumica

Tabella 1 – Elenco campioni e prove geotecniche eseguite.

I certificati di laboratorio, i quali sono riportati in Allegato alla presente relazione, hanno restituito i seguenti parametri per i campioni di riferimento.

Sondaggio	Prof. da p.c.	Litotipo	Massa volumica apparente (Kg/m ³)	Resistenza a compressione uniassiale (N/mm ²)
S1	3.50-3.70	Trachite	1952,4	1,97
S1	12,40-12,80	Piroclastite	1973,0	1,42

Tabella 2: Risultati della prova di laboratorio sulla determinazione della massa volumica e sulla prova di compressione uniassiale.

8.3 INDAGINE GEOFISICA MEDIANTE METODOLOGIA MASW

Durante i lavori di indagine è stata portata avanti una campagna investigativa geofisica al fine di definire la categoria di sottosuolo dei terreni interessati dalla posa dell'anemometro, in accordo con le NTC 2018. L'indagine è stata condotta mediante la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).

La tecnica consiste nella registrazione multicanale di segnali sismici generati da sorgenti impulsive all'interfaccia della superficie libera del terreno. Si tratta di una prova totalmente non invasiva basata sulla propagazione di onde di superficie (Rayleigh e Love) per la stima del profilo di velocità delle onde di taglio Vs, nell'ipotesi di semispazio monodimensionale, caratterizzato da legame costitutivo (visco-) elastico lineare. Le prove per onde superficiali sfruttano le caratteristiche dispersive dei mezzi stratificati. In altre parole, in presenza di un mezzo multistrato, la velocità di fase e di gruppo del segnale risulta dipendente dalla frequenza di eccitazione. Per questo motivo, le componenti spettrali ad alta frequenza forniscono informazioni sugli strati più superficiali, perché caratterizzate da una minor capacità penetrativa, a causa della maggiore attenuazione subita durante il percorso all'interno del mezzo di propagazione. Viceversa, le componenti a grande lunghezza d'onda e bassa frequenza permettono di ricavare informazioni circa le proprietà dei terreni più profondi, così come schematizzato in Figura 15. Il profilo di velocità Vs(z) in funzione della profondità z viene determinato attraverso la soluzione di un problema inverso.

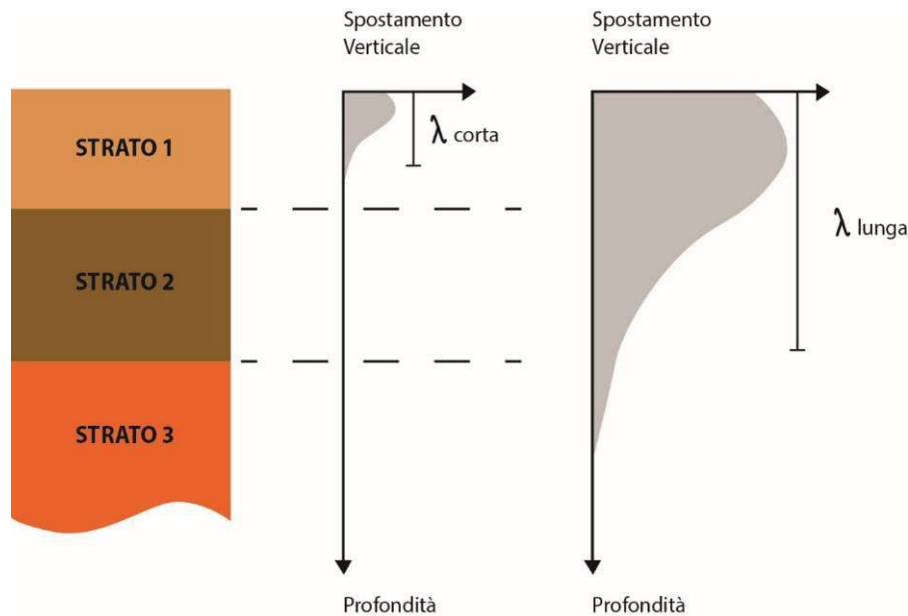


Figura 15 - Dipendenza della profondità di indagine dalla frequenza del segnale.

L'analisi MASW dei segnali sismici può essere sintetizzata in alcuni passi fondamentali: la prima fase consiste nell'estrazione, mediante picking, della curva di dispersione sperimentale a partire dall'analisi spettrale del segnale nel dominio di Fourier. In altre parole, dopo aver selezionato l'intervallo caratterizzato da massima ampiezza nello spettro f-k (frequenza-numero d'onda) o f-V (frequenza-velocità) si ricostruisce la curva $V(f)$ (velocità – frequenza) o $S=S(f)$ (lentezza – frequenza). La seconda fase di elaborazione consiste nella soluzione del problema inverso. Solitamente si parte da un modello di partenza con un numero prestabilito di strati sovrapposti, ciascuno caratterizzato da un proprio valore di velocità V_s .

Per l'esecuzione del cantiere d'interesse, è stata impiegata una strumentazione di acquisizione modello GEA24, prodotto dalla PASI Geophysics, con frequenza di campionamento 1500 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della PASI Geophysic con frequenza propria di 4,5 Hz. Il numero di canali è risultato pari a n° 24 canali. Per l'energizzazione è stata utilizzata una mazza battente da 10 kg impattante verticalmente su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg.

Dall'indagine eseguita, spiegata nel dettaglio nella relazione sismica riportata nell'Allegato 2 "Relazione sulle indagini geognostiche" nell'Allegato 5, sono stati riscontrati valori di V_s progressivamente crescenti con la profondità e compresi tra circa 360 e 800 m/s.

L'analisi congiunta delle onde di superficie (Rayleigh e Love) ha consentito di determinare il profilo verticale V_s e, di conseguenza, di calcolare il parametro V_{seq} , risultato pari a 489.81 m/s (considerando come riferimento il piano campagna). Il bedrock sismico ($V_s > 800$ m/s) è stato incontrato a 21.70. Ciò consente di attribuire una categoria di sottosuolo che permette l'utilizzo dell'approccio semplificato in funzione del parametro V_s eq, definita dalla Tab. 3.2.II, delle NTC 20018 (Tabella 3), da cui si ricava una categoria di sottosuolo per l'area di indagine di **tipo B**.



CATEGORIA	CARATTERISTICHE DELLA SUPERFICIE TOPOGRAFICA
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.

Tabella 3 - Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

L'indagine MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0.00 – 1.00	1° sismostrato con Vs di 80 m/s, suolo
1.00 – 4.90	2° sismostrato con Vs di 497 m/s, roccia intensamente fratturata/alterata e/o terre addensate
4.90 – 21.70	3° sismostrato con Vs tra 685 e 715 m/s, roccia fratturata/alterata e/o terre molto addensate
21.70 – 31.00	4° sismostrato con Vs di 1432 m/s, roccia da poco fratturata a integra

Figura 16 – Profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs per le litologie indagate.

Di seguito si indicano le correlazioni bibliografiche che possono essere utilizzate per il calcolo dei parametri di deformazione dinamici calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input Vp, Vs e densità per ciascun sismostrato definito dalle indagini geofisiche.

$$\text{Coefficiente di Poisson } \nu = \frac{V_p^2 - 2 V_s^2}{2 (V_p^2 - V_s^2)}$$

$$\text{Modulo di Young dinamico } E_d = \gamma V_s^2 [(3V_p^2 - 4 V_s^2) / (V_p^2 - V_s^2)]$$

$$\text{Modulo di taglio (rigidità) } G_0 = \gamma V_s^2$$

$$\text{Modulo di comprimibilità o di Bulk } K = \gamma (V_p^2 - 4/3 V_s^2)$$

Sismostrato	Vs	Vp	Densità γ	Modulo di Young dinamico E_{dyn}	Modulo di taglio iniziale G_0	Modulo di comprimibilità o di Bulk K
	m/s	m/s	kg/m ³	MPa	MPa	MPa
1	80	160	1600	27.31	10.24	27.31
2	497	994	1800	1185.64	444.62	1185.64
3	685	1370	2000	2502.53	938.45	2502.53
4	715	1430	2000	2726.53	1022.45	2726.53
5	1432	2864	2100	11483.49	4306.31	11483.49

Tabella 4: Parametri elastici calcolati tramite i parametri di input Vp, Vs ricavati dall'indagine MASW.

8.4 STIMA DELLA RESISTENZA DELL'AMMASSO ROCCIOSO

Le caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso costituente il basamento, sono state qui determinate attraverso il Metodo proposto da Hoek e Brown (2002), che permette di determinare i parametri di resistenza al



taglio (coesione ed angolo di attrito della roccia) attraverso l'involuppo a rottura con criterio empirico, attraverso la seguente relazione:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

dove σ'_1 e σ'_3 sono rispettivamente gli sforzi principali efficaci massimo e minimo

s e a sono delle costanti, empiricamente determinate, che dipendono dalle caratteristiche dell'ammasso roccioso in funzione di GSI;

m_b è una costante empirica che dipende dalle caratteristiche del litotipo e della struttura dell'ammasso;

σ_{ci} è la resistenza a compressione uniassiale della matrice rocciosa.

Per la stima dei parametri di Hoek e Brown da valori GSI, sono state formulate le seguenti relazioni:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right)$$

Il Metodo adottato stima la riduzione della resistenza dell'ammasso roccioso (inteso come insieme della roccia intatta e delle discontinuità) in funzione delle proprietà meccaniche e idrauliche delle discontinuità presenti, che controllano le mutue interazioni tra i blocchi (attrito, deformazione, gradi di libertà cinematica). I dati di input del Metodo sono i seguenti:

- Resistenza a compressione uniassiale della matrice rocciosa,
- G.S.I.,
- costante m_i , legata alla proprietà di attrito della roccia,
- fattore di disturbo (D),
- peso di volume della matrice rocciosa.

I parametri di resistenza a compressione uniassiale e peso di volume della matrice rocciosa sono stati determinati mediante le analisi di laboratorio ricavati dal campione C1, prelevato a quota 3.50 – 3.70 (vedi Tabella 2).

Per quanto riguarda il parametro G.S.I. (Geological Strength Index), esso si ricava mediante l'esame principalmente visivo della roccia in situ, analizzando il grado di fratturazione della roccia e tipologia e frequenza delle superfici di discontinuità dell'ammasso.

Da quanto rilevato durante l'esecuzione del sondaggio geognostico, infatti, si evidenzia che il substrato lapideo presenta una struttura da molto fratturata a poco fratturata man mano che si procede in profondità, con una coltre di alterazione e decolorazione diffusa a seguito di processi di ossidazione particolarmente evidenti negli strati più superficiali (fino a -3,20 m di profondità). Sulla base dei dati raccolti sugli affioramenti lapidei individuati nell'area oggetto di studio, ed in particolare gli affioramenti superficiali in prossimità dello stradello di penetrazione agraria che porta al lotto dove andrà installata la torre anemometrica, è fornita una classificazione dell'ammasso roccioso adottando la metodologia proposta da Marinos e Hoek (2000) che prevede l'utilizzo del G.S.I., parametro quantitativo attraverso il quale è possibile stimare la riduzione della resistenza dell'ammasso.

In funzione dei dati di campo, il parametro GSI è stato determinato pari a 45.



Figura 17 – Grafico per la determinazione dell'Indice GSI (Hoek et al. 2000)

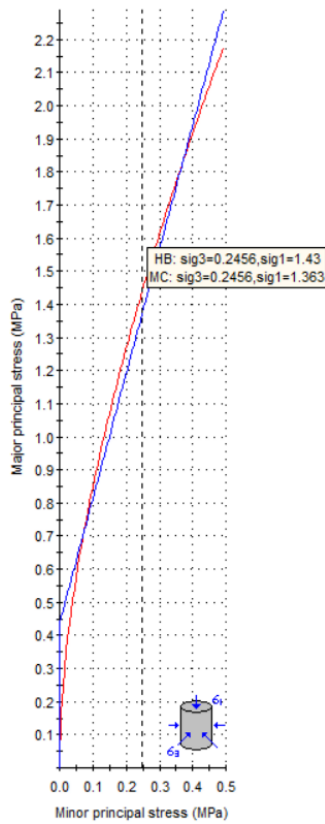
I parametri m_i e D sono delle costanti, per i quali, il primo m_i è stato assunto un valore pari a 25 ± 3 caratteristico delle rocce vulcaniche, e il secondo D (fattore di disturbo) è relativo al detensionamento della roccia nel caso di scavi o esplosioni, in questo caso è stato assunto pari a 0,2.

La stima dei parametri del criterio empirico di Hoek e Brown è stata effettuata mediante il software RocLab (Rocscience Inc, 2002), tramite i parametri di cui alla tabella.

Nel seguito sono riportati gli involuipi di rottura ed i parametri suddetti.



