



Finanziato  
dall'Unione europea

NextGenerationEU



Ministero  
delle Infrastrutture  
e dei Trasporti



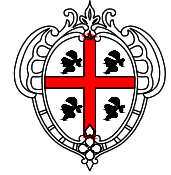
REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

Assessorato dei Lavori Pubblici

Ente acque della Sardegna

Ente Abbas de Sardigna

Servizio Progetti e Costruzioni



PNRR

PIANO NAZIONALE PER LA RIPRESA E RESILIENZA

D.M. MIMS n. 517 del 16.12.2021 - All. 1

Codice di intervento PNRR-M2C4-I4.1-A2-50

Diga Monte Pranu: interventi di verifica della sicurezza  
e ripristino del paramento di valle delle dighe in terra

## PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA-ECONOMICA

RELAZIONE GEOLOGICA E GEOTECNICA

Allegato

R2-1

REDATTO DAL SERVIZIO PROGETTI E COSTRUZIONI

Responsabile del Procedimento:

Geol. Ignazio Ghironi

Progettisti:

Ing. Giuseppe Colleselli, Prog. Ing. Francesco Colleselli

Collaborazioni tecniche:

M. Albano, M. Menarbin, E. Nisato

colleselli & p.  
INGEGNERIA GEOTECNICA

Il Direttore Generale

Il Direttore del Servizio  
Ing. Stefano Serra

CAGLIARI - Dicembre 2022

DATA	VERIFICA	APPROVAZIONE RUP	APPROVAZIONE
23/12/2022	E. Nisato / G. Colleselli		

Ente Acque della  
Sardegna  
Servizio Progetti e  
Costruzioni

---

COMUNE di Tartalias e  
Giba

Progetto di fattibilità  
tecnico economica

Diga Monte Pranu:  
interventi di verifica della  
sicurezza e ripristino del  
paramento di valle delle  
dighe in terra.

**RELAZIONE  
GEOLOGICA E  
GEOTECNICA**

---

Data	<b>23/12/2022</b>	
Commessa	<b>22-S085</b>	
Codice	<b>R2-1</b>	
Rev.	Redatto	Approvato
<b>1</b>	<b>EN</b>	<b>GC</b>

Sistema  
di gestione  
della qualità  
certificato



**Sommario**

<b>1</b>	<b>PREMESSE.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>7</b>
2.1	Normativa di riferimento.....	7
2.2	Elaborati e studi precedenti .....	7
2.3	Bibliografia.....	8
<b>3</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOGRAFICO.....</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOLOGICO .....</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>ASSETTO GEOLOGICO LOCALE .....</b>	<b>11</b>
5.1	Depositi Quaternari .....	13
5.2	Successione vulcanica miocenica .....	14
5.2.1	Formazioni della successione ignimbratica.....	15
5.2.2	Formazioni della successione andesitica.....	16
<b>6</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO.....</b>	<b>18</b>
<b>7</b>	<b>INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO .....</b>	<b>19</b>
<b>8</b>	<b>COMPATIBILITÀ GEOLOGICA .....</b>	<b>21</b>
<b>9</b>	<b>CAMPAGNE DI INDAGINI GEOGNOSTICHE.....</b>	<b>23</b>
9.1	Campagna di indagini storiche del 1932 e del 1948 .....	23
9.2	Campagna di indagini 2015.....	25

9.3	Campagna di indagini 2022 .....	25
<b>10</b>	<b>MODELLO GEOLOGICO-GEOTECNICO .....</b>	<b>29</b>
10.1	Unità geologico-geotecnico di riferimento .....	29
10.2	Modello diga Case Miais .....	31
10.3	Modello diga Bavorada .....	33
<b>11</b>	<b>RISULTATI DELLE INDAGINI.....</b>	<b>35</b>
11.1	Sondaggi geognostici .....	35
11.1.1	Qualità dell'ammasso roccioso .....	35
11.1.2	Prove di permeabilità di tipo Lefranc.....	36
11.2	Prove di laboratorio.....	38
11.2.1	Prove di classificazione fisica dei terreni.....	38
11.2.2	Prove edometriche .....	41
11.2.3	Prove di taglio diretto.....	42
11.2.4	Point Load Test .....	42
11.3	Prove geofisiche di superficie .....	43
11.4	Prove penetrometriche dinamiche (DPSH).....	44
<b>12</b>	<b>MODELLO GEOTECNICO DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>46</b>
<b>13</b>	<b>STUDI SISMICI DELL'AREA .....</b>	<b>48</b>
13.1	INGV, Istituto Nazionale Di Geofisica e Vulcanologia .....	48
13.2	ITHACA, catalogo delle faglie attive e capaci.....	50
<b>14</b>	<b>INQUADRAMENTO SISMICO.....</b>	<b>52</b>
14.1	Azione sismica di progetto.....	52
14.2	Accelerazione orizzontale massima su suolo rigido .....	52



14.3	Risposta sismica locale.....	53
	<b>ALLEGATO: INDAGINI GEOGNOSTICHE 2022 .....</b>	<b>56</b>

## 1 PREMESSE

Con Determina del Direttore del Servizio Progetti e Costruzioni dell'Enas n. 1353 del 28/10/202022, è stato affidato l'incarico del Servizio di redazione del Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica dei lavori denominati "PNRR-M2C4-I4.1-A2-50: Diga Monte Pranu: interventi di verifica della sicurezza e ripristino del paramento di valle delle dighe in terra" allo Studio Colleselli & P. Ingegneria Geotecnica.

L'invaso di Monte Pranu è ubicato tra i comuni di Villaperuccio, Tratalias e Giba ed è nato con lo scopo di creare un serbatoio da utilizzare per scopi irrigui per i comprensori del Basso Sulcis e realizzato per la regolazione delle piene del Rio Palmas.

L'invaso è costituito da cinque sbarramenti che realizzano un serbatoio della capacità di 63 M m<sup>3</sup>. Lo sbarramento principale sorge sul Rio Palmas alla sezione di Monte Pranu, mentre sono stati realizzati altri tre sbarramenti secondari, tra i quali le dighe in terra di Case Mias e Bavorada, che costituiscono parte delle sponde Sud e Sud Ovest dell'invaso e sono l'oggetto della presente PFTE.

Le dighe di Case Mias e Bavorada, previste nel progetto del 1934 in muratura, sono state poi realizzate come delle dighe in terra tra il gennaio del 1949 e il settembre del 1950.

I sondaggi eseguiti dal Servizio Dighe durante le fasi di progettazione, presso Case Mias e Bavorada nel 1948, oltre ad ulteriori indagini eseguite in corso d'opera, avevano evidenziato la presenza un assetto geologico costituito da coltri argillose sovrapposte ad una formazione trachitica profonda. Poiché le coltri argillose diminuivano il loro spessore in corrispondenza delle rocce affioranti sulle spalle delle dighe, il progetto fu modificato e fu deciso di costruire le dighe in terra formate da un nucleo argilloso rivestito da uno spessore di circa 2 m di materiale meno argilloso; il corpo diga fu immerso nelle coltri argillose tramite 2 o 4 trincee longitudinali sufficientemente profonde da raggiungere le coltri argillose (profondi circa 1.5 m e distanti tra loro 5 m) (Atti di collaudo, Servizio Dighe).

Verso valle dopo l'ultimo taglione fu disposto un drenaggio costituito da trincee drenanti con interasse 20 m riempite da ciottoli trasversale all'asse della diga, che scaricano su un fosso di raccolta per mezzo di canali di scolo perpendicolari all'asse (Atti di collaudo, Servizio Dighe).

Nel 1953, con il progetto di variante del 35° lotto della Bonifica del Basso Sulcis, la struttura delle dighe è stata in parte modificata: fu previsto di addolcire le pendenze delle scarpate a monte e valle e di rivestire i paramenti lato vaso con lastroni di calcestruzzo

cementizio con uno spessore di 20 cm gettato in sito su di un sottofondo costituito da 60 cm di muratura di pietrame a secco costituito a sua volta sopra ad uno strato di 20 cm di pietrisco con funzione di filtro rovescio. Al piede del rivestimento a monte delle dighe fu costruito un taglione di calcestruzzo per evitare scalzamenti dovuti al moto ondoso. Fu prevista anche l'impermeabilizzazione superiore delle dighe in terra con bitumazione del manto stradale. Inoltre a lato valle furono realizzati dei nuovi dreni trasversali nel corpo diga con interasse 10 m ed anche un muro a sezso di rinforzo per la raccolta e lo smaltimento delle acque di drenaggio. I lavori terminarono nel 1957.

La Figura seguente riporta uno schema attuale rappresentativo delle dighe in terra tratto dallo studio della Valutazione delle condizioni di stabilità e flusso di filtrazione di Cinigeo (ottobre 2022).

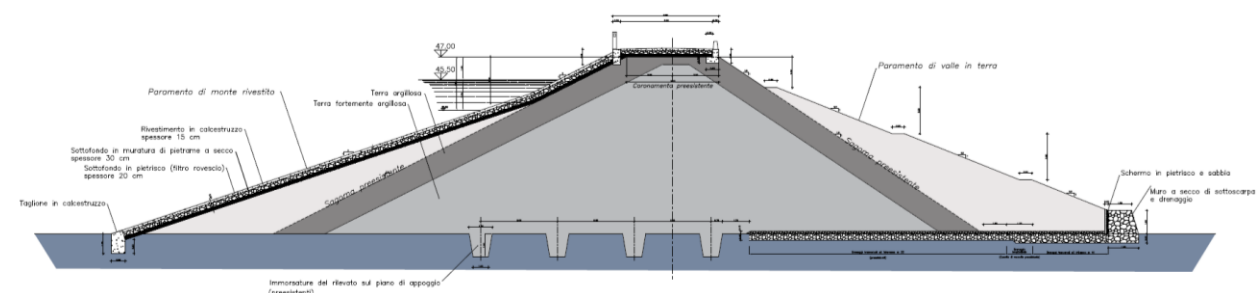


Figura 1.1 Sezione di riferimento delle dighe in terra Case Miais e Bavorada (Cinigeo, 2022)

La presente relazione riguarda l'analisi geologico e geotecnica dell'area dove sorgono le dighe in terra di Case Miais e Bavorada. A seguito di una ricerca bibliografica riguardante la geologia del territorio, si sono analizzate le indagini disponibili per creare un modello geologico-geotecnico al fine di valutare la sicurezza delle dighe nei confronti delle verifiche di stabilità globale ed idrauliche, confrontando lo stato attuale con quello di progetto migliorativo. Per le analisi numeriche eseguite si rimanda alla relazione specifica *R3 – Relazione sui calcoli*.

## 2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- (1) EN 1997 Eurocode 7: Geotechnical Design
- (2) EN 1998 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance
- (3) DG Dighe, Divisione 6 – Strutture e Geotecnica (2018) Verifiche sismiche delle grandi dighe, degli scarichi e delle opere complementari e accessori. Istruzioni per l'applicazione della normativa tecnica di cui al D.M. 26.06.2014 (NTD14) e al D.M. 17.01.2018 (NTC18)
- (4) ASG (2016). Linee guida per indagini geofisiche. Associazione Italiana di Geofisica
- (5) AGI (1977) Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche. Associazione Geotecnica Italiana
- (6) AGI (1994) Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio. Associazione Geotecnica Italiana
- (7) AGI (2005) Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica - Linee guida. Associazione Geotecnica Italiana
- (8) Decreto Ministeriale 26 giugno 2014. "Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)" (NTD 14)
- (9) D.M. 17/01/2018 "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni";
- (10) Circolare 02/01/2019 n.7 C.S.LL.PP. recante le istruzioni per l'applicazione del "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni".

### 2.2 ELABORATI E STUDI PRECEDENTI

- (11) Azienda Carboni Italiani, Direzione Lavori Bonifica, Lavori di bonifica del Basso Sulcis, Progetto di variante Costruzione del serbatoio de Monte Pranu per irrigazione e regolazione delle piene di Rio Palmas, Piante e Profili dei sondaggi, Case Mias e Bavorada, 20 luglio 1948;
- (12) Cinigeo, Sbarramenti di Case Mias e Bavorada – Valutazione delle condizioni di stabilità e del flusso di filtrazione per Ente Acque della Sardegna, ottobre 2022
- (13) Ministero dei Lavori Pubblici, Consiglio Superiore, 4° Sezione – Servizio Dige, Atti di collaudo (D.R. 1° Ottobre 1932 n. 1370, Relazione, verbali di vista e Certificato di collaudo
- (14) Relazioni sulle indagini geognostiche e geofisiche, Prove Lefranc, Prove di pompaggio, Prove penetrometriche DPSH, Prove di laboratorio, L191 – Diga Monte

Pranu: interventi di verifica della sicurezza e ripristino del paramento di valle delle dighe in terra, Opere geotecniche 2022

- (15) Vardabasso Silvio, Relazione geologica, progettazione esecutivo V° Lotto – Serbatoio di Monte Pranu, Cagliari 31 Agosto 1932

### 2.3 BIBLIOGRAFIA

- (16) Cherchi A., Montadert L., Il sistema di rifting oligo- miocenico del Mediterraneo occidentale e sue conseguenze paleogeografiche sul Terziario sardo. Mem. Soc. Geol. It, 24 (1982), 387-400, 8 ff.
- (17) DISS 3.3.0. DISS Working Group (2021). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.3.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/diss3.3.0>
- (18) Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000, Foglio n. 564 Carbonia e Note illustrative, 2012
- (19) ITHACA Working Group (2019). ITHACA (ITaly HAZard from CApable faulting), A database of active capable faults of the Italian territory. Version December 2019. ISPRA Geological Survey of Italy.)
- (20) Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Antonucci A. (2022). Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 4.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.4>
- (21) Meletti C., Montaldo V., 2007. Stime di pericolosità sismica per diverse probabilità di superamento in 50 anni: valori di ag. Progetto DPC-INGV S1
- (22) Regione autonoma della Sardegna, Direzione generale agenzia del distretto idrografico, Piano stralcio per l'assetto idrogeologico (PAI), Norme di attuazione, Cartografia sul SardegnaSIT PAI Geoportale (data consultazione novembre 2022) , 2020
- (23) Stucchi M., Meletti C., Montaldo V., 2007. Valutazione standard (10%, 475 anni) di amax (16mo, 50mo e 84mo percentile) per le isole rimaste escluse nella fase di redazione di MPS04. Progetto DPC-INGV S1



### 3 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area dell'intervento è ubicata tra i comuni di Tratalias e Giba in Provincia del Sulcis Iglesiente (ex Provincia del Sud della Sardegna e Provincia di Carbonia Iglesias).