Analysis of Rock Strength using RocLab

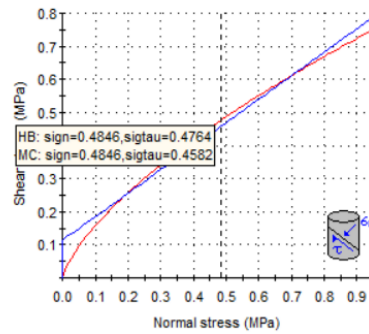


Hoek-Brown Classification
 intact uniaxial compressive strength = 1.97 MPa
 GSI = 46 mi = 25 Disturbance factor = 0.2

Hoek-Brown Criterion
 mb = 2.933 s = 0.0016 a = 0.508

Mohr-Coulomb Fit
 cohesion = 0.114 MPa friction angle = 35.38 deg

Rock Mass Parameters
 tensile strength = -0.001 MPa
 uniaxial compressive strength = 0.075 MPa
 global strength = 0.442 MPa
 modulus of deformation = 1003.40 MPa



8.5 PARAMETRI GEOMECCANICI DI PROGETTO

Di seguito si riportano i parametri geotecnici equivalenti della massa rocciosa, ricavati da classificazione di Hoek-Brown.

	USCS	Em	Cm	Φ_m	Tm	γ
	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(°)	(Mpa)	kN/m ³
Piroclastiti in facies ignimbratica	1,97	947,27	0,11	35,04	0,001	19,14

-
- USCS resistenza a compressione uniassiale
- Em Modulo elastico
- cm coesione
- ϕ_m angolo di attrito
- Tm resistenza a trazione
- γ peso di volume della roccia intatta

9. MODELLO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO

Il Modello geologico di seguito proposto si riferisce ai risultati delle indagini geognostiche eseguite nel sito (sondaggio a carotaggio continuo + indagine MASW), che permettono di individuare, al di sotto di un primo strato pedogenetico, spinto alla profondità di - 1,00 m dal piano campagna, le piroclastiti in facies ignimbratica costituenti il basamento dell'area, caratterizzate nella parte più superficiale dalla presenza di una coltre di alterazione dei depositi di flusso piroclastico, ben cementata, da totalmente fratturati a molto fratturati fino alla profondità di -3,20 m dal p.c., al di sotto del quale la roccia si presenta più massiva e in facies lapidea.

Di seguito si presenta lo schema delle unità geologiche di riferimento, i cui parametri geotecnici sono stati definiti in funzione delle analisi geomeccaniche precedentemente esposte e da studi e lavori bibliografici esaminati, condotti su litologie simili, in prossimità del sito di indagine.

Pertanto, le fondazioni delle opere in progetto previste nella presente fase progettuale dovranno fare riferimento al modello geologico descritto con i seguenti parametri geotecnici di riferimento.

Sarà comunque necessario, per le successive fasi di progetto e di esecuzione lavori, verificare puntualmente, per ciascun sito di posa degli aerogeneratori, le caratteristiche litostratigrafiche e geotecniche dei terreni, attraverso una campagna di indagine geognostica e geotecnica di maggior dettaglio.

	- 1,00 m	Suolo limoso sabbioso, marrone, ossidato, asciutto, sfumante nella coltre intensamente alterata del substrato lapideo
	-3,20 m	<p>Coltre di alterazione del substrato lapideo, da totalmente fratturati a molto fratturati, cementata</p> <p>Peso di Volume = 19,00 kN/m³ Coesione = 90 KPa Angolo di attrito = 27,6°</p> <p>Modulo di deformazione = 764 MPa RQD = 5%</p>
	-20,00 m	<p>Piroclastite arenacea con livelli parzialmente argillificati, da poco fratturata a molto fratturata</p> <p>Peso di Volume = 19,14 kN/m³ Angolo di resistenza al taglio = 35,04° Coesione = 112 KPa GSI = 45 Modulo Elastico = 947,27 Mpa RQD = 50% (da -11 m =90%)</p>

10. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nella presente relazione sono riportate le caratteristiche geologiche, stratigrafiche, morfologiche e idrogeologiche di massima dell'area interessata dallo sviluppo del parco eolico, sulla base dei rilievi di superficie eseguiti nell'area, la fotointerpretazione, l'analisi cartografica dei dati di base unitamente ai sopralluoghi diretti in campo, alla campagna di indagini geognostiche descritte nei precedenti paragrafi e all'osservazione della roccia in affioramento.

Nel particolare, dal punto di vista morfologico lo studio ha evidenziato che le aree direttamente interessate dallo sviluppo degli aerogeneratori sono delle superfici pianeggianti e sub pianeggianti, con pendenze prossime allo 0 – 10%. Gli interventi di progetto non ricadono in aree classificate a pericolosità da frana o idraulica secondo il Piano assetto idrogeologico (PAI) regionale.

Dal punto di vista litologico, il settore è caratterizzato dalla estesa presenza di rocce vulcaniche afferenti al "Ciclo vulcanico calcoalcalino (Oligo – Miocene)" che si mostrano nel complesso in facies prevalentemente rocciosa sin dal piano campagna, intensamente fratturata, talvolta con un primo strato da poco a molto alterato superficiale, in cui i processi pedogenetici in atto hanno permesso la formazione di un suolo, rinvenibile fino alla profondità massima di – 1 m, con tessitura limoso sabbiosa, che sfuma nella coltre intensamente alterata del substrato lapideo. Localmente, l'intensa fratturazione è causa della degradazione della roccia per processi di alterazione chimica e fisica, con diminuzione delle proprietà geotecniche nei primi strati superficiali, come rilevato nel corso delle indagini eseguite, proprietà che tendono a migliorare con la profondità.

I parametri geotecnici dei materiali, utili per le verifiche geotecniche propedeutiche alla progettazione, sono riportati nel modello geologico di riferimento, così come richiesto dalla normativa vigente (NTC 2018). Sarà necessario, comunque, in caso di esito positivo di autorizzazione, effettuare ulteriori indagini puntuali per ciascun punto di posa delle pale eoliche, nelle successive fasi progettuali, al fine di conoscere nel dettaglio, per ciascun sito di posa delle pale eoliche, le condizioni stratigrafiche e geotecniche dei terreni di sedime attraverso una apposita campagna di indagini geognostiche.

Dallo studio è emerso quanto segue:

- nell'ambito dell'area esaminata non sono stati rilevati movimenti gravitativi profondi che possano coinvolgere estese porzioni di territorio; localmente sono stati rilevati, nei settori più acclivi, processi legati alla dinamica dei versanti, interessanti porzioni di roccia e blocchi vulcanici, fratturati e dislocati, in cui la gravità gioca un ruolo determinante per la loro movimentazione. Tali processi sono comunque distanti dalle aree di posa previste per gli aerogeneratori;
- l'area indagata non evidenzia segni di dissesto profondo tanto che nel suo insieme può essere considerata stabile;
- la tipologia di intervento in progetto, non comporta alterazioni nell'attuale assetto idrologico del territorio; tuttavia, dovrà essere curato il drenaggio delle acque superficiali, in particolare nelle piste e nelle strade di accesso, per scongiurare i fenomeni di erosione;

- il progetto non prevede modificazioni morfologiche significative rispetto all'assetto attuale, anche l'apertura della viabilità di servizio non comporta modifiche profonde allo stato dei luoghi in quanto segue, ridefinendola e adattandola, la viabilità esistente.



ALLEGATI



ALLEGATO 1

– Estratto della Carta geologica Foglio 180 "Sassari" –



Ciclo Vulcanico Oligo - Miocenico

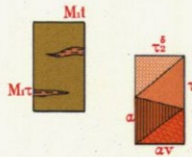
Lengheno. Successione alternata di tufi pomicei, a luoghi ricchi di resti vegetali carbonizzati, in banchi regolari, talvolta rimaneggiati, molasse, marne argillose, sabbie più o meno cementate, conglomerati, comprendenti livelli riccamente fossiliferi (foraminiferi, pteropodi, molluschi, echinidi ecc.) della zona Castelsardo - Codurina (Mt.). Sottili intercalazioni laviche (trachiandesitiche) di eruzione sottomarina (M_τ).

Trachidaciti a struttura porfirica, di colore rosso fegato, rossastro e roseo, di sovente alterate in masse più o meno argillificate bianche, rossastre e verdastre (τ₂).

Trachiandesiti vitrofiriche a strutture solit. porfirica, talora a base nettamente vetrosa (ossidanoide), nere, picee, più di frequente rossastre, spesso ricche di inclusi allotigeni specialmente di andesite; episodi piroclastici intercalati. Trachidaciti. Masse più o meno intensamente argillificate, derivanti dalle alterazioni delle vulcaniti (τ₂).

Andesiti iperstenico-augitiche e forme trachiandesitiche olocristalline ad asse assiate, a struttura porfirica, grigie, verdastre, brunastre, nerastre (α).

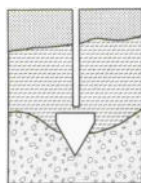
Conglomerati piroclastici con elementi andesitici di dimensioni varie (anche notevoli) a spigolo vivo, impastati da masse tufacee chiare (residi di antichi apparati vulcanici?). (αv).





ALLEGATO 2

– Relazione sulle indagini geognostiche –



DR. ANTONELLO ANGIUS

Web site: www.angiusgeo.com

**INDAGINI GEOGNOSTICHE, PROVE GEOTECNICHE, MONITORAGGIO AMBIENTALE,
PROSPEZIONI MINERARIE, CONSOLIDAMENTI, POZZI PER ACQUA, PROSPEZIONI GEOFISICHE**

Tel/Fax: +39 070 40 32 74

Pec: angiusgeo@pec.it

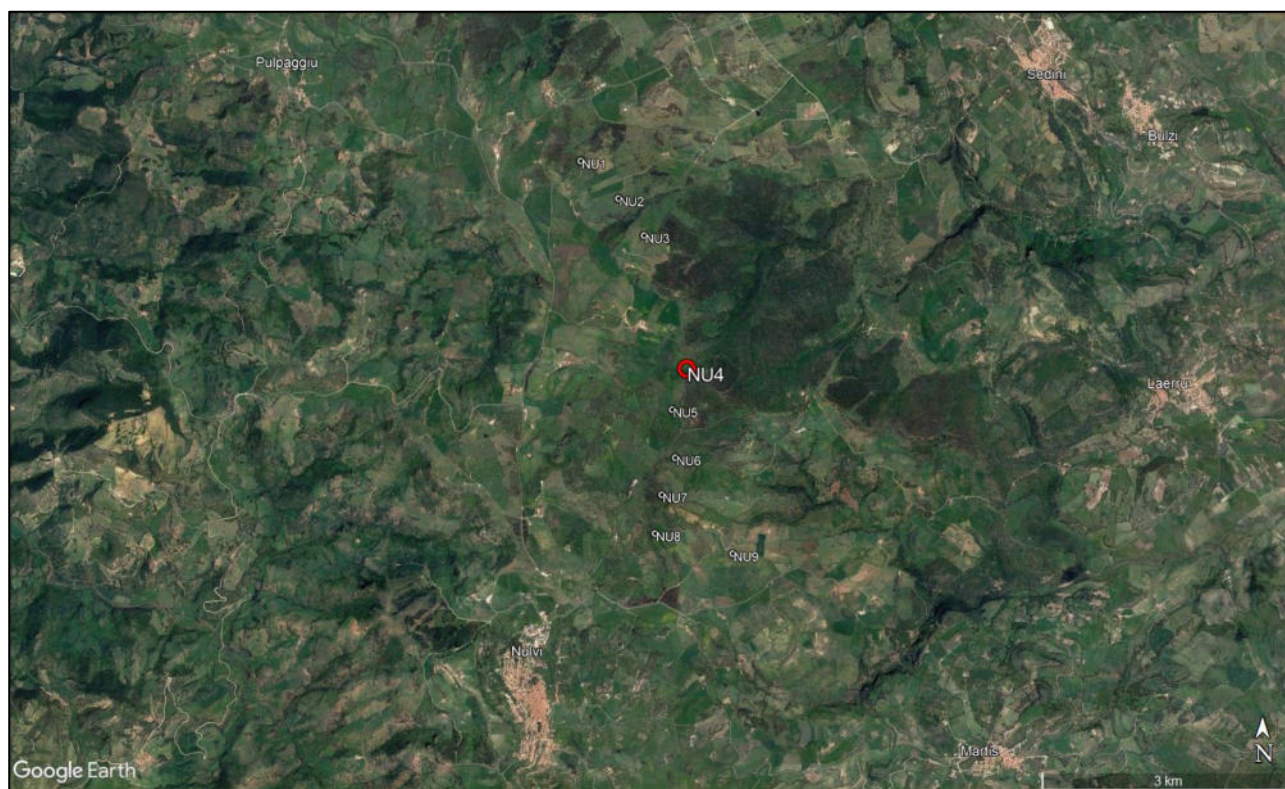
e-mail: angiusgeo@tiscali.it

Comune di Nulvi

Provincia di Sassari

Progetto:

Indagini geognostiche per la realizzazione di un impianto eolico in agro di Nulvi



OTTOBRE 2022

INDAGINE GEOGNOSTICA

Committente: Dr. Geol. Francesca Demurtas

SEDE LEGALE e UFFICI: Via Italia, 143 – 09134 Cagliari (ITALY)
Codice Fiscale: NGSNNL61H07B354Y
Partita IVA: 01985230927
CCIAA Cagliari: 154185 del 07/01/1991
Albo Nazionale Gestori Ambientali: CA08746

RINA SOA
Società attestata da
OS20b CLASS. I

Sommario

Premessa	1
1.0 Inquadramento geografico e topografico del sito	2
2.0 Caratteristiche della campagna geognostica	4
3.0 Sondaggi geognostici	4
4.0 Prove di laboratorio geotecnico	5
5.0 Indagine geofisica	6

Allegati

ALLEGATO 1 – Planimetria ubicazione indagini

ALLEGATO 2 – Report fotografico

ALLEGATO 3 – Stratigrafie sondaggi

ALLEGATO 4 – Certificati prove di laboratorio geotecnico

ALLEGATO 5 – Indagine geofisica

PREMESSA

Nel mese di Ottobre 2022 la Dott.ssa Geol. Francesca Demurtas ha affidato all’*Impresa Dott. Antonello Angius*, specializzata in indagini geognostiche, l’esecuzione di un sondaggio a carotaggio e una prospezione geofisica con il metodo sismico MASW nell’ambito del progetto per la realizzazione di un impianto eolico in agro di Nulvi (SS).