La presente relazione riguarda due dighe in terra costituiscono gli sbarramenti meridionali dell'invaso di Monte Palmas: la diga di Case Miais, con una lunghezza di circa 1400 m e la diga Bavorada con una lunghezza di circa 750 m.

Nella Figura seguente è mostrata l'ubicazione delle aree di intervento su foto satellitare, mentre nella Tavola *D01 - Corografia generale* su un estratto cartografico di Carta Tecnica Regionale con scala 1: 10.000.



Figura 3.1 Ubicazione dell'area degli interventi sulle dighe in terra su foto satellitare (Google Earth, 2022)

## 4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La geologia della Sardegna solitamente si riferisce a tre grandi insiemi: il basamento metamorfico ercinico, il complesso tardo paleozoico e le successioni sedimentarie e vulcaniche tardo paleozoiche, mesozoiche e cenozoiche. Nell'area del Lago di Monte Pranu, affiorano in particolare i complessi terziari vulcanici sovrastati da depositi quaternari.

La geologia di quest'area inserisce all'interno del contesto collisionale tra il margine sudeuropeo e la placca apula che portò allo sviluppo della catena appenninica tra l'Oligocene Sup. e il Miocene Inferiore. Durante le fasi collisionali il Bacino balearico e quello del Tirreno si aprirono e portarono ad una conseguente deriva e rotazione del Blocco sardo-corso, che rappresenta il retropaese della catena appenninica. In concomitanza alla rotazione del Blocco Sardo Corso si sviluppò quello che rappresenta uno degli eventi geologici terziari più importanti del Mediterraneo occidentale ovvero l'instaurarsi di un vulcanismo calcocalino grazie all'impostazione di movimenti tettonici trascorrenti e una successiva fase distensiva (Figura 4.1) (ISPRA, Note illustrative, 2012). Anche se il ciclo vulcanico copre tutto il periodo oligo-miocenico, in realtà la maggior parte dell'attività vulcanica si concentrò tra l'Aquitano e il Burdigaliano cioè in un breve intervallo di tempo corrispondente al passaggio dalla tettonica compressiva legata alla collisione appenninica a quella distensiva post-collisionale (ISPRA, Note illustrative, 2012).

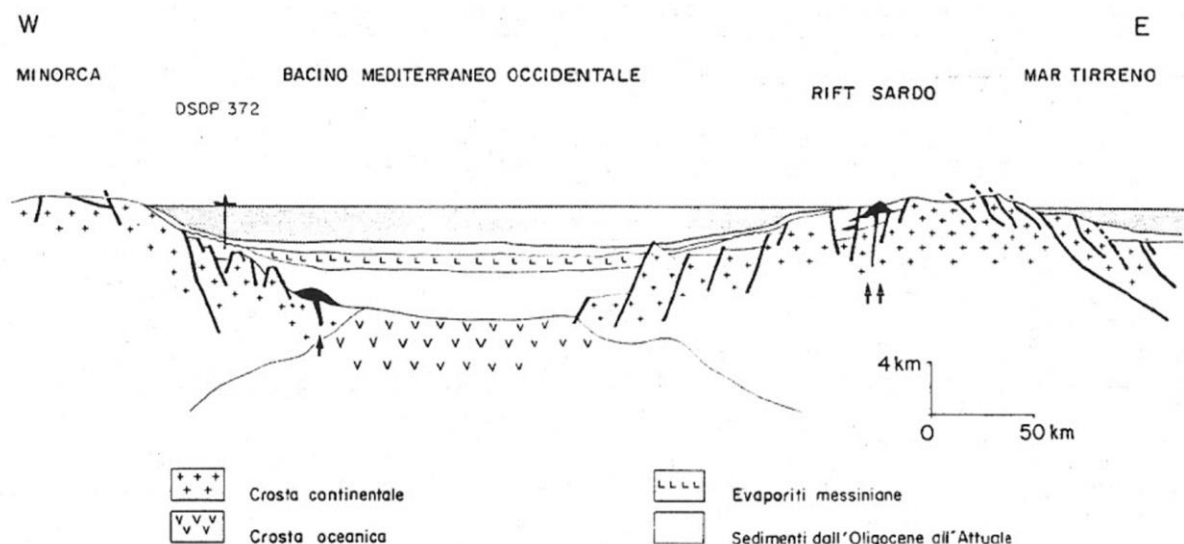


Figura 4.1 Rift oligo-miocenico della Sardegna (Cherchi et al, 1982)



## 5 ASSETTO GEOLOGICO LOCALE

Nella Figura seguente si riporta un estratto della Carta Geologica d'Italia, Foglio n. 564 Carbonia con la legenda (ISPRA, 2012), nel quale si può osservare che le principali litologie che affiorano nell'area del Lago di Monte Pranu appartengono alle successioni vulcaniche e sedimentarie mioceniche e depositi quaternari continentali.

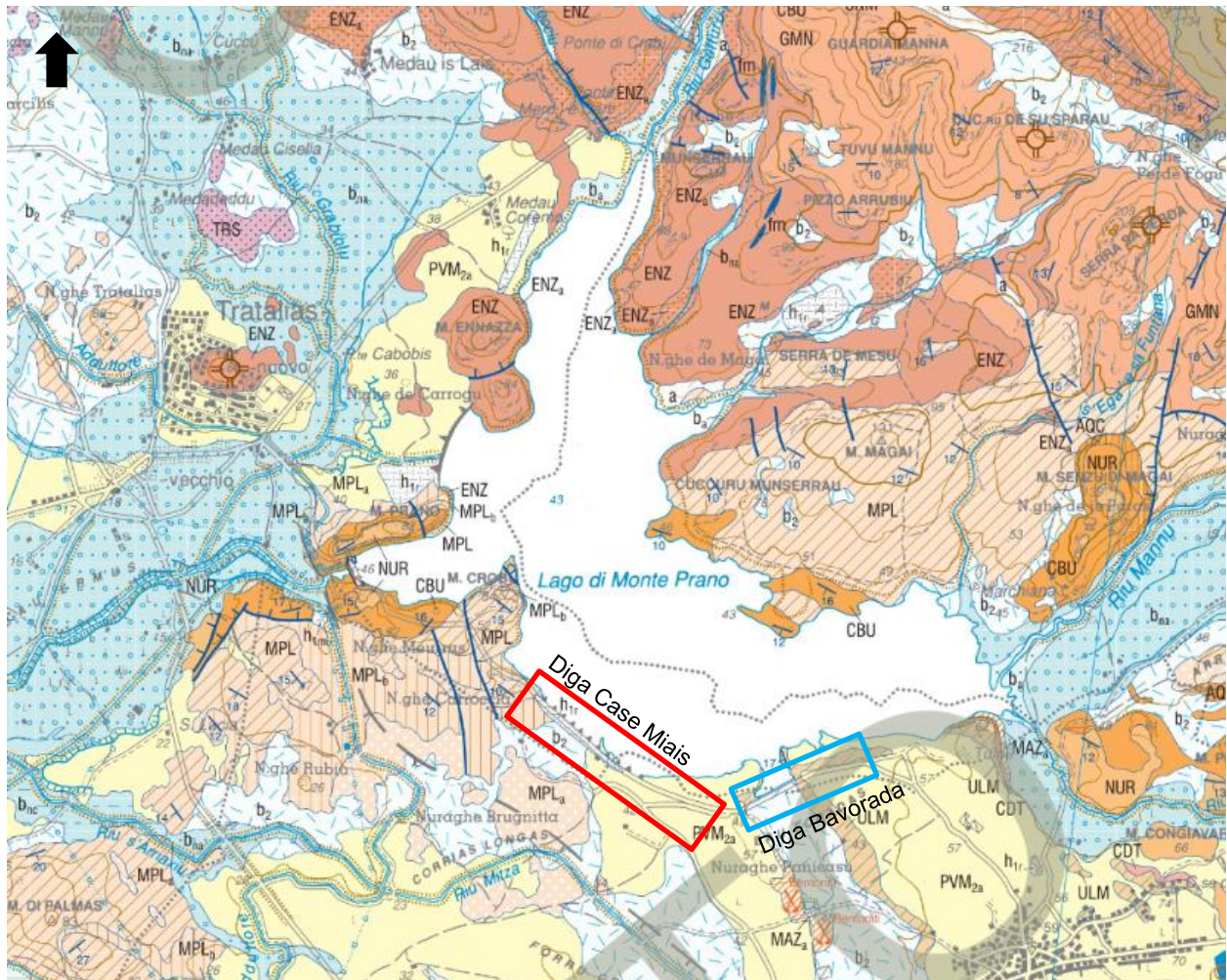
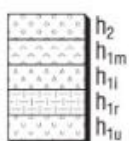


Figura 5.1 Estratto della Carta Geologica d'Italia, Foglio n. 564 Carbonia (ISPRA, 2012)

### LEGENDA

**OLOCENE** – Depositi quaternari dell'area continentale



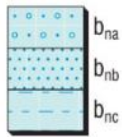
#### Depositi antropici

Saline e vasche di salificazione ( $h_2$ ), discariche minerarie ( $h_{1m}$ ), discariche industriali ( $h_{1i}$ ), materiali di riporto e aree bonificate ( $h_{1r}$ ), discariche per rifiuti solidi urbani ( $h_{1u}$ ).

Spessore: fino a 40 m.

**OLOCENE**





#### Depositi alluvionali terrazzati

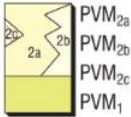
Ghiaie con subordinate sabbie ( $b_{na}$ ), sabbie con subordinati limi e ghiaie ( $b_{nb}$ ), limi e argille con subordinate sabbie ( $b_{nc}$ ). Spessore: fino a 5-6 m.

**OLOCENE**

### PLEISTOCENE – Depositi pleistocenici

#### SINTEMA DI PORTOVESME

Subsistema di Portoscuso



Ghiaie alluvionali terrazzate con subordinate sabbie eoliche e detriti ( $PVM_{2a}$ ) con spessori fino a più di 10 m; sabbie e arenarie eoliche con subordinati detriti e depositi alluvionali ( $PVM_{2b}$ ) con spessori fino a 20 m; detriti di versante e breccie con subordinati depositi eolici e alluvionali ( $PVM_{2c}$ ) con spessori fino a 3 m.

Subsistema di Calamosca ("Panchina tirreniana" *Auct.*)

Conglomerati e ghiaie litorali con resti di molluschi (*Strombus bubonius*, *Conus testudina-rius*, *Patella ferruginea*, etc.) ( $PVM_1$ ). Spessore: meno di 1 m.

**PLEISTOCENE SUP.**

### MIOCENE – Successioni vulcaniche e sedimentarie terziarie, successione vulcanica miocenica

#### Ignimbriti auct. - Gruppo di Cala Lunga



#### RIOLITI IPERALCALINE DI MONTE ULMUS

Depositi piroclastici di flusso in genere da incipientemente a densamente saldati con tessitura eutassitica, talora reomorfici, con evidenti strutture di flusso nella parte bassa, spesso con vitrofiro basale, scarsamente porfirici per Sa,  $\pm$ PI, a composizione riolitica iperalcalina; localmente (S. Antioco), a tetto, breccie piroclastiche con elementi eterometrici fino a dimensioni metriche. Spessore: fino a 50 m.

**MIOCENE MEDIO (LANGHIANO)**

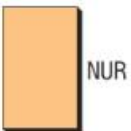
#### Ignimbriti auct. - Gruppo di Monte Sirai



#### DACITI DI MATZACCARA

Depositi piroclastici in più unità di flusso moderatamente e, localmente (Giba, S. Antioco), densamente saldati con tessitura eutassitica, porfirici per PI e Bt, a composizione dacitica (MAZ); depositi piroclastici di caduta, subordinate epiclastiti e piroclastiti di flusso non saldate ( $MAZ_a$ ). Spessore: fino a 19 m.

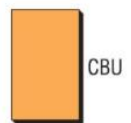
**MIOCENE MEDIO (LANGHIANO)**



#### RIOLITI DI NURAXI

Depositi piroclastici di flusso densamente saldati, da grigi a rosso-violacei, con marcata foliazione, porfirici per PI e Sa, con tessitura da eutassitica a paratassitica, spesso reomorfici, a composizione riolitica; livello vitrofirico alla base. Spessore: 20 m. ( $^{39}Ar/^{40}Ar$ :  $15,8 \pm 0,2$  Ma).

**MIOCENE MEDIO (LANGHIANO)**

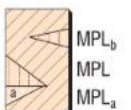


#### RIOLITI DI MONTE CROBU

Depositi piroclastici di flusso da densamente saldati con tessitura eutassitica, di colore rosso bruno, a non saldati (tufi, tufi a lapilli e tufi-breccia), porfirici per Sa e PI, a composizione riolitica; spesso con livello vitrofirico basale, talora, a tetto, subordinati livelli piroclastici di caduta e paleosuoli (S. Antioco). Spessore: in genere da alcuni metri fino a qualche decina di metri; eccezionalmente fino a più di 100 m.

**MIOCENE ?INF.-?MEDIO (?BURDIGALIANO SUP. - ?LANGHIANO)**

#### Andesiti auct. – Gruppo di Carbonia



#### ANDESITI DI MONTE PALMAS

Breccie laviche autoclastiche andesitiche con clasti subangolosi vescicolati grigio chiari, porfiriche per PI, Opx, Cpx, Hbl e Bt in pasta di fondo ipocristallina, passanti verso l'alto (M. Magai) a lave andesitico-dacitiche con sviluppo di Qtz (MPL); intercalazione discontinua di lave andesitico-basaltiche scure in colate massive e autoclastiche, porfiriche per PI, Opx, Cpx,  $\pm$ Ol in pasta di fondo ipocristallina (MPL<sub>b</sub>); alla base, bancate di breccie piroclastiche a matrice pomiceo-cineritica, intercalazioni di livelli epiclastici (MPL<sub>a</sub>). Spessore: fino a circa 60 m.

**MIOCENE INF. (BURDIGALIANO)**

A seguito alla consultazione bibliografica e dei documenti di progetto riguardanti l'invaso di Monte Pranu, nei seguenti paragrafi si presentano e descrivono le principali formazioni geologiche presenti nell'area. Le informazioni sono state reperite principalmente dalle Note illustrative del Foglio Carbonia n. 564, della Carta Geologica d'Italia a scala 1: 50.000 (ISPRA).

## 5.1 DEPOSITI QUATERNARI

I depositi Quaternari che interessano le aree in studio sono coltri eluvio – colluviali oloceniche ( $b_2$ ) e i depositi pleistocenici appartenenti al Sintema di Portovesme (subsintema di Portoscuso).

### *$b_2$ - coltri eluvio-colluviali (Olocene)*

Nei pressi delle dighe Case Miais e Bavorada affiorano in superficie coltri eluvio-colluviali con spessori intorno al metro. Si tratta di depositi sabbiosi e limosi intercalati a sedimenti grossolani talvolta arricchiti di frazione organica. Sono composti da sedimenti provenienti dalla degradazione fisica del substrato e del suolo in epoca olocenica. Localmente contengono suoli ad accumulo di carbonato di calcio in noduli, croste e lenti, più o meno induriti.

### *$PVM_1$ , $PVM_2$ - Sintema di Portovesme, Subsintema di Portoscuso (Pleistocene Superiore)*

Il Sintema di Portovesme è datato Pleistocene Superiore ed è composto da due subsintemi, quello di Cala Mosca ( $PVM_1$ ) e quello di Portoscuso ( $PVM_{2a}$ ,  $PVM_{2b}$ ,  $PVM_{2c}$ ). Il subsintema di Cala Mosca costituisce la base del sintema ed è costituito prevalentemente da ghiaie litorali ed ha spessori inferiori al metro, ma non affiora nei pressi dell'area in studio.

Il subsintema di Portoscuro è costituito da depositi di ambiente alluvionale ( $PVM_{2a}$ ), di ambiente eolico ( $PVM_{2b}$ ) e di versante ( $PVM_{2c}$ ), spesso intercalati tra loro.

I depositi alluvionali  $PVM_{2a}$  sono quelli che affiorano più estesamente nell'area in studio. Si tratta in genere di strati grossolani con clasti a spigoli da sub-angolosi a sub-arrotondati (ghiaie grossolane e blocchi) a cui si intercalano lenti e livelli di sedimenti più fini (sabbie e limo). Questi caratteri accompagnati dalla presenza di stratificazioni locali incrociate e concave suggeriscono un ambiente di genesi legato ai corsi d'acqua a canali intrecciati. Questi depositi alluvionali rappresentano i residui di estese conoidi alluvionali variamente incise e terrazzate. Anche presso Giba (da Sud e fino a Ovest di Giba presso loc. Campissa), nei pressi dell'area delle due dighe in terra, sono presenti in affioramento questi tipi di depositi costituiti

prevalentemente da elementi del basamento paleozoico. Gli studi effettuati sostengono si tratti probabilmente di un conoide a profilo convesso con spessori fino a 10 m.

## 5.2 SUCCESSIONE VULCANICA MIOCENICA

I depositi della successione vulcanica miocenica sono formati da colate laviche, domi lavici e piroclastiti messi in posto in condizioni subaeree e da epiclastiti e subordinati filoni. Essi poggiano in discordanza sulla f.ne del Cixerri e sulle formazioni sottostanti ed è ricoperta da formazioni quaternarie.

A seguito degli studi effettuati per la creazione del Foglio Carbonia n. 564 (ISPRA, 2012) sono state distinte numerose formazioni nella successione miocenica. Già studi precedenti (Assorgia et al., 1992a; Otelli et al., 1993 e i Fogli della Carta Geologica d'Italia a scala 1:100.000) avevano già suddiviso un complesso "andesitico" più antico da una "ignimbrico" più recente.

La successione andesitica è suddivisa in 3 gruppi: gruppo di Serbariu di Sopra, gruppo di Carbonia e gruppo di S. Antioco (Figura 5.2). La successione ignimbrica, che sormonta quella andesitica, è suddivisa in: gruppo di Su Ruvu Mannu (prevalenza rocce laviche), gruppo di Monte Sirai (prevalenza piroclastiti di flusso) e il gruppo di Cala Lunga (prevalenza piroclastiti di flusso). Questi gruppi sono separati da due discordanze angolari sono e riconducibili ad apparati di emissione situati in posizioni diverse (Figura 5.2).

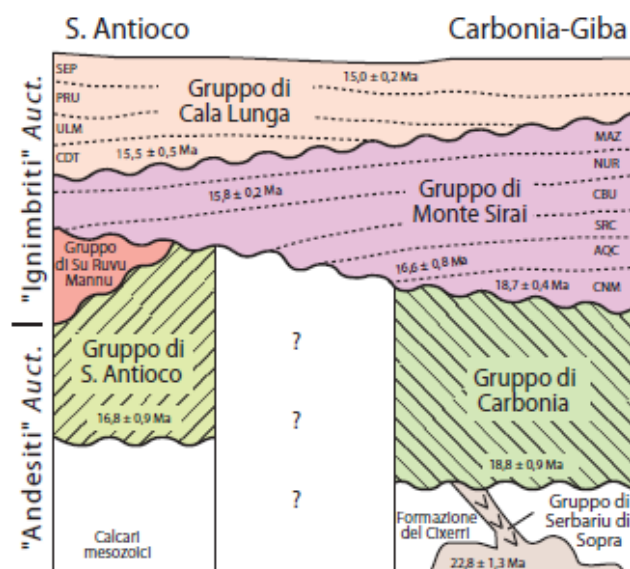


Figura 5.2 Schema dei rapporti stratigrafici tra i gruppi della successione vulcanica miocenica (Note Illustrative, Foglio n. 564, ISPRA, 2012)

I gruppi di Monte Sirai e Cala Lunga sono formati da dieci formazioni piroclastiche generalmente limitate a letto e a tetto da paleosuoli, epiclastiti o livelli vitrofirici e classificate in base alla composizione petrografica.

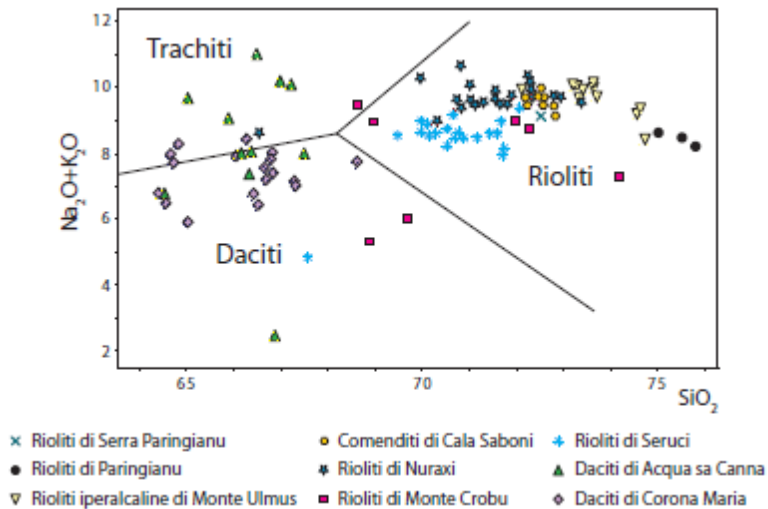


Figura 5.3 Classificazione chimica alcali- silice delle piroclastiti ignimbratiche del Foglio Carbonia  
(Note illustrative, Foglio n. 564, ISPRA, 2012)

### 5.2.1 Formazioni della successione ignimbratica

#### Gruppo di Cala Lunga, ULM - Rioliti iperalcaline di Monte Ulmus (Miocene Medio, Langhiano)

Questo gruppo poggia in discordanza angolare sul gruppo di Monte Sirai e sigilla le faglie dirette che tagliano il gruppo sottostante. In prossimità delle discordanze gli spessori di queste formazioni variano in base ad una paleomorfologia molto articolata e controllata da faglie.

Tra le quattro f.ni del Gruppo Cala Lunga quella che affiora presso la diga Bavorada, è la f.ne delle rioliti iperalcaline di Monte Ulmus. In genere poggia sulla f.ne inferiore del gruppo (Comediti di Cala Saboni, CDT) ma può poggiare in discordanza sul gruppo di Monte Sirai.

Le ULM sono depositi piroclastici con gradi di saldatura variabili: la parte basale della formazione è di colore rossiccio e densamente saldata, poi una porzione foliata da mediamente a molto saldata mentre verso l'alto il deposito è via via meno foliato e più massivo. La matrice è di un colore variabile da grigio-rosato a bruno-violaceo.

Gli spessori sono molto variabili: quelli massimi fino a 50 m si trovano a M. Ulmus, Cala Lunga, Cala Saboni, ma diminuiscono ad alcuni metri nello spazio di poche centinaia di metri. In altri casi (ad es. presso Giba) gli spessori sono più costanti e di circa 5 m.

Gruppo di Monte Sirai, MAZ – Daciti di Matzaccara (Miocene medio, Langhiano)

L'attività vulcanica del gruppo di monte Sirai è prevalentemente esplosiva con produzione di depositi piroclastici in gran parte di flusso a composizione dacitica – riolitica.

Tra le formazioni del gruppo del Monte Sinai ci sono le *daciti di Matzaccara* che affiorano nelle vicinanze delle dighe in oggetto di studio in corrispondenza di numerose cave per l'estrazione di bentoniti. Si tratta di depositi piroclastici da moderatamente a densamente saldati (MAZ) intercalati da strati poco saldati, epiclastici, tufitici o paleosuoli (MAZ<sub>a</sub>) in particolare alla base della formazione. Le daciti poggiano sempre sulle rioliti di Nuraxi (NUR). Le MAZ hanno struttura pseudofluidale con matrice grigiastra nella quale sono immersi minerali di Pl e Bt, sono presenti livelli a pomici ben classati e con gradazione inversa. Gli strati epiclastici possono variare da alcuni cm al metro e sono costituite da conglomerati formati da elementi di lave andesitiche o tufi saldati in matrice arenacea. Gli spessori massimi della f.me MAZ sono di poco inferiori ai 20 m.

5.2.2 Formazioni della successione andesitica

Gruppo di Carbonia, MPL - Andesiti di Monte Palmas (Miocene Inferiore, Burdigaliano)

Il Gruppo di Carbonia comprende 18 formazioni vulcaniche, 3 epiclastiche e filoni che sono prodotti di una serie magmatica olivinica ed una pirossenica con fenomeni di mixing reciproci. Le lave andesitiche per loro natura non hanno una gran continuità laterale, perciò, le formazioni di questo gruppo hanno in genere estensioni modeste.

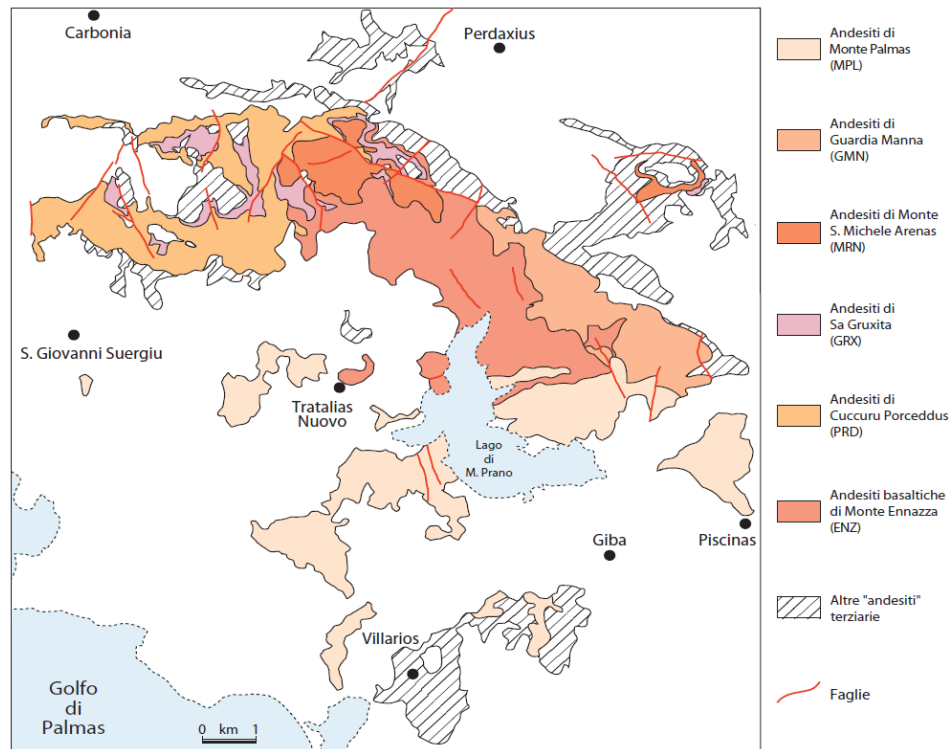


Figura 5.4 Schema dell'estensione areale delle principali unità vulcaniche del Gruppo di Carbonia  
(Note illustrative, Foglio n. 564, ISPRA, 2012)

Nella parte sud-occidentale del Lago di Monte Pranu affiorano le *Andesiti di Monte Palmas*, MPL. In genere le MPL poggiano sui conglomerati di Villarois, sulle andesiti di Monte Ennazza e su quelle di Guardia Marina mentre, sono ricoperte dalla successione ignimbritica. Questa f.ne è costituita prevalentemente da brecce laviche a composizione intermedio-acida costituite da elementi vescicolati grigio chiari che localmente mostrano strutture di flusso con bande bruno rossicce (MPL). Alle brecce MPL si alternano, talvolta, colate laviche massive a composizione intermedio basica (MPL<sub>b</sub>) e è possibile che poggino su depositi piroclastici intercalati a livelli epiclastici (MPL<sub>a</sub>). Macroscopicamente si osservano minerali quali il PI in glomeruli, anfiboli, pirosseni e Bt.



## 6 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Il coronamento della diga di Case Miais ha una lunghezza di 1380 m e le sue quote variano tra 48.5 e 47.9 m s.l.m. mentre la diga Bavorada è lunga 679 m e la sua quota è a 47.9 m s.l.m.