Le prove in sito sono state eseguite nel mese di Ottobre 2022.

L’area di indagine ricade nel Comune di Nulvi (SS).

L’immagine sottostante (**Figura 1**) riporta una panoramica del luogo d’intervento su foto satellitare. Le indagini sono state realizzate nell’area che ospiterà l’aerogeneratore NU4.

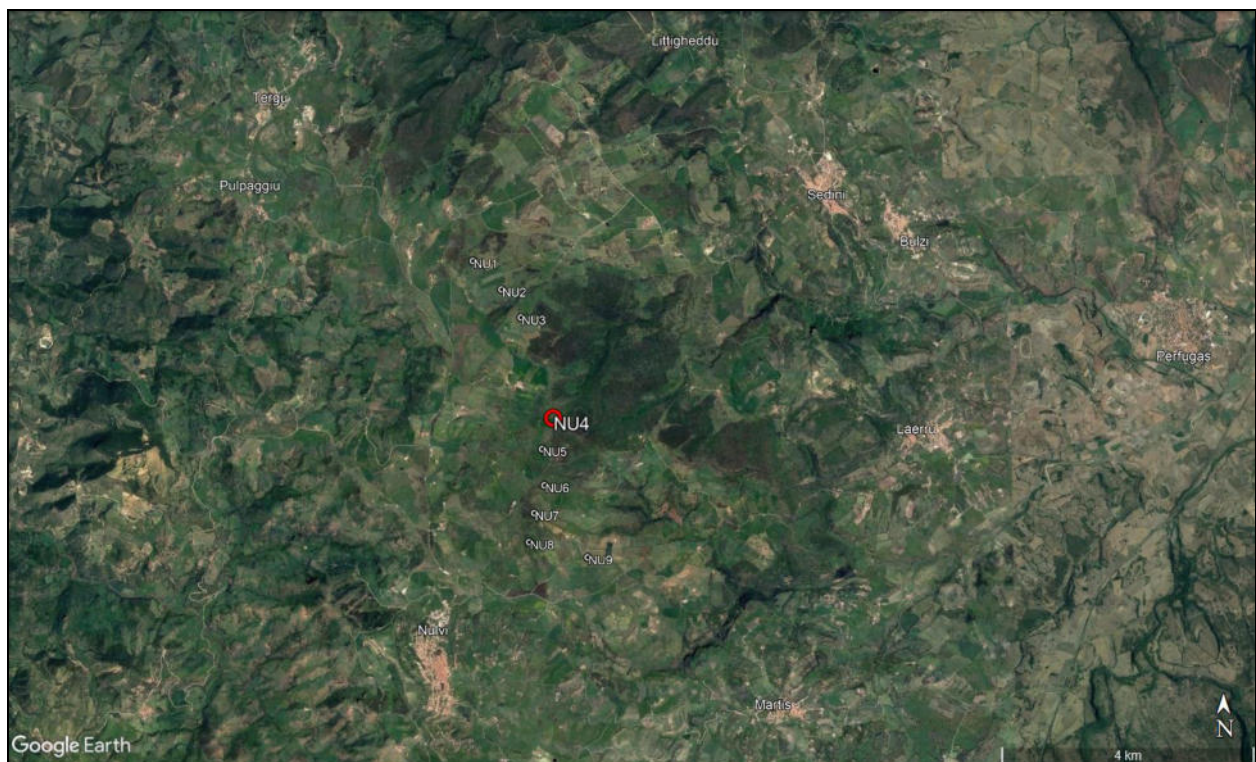


Figura 1 - Panoramica dei luoghi d’intervento (Google Earth)

La relazione illustra le modalità esecutive dei lavori e ne riassume le risultanze geognostiche.

Le operazioni d’indagine rispondono alla normativa tecnica ufficialmente riconosciuta, e in particolare fanno riferimento alle Raccomandazioni A.G.I. (*Associazione Geotecnica Italiana*) e ISRM (*International Society for Rock Mechanics*).

Tutti i lavori sono stati eseguiti dal personale specializzato dell’Impresa ed assistiti in cantiere da Geologi esperti in geognostica e indagini in sito.

1.0 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E TOPOGRAFICO DEL SITO

L’area oggetto d’indagine ricade nel Comune di Nulvi (SS) (**Figura 2**), e i riferimenti cartografici sono rappresentati da:

- ➔ Foglio 460 sez. IV “Òsilo” dell’IGM (scala 1: 25.000) (**Figura 3**);
- ➔ Sez. 460-010 “Nulvi” della Nuova Carta Tecnica Regionale (scala 1:10.000) (**Figura 4**).