Il piano campagna ai piedi della diga Case Miais è variabile: verso nord ovest la sua quota è più bassa, tra i 36-37 m s.l.m. per alzarsi man mano verso sud est in corrispondenza del sondaggio S03 fino ad una quota di 42 m s.l.m. per poi mantenersi costante fino alla fine della diga.

Il piano campagna ai piedi della diga Bavorada varia tra una quota minima di 35.6 m s.l.m. in corrispondenza del centro della diga a una massima di 41.7 m s.l.m. in corrispondenza delle spalle della diga.

L'attuale assetto geomorfologico dell'area deriva dall'interazione tra i caratteri litologici, l'assetto tettonico e gli agenti modellanti quali acque superficiali, acque sotterranee.

Il bacino di Rio Palmas nel Sulcis è limitato da un anfiteatro monouso caratterizzato da litologie appartenenti al basamento metamorfico paleozoico fortemente piegato e tettonizzato mentre, i rilievi più tenui all'interno del bacino appartengono alle successioni neogeniche delle ignimbriti e delle andesiti. Per quanto riguarda le piane più a monte all'interno del bacino la litologia è caratterizzata da successioni sedimentarie paleogeniche mentre i territori più a valle che si estendono fino al mare da depositi alluvionali quaternari.

Le due dighe in terra si trovano al di sopra dei depositi alluvionali quaternari ma a cavallo con le formazioni vulcaniche neogeniche su un territorio con morfologie generalmente dolci con una topografia pressoché pianeggiante.

## 7 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

Il bacino del Sulcis – Iglesiense che ha un'estensione di 1.640 km<sup>2</sup>, pari a circa il 7% del territorio sardo. Il corso d'acqua principale del bacino imbrifero del Sulcis è il Rio Palmas (460.6 km<sup>2</sup>), alimentato dalle seguenti aste secondarie: Rio Mannu di Narcao, Rio del Rio Gutturu de Ponti e del Rio Mannu di Santadi.

La Figura 7.1 è un estratto della Carta delle permeabilità della Sardegna (APAT, 2019) la quale associa alle litologie del substrato una classe di permeabilità. La permeabilità dei depositi alluvionali è medio alta per porosità poiché è composta prevalentemente da depositi grossolani; la permeabilità del substrato roccioso (Andesiti di Monte Palmas, Rioliti iperalcaline di Monte Ulmus) è medio bassa per fratturazione o porosità.

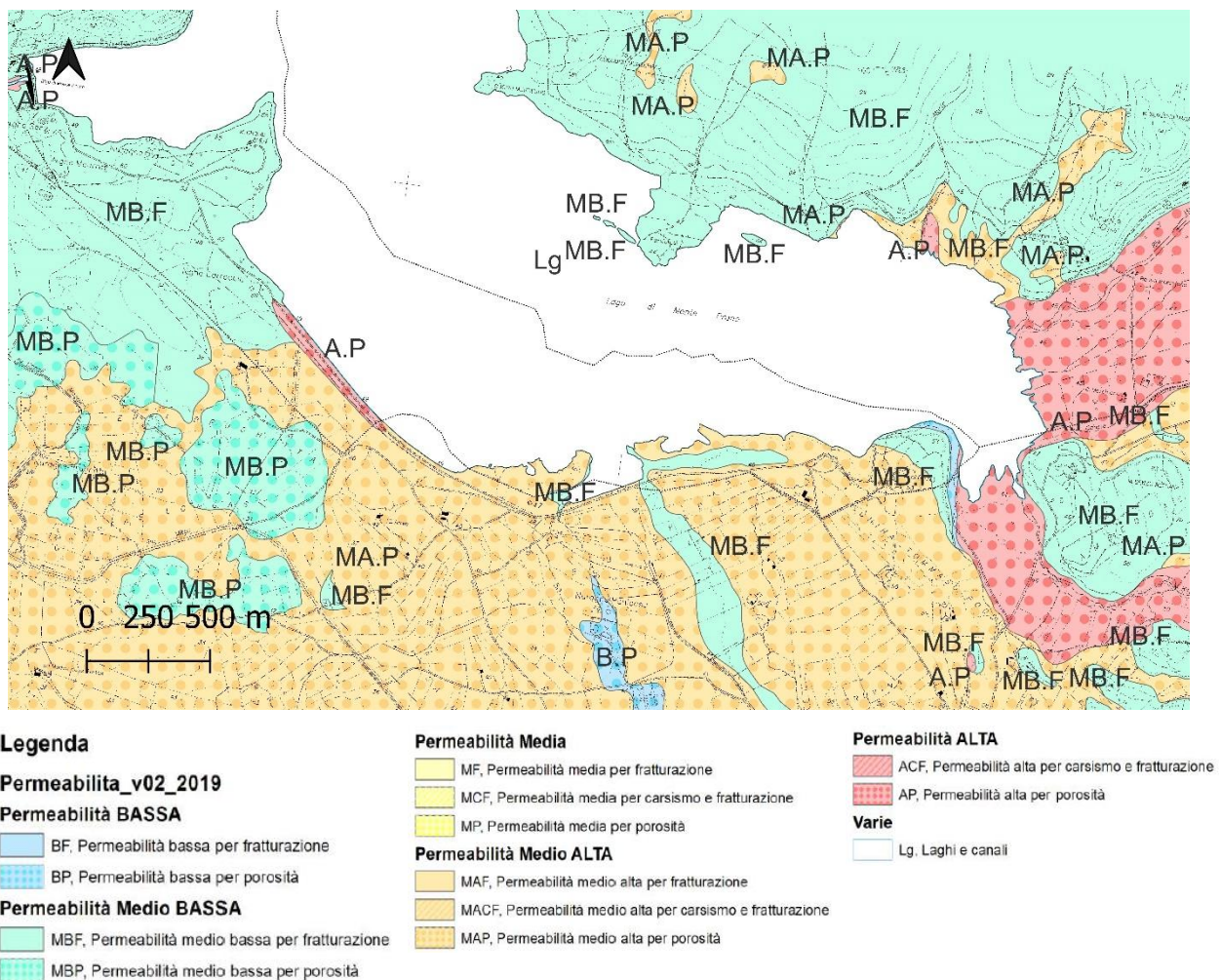


Figura 7.1 Carta delle permeabilità dei substrati della Sardegna e legenda (ARPAS, 2019)



La permeabilità dei complessi vulcanici, tuttavia, è variabile: nel caso di roccia alterata fratturata oppure nei livelli piroclastici o epiclastici la permeabilità tende ad essere minore, mentre negli espandimenti ignimbritici o lavici è più alta.

Le note illustrative del Foglio n. 564 Carbonia hanno valutato alcuni parametri idrodinamici sulla base di prove di emungimento a portata costante eseguiti in pozzi profondi.

Per le “andesiti” è stata determinata una permeabilità di  $2 \times 10^{-6}$  m/s ed una trasmissività di  $1.8 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s su 84 m di saturazione nella zona a S del Lago di M. Pranu si sono riscontrate portate di 20-30 l/s ciascuno, con valori di trasmissività compresi tra  $9.5 \times 10^{-3}$  e  $4 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s.

Nei depositi alluvionali ghiaiosi la permeabilità accertata è di  $0.7-0.8 \times 10^{-4}$  m/s e la trasmissività di  $0.6 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s su uno spessore del mezzo saturo di 8 m.

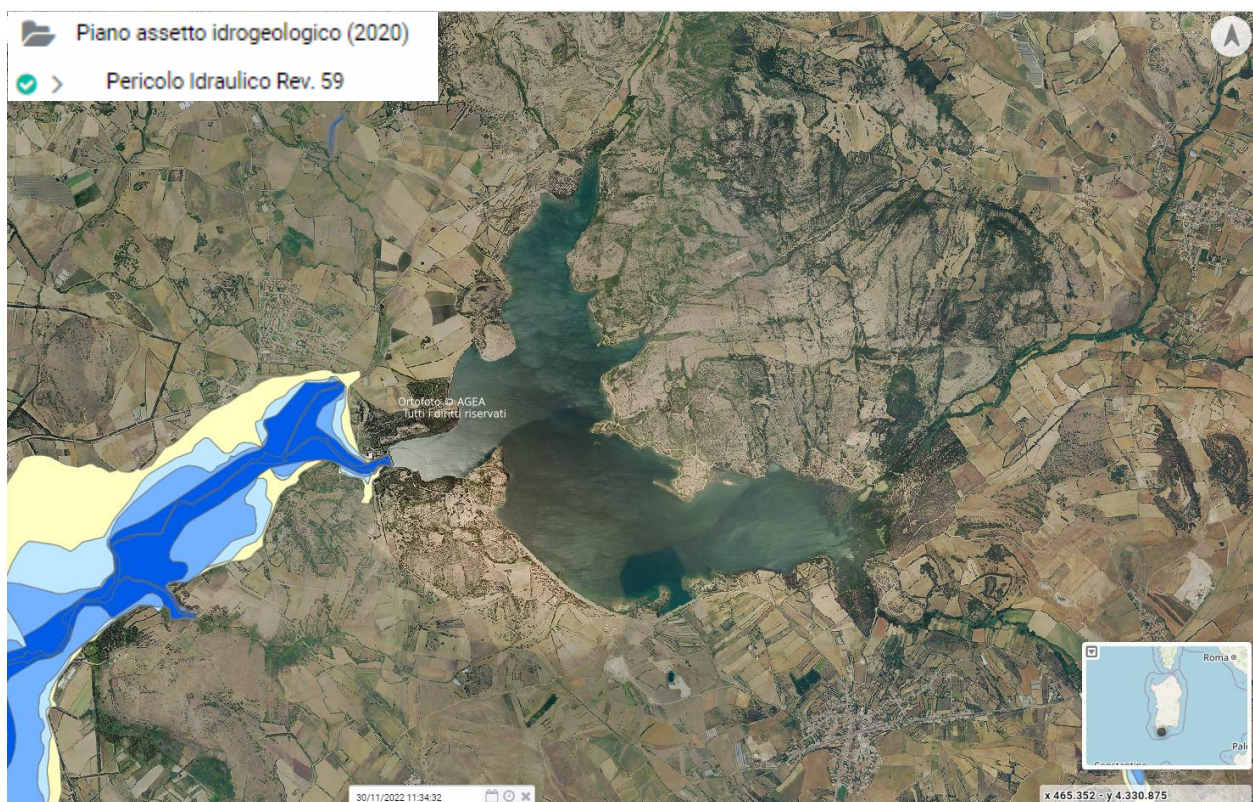
Le “ignimbriti” hanno permeabilità che varia da 0.16 a  $0.016 \times 10^{-4}$  m/s; e trasmissività altrettanto varia da 0.35 a  $1.4 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s per potenze del mezzo saturo

Inoltre, le Note illustrative osservando la piezometria delle falde rilevano che a S del Lago di M. Pranu le “andesiti” sono caratterizzate da permeabilità piuttosto elevata tanto che, nonostante le caratteristiche di roccia fessurata, è possibile individuare un flusso continuo ed uniforme della falda; in particolare, dopo la costruzione dello sbarramento sono comparse in quest’area alcune emergenze e aree paludose prima inesistenti.

## 8 COMPATIBILITÀ GEOLOGICA

All'interno del Geoportale della Sardegna è possibile consultare le mappe del PAI, aggiornate al 31-01-2018 e l'aggiornamento del PGRA della Sardegna per il secondo ciclo di pianificazione, previsto dall'art. 14 della Direttiva 2007/60/CE e dell'art. 12 del D.Lgs 49/2010, approvato con la Deliberazione del Comitato Istituzionale n.14 del 21/12/2021.

Il PAI e il PGRA non individuano nei territori delle dighe di Case Miais e Bavorada rischi geomorfologici da frana, alluvioni e neanche pericoli idraulici come raffigura l'estratto nella Figura seguente.



- ✚ Hi\* - (Aree da modellazione 2D con  $V_p \leq 0,75$ )
- Hi0 - P0 (Tratto studiato nel quale la piena risulta contenuta all'interno delle sponde per tutti i Tr)
- Hi1 - P1 (Aree a pericolosità idraulica Moderata o Fascia geomorfologica)
- Hi2 - P2 (Aree a pericolosità idraulica Media)
- Hi3 - P2 (Aree a pericolosità idraulica Elevata)
- Hi4 - P3 (Aree a pericolosità idraulica Molto elevata)

Figura 8.1 Estratto del Piano assetto idrogeologico, 2020 Navigatore SardegnaSIT

L'Art 4 comma 8 delle Norme di Attuazione dei PAI (2020) recitano che sono i Comuni che sono tenuti ad inserire nei certificati di destinazione urbanistica riguardanti i terreni ricadenti





## 9 CAMPAGNE DI INDAGINI GEOGNOSTICHE

In questo paragrafo si delineano i principali studi e campagne di indagini eseguiti presso la diga di Case Miais e la diga Bavorada.

### 9.1 CAMPAGNA DI INDAGINI STORICHE DEL 1932 E DEL 1948

Nel 1932 era stato affidato al Prof. Vardabasso il compito di redigere una relazione geologica per valutare la possibilità di creare lo sbarramento del Rio Palmas alla stretta di monte Pranu presso Tratalias nel Sulcis e sulla possibilità di creare degli sbarramenti tra l'altura delle Nuraghe Carroccio e loc. Case Bavorada. In occasione di questo studio erano state fatte delle ipotesi sulla geologia presso le attuali dighe in terra, accompagnate dall'esecuzione di rilievi geologici e di 4 trincee esplorative (spinte fino a - 1m da p.c.). Le trivellazioni incontrarono uno spessore superficiale di depositi sciolti di origine alluvionale (circa 0.90-1 m) per poi incontrare il substrato tufaceo bianco. Nella seguente Figura si può osservare il profilo geologico interpretativo disegnato dal Prof. Vardabasso nel 1932.

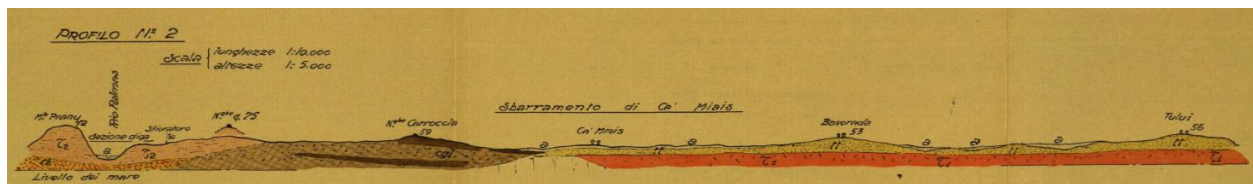


Figura 9.1 Profilo geologico longitudinale nei pressi dell'attuale Diga Case Miais (Vardabasso, 1932)

In occasione del Progetto di Variante dei Lavori di bonifica del Basso Sulcis = IV° Lotto del luglio 1948 sono stati eseguiti alcuni sondaggi nei pressi delle dighe in terra Case Mais e Bavorada, restituiti su profili e piante dall'Ing Antonio Salaris. Nelle Tabelle seguenti un elenco dei sondaggi eseguiti durante questa campagna geognostica.

Tabella 9.1 Sondaggi eseguiti nella campagna di indagini del 1948 presso la diga Case Mais (Variante del IV°, 1948)

Nome sondaggio	Profondità da p.c. (m)	Quota (m s.l.m.)
P	20.2	45.3
O	12.0	44.2
NT	15.5	42.5
M	13.5	42.3
L	39.0	41.5

IN	39.0	41.3
H1	10.3	41.0
H	33.5	41.0
G1	10.1	40.5
G	20.8	40.5
F1	11.0	40.8
FT	22.3	41.0
E1	10.7	39.5
E_Ebis	20.2	39.0
D1	10.5	38.0
D	22.0	37.5
C1	10.2	35.7
C	21.6	35.0
B1	10.7	35.8
B	20.8	38.0
A1	10.2	41.0

*Tabella 9.2 Sondaggi eseguiti nella campagna di indagini del 1948 presso la diga Bavorada  
(Variante del IV°, 1948)*

Nome sondaggio	Profondità (m da p.c.)	Quota (m s.l.m.)
A	14.0	40.0
B	14.7	39.0
C	12.0	42.0

Durante i lavori di ristrutturazione nel 2003 sono stati installati n. 18 piezometri: 10 piezometri presso la diga di Case Miais (P1-P10), 8 piezometri presso la diga Bavorada (P11-P18).

*Tabella 9.3 Coordinate con sistema di riferimento Gauss Boaga, Roma 1940, Ovest, dei piezometri installati nel 2003 nelle dighe in terra di Case Miais e Bavorada*

Nome piezometro	Diga	X - Est	Y - Ovest
P01	Case Miais	1465554.53	4326422.569
P02	Case Miais	1465571.54	4326440.999
P03	Case Miais	1465628.91	4326335.139
P04	Case Miais	1465656.69	4326362.259
P05	Case Miais	1465757.06	4326224.87
P06	Case Miais	1465777.93	4326250.48
P07	Case Miais	1466005.6	4326023.65
P08	Case Miais	1466020.56	4326039.15
P09	Case Miais	1466370.75	4325834.701
P10	Case Miais	1466376.72	4325852.841
P11	Bavorada	1466857.55	4325800.223

P12	Bavorada	1466851.28	4325814.313
P13	Bavorada	1467051.28	4325888.783
P14	Bavorada	1467038.34	4325912.233
P15	Bavorada	1467206.78	4325982.244
P16	Bavorada	1467204.18	4325992.894
P17	Bavorada	1467358.92	4326011.575
P18	Bavorada	1467357.55	4326021.595

## 9.2 CAMPAGNA DI INDAGINI 2015

L'Ente Acque della Sardegna nell'ambito degli studi finalizzati all'individuazione delle cause originanti le perdite dell'intero invaso di Monte Pranu ha affidato *all'impresa Dr. Antonellus Angius* una campagna di indagini che si è svolta tra il dicembre 2015 e il gennaio 2016. Gli unici sondaggio eseguiti presso le dighe oggetto del presente PTFE sono il sondaggio Sond 1 CASE MIAIS spinto sino ad una profondità di 12.8 m da p.c. e i Sond 1 BIS CASE MIAIS spinto sino alla profondità di 35 m da p.c..

## 9.3 CAMPAGNA DI INDAGINI 2022

L'ENAS ha affidato alla Ditta *Opere Geotecniche s.r.l.* l'esecuzione di una campagna di indagini geognostiche che si è svolta tra il 14 gennaio e il 28 febbraio 2022.

Di seguito un elenco delle indagini eseguite:

- rilievo topografico e fotogrammetrico delle dighe in terra Case Mias e Bavorada presso Monte Pranu;
- n. 9 sondaggi geognostici a carotaggio continuo spinti sino a profondità pari a 15 m da p.c., disposti sulla sommità dei rilevati in terra che formano le dighe (S01÷S06 presso Diga Case Mias, S07÷S09 presso Diga Bavorada);
- n. 2 sondaggi geognostici a carotaggio continuo spinti sino alla profondità di 10 m da p.c. con installazione di un piezometro a tubo aperto, (foro e piezometro PB01 presso Diga Case Mias, foro e piezometro PB02 presso Diga Bavorada);
- n. 8 piezometri di tipo Casagrande spinti sino a profondità di 9.4 m da p.c. (PZC02, PZC04, PZC06, PZC08, PZC10, PZC12, PZC14, PZC16);
- prelievo di n.12 campioni indisturbati e n. 13 campioni disturbati sui quali sono state eseguite prove di laboratorio (prove di classificazione, prove di taglio CD, prove di consolidazione edometriche, Point Load Test) eseguite dal Laboratorio certificato Geodata S.a.s.;
- n. 27 prove di permeabilità in foro di tipo Lefranc, di cui n.3 condotte con carico costante e n.24 carico idraulico variabile;

- n. 7 prove penetrometriche dinamiche continue con penetrometro super pesante (*Dynamic Probing Super Heavy, DPSH*) spinte sino a rifiuto sino a profondità di 11.40 m da p.c. (DPSH1÷DPSH5 presso Diga Case Mias, DPSH6 e DPSH7 presso Diga Bavorada). Tali prove hanno sostituito le prove di tipo CPT in progetto che non sono state realizzate a causa della presenza diffusa di ciottoli all'interno del corpo diga;
- n. 5 prove geofisiche di sismica a rifrazione, n.2 nell'area della Diga di Case Mias e n. 3 presso la Diga Bavorada.
- n. 3 prove geofisiche di tipo *Refraction Microtremor, Re.mi.*, n.2 nell'area della Diga di Case Mias e n.1 presso la Diga Bavorada

Nella seguente Tabella si riportano le coordinate delle indagini eseguite

*Tabella 9.4 Coordinate con sistema di riferimento Gauss Boaga, Roma 1940 – Ovest e quote espresse in m s.l.m. dei sondaggi eseguiti nel 2022 presso le dighe in terra di Case Mias e Bavorada*

Sondaggio	Gauss Boaga - Roma 40 Ovest		
	X-Est	Y-Nord	Quota (m s.l.m.)
S_01	1465595.644	4326412.985	48.720
S_02	1465776.343	4326246.198	48.522
S_03	1465964.715	4326076.392	48.264
S_04	1466172.860	4325937.492	48.239
S_05	1466400.387	4325840.004	48.247
S_06	1466635.853	4325764.818	48.194
S_07	1466907.357	4325840.181	48.237
S_08	1467122.812	4325953.112	48.233
S_09	1467351.586	4326016.636	48.181

*Tabella 9.5 Coordinate con sistema di riferimento Gauss Boaga, Roma 1940 – Ovest e quote espresse in m s.l.m. dei sondaggi eseguiti nel 2022 presso le dighe in terra di Case Mias e Bavorada*

Prova penetrometrica dinamica	Gauss Boaga - Roma 40 Ovest		
	X-Est	Y-Nord	Quota (m s.l.m.)
DPSH_01	1465690.233	4326325.612	48.616
DPSH_02	1465871.894	4326158.125	48.289
DPSH_03	1466065.190	4326002.071	48.202
DPSH_04	1466289.796	4325881.178	48.258
DPSH_05	1465822.146	4326203.925	48.422
DPSH_06	1467010.657	4325894.374	48.185
DPSH_07	1466920.835	4325847.276	48.160



*Tabella 9.6 Coordinate con sistema di riferimento Gauss Boaga, Roma 1940, Ovest e quote espresse in m s.l.m. dei piezometri eseguiti nel 2022 presso le dighe in terra di Case Miais e Bavorada*

Piezometro	Gauss Boaga - Roma 40 Ovest		
	X-Est	Y-Nord	Quota (m s.l.m.)
Pz_C_02	1465571.365	4326436.818	48.732
Pz_C_04	1465656.666	4326358.104	48.756
Pz_C_06	1465777.748	4326246.348	48.501
Pz_C_08	1466020.464	4326034.927	48.148
Pz_C_10	1466376.665	4325849.006	48.228
Pz_C_12	1466847.631	4325810.104	48.205
Pz_C_14	1467038.477	4325910.012	48.154
Pz_C_16	1467204.373	4325990.384	48.249

*Tabella 9.7 Coordinate con sistema di riferimento Gauss Boaga, Roma 1940, Ovest espresse in m s.l.m. delle prove di portata eseguite nel 2022 presso le dighe in terra di Case Miais e Bavorada*

Prove di portata	Gauss Boaga - Roma 40 Ovest		
	X-Est	Y-Nord	Quota (m s.l.m.)
PB_01	1465991.069	4326013.896	41.861
PB_02	1466860.350	4325798.970	44.232

L'ENAS ha affidato alla stessa Ditta *Opere Geotecniche s.r.l.* un'ulteriore campagna di indagini integrative tra il 24 maggio e il 1° giugno 2022, che è consistita in:

- n. 3 sondaggi a spinti sino alla profondità di 3 m da p.c. utilizzando una carotatrice su slitta orientabile ad avanzamento manuale con catena (Sv1÷Sv3);
- n. 2 sondaggi integrativi dei sondaggi S03, S04 con distruzione di nucleo nei primi metri e poi a carotaggio continuo (approfondimento S03 da 26 fino a profondità di 31 m da p.c.);
- n. 1 sondaggio a carotaggio continuo con installazione di piezometro di tipo a tubo aperto spinto sino alla profondità di 10 m da p.c.;
- n. 2 sondaggi a carotaggio continuo con installazione di piezometri di tipo Casagrande spinti sino a profondità di 10 m da p.c.;
- prelievo di n. 7 campioni disturbati ed esecuzione di prove di laboratorio (prove di classificazione, prova di taglio CD, prova di consolidazione edometrica).

Durante questa fase non sono stati eseguiti rilievi topografici di dettaglio ma sono state restituite alcune coordinate e quote di massima, disponibili nelle stratigrafie di sondaggio.



*Tabella 9.8 Coordinate con sistema di riferimento Gauss Boaga, Roma 1940, Ovest, delle prove di portata eseguite nel 2022 presso le dighe in terra di Case Miais e Bavorada*

Prova penetrometrica dinamica	Gauss Boaga - Roma 40 Ovest		
	X-Est	Y-Nord	Quota m s.l.m.
S03 integrazione	1465965	4326076	48.26
S04	1466173	4325937	48.23
Sv1	1465636	4326349	-
Sv2	1465845	4326164	-
Sv3	1466083	4325979	-
PZC08BIS	1466020	4326034	48.14
PZC14B	1467038	4325990	-
PB03	1465894	4325889	-

## 10 MODELLO GEOLOGICO-GEOTECNICO

### 10.1 UNITÀ GEOLOGICO-GEOTECNICO DI RIFERIMENTO

Di seguito si descrivono le unità geologico-geotecniche dei terreni di fondazione delle dighe in terra in oggetto individuate grazie alle campagne di indagine eseguite.

#### Unità Riporto - R

L'unità del riporto costituisce i terreni che costituiscono il corpo arginale delle due dighe. Si tratta di terreni prevalentemente coesivi formati da limi ed argille-sabbiosi con rari ciottoli di colore marrone – nocciola, da moderatamente consistenti a consistenti, umidi. Talvolta sono presenti intervalli da centimetrici a metrici di ghiaie sabbiose limose.

La maggior parte dei sondaggi eseguiti nella campagna di indagine del 2022 dal coronamento delle due dighe in terra hanno individuato degli spessori di strati basali della pavimentazione stradale, costituita prevalentemente da pietrisco brecciato di natura calcarea e materiale incoerente sabbioso sciolto. Lo spessore di questi strati raggiunge anche i 2 m in corrispondenza dei sondaggi S03, S04 ed S09; in questo ultimo sondaggio, inoltre, sono presenti degli strati di pavimentazione pregressa formata da terreno costipato compatto. L'unità del "Riporto" comprende anche questi spessori.

#### Unità coltri eluvio colluviali – b<sub>2</sub>

Depositi eluvio colluviali costituiti da tessiture prevalentemente limose sabbiose con argilla e inclusioni di ghiaia, sono evidenti tracce di materiale organico in decomposizione. I depositi sono plastici e umidi di un colore bruno avana e verdastro, da molli e molto consistenti.

La presenza di questo strato non è continua in tutta l'area dell'impronta delle dighe: alcuni sondaggi e prove DPSH la incontrano (come il sondaggio S02, S03, S04, S05), mentre i sondaggi S01, S05, S08, S09, S07, PzC14 no.

#### Unità Sintema di Portovesme – PVM

Depositi alluvionali costituiti da ghiaie e ciottoli con dimensioni centimetriche (1-10 cm) poligenetici ed eterometrici, arrotondati e appiattiti in matrice sabbioso limosa di colore avana. Questa unità è ben rappresentata nelle stratigrafie dei sondaggi presso la diga di Case Miais S03, S04 e S05.

#### Unità Cappellaccio di alterazione delle Rioliti iperalcaline di Monte Ulmus – C. ULM

L'unità del cappellaccio di alterazione delle rioliti di Monte Ulmus è stata intercettata dai sondaggi S04, S05 e S06 presso la diga di case Miais e da tutti i sondaggi eseguiti presso diga Bavorada. Si tratta di rioliti fortemente o totalmente alterate con un colore beige o grigio chiaro. Le rioliti di Monte Ulmus sono rocce piroclastiche compatte formate principalmente da frammenti di piccole dimensioni (ceneri, pomici, vetri e lapilli) che, se alterate, possono trasformarsi in strati fortemente argillificati o strati sabbiosi con presenza di clasti centimetrici, come nel caso del cappellaccio di alterazione presente nei terreni di fondazione presso le dighe in oggetto (ad esempio tra 3.9 e 4.8 m da p.c. del S09).