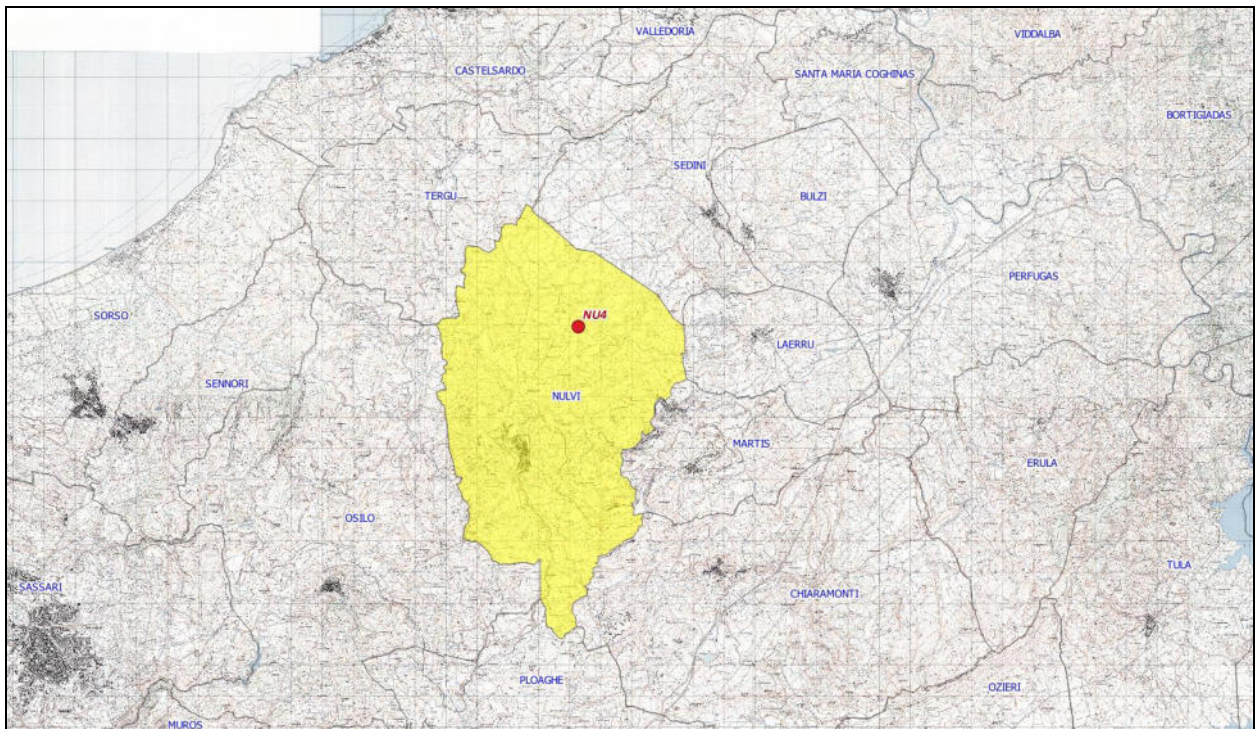


Figura 2 - Inquadramento geografico del sito

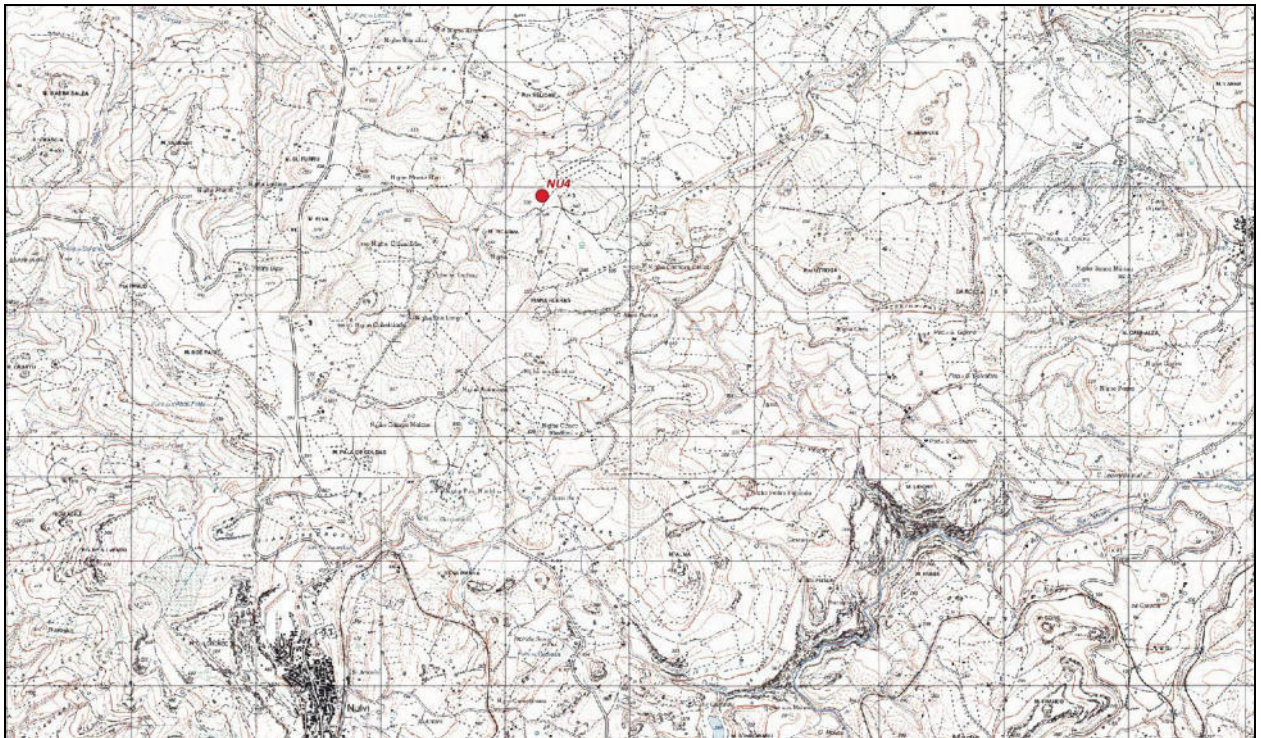


Figura 3 - Stralcio Cartografia I.G.M. – Foglio 460 Sez. IV

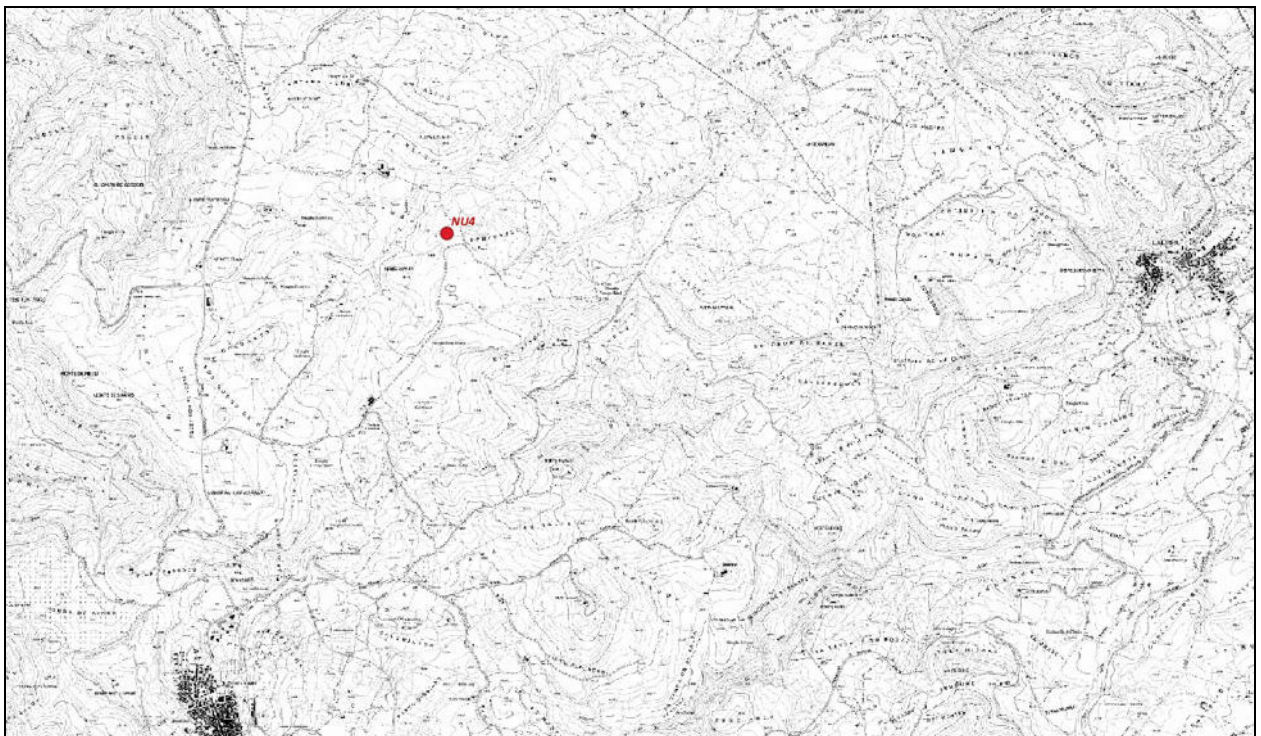


Figura 4 - Stralcio Carta C.T.R. – Sez. 460-010

2.0 CARATTERISTICHE DELLA CAMPAGNA GEOGNOSTICA

L'indagine è stata articolata come segue:

- esecuzione di n. 1 sondaggio a rotazione a carotaggio continuo (\varnothing 101 mm), spinto a profondità di 20.00 m dal p.c.;
- prelievo di n. 2 campioni di rocce da sottoporre a prove di laboratorio geotecnico;
- prospezione geofisica comprendente n. 1 stendimento con metodologia sismica MASW.

3.0 SONDAGGI GEOGNOSTICI

È stato eseguito n.1 sondaggio a rotazione con carotaggio continuo, di diametro 101 mm, spinto alla profondità di 20.00 metri dal p.c.. Per la realizzazione del carotaggio continuo sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

- Sonda idraulica cingolata Deltabase, modello 520;
- Carotiere semplice con corone *widia* \varnothing 101 mm;
- Carotiere doppio T6 con corona diamantata;
- Cassette catalogatrici monostampo in PVC.

La tabella sottostante (**Tab.1**) riporta l'identificativo del sondaggio e la profondità raggiunta.

Area	ID Sondaggio	Profondità (m)
NU4	S1	20.00

Tab. 1 - Sondaggi e profondità raggiunte

Per l'avanzamento della perforazione, nei livelli non lapidei, sono stati utilizzati carotieri semplici, costituiti da un tubo metallico cilindrico avente diametro di 101 mm e lunghezza pari a 1.50 m, munito all'estremità inferiore di una corona in carburo di tungsteno (*widia*) e provvisto, nella parte sommitale, di un dispositivo (valvola di ritenzione) che impedisce la perdita dei

campioni di terreno prelevati. Nei livelli lapidei è stato utilizzato un carotiere doppio T6 con corona diamantata.

Le carote estratte durante le perforazioni sono state riposte in cassette monostampo in PVC, dotate di coperchio, per lunghezze di 5 ml cadauna, opportunamente siglate e fotografate.

L’ubicazione dei sondaggi geognostici eseguiti è riportata nell’**Allegato 1 - Planimetria ubicazione indagini**.

L’**Allegato 2 – Report fotografico** riporta le foto delle cassette catalogatrici e dei posizionamenti, mentre le **stratigrafie dei sondaggi** sono riportate nell’**Allegato 3**.

4.0 PROVE DI LABORATORIO GEOTECNICO

Sono stati prelevati n. 2 campioni di rocce, e sottoposti a prove geotecniche presso il laboratorio Geosystem (Quartucciu), autorizzato ai sensi della circolare ministeriale n.7618/STC del 08.09.2010.

La tabella sottostante (**Tab.2**) riporta l’elenco dei campioni prelevati, la profondità di prelievo e le relative prove.

ID Campione	Quota (m)	Prova
S1 – C1	3.50 – 3.70	Prova di compressione monoassiale, Massa volumica
S1 – C3	7.40 – 7.60	Prova di compressione monoassiale, Massa volumica

Tab. 2 - Elenco campioni e tipo di prova geotecnica eseguita

I certificati delle prove di laboratorio sono riportati nell’**Allegato 4 – Certificati prove di laboratorio geotecnico**.

5.0 INDAGINE GEOFISICA

È stato richiesto di impiegare la tecnica d'indagine MASW con la realizzazione di n. 1 stendimento le cui caratteristiche principali sono riassunte nella tabella seguente (**Tab.3**).


Area	Sigla stendimento	Intervallo geofoni (m)	Lunghezza (m)
NU4	M1	4.00	44.00

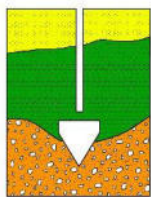
Tab. 3 - Caratteristiche principali degli stendimenti sismici

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 Vs, è in grado di ricostruire una sismostratigrafia atta a permettere la definizione della categoria di suolo ai sensi del Decreto 17/01/2018.

Le risultanze dell'indagine sono descritte nell'**Allegato 5 – Indagine geofisica**.

Cagliari, 24.10.2022


L'Impresa
Ditta Dr. Antonello Angius
Via Italia, 143 - 09134 Cagliari
C.F. NGSNNL61H07B354Y
P. Iva 01985230927



DR. ANTONELLO ANGIUS

Web site: www.angiusgeo.com

**INDAGINI GEOGNOSTICHE, PROVE GEOTECNICHE, MONITORAGGIO AMBIENTALE,
PROSPEZIONI MINERARIE, CONSOLIDAMENTI, POZZI PER ACQUA, PROSPEZIONI
GEOFISICHE**

Tel/Fax: +39 070 40 32 74

Pec: angiusgeo@pec.it

e-mail: angiusgeo@tiscali.it

Progetto:

Indagini geognostiche per la realizzazione di un impianto eolico in agro di Nulvi

Committente:

Dr. Geol. Francesca Demurtas

Planimetria ubicazione indagini

ALLEGATO 1

TAVOLA 1

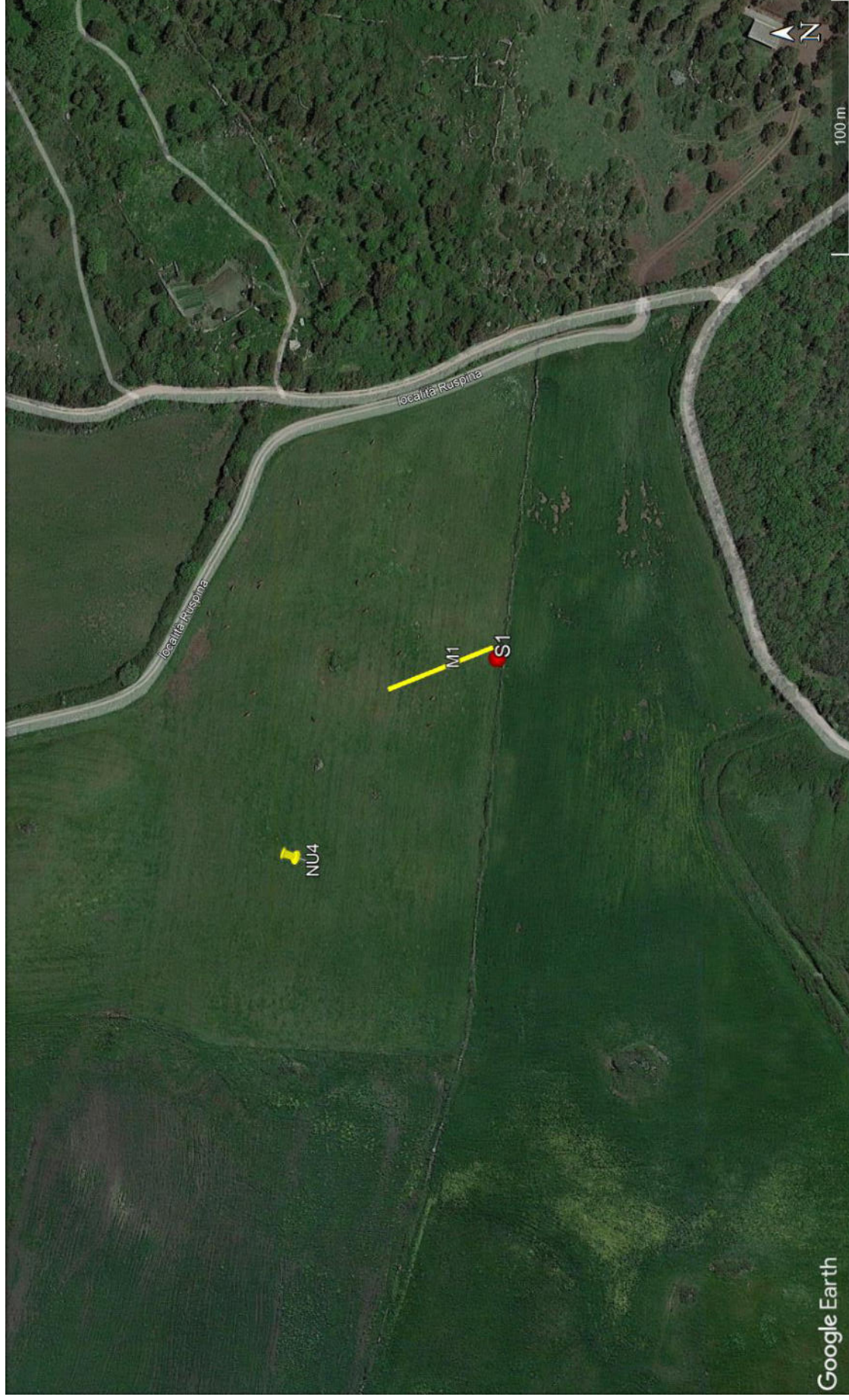
PLANIMETRIA UBICAZIONE INDAGINI

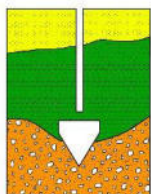
Comune di Nulvi

Progetto: "Indagini geognostiche per la realizzazione di un impianto eolico in agro di Nulvi"

LEGENDA

- Sondaggio geognostico
- Stendimento sismico MASW
- Sito di indagine





DR. ANTONELLO ANGIUS

Web site: www.angiusgeo.com

**INDAGINI GEOGNOSTICHE, PROVE GEOTECNICHE, MONITORAGGIO AMBIENTALE,
PROSPEZIONI MINERARIE, CONSOLIDAMENTI, POZZI PER ACQUA, PROSPEZIONI
GEOFISICHE**

Tel/Fax: +39 070 40 32 74

Pec: angiusgeo@pec.it

e-mail: angiusgeo@tiscali.it

Progetto:

Indagini geognostiche per la realizzazione di un impianto eolico in agro di Nulvi

Committente:

Dr. Geol. Francesca Demurtas

Report fotografico

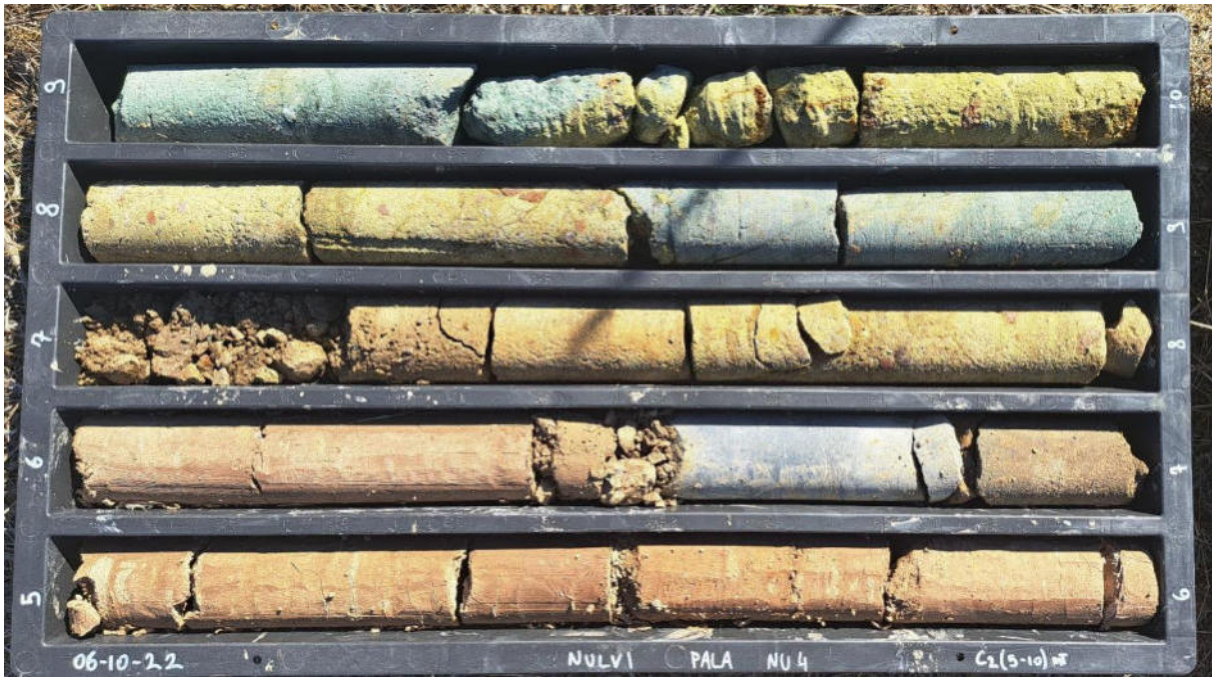
ALLEGATO 2



Posizionamento sondaggio S1



Sondaggio S1, 0.00 – 5.00 m



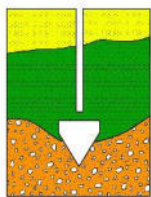
Sondaggio S1, 5.00 – 10.00 m



Sondaggio S1, 10.00 – 15.00 m



Sondaggio S1, 15.00 – 20.00 m



DR. ANTONELLO ANGIUS

Web site: www.angiusgeo.com

**INDAGINI GEOGNOSTICHE, PROVE GEOTECNICHE, MONITORAGGIO AMBIENTALE,
PROSPEZIONI MINERARIE, CONSOLIDAMENTI, POZZI PER ACQUA, PROSPEZIONI
GEOFISICHE**

Tel/Fax: +39 070 40 32 74

Pec: angiusgeo@pec.it

e-mail: angiusgeo@tiscali.it

Progetto:

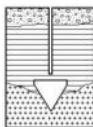
Indagini geognostiche per la realizzazione di un impianto eolico in agro di Nulvi

Committente:

Dr. Geol. Francesca Demurtas

Stratigrafie dei sondaggi

ALLEGATO 3



Ditta DR. ANTONELLO ANGIUS

Via Italia, 143 Cagliari 09134

angiusgeo@tiscali.it www.angiusgeo.com

SONDAGGI GEOGNOSTICI - MONITORAGGIO AMBIENTALE

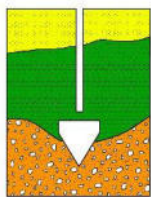
Committente Dott.ssa Francesca Demurtas	Profondità raggiunta -20.00	Quota Ass. P.C.	Certificato n° 1	Pagina 1
Operatore Paolo Salis	Indagine Geognostica	Cantiere Nulvi Eolico - Aerogeneratore NU4		Inizio/Fine Esecuzione 06/07.10.2022
Responsabile Dott. Geol. Antonello Angius	Sondaggio S1	Tipo Carotaggio Rot. car. cont. 101mm	Tipo Sonda Deltabase 520	Coordinate X Y

Scala (mt)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio R.Q.D.	S.P.T.	Pocket Test Kg/cmq	Vane Test Kg/cmq	Campioni	Metodo Perforazione	Falda
1		Suolo limoso sabbioso, marrone, ossidato, asciutto, sfumante nella coltre intensamente alterata del substrato lapideo .	0.90							
2		Coltre alterata e decompressa del substrato lapideo (conglomerato vulcanico), totalmente fratturata, da grigio biancastra a giallastra.	3.20							
3		Trachite da semilapidea a lapidea con livelli pluri decimetrici argillificati, rossastra, poco fratturata.	6.50							3.50 R 3.70
4		Piroclastite arecea con livelli parzialmente argillificati e conglomerato vulcanico con blocchi decimetrici di basalto, da color ocra a rosata.	11.20							7.40 R 7.60
5		Piroclastite arenacea e conglomerato vulcanico, grigio integro con un livello parzialmente alterato totalmente fratturato tra 12.0 e 13.30 metri; tra 15.30 e 16.75 metri livello rosato.	20.00							
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										

Campioni: S-Pareti Sottile, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, RS-Rimaneggiato da SPT
 Perforazione:CS-Carotere Semplice, CD-Carotere Doppio, EC-Elica Continua
 Prove SPT:PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa
 Carotaggio:Rot. car. cont. 101mm

Sonda Deltabase 520

Responsabile



DR. ANTONELLO ANGIUS

Web site: www.angiusgeo.com

**INDAGINI GEOGNOSTICHE, PROVE GEOTECNICHE, MONITORAGGIO AMBIENTALE,
PROSPEZIONI MINERARIE, CONSOLIDAMENTI, POZZI PER ACQUA, PROSPEZIONI
GEOFISICHE**

Tel/Fax: +39 070 40 32 74

Pec: angiusgeo@pec.it

e-mail: angiusgeo@tiscali.it

Progetto:

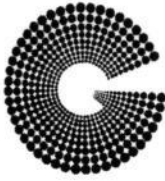
Indagini geognostiche per la realizzazione di un impianto eolico in agro di Nulvi

Committente:

Dr. Geol. Francesca Demurtas

**Certificati prove di laboratorio
geotecnico**

ALLEGATO 4



GEOSYSTEM

Del Dott. Geol. G.B. Demontis

ZONA INDUSTRIALE LOC. "PILL'E MATTA"
09044 QUARTUCCIU (CA)

TEL/FAX 070852509-070852424 - www.geosystem.ca.it
email: geosystemca@yahoo.it - pec: geosystem@pec.it

LABORATORIO AUTORIZZATO ALL'ESECUZIONE DI:
PROVE SU MATERIALI DA COSTRUZIONE SETTORE A
DI CUI ALL'ART. 59 DEL D.P.R. N. 380/2001
CIRCOLARE N.7617/STC DEL 08/08/2010
AUT. MINISTERO N.0000527 DEL 30/09/2019
PROVE SUI TERRENI SETTORE A
DI CUI ALL'ART. 59 DEL D.P.R. N. 380/2001
CIRCOLARE N.7618/STC DEL 08/09/2010
AUT. MINISTERO N.0000519 DEL 25/09/2019
CONTROLLI NON DISTRUTTIVI SU CALCESTRUZZO
CERTIFICAZIONE UNI EN ISO 9712
REGOLAMENTO IT-IND-REG-02_NDT.CIV
LABORATORIO CERTIFICATO ISO 9001
CERT. N.IT 11/0996 ISO 9001/UNI EN ISO 9001

V.D.A. N° 6238
COMMITTENTE Ditta Dott. Antonello Angius
CANTIERE Nulvi

DEL 19/10/2022

CAMPIONE Rocce arenacee

UBICAZIONE \

DATA PRELIEVO \

DATA PROVA 21/10/2022

CERTIFICATO N.

045299

DEL 21 OTT. 2022

PROVA DI COMPRESSIONE MONOASSIALE SU CAROTE DI ROCCIA (ASTM D7012-14) - Metodo C

VDA n.	Identificativo	Profondità	Dimensioni (mm)		Massa volumica	Res.Unit.	NOTE
		m	Diametro	Altezza	Kg/m ³	N/mm ²	
6238-1	S1	3,50-3,90m	84,0	155,0	1952,4	1,97	Piani di rottura paralleli al carico
6238-2	S1	7,40-7,60m	84,0	167,0	1973,0	1,42	Piani di rottura paralleli al carico
\	\	\	\	\	\	\	\
\	\	\	\	\	\	\	\
\	\	\	\	\	\	\	\
\	\	\	\	\	\	\	\
\	\	\	\	\	\	\	\
\	\	\	\	\	\	\	\
\	\	\	\	\	\	\	\
\	\	\	\	\	\	\	\
\	\	\	\	\	\	\	\
\	\	\	\	\	\	\	\
\	\	\	\	\	\	\	\
\	\	\	\	\	\	\	\
\	\	\	\	\	\	\	\
\	\	\	\	\	\	\	\
\	\	\	\	\	\	\	\
\	\	\	\	\	\	\	\
\	\	\	\	\	\	\	\
\	\	\	\	\	\	\	\

Attrezzatura di Prova: Pressa 3000 KN Controls, Unità di Comando MCC88 Controls, bilancia, calibro.
Velocità di prova 0,5-1,0 N/mm²

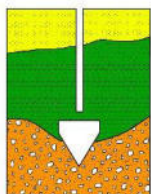
Note : Nel caso in cui il rapporto tra la lunghezza e il diametro del provino testato è minore di 2 si applicherà, come da normativa, una correzione al valore di resistenza alla compressione ottenuto dalla prova

IL TECNICO

IL DIRETTORE

Dott. Geol. Guido Demontis

C.G.I.A.A. CAGLIARI 52034 - CODICE FISCALE DMN GNN 64D15 B354K - PARTITA IVA 01588890929



DR. ANTONELLO ANGIUS

Web site: www.angiusgeo.com

**INDAGINI GEOGNOSTICHE, PROVE GEOTECNICHE, MONITORAGGIO AMBIENTALE,
PROSPEZIONI MINERARIE, CONSOLIDAMENTI, POZZI PER ACQUA, PROSPEZIONI
GEOFISICHE**

Tel/Fax: +39 070 40 32 74

Pec: angiusgeo@pec.it

e-mail: angiusgeo@tiscali.it

Progetto:

Indagini geognostiche per la realizzazione di un impianto eolico in agro di Nulvi

Committente:

Dr. Geol. Francesca Demurtas

Indagine geofisica

ALLEGATO 5

Sommario

1	PREMESSA.....	2
2	PROGRAMMA DELLE INDAGINI SVOLTE	2
3	INDAGINI SISMICHE MASW.....	3
3.1	Tecnica e parametri utilizzati	3
3.2	Strumentazione utilizzata	5
3.3	Elaborazione dei dati.....	5
3.4	CATEGORIE DI SOTTOSUOLO - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018)	6
3.5	VALORI DI VELOCITÀ DELLE ONDE P ED S PER I PRINCIPALI LITOTIPI	8
3.6	DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI DEFORMAZIONE E DI RESISTENZA AL TAGLIO DALLE INDAGINI SISMICHE.....	9
4	INTERPRETAZIONE DEI DATI: MASW.....	12
4.1	MASW M1	12
5	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	14

Allegati:

- Tavola 1. Planimetria ubicazione indagini;
- Allegato A. MASW: Sismogramma acquisito – spettro velocità di fase/frequenza – Profilo Vs;
- Allegato B. Documentazione fotografica.

1 PREMESSA

La presente Relazione descrive le attività di indagine geofisica realizzate nell’ambito delle *indagini geognostiche per la realizzazione di un parco eolico in agro di Nulvi*.

La prospezione geofisica è stata realizzata impiegando la metodologia sismica con la tecnica MASW.

L’indagine sismica con metodologia MASW è una tecnica di indagine non invasiva, che attraverso la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali Vs, si pone come obiettivo la ricostruzione dell’assetto sismo-stratigrafico dei terreni sede di posa delle opere di fondazione nonché la classificazione del suolo di fondazione per le categorie semplificate indicate nel Decreto 17 gennaio 2018 - NTC 2018 aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni".

A supporto della progettazione geotecnica e strutturale, sono stati determinati sulla base di correlazioni bibliografiche i parametri elasto-dinamici derivati dalle indagini sismiche e il modulo statico di deformazione.

Come richiesto dalla Committenza è stato realizzato uno stendimento MASW, eseguito in data 07 Ottobre 2022.

Fanno parte integrante della presente relazione i seguenti allegati:

- Tavola 1. Planimetria ubicazione indagini;
- Allegato A. MASW: Sismogramma acquisito – spettro velocità di fase/frequenza – Profilo Vs;
- Allegato B. Documentazione fotografica.