#### Unità Rioliti iperalcaline di Monte Ulmus – ULM

Le Rioliti di Monte Ulmus sono state intercettate dal sondaggio S06 presso diga Case Miais e dai sondaggi eseguiti presso la diga Bavorada. Come si può osservare dalle indagini si tratta di rioliti in facies ignimbratica formate principalmente da frammenti vulcanici di origine esplosiva di piccole dimensioni (ceneri, pomici, vetri e lapilli), il colore varia tra il grigio chiaro, beige e rosa salmone pallido. Spesso si osservano strutture di flusso piroclastico con evidenze di vescicolazione. Le rioliti presentano un RQD variabile tra 30-80% con famiglie di fratture sub-orizzontali e a 45°, i giunti sono scabri e in alcuni casi ossidati con aperture dell'ordine di 0.5 cm prive di riempimento.

#### Unità Daciti di Matzaccara – MAZ

L'unità delle Daciti di Matzaccara è stata intercettata dal sondaggio S03 della campagna di indagine del 2022 e dal sondaggio Sond.1 BIS CASE MIAIS della campagna del 2015. Si tratta prevalentemente di rocce vulcaniche provenienti da attività esplosiva a composizione dacitica – riolitica. Queste rocce sono costituite da depositi di flusso piroclastici fratturati non saldati costituiti da brecce di vulcaniti di colore vinaccia con dimensioni centimetriche in una matrice sabbioso argillosa con un colore dal nocciola al rosso; ai depositi piroclastici si intervallano depositi epiclastici, andesiti lapidee molto alterate e fratturate, blocchi di lava nerastra massiva in matrice cineritica e argillificata. Nei livelli superiori della formazione sono presenti in cineriti chiare o rossicce molto alterate e argillificate (cappellaccio di alterazione).

#### Unità Andesiti di Monte Palmas - MPL

Le Andesiti di Monte Palmas sono state indagate dai sondaggi eseguiti a nord ovest della diga Case Miais (S01, S02). Si tratta di rocce lapidee di colore grigio o grigio ceruleo,

presentano RQD variabili tra 30 e 90% perciò in uno stato da buono a molto fratturato. Si distinguono varie famiglie di fratture con aperture anche decimetriche riempite di argilla di colore beige con immersa ghiaia di vulcanite, con giunti scabri ed alterati.

## 10.2 MODELLO DIGA CASE MIAIS

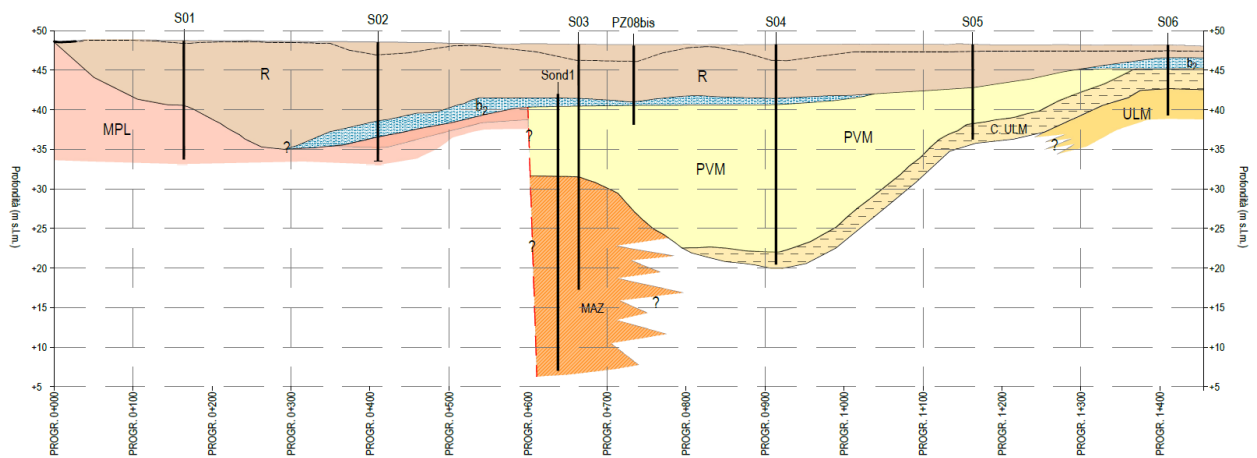
Osservando i sondaggi eseguiti in corrispondenza della diga di Case Miais, in occasione del Progetto di variante del 4° Lotto in data 20 luglio 1948, si osserva un netto cambio delle litologie tra i sondaggi E-Ebis ed E1.

- i sondaggi A1 ÷ E-Ebis trovarono in prevalenza rocce trachitiche fratturate e non fratturate alternate a tufi argillosi o a rocce tenerissime;
- i sondaggi E1 ÷ P, incontrarono terreni sciolti: nei primi 7 m circa, da quello che allora era il p.c., presenza di terreni fortemente argillosi con ciottoli, successivamente strati di argilla smectitica e arenacea fino a profondità anche molto elevate (quota 38.4 da boccaforo del sondaggio IM, quota 29.4 da boccaforo del sondaggio H) fino ad incontrare un substrato di rocce trachitiche alterate.

Inoltre, anche nella I° Relazione degli Atti di collaudo delle dighe dell'invaso di Monte Pranu si scrive: *“la diga di Case Miais per circa m. 2000, verso la estremità destra della diga, è fondata anziché su terreno argilloso su una formazione trachitica, più o meno alterata...”*.

Grazie alla campagna di indagine svolta nel 2022 è stato possibile interpretare con maggior sicurezza la stratigrafia geologico-geotecnica in corrispondenza della diga di Case Miais. Il profilo geologico geotecnico, perciò, è stato interpretato principalmente grazie alle informazioni dei sondaggi recenti e tenendo conto delle trivellazioni degli studi storici soltanto con uno sguardo generale.

Nella seguente Figura è schematizzato il profilo geologico-geotecnico della diga di Case Miais, profilo interpretativo integrale è raffigurato nella *Tavola D07 Profilo Case Miais*.



*Figura 10.1 Profilo geologico geotecnico schematico della diga a Case Miais (R=riporto, b<sub>2</sub>=coltri eluvio colluviali, PVM=Sintema di Portovesme, MAZ=Daciti di Matzaccara, C.ULM=cappellaccio di alterazione delle Rioliti di Monte Ulmus, ULM=Rioliti di Monte Ulmus )*

Il riporto (R), che costituisce il corpo della diga, ha uno spessore variabile in dipendenza con l'andamento topografico del piano campagna. Lo spessore del corpo diga infatti aumenta dalla prog. 0+000 fino ad un massimo di 13-14 m alla prog. 0+300 per poi diminuire gradualmente fino alla progressiva 0+600. Dalla prog. 0+600 lo spessore rimane pressoché costante (circa 6 m) fino alla prog. 1+200 in corrispondenza del sondaggio S05 (spessore dell'asfalto e il riporto di 5.4 m), per poi assottigliarsi e quasi scomparire in corrispondenza del S06.

Dalla prog. 0+000 alla prog. 0+600 il materiale del corpo diga poggia quasi interamente sul substrato roccioso delle Andesiti di Monte Palmas (MPL) mentre dalla 0+600 in poi, a causa della presenza di una probabile faglia poggia sui depositi alluvionali grossolani del Sintema di Portovesme (PVM). I depositi alluvionali hanno uno spessore variabile tra un minimo di 5 m in corrispondenza del S05 e un massimo di 18 m in corrispondenza del S04. I depositi alluvionali di Portovesme a loro volta poggiano con un contatto di tipo erosivo tra le prog. 0+600 e 0+800 sulle Daciti di Matzaccara (MAZ), individuate dai sondaggi S03 e Sond 1 BIS (2015) e sulle Rioliti iperalcaline di Monte Ulmus (cappellaccio, C.ULM e substrato compatto, ULM) in corrispondenza dell'S06 e l'S05.

La maggior parte dei sondaggi ha intercettato uno spessore nell'ordine metrico (1-3 m) di depositi di limo sabbioso argilloso debolmente ghiaioso (b<sub>2</sub>) tra il corpo diga e le litologie sottostanti. Questo strato, tuttavia, non è continuo per tutta la lunghezza della diga: nei primi 300 m della diga e tra le prog. 1+000 e 1+300 sembra assente.

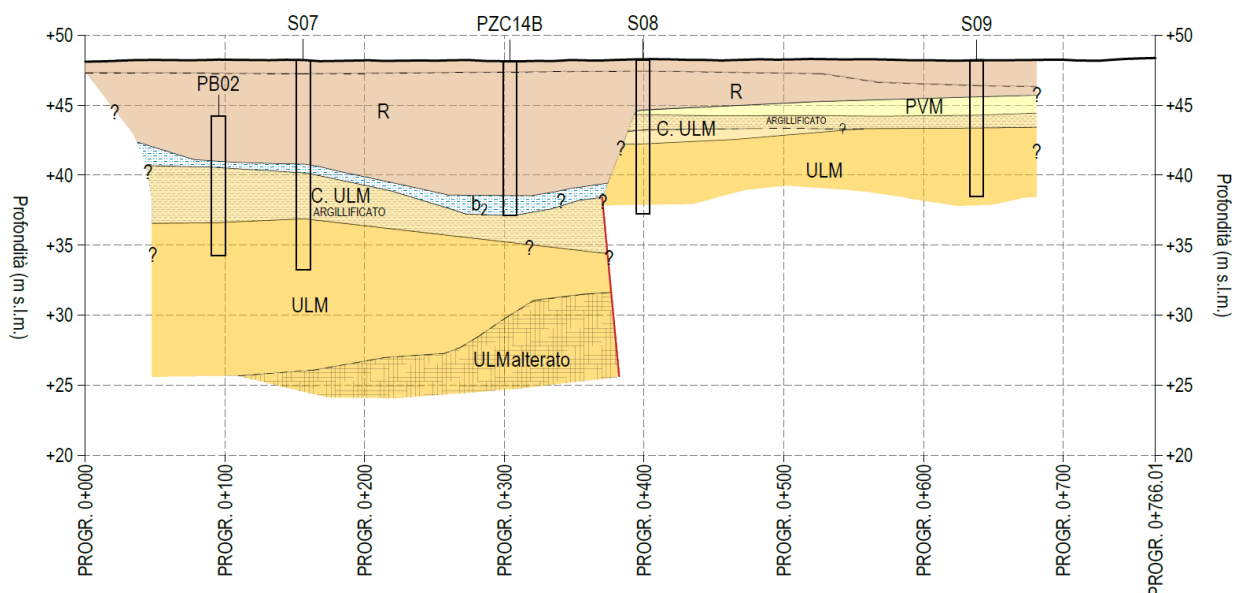
### 10.3 MODELLO DIGA BAVORADA

Durante la campagna di indagini storica svolta nel 1948 erano stati eseguiti 3 trivellazioni presso la diga Bavorada con lunghezze fino a 14 m. Le trivellazioni hanno individuato in quest'area la presenza di tufi arenacei alternati a spessori di argilla.

Grazie alla campagna di indagine svolta nel 2022 è stato possibile interpretare con maggior sicurezza la stratigrafia geologico geotecnica in corrispondenza della diga Bavorada.

Il profilo geologico geotecnico, perciò, è stato interpretato principalmente grazie alle informazioni dei sondaggi recenti e tenendo conto delle trivellazioni degli studi storici soltanto con uno sguardo generale.

Nella seguente Figura è schematizzato il profilo geologico-geotecnico della diga di Case Miais, profilo integrale è raffigurato nella *Tavola D08 Profilo Bavorada*.



*Figura 10.2 Profilo geologico geotecnico schematico della diga Bavorada (R=riporto- corpo diga,  $b_2$ = coltri eluvio colluviali, PVM=Sintema di Portovesme, C.ULM=cappellaccio di alterazione delle Rioliti di Monte Ulmus (argillificato))*

Dalla prog. 0+000 e la prog. 0+370 la stratigrafia è pressoché costante: uno spessore di circa 8 m di corpo arginale (R), 1 m circa di depositi di limo sabbioso argilloso debolmente ghiaioso e, infine, il substrato roccioso costituito dalle Rioliti iperalcaline di Monte Ulmus. Il substrato roccioso è caratterizzato nella parte più superficiale da un cappellaccio di alterazione argillificato (C.ULM).

Dalla progressiva 0+370 in poi la stratigrafia è definita dai sondaggi S08 e S09: il cappellaccio per lo più argillificato del substrato roccioso delle Rioliti di Monte Ulmus è stato

trovato alla quota di circa 44.5 m s.l.m. con uno spessore intorno a 1.5 m; al di sopra del substrato è presente uno strato di depositi alluvionali del Sistema di Portovesme (PVS) con uno spessore metrico. Lo spessore del corpo arginale composto sia dagli strati pregressi della pavimentazione stradale che da terreni di riporto rimane costante fino alla prog. 0+650.

## 11 RISULTATI DELLE INDAGINI

### 11.1 SONDAGGI GEOGNOSTICI

Le perforazioni eseguite confermano come nei terreni di fondazione delle dighe Case Miais e Bavorada siano presenti di depositi alluvionali e coltri eluvio colluviali che sovrastano un substrato di origine vulcanica spesso molto alterato.

Per le stratigrafie complete dei sondaggi si rimanda ai profili disegnati dal Ing. Salaris Antonio del Progetto di variante del 1948 e alle *Relazioni sulle indagini geognostiche* delle indagini geognostiche eseguite nelle campagne del 2015 e del 2022.

#### 11.1.1 Qualità dell'ammasso roccioso

Il Rock Quality Designation (RQD) è un parametro di classificazione proposto nel 1989 da D. U. Deere per stimare quantitativamente la qualità di un ammasso roccioso. Tale parametro è definito come la percentuale di frammenti di roccia più lunghi di 100 mm presenti sulla lunghezza totale del campione della manovra di carotaggio considerato:

$$RQD(\%) = \frac{\sum \text{lunghezza spezzoni materiale fresco} > 10 \text{ cm}}{\text{lunghezza totale della manovra di carotaggio}} \cdot 100$$

Dai valori di RQD ottenuti è possibile classificare la qualità della roccia come illustrato nella seguente Tabella, proposta da Deree (1989).