2 PROGRAMMA DELLE INDAGINI SVOLTE

Le prospezioni geofisiche sono state articolate secondo il seguente programma:

1. Verifica preliminare dei luoghi oggetto d'indagine;
2. Esecuzione, di n°1 stendimento di sismica con tecnica MASW (M1);
3. Elaborazione dei dati tramite analisi delle prospezioni acquisite in campagna, applicazione filtri, e restituzione grafica delle sezioni sismiche con l’impiego di software specialistici.

L'ubicazione degli stendimenti è indicata nella **Tavola 1**.

Nella tabella seguente si riporta il quadro riassuntivo delle indagini svolte, con le sigle identificative e la lunghezza complessiva dello stendimento.

Tabella 1. Quadro riassuntivo delle indagini MASW

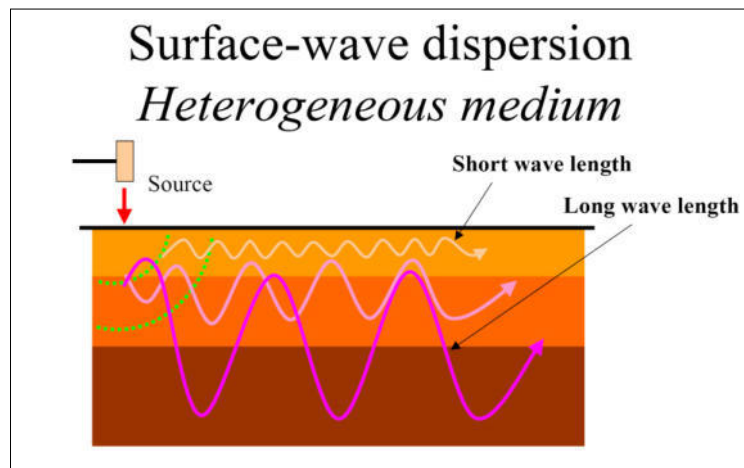
Stendimento	Lunghezza [m]
M1	44.00

3 INDAGINI SISMICHE MASW

3.1 Tecnica e parametri utilizzati

“Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva, 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 (geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. 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.” (da *Caratterizzazione sismica dei suoli con il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves – V. Roma 2006)*). L’indagine svolta ha visto l’applicazione di tecnica M.A.S.W. di tipo attivo, ossia misura del comportamento dei terreni a seguito di un’energizzazione.



da SAGEEP2003

L’indagine si sviluppa mediante la materializzazione sul terreno di una linea retta mediante la posa di una fettuccia metrica. A seguire vengono posizionati i geofoni intervallati ad una distanza pari a 2,0 m in funzione anche della disponibilità di spazio. Esternamente alla stesa geofonica, da ora base sismica, a distanza di interesse che può essere pari ad un multiplo della distanza intergeofonica ma anche variabile (in funzione delle disponibilità di cantiere), sia in andata (ovvero in prossimità del geofono 1) che al ritorno (ovvero all’ultimo geofono posizionato sulla base sismica), vengono svolte delle energizzazioni mediante massa battente pari a Kg 10,0. Nel caso in esame, sono state svolte le energizzazioni in “andata” e in “ritorno” con distanza dal geofono 1 e dal geofono 24 crescente e pari a multipli della distanza intergeofonica (v. schema).

Il metodo risulta efficace se la base sismica è ubicata su piano a pendenza costante e per una stratificazione piano parallela al piano topografico. Al fine di svolgere al meglio la campagna geofisica M.A.S.W., è utile che lo sviluppo lineare della base sismica sia limitata in lunghezza secondo i siti.

La maggior profondità di caratterizzazione raggiunta è legata alla minor frequenza registrata. Come già indicato nella figura, una frequenza alta caratterizza gli strati superficiali. La registrazione delle frequenze minori è destinata ai geofoni più lontani dalla sorgente.

Per il presente lavoro sono state considerate le componenti R dell'onda di Rayleigh (R: componente radiale) e la componente T che rappresenta l'onda di Love (componente trasversale).

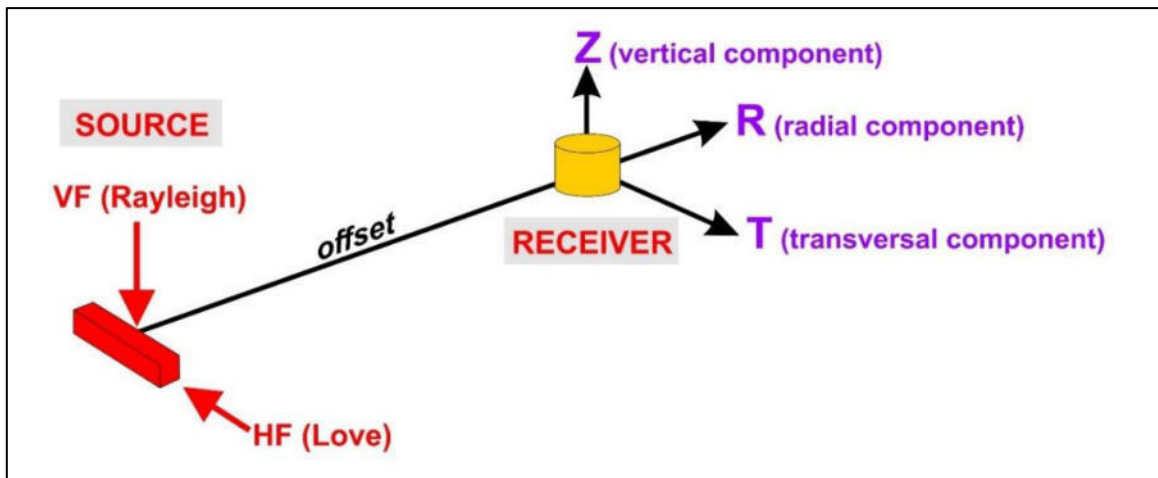


FIGURA 1. Componenti sismiche delle onde di superficie

Gli spettri di velocità sono stati gestiti tramite approccio FVS (Full Velocity Spectrum – Dal Moro 2014; 2019) quindi senza alcun picking/interpretazione in termini di curve modali.

L'acquisizione dei dati è avvenuta tramite sismografo a 24 canali collegato a geofoni orizzontali a frequenza propria di 4,5 Hz in configurazione RVF per acquisire la componente orizzontale dell'onda di Rayleigh e in configurazione THF per le onde di Love (vedi FIGURA 1). Il numero di geofoni utile all'esecuzione ottimale di un'indagine M.A.S.W. è risultato, per il cantiere svolto, di 12 geofoni dei quali sono state utilizzate tutte le tracce. Il tempo dell'acquisizione è stato definito tra 1.00 e 2.00 secondi.

Schema 1. Schema geometrico di acquisizione dei dati per lo stendimento M1 di lunghezza L=44.00 m



3.2 Strumentazione utilizzata

Per l'esecuzione del cantiere d'interesse, è stata impiegata una strumentazione di acquisizione modello GEA24, prodotto dalla PASI Geophysics, con frequenza di campionamento 1500 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della PASI Geophysical con frequenza propria di 4,5 Hz. Il numero di canali è risultato pari a n° 12 canali.

Per l'energizzazione ci siamo avvalsi di una mazza battente da 10 kg impattante verticalmente su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg.

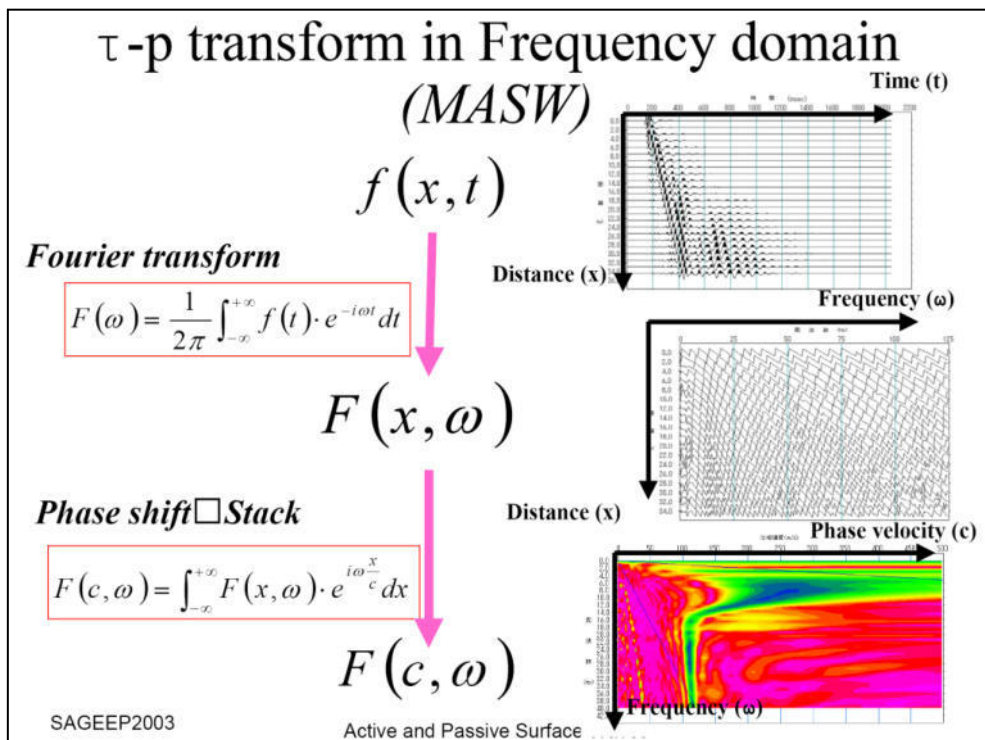
3.3 Elaborazione dei dati

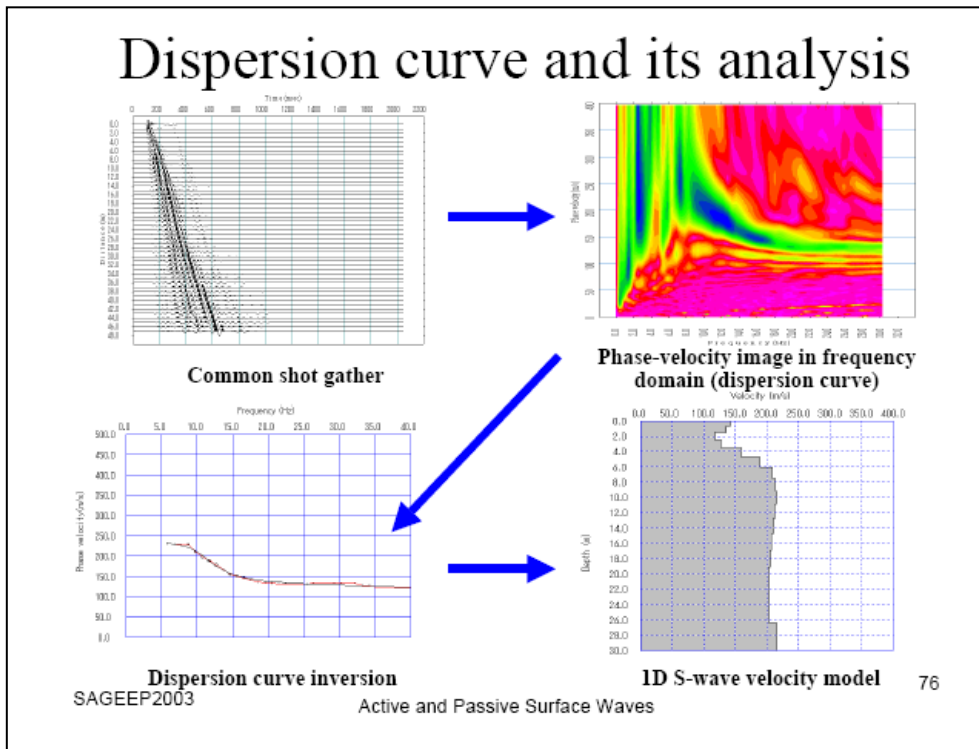
Il metodo interpretativo della M.A.S.W. si compone dei seguenti passaggi di analisi dei segnali acquisiti:

- individuazione della variazione del segnale acquisito nel tempo
- analisi di Fourier con definizione dei contenuti spettrali acquisiti nei segnali
- stacking dello spostamento di fase con definizione delle velocità di rotazione retrograda compatibile con il campo di frequenza definita.

A posteriori dell'analisi matematica del segnale acquisito, definito un modello stratigrafico compatibile con la geologia locale, si provvede all'inversione della curva di dispersione ottenendo la sismo-stratigrafia.

A seguire è indicato il procedimento di elaborazione che ha prodotto il profilo di velocità grazie all'impiego del software ZondST2D.





3.4 CATEGORIE DI SOTTOSUOLO - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018)

Le “Norme Tecniche per le Costruzioni” – Decreto del 19/01/2018 definiscono le regole per progettare l’opera sia in zona sismica che in zona non sismica.

Per la valutazione delle azioni sismiche di progetto deve essere valutata l’influenza delle condizioni litologiche e morfologiche locali sulle caratteristiche del moto nel suolo superficiale.

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 del citato Decreto. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II del suddetto decreto, 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, V_s . I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità V_s per l’approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2 del Decreto.

I valori di V_s sono ottenuti mediante specifiche prove, tra le quali le MASW costituiscono la metodologia maggiormente adoperata.

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;

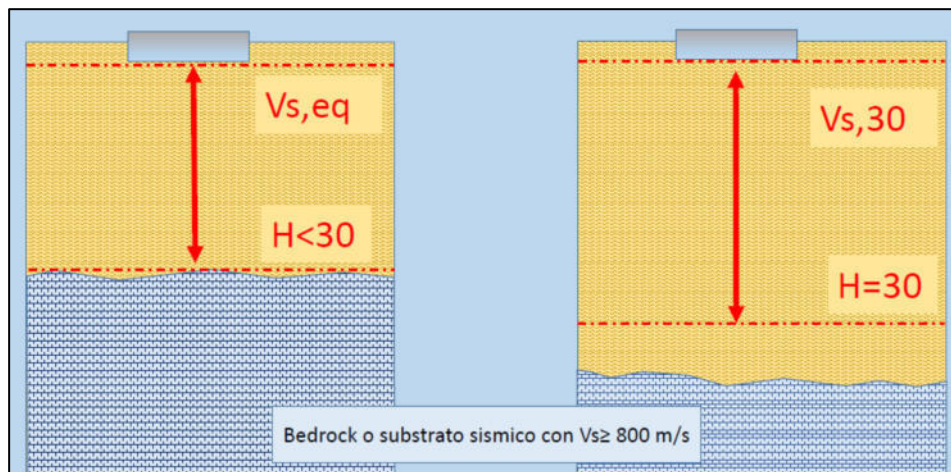
N numero di strati;

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

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato H 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 (v. schema seguente).

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.

Schema di Calcolo delle $V_{S,eq}$ e delle $V_{S,30}$



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

Per queste cinque categorie di sottosuolo, le azioni sismiche sono definibili come descritto al § 3.2.3 delle NTC 2018. Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche.

Tabella 3.2.II. Categorie di sottosuolo (Fonte NTC 2018)

Categoria	Descrizione
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>Depositi 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>Depositi 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.

3.5 VALORI DI VELOCITÀ DELLE ONDE P ED S PER I PRINCIPALI LITOTIPI

Nella tabella alla pagina seguente si riportano i valori di velocità delle onde P ed S dei principali litotipi riferibili anche al contesto geologico in esame (*Fonte: Hearey e Brooks 1991, Bala et al 2005, Corrao e Coco 2006, bibliografia specialistica reperibile in rete*).

In particolare, si ricorda che le velocità delle onde P misurate per terreni perfettamente saturi ($S_r = 100\%$) dipendono talora in maniera decisiva dalle vibrazioni trasmesse dal fluido interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale e perciò tale valore può non essere rappresentativo delle proprietà meccaniche del materiale in questione. Invece le velocità delle onde S sono caratteristiche delle vibrazioni trasmesse prevalentemente dal solo scheletro solido e perciò rappresentative delle proprietà meccaniche del terreno. Ne consegue che per alcuni terreni al di sotto della falda le uniche onde in grado di fornire informazioni precise sulla rigidità del terreno sono quelle di taglio (S).

Valori di velocità delle onde P ed S dei principali litotipi

Litotipi	Vp [m/s] min-max	Vs [m/s] min-max
TERRENI E ACQUA		
Alluvioni	400 - 2000	200 - 800
Sabbia asciutta	200 - 1000	80 - 400
Sabbia satura (in funzione anche del grado di saturazione)	600 - 2300	250 - 450
Sabbia siltosa	600 - 1900	200 - 600
Sabbia e ghiaia	300 - 1800	300 - 600
Limo	650 - 1250	240 - 480
Argilla	1000 - 2500	300 - 600
Argilla sabbiosa	600 - 2500	200 - 450
Acqua	1450 - 1500	0
ROCCE SEDIMENTARIE		
Argillite	2100 - 4400	550 - 2100
Arenaria	1500 - 6000	950 - 3100
Arenaria fratturate	800 - 2100	360 - 950
Calcere	2000 - 7000	1000 - 3300
Calcere fratturato	750 - 1500	330 - 1000
Calcarenite	1400 - 4400	800 - 2500
Calcarenite fratturata	600 - 1300	330 - 800
Marna	1500 - 4500	600 - 1.500
ROCCE IGNEE		
Basalto	1800 - 5000	1000 - 3000
Basalto fratturato	950 - 1350	480 - 700
Granitoidi	1600 - 5000	900 - 3000
Granitoidi fratturati	1000 - 1750	500 - 900
Piroclastite coerente	750 - 2500	350 - 1100
Piroclastite incoerente	350 - 1000	160 - 450

3.6 DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI DEFORMAZIONE E DI RESISTENZA AL TAGLIO DALLE INDAGINI SISMICHE

Di seguito si indicano le correlazioni bibliografiche che possono essere utilizzate per il calcolo dei parametri di deformazione dinamici calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input Vp, Vs e densità per ciascun sismostrato definito dalle indagini geofisiche.

$$\text{Coefficiente di Poisson } \nu = \frac{V_p^2 - 2 V_s^2}{2 (V_p^2 - V_s^2)}$$

$$\text{Modulo di Young dinamico } E_d = \gamma V_s^2 [(3V_p^2 - 4 V_s^2)/(V_p^2 - V_s^2)]$$

$$\text{Modulo di taglio (rigidità) } G_0 = \gamma V_s^2$$

$$\text{Modulo di comprimibilità o di Bulk } K = \gamma (V_p^2 - 4/3 V_s^2)$$

Determinazione del modulo di Young statico Es

Per la determinazione del modulo di Young statico Es dal modulo dinamico Ed si può applicare la nota relazione proposta da Rzhevsky e Novik (1971) valida per i moduli misurati in MPa o Kg/cmq:

$$E_{stat} = \frac{E_{din} - 0.97}{8.3}$$

Per gli ammassi rocciosi la bibliografia specialistica suggerisce di applicare un coefficiente pari a 0,8-1,0 per la roccia integra e un coefficiente via via più basso per quelle fratturate in relazione al grado di fratturazione.

$$E_{stat} = E_{din} \times (0.3/1.0)$$

Si sottolinea tuttavia come i valori ottenuti con la suddetta formulazione sia un modulo di elasticità e quindi non può essere utilizzato per determinare ad esempio cedimenti di fondazione quando il carico delle fondazioni dia luogo a elevate deformazioni (superiori al limite di elasticità) poiché in quei casi la componente plastica è predominante su quella elastica.

Correlazioni con Nspt e parametri geotecnici

Nella letteratura specializzata sono ormai reperibili moltissime correlazioni tra il numero di colpi (Nspt) del Penetrometro Standard e la velocità delle onde di taglio (Vs). Le principali correlazioni sono di tipo esponenziale, con $N_{spt} = (V_s / \alpha)^\beta$ con i coefficienti α e β variabili in funzione del tipo di terreno. Si ricorda che il numero di colpi di cui si parla è quello necessario per far avanzare di 30 cm nel terreno la punta del campionatore Raymond standard.

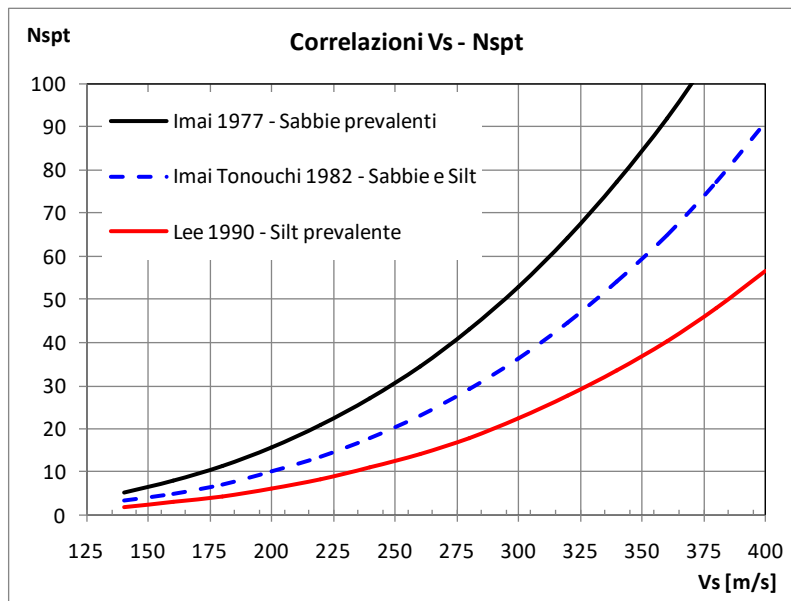
A tale scopo si illustrano le correlazioni proposte da Imai 1977, Imai e Tonuchi (1982) e Lee (1990) valide per tre differenti tipologie di terreni che caratterizzano in genere tutti i terreni:

$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{97,0} \right)^{3,184} \text{ valida per i terreni misti sabbioso-siltosi - Imai e Tonuchi (1982)}$$

$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{114,43} \right)^{3,226} \text{ valida per terreni prevalentemente fini/siltosi - Lee (1990)}$$

Dove: Nspt = numero di colpi del Penetrometro Standard e Vs = Velocità delle onde di taglio



Noto il valore di Nspt si calcolano i seguenti parametri geotecnici dei terreni:

Parametri geotecnici	Metodologie – Relazioni
Resistenza al taglio ϕ	<p><u>Terreni sabbiosi</u></p> <p>Entro i 6 m di profondità- Peck-Hanson&Thornburn, $\phi = 0,28 Nspt + 27,2$</p> <p>Oltre i 6 m di profondità- Japanese National Railway, $\phi = 0,30 Nspt + 27$</p> <p><u>Terreni: sabbie fini o limose</u></p> $\phi = \sqrt{15Nspt} + 15$
Modulo di deformazione E (o di Young)	<p>Schmertmann (valido per sabbie e terreni prevalentemente sabbiosi)</p> <p>$E(\text{Kg/cm}^2) = 2B Nspt$ dove</p> <p>B=4 (sabbia fine), B=6 (sabbia media), B=10 (sabbia grossolana)</p> <p>D'Appolonia et Alii. (valido per sabbia+ghiaia e sabbie sovraconsolidate)</p> <p>$E(\text{Kg/cm}^2) = 7,71 Nspt + 191$ (ghiaia + sabbia)</p> <p>Tornaghi (valido per sabbia + ghiaia)</p> <p>$E(\text{MPa}) = B SNspt$ (B=7 MPa)</p>

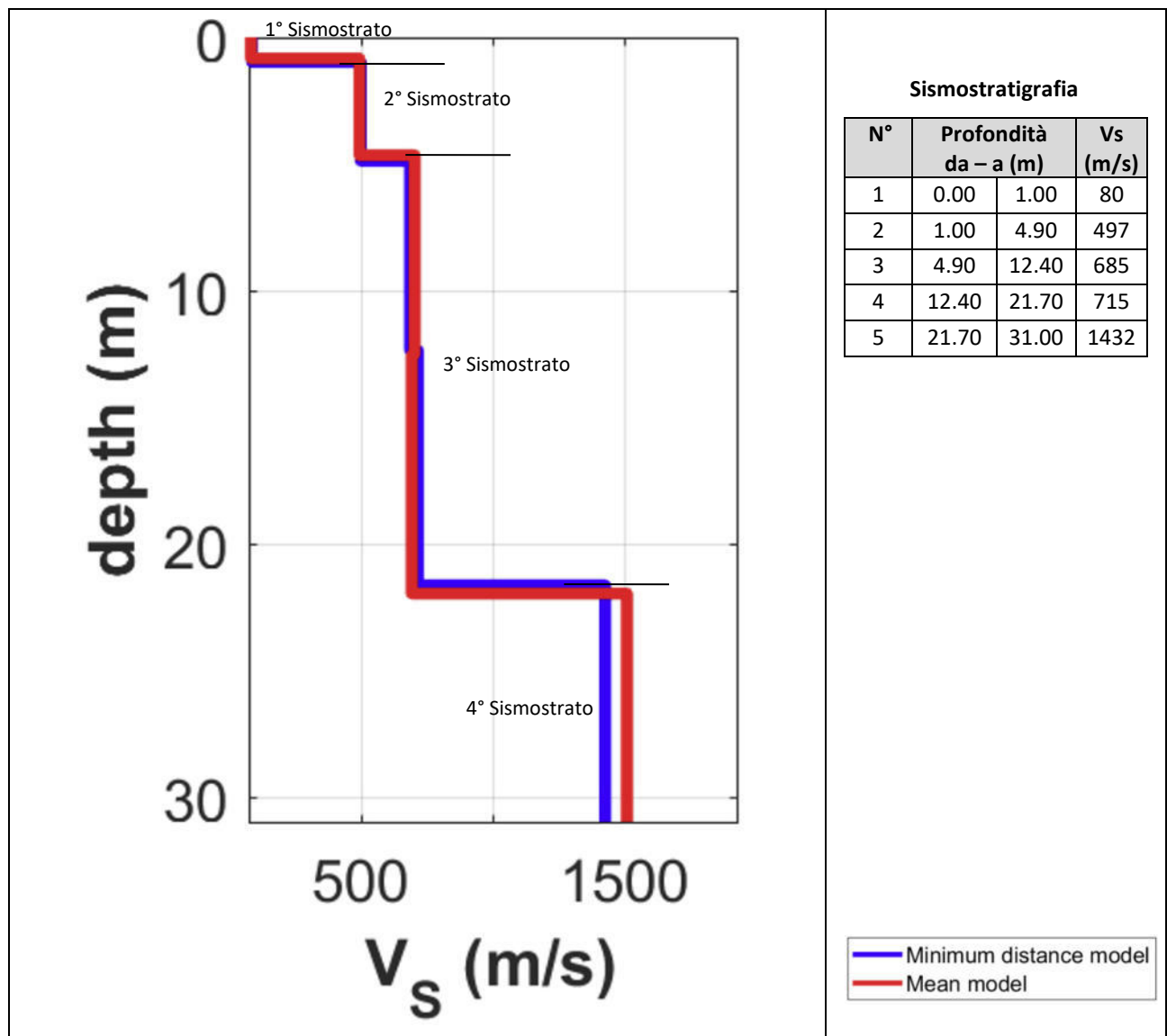
4 INTERPRETAZIONE DEI DATI: MASW

4.1 MASW M1

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali V_s dello stendimento M1, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio V_s .