*Tabella 11.1 Classificazione della qualità dell'ammasso roccioso tramite il calcolo del parametro RQD (Deree, 1989)*

RQD (%)	Qualità dell'ammasso roccioso
<25	Molto scarsa
25-50	Scarsa
50-75	Discreta
75-90	Buona
90-100	Eccellente

Di seguito si riportano i valori di RQD misurati nelle carote in roccia per ciascun sondaggio geognostico nelle due dighe.



*Tabella 11.2 Qualità dell'ammasso roccioso, RQD dei sondaggi presso diga Case Miais*

Profondità (m da p.c.)	RQD (%) - S01	RQD (%) - S02	RQD (%) - Sond 1 Case Miais (2015)	RQD (%) - S06
6-7				90
7-8				90
8-9				80
9-10	50			
10-11	30			
11-12	60			
12-13	40			
13-14	90			
14-15	60	30		
27-28			25	
28-29			25	
29-30			25	
30-31			25	
31-32			25	
32-33			25	
33-34			25	

*Tabella 11.3 Qualità dell'ammasso roccioso, RQD dei sondaggi presso diga Bavorada*

Profondità (m da p.c.)	RQD (%) - PB02	RQD (%) - S07	RQD (%) - S08	RQD (%) - S09
5-6				80
6-7	30		80	40
7-8	70		70	20
8-9	90		90	
9-10	80		40	
10-11				
11-12		50		
12-13		80		
13-14		70		
14-15		60		

#### 11.1.2 Prove di permeabilità di tipo Lefranc

In occasione dell'esecuzione dei sondaggi eseguiti nella campagna di indagini dell'anno 2022 sono state eseguite delle prove di permeabilità per immissione di carico variabile di tipo Lefranc i cui risultati nella loro interezza sono riportati nell'*All. 08 Prove Lefranc*.

Le seguenti Tabelle riportano i valori della conducibilità idraulica media  $k$  (m/s) durante le prove eseguite suddivise per le due dighe ed è indicata l'unità geologico geotecnica di riferimento sulla quale è stata eseguita la prova.

*Tabella 11.4 Valori della conducibilità idraulica media  $k$  (m/s) eseguite durante i sondaggi presso la diga Bavorada*

Sigla sondaggio	Sigla prova	Quota (m da p.c.)	Valore medio $k$ (m/s)	Unità geologico – geotecnica
S07	S07_LF4	10.75 ÷ 11.25	1.21 E-06	C.ULM
S09	S09_LF2	4.50 ÷ 5.00	2.58 E-07	C.ULM
S07	S07_LF1	2.90 ÷ 3.50	2.71E-07	R
S07	S07_LF2	4.50 ÷ 5.10	7.18E-06	R
S07	S07_LF3	6.50 ÷ 7.10	4.73E-07	R
S08	S08_LF1	2.30 ÷ 2.80	1.56E-07	R
S08	S08_LF2	3.00 ÷ 3.60	1.60E-07	R
S09	S09_LF1	1.50 ÷ 2.00	2.23E-06	R
S08	S08_LF3	6.00 ÷ 6.50	7.04 E-08	ULM

*Tabella 11.5 Valori della conducibilità idraulica media  $k$  (m/s) eseguite durante i sondaggi presso la diga Case Miais*

Sigla sondaggio	Sigla prova	Quota (m da p.c.)	Valore medio $k$ (m/s)	Unità geologico – geotecnica
S06	S06_LF1	0.90 ÷ 1.40	1.92E-04	R
S01	S01_LF4	10.5 ÷ 12.3	1.96 E-04	MPL
S02	S02_LF3	12.0 ÷ 12.5	4.02 E-07	MPL
S03	S03_LF3	8.85 ÷ 9.35	3.23 E-05	PVM
S04	S04_LF3	9.00 ÷ 9.50	1.44 E-07	PVM
S05	S05_LF3	7.70 ÷ 8.20	2.18 E-04	PVM
S01	S01_LF1	2.50 ÷ 3.00	1.90 E-05	R
S01	S01_LF2	6.30 ÷ 6.80	1.96 E-06	R
S01	S01_LF3	8.50 ÷ 9.00	1.75 E-04	R
S02	S02_LF1	4.50 ÷ 5.00	1.05 E-06	R
S02	S02_LF2	7.20 ÷ 7.70	9.56 E-08	R
S03	S03_LF1	2.70 ÷ 3.20	2.19 E-06	R
S03	S03_LF2	4.50 ÷ 5.00	3.18 E-06	R
S04	S04_LF1	3.00 ÷ 3.50	7.66 E-07	R
S04	S04_LF2	4.90 ÷ 5.50	2.08 E-06	R
S05	S05_LF1	2.95 ÷ 3.45	2.11 E-09	R
S05	S05_LF2	4.50 ÷ 5.00	8.28 E-05	R
S06	S06_LF2	4.20 ÷ 4.70	1.58 E-09	ULM

## 11.2 PROVE DI LABORATORIO

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono stati prelevati dei campioni sui quali sono state eseguite alcune prove di classificazione sui campioni di terreno, prove Point Load Test, prove edometriche e prove di taglio diretto.

### 11.2.1 Prove di classificazione fisica dei terreni

La classificazione dei terreni è stata ottenuta dai risultati delle prove granulometriche di laboratorio.

Nella seguente Figura è rappresentata la granulometria dell'unità del riporto (R).

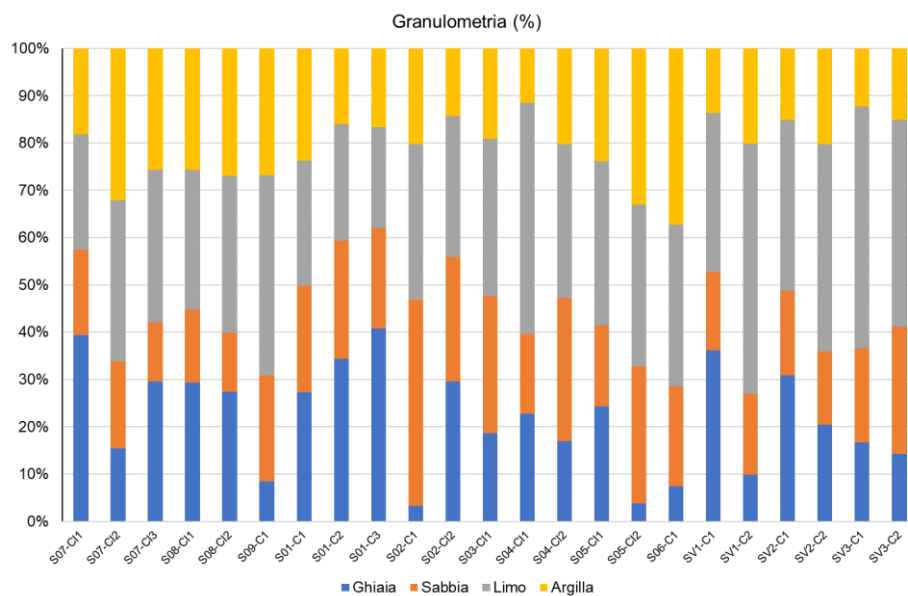


Figura 11.1 Granulometria dei terreni relativi ai campioni eseguiti nell'unità del riporto (R)

Nella seguente Figura è rappresentata la granulometria dell'unità delle coltri eluvio colluviali (b<sub>2</sub>).

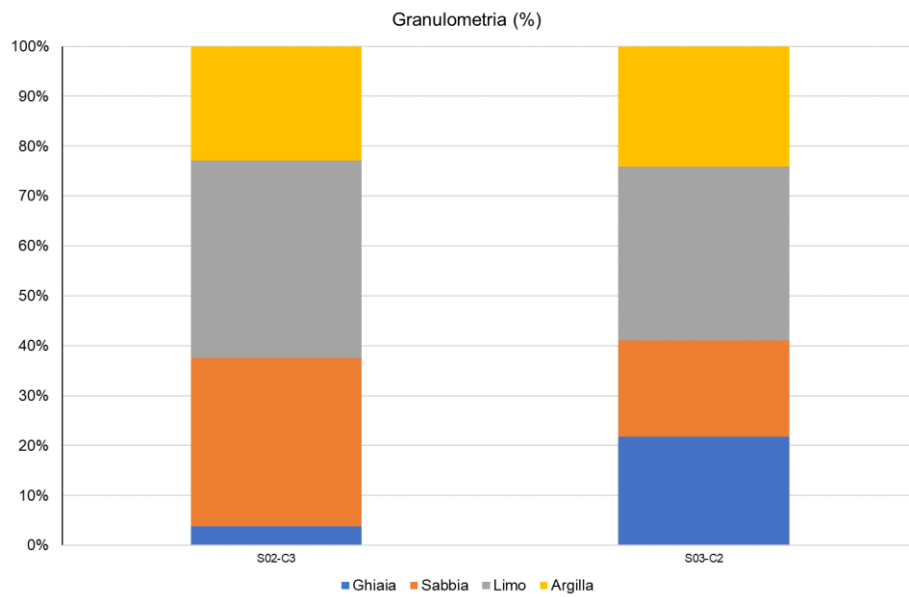


Figura 11.2 Granulometria dei terreni relativi ai campioni eseguiti nell'unità  $b_2$  delle coltri eluvio colluviali

Nella seguente Figura è rappresentata la granulometria nell'unità del cappellaccio delle Rioliti di Monte Ulmus (C.ULM).

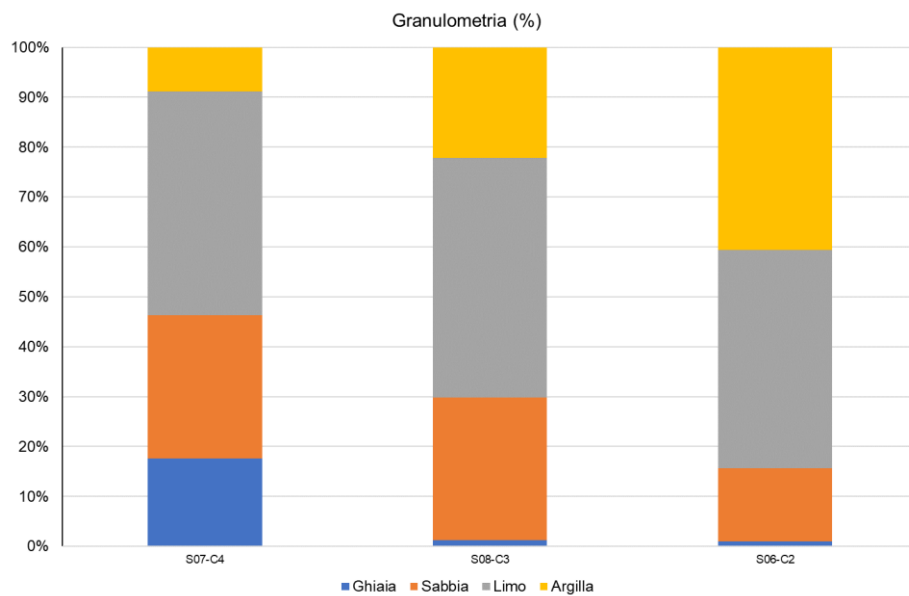
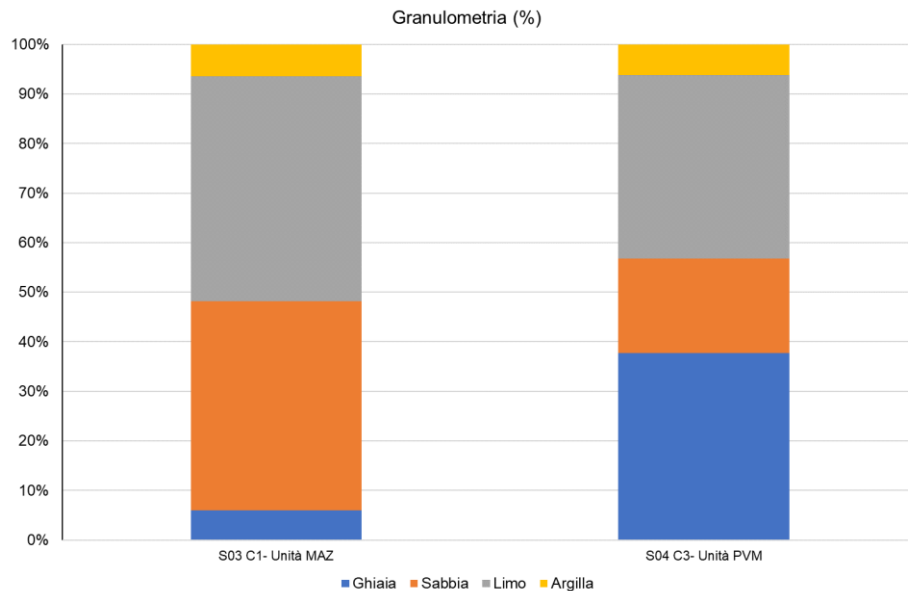


Figura 11.3 Granulometria dei terreni relativi ai campioni eseguiti nell'unità del cappellaccio delle Rioliti di Monte Ulmus (C.ULM)

Nella seguente Figura è rappresentata la granulometria della parte alterata dell'unità delle Daciti di Matzaccara (MAZ) e del Sintema di Portovesme (PVM).