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0.00 – 1.00	1° sismostrato con V_s di 80 m/s, suolo
1.00 – 4.90	2° sismostrato con V_s di 497 m/s, roccia intensamente fratturata/alterata e/o terre addensate
4.90 – 21.70	3° sismostrato con V_s tra 685 e 715 m/s, roccia fratturata/alterata e/o terre molto addensate
21.70 – 31.00	4° sismostrato con V_s di 1432 m/s, roccia da poco fratturata a integra

MASW M1 - PROFILO V_s (V_{seq} da p.c.= 391.77 m/s)



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 V_s non inferiore a 800 m/s.

Esaminato il profilo delle V_s la profondità del substrato è posta a **21.70 m dal p.c.** ($V_s > 800$ m/s);

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **21.70 m** di profondità dal p.c. è pari a:

$$V_{s,eq} = \frac{21.70 \text{ m}}{0.0443 \text{ s}} = 489.81 \text{ m/s}$$

Ciò consente di classificare il terreno come **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.

Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Nella **Tabella 1** si illustrano i parametri di deformazione dinamici medi calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input V_s , e V_p e densità (da bibliografia/correlazione) per ciascun sismostrato definito dalle indagini eseguite.

Tabella 1. Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sismostrato	V_s	V_p	Densità γ	Modulo di Young dinamico E_{dyn}	Modulo di taglio iniziale G_0	Modulo di comprimibilità o di Bulk K
	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>kg/m³</i>	<i>MPa</i>	<i>MPa</i>	<i>MPa</i>
1	80	160	1600	27.31	10.24	27.31
2	497	994	1800	1185.64	444.62	1185.64
3	685	1370	2000	2502.53	938.45	2502.53
4	715	1430	2000	2726.53	1022.45	2726.53
5	1432	2864	2100	11483.49	4306.31	11483.49

5 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La prospezione geofisica attraverso l'impiego della tecnica della sismica con tecnica MASW ha permesso di ricostruire con buon grado di precisione l'assetto lito-stratigrafico dell'area in esame e dedurre le caratteristiche sismiche.

L'analisi congiunta delle onde di superficie (Rayleigh e Love) ha consentito di determinare il profilo verticale V_s e, di conseguenza, di calcolare il parametro $V_{s_{eq}}$, risultato pari a 489.81 m/s (considerando come riferimento il piano campagna). Il bedrock sismico ($V_s > 800$ m/s) è stato incontrato a 21.70. Ciò consente di attribuire una **Categoria B** di sottosuolo: 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.

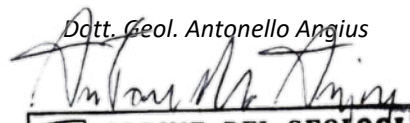

I dati derivati dalla MASW, rapportati alle correlazione bibliografiche indicate nei precedenti paragrafi, hanno permesso di determinare i parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni e per correlazione ottenere una preliminare definizione dei parametri di resistenza al taglio.

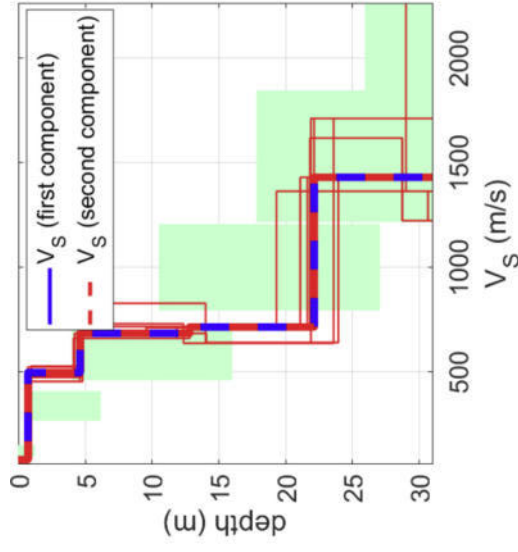
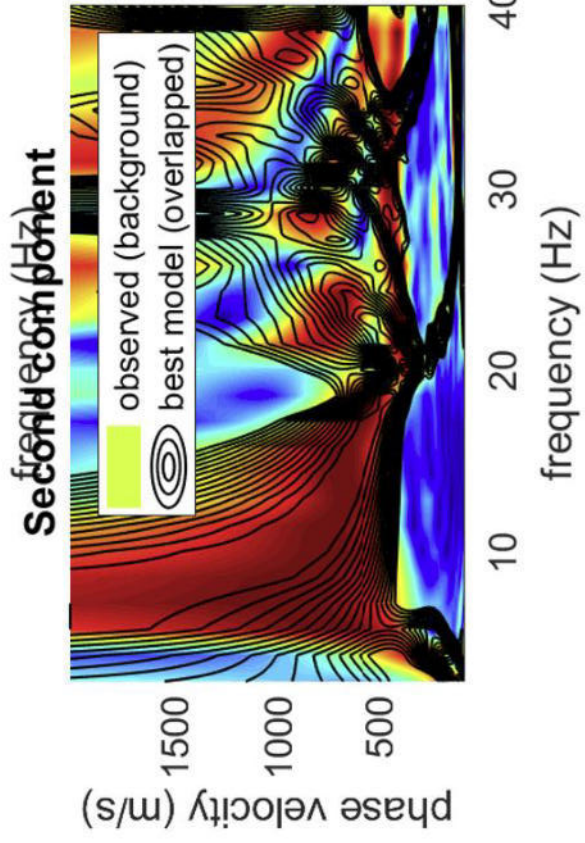
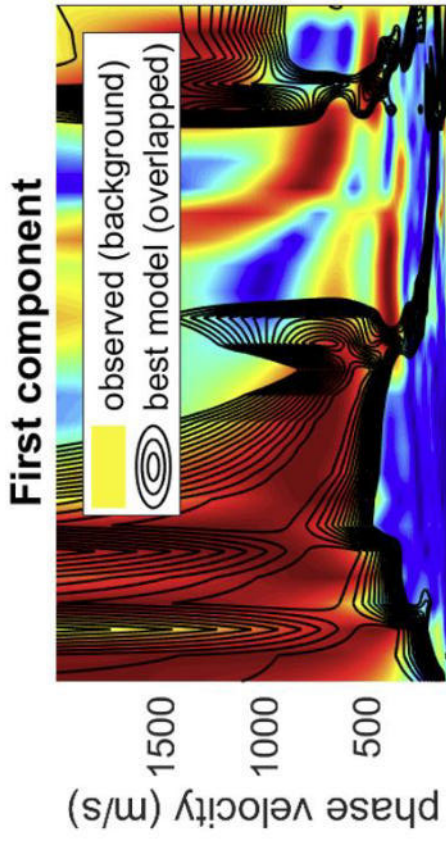
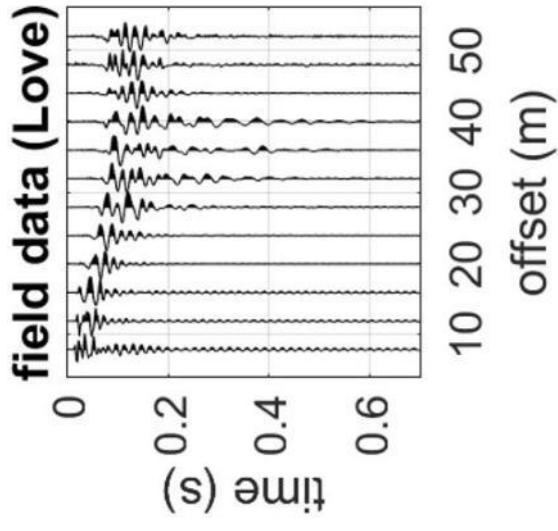
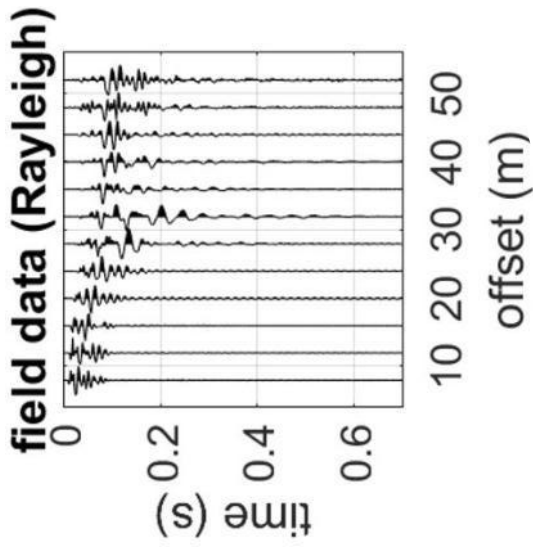
Cagliari 24.10.2022

Acquisizione ed elaborazione:

Dott. Geol. Marcello Piras

Dott. Geol. Martina Gaias

Dott. Geol. Antonello Angius





First component: RVF-PHASE-spectrum.mat
 Second component: THF-PHASE-spectrum.mat

ALLEGATO B – MASW 1
Documentazione fotografica



Foto 1: M1 da G1

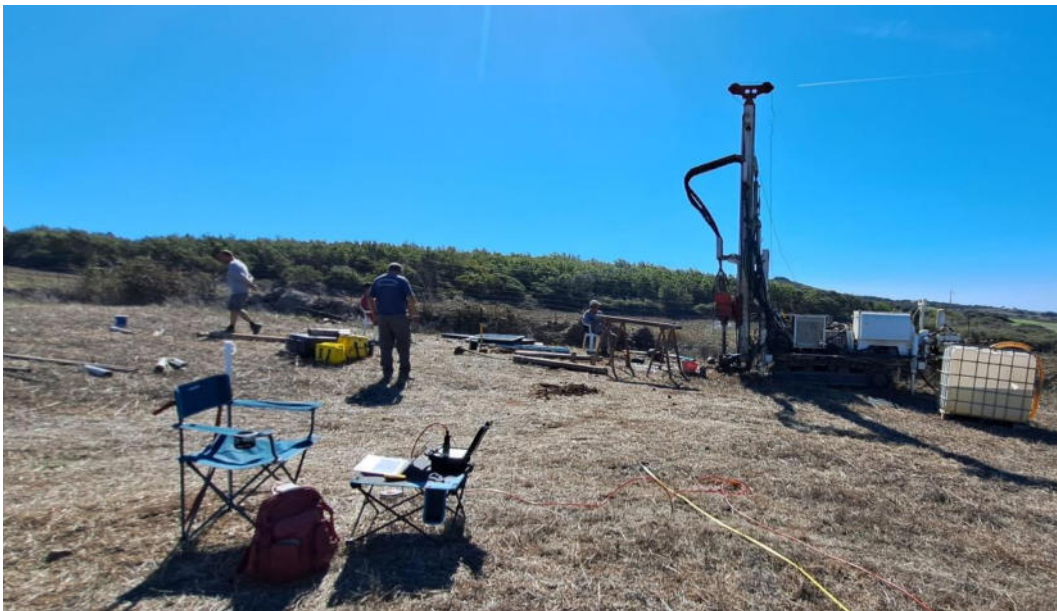


Foto 2: unità di acquisizione del dato



Foto 3: M1 da G12