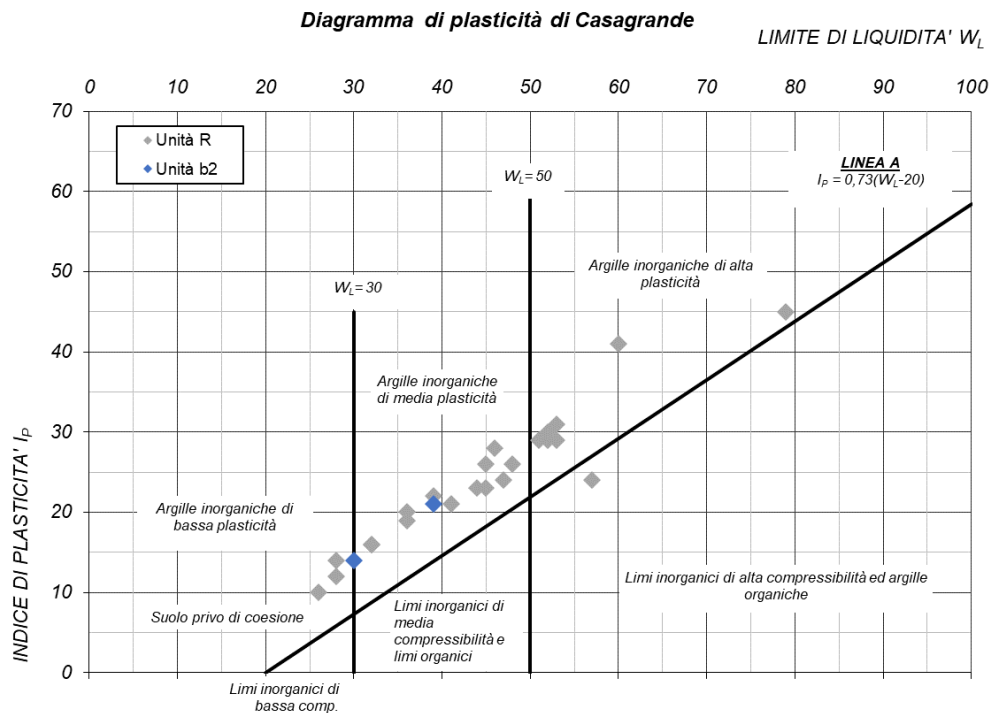
*Figura 11.4 Granulometria dei terreni relativi ai campioni eseguiti nelle unità delle Daciti di Matzaccara (MAZ) e l'unità dei depositi del Sintema di Portovesme (PVM)*

La determinazione dei parametri fisici è stata effettuata facendo riferimento ai risultati alle prove di laboratorio:

- limiti di Atterberg (limite liquido, limite plastico, indice di plasticità);
- pesi di volume naturale;
- grado di saturazione;
- contenuti d'acqua naturale;
- indice dei vuoti iniziale.

Per l'elenco completo dei risultati delle prove di laboratorio si rimanda all'Allegato 1 mentre nella seguente Figura è presentata la Carta di plasticità di Casagrande per le unità del riporto e delle coltri eluvio colluviali.





**Figura 11.5 Carta di plasticità di Casagrande**

### 11.2.2 Prove edometriche

Nella Tabella seguente si riportano i risultati delle prove edometriche eseguite sui campioni estratti durante l'esecuzione dei sondaggi eseguiti nel 2022. Le prove sono state eseguite sia su campioni indisturbati (CIX) che su campioni parzialmente rimaneggiati (CX).

*Tabella 11.6 Risultati delle prove edometriche eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi durante la campagna di indagini 2022*

Diga	Sondaggio	Campioni	Profondità campioni		Unità geologico geotecnica	Prova edometrica					
			Z <sub>in</sub>	Z <sub>fin</sub>		e <sub>0</sub>	C <sub>r</sub>	C <sub>c</sub>	M	c <sub>v</sub>	K <sub>ED</sub>
			(m)	(m)		(-)	(-)	(-)	(MPa)	(m/s)	(m/s)
Case Miais	S03	C1	27.30	27.60	MAZ	1.32	0.050	0.24	7.1	3.8E-08	5.4E-11
Case Miais	S03	Cl1	4.50	5.00	R	0.47	0.017	0.10	7.3	2.4E-08	3.3E-11
Case Miais	S04	Cl1	2.50	2.90	R	0.47	0.027	0.13	4.5	5.3E-08	1.1E-10
Case Miais	S05	Cl1	3.10	3.45	R	0.54	0.027	0.13	4.8	3.7E-08	6.9E-11
Bavorada	S07	Cl3	6.50	7.10	R	0.74	0.070	0.18	2.5	1.5E-08	8.6E-11
Bavorada	S08	Cl2	3.10	3.60	R	0.67	0.017	0.19	8.3	1.6E-08	2.9E-11
Case Miais	SV1	C2	2.50	3.00	R	0.37	0.007	0.13	9.8	5.1E-08	4.5E-11
Case Miais	SV2	C1	1.50	2.00	R	0.35	0.003	0.11	16.9	4.7E-08	3.0E-11
Case Miais	SV2	C2	2.35	3.00	R	0.44	0.007	0.15	17.9	3.8E-08	3.0E-11
Case Miais	SV3	C2	2.50	3.00	R	0.46	0.010	0.13	12.1	3.1E-08	6.2E-11

### 11.2.3 Prove di taglio diretto

Nella Tabella seguente si riportano i risultati delle prove di taglio diretto eseguite sui campioni estratti durante l'esecuzione dei sondaggi eseguiti nel 2022.

*Tabella 11.7 Risultati delle prove di taglio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi durante la campagna di indagini 2022*

Diga	Sondaggio	Campioni	Profondità campioni		Unità geologico geotecnica	Prova di taglio diretto (CD)	
			Z <sub>in</sub>	Z <sub>fin</sub>		φ'	c'
			(m)	(m)		(°)	(kPa)
Case Miais	S01	C2	5.80	6.00	R	30	18
Case Miais	S02	C3	11.00	11.70	A	28	8
Case Miais	S02	CI2	7.10	7.60	R	26	14
Case Miais	S03	CI1	4.50	5.00	R	30	15
Case Miais	S04	C3	13.00	13.70	PVM	34	10
Case Miais	S04	CI2	4.50	5.00	R	31	15
Case Miais	S05	CI2	4.50	5.00	R	30	16
Case Miais	S06	C2	3.10	3.45	C.ULM	25	8
Case Miais	S06	C1	1.10	1.35	R	24	38
Bavorada	S07	C4	10.20	10.55	C.ULM	34	16
Bavorada	S07	CI1	3.10	3.50	R	25	5
Bavorada	S07	CI2	4.70	5.10	R	22	15
Bavorada	S08	C3	6.00	6.50	C.ULM	32	10
Bavorada	S08	CI1	2.50	2.80	R	23	23
Case Miais	SV1	C2	2.50	3.00	R	25	20
Case Miais	SV2	C1	1.50	2.00	R	27	34
Case Miais	SV2	C2	2.35	3.00	R	27	36
Case Miais	SV3	C2	2.50	3.00	R	27	25

### 11.2.4 Point Load Test

Sono state eseguite prove Point Load Test su 2 campioni estratti dalle carote dei sondaggi S03 e S06, che hanno consentito una stima della resistenza a compressione uniassiale.

La prova viene condotta posizionando i campioni di roccia tra due punte coniche di acciaio e comprimendoli fino a rottura. Un manometro permette di leggere il valore del carico applicato quando avviene la rottura del campione, mentre un'asta graduata consente la lettura dello spessore del campione prima che avvenga la compressione.

La prova eseguita nel campione di roccia vulcanica C4 prelevato dal sondaggio S03 alla profondità di 13 m da p.c. ha restituito un valore dell' $I_{s50}$  pari a 2.03 MPa, mentre quella eseguita sul campione di roccia vulcanica C3 prelevato dal sondaggio S06 alla profondità di 8.10 m da p.c. un valore di  $I_{s50}$  pari a 0.57.

È possibile calcolare il valore della resistenza a compressione uniassiale come proposta dalla ASTM D5731-07 attraverso la seguente relazione:

$$\sigma_c = (\text{UCS} =) k I_{s(50)}$$

dove:

- $I_{s(50)}$  è il Point Load Strength Index calcolato a partire dal  $I_s$  (Uncorrected Point Load Strength Index) calcolato attraverso la formulazione  $I_s = P/D_e^2$ , dove  $P$  è il carico di rottura e  $D_e$  è il diametro equivalente espresso in mm, variabile tra le prove assiali ( $D_e^2 = D$ ) e diametrali ( $D_e^2 = 4A/\pi$ ).
- $k$  è un fattore correttivo, variabile generalmente tra un valore di 14 e 25. Palmstrom (1995) associa la variabilità del parametro  $k$  ai valori dell' $I_{s(50)}$  e a quello della  $\sigma_c$  come descritto nella seguente Tabella.

TABLE A3-6 SUGGESTED VALUE OF THE FACTOR  $k_{50}$  VARYING WITH THE STRENGTH OF THE ROCK

$\sigma_c$ (MPa)	$I_{s50}$ (MPa)	$k_{50}$
25 <sup>*)</sup> - 50	1.8 - 3.5	14
50 - 100	3.5 - 6	16
100 - 200	6 - 10	20
> 200	> 10	25

<sup>\*)</sup> Bieniawski (1973) suggests that point load strength test are not carried out on rocks having compressive strength less than approximately 25 MPa.

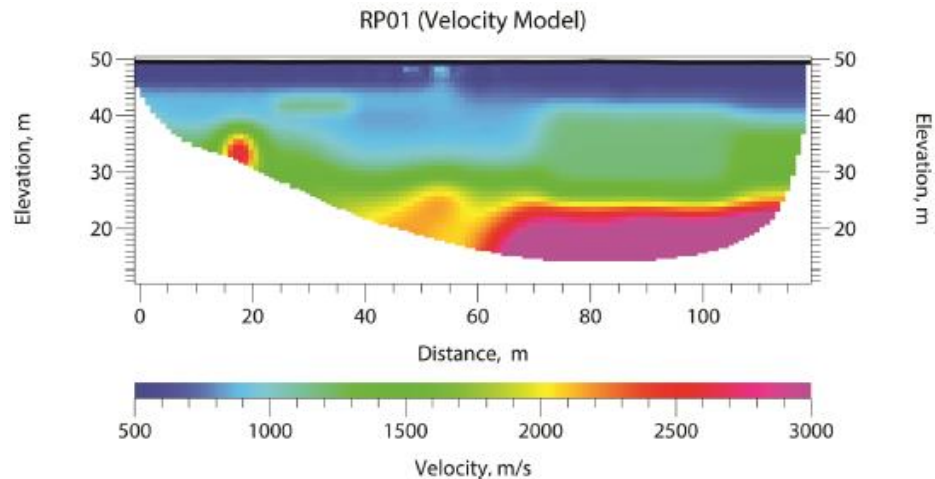
*Figura 11.6 Valori del fattore  $k$  ( $k=k_{50}$ ) variabile con la resistenza della roccia (Palmstrom, 1995)*

Utilizzando un fattore correttivo  $k$  pari a 14 la resistenza a compressione uniassiale per il campione estratto dal S03 è pari a 28 MPa, mentre per quello estratto dal sondaggio S06 è pari a 8 MPa.

### 11.3 PROVE GEOFISICHE DI SUPERFICIE

Durante la campagna di indagini svolta a marzo 2022 sono state eseguite delle indagini geofisiche di sismica a rifrazione e di sismica per la stima delle  $V_{seq}$ .

Per le indagini di sismica a rifrazione sono stati restituiti n. 5 profili di tomografia sismica in onde longitudinali P, n. 2 nell'area di Bavorada (RP04, RP05) e n. 3 nell'area di Case Miais (RP01, RP02, RP03).



Sono state inoltre eseguite 3 prove di sismica passiva per la stima delle onde S, una presso la diga Bavorada (RS) e 2 nell'area di Case Miais (RS).

#### 11.4 PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE (DPSH)

Le prove penetrometriche dinamiche DPSH sono state eseguite tramite l'utilizzo di un penetrometro cingolato, statico 200 kN dinamico DPSH (Dynamic Probing Super Heavy) con massa battente 63.5 kg e volata 75 cm.

La prova penetrometrica dinamica (DP) consiste nell'infiggere verticalmente nel terreno una punta conica metallica posta all'estremità di un'asta di acciaio prolungabile con l'aggiunta di successive aste. L'infissione avviene per battitura, facendo cadere da un'altezza costante un maglio di dato peso. Si contano quindi i colpi necessari per la penetrazione di ciascun tratto di lunghezza stabilita. La resistenza del terreno è funzione inversa della penetrazione per ciascun colpo e, diretta del numero di colpi ( $N_{DP}$ ) per una data penetrazione.

Durante la campagna di indagini del 2022 sono state eseguite 7 prove penetrometriche dinamiche sui corpi delle due dighe, spesso con un preforo di circa 2 m. La maggior parte delle DPSH hanno riscontrato dei numeri di colpi tra 1 e 11 con una media di 2-3 in corrispondenza dei riporti che costituiscono i corpi diga. In corrispondenza dei depositi colluviali ed eluviali, dove i terreni sono in prevalenza limi sabbiosi debolmente argillosi, il numero dei colpi tende ad aumentare con la profondità, fino a quando non si raggiunge il rifiuto in corrispondenza del substrato roccioso o del cappellaccio di alterazione del substrato roccioso. Le DPSH 3 e DPSH

4 raggiungono il rifiuto in corrispondenza alla presenza di depositi alluvionali in prevalenza ghiaiosi.



## 12 MODELLO GEOTECNICO DI RIFERIMENTO

Si riportano nella seguente tabella il modello geotecnico di riferimento assunto per le verifiche ai sensi delle NTC 18, esplicitando i parametri caratteristici delle varie unità individuate dalle indagini

*Tabella 12-1: Stratigrafia di calcolo e parametri geotecnici caratteristici - Modello Geotecnico*

Unità	$\gamma/\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'_k$ (°)	$c'_k$ (kPa)	k (m/s)
Corpo diga (R)	19/9	25	15	1x10 <sup>-5</sup>
depositi eluvio colluviali (b <sub>2</sub> )	18/8	27	5	1x10 <sup>-5</sup>
Depositi alluvionali (PVM)	19/9	0	33	5x10 <sup>-5</sup>
Rioliti alterate (C. ULM)	21/11	32	5	3x10 <sup>-6</sup>
Rioliti (ULM)	25/15	38	20	3x10 <sup>-6</sup>
Andesiti alterate (MPL)	21/11	35	0	2x10 <sup>-6</sup>
Andesiti (MPL)	25/15	38	10	2x10 <sup>-6</sup>

Dove:

- $\gamma/\gamma'$  peso di volume del terreno / peso di volume immerso del terreno
- $\phi'_k$  valore caratteristico angolo di resistenza al taglio efficace
- $c'_k$  valore caratteristico coesione in condizioni drenate efficace
- k coefficiente di permeabilità

I valori dei parametri di resistenza che verranno utilizzati nelle verifiche di sicurezza sono in termini di tensioni efficaci e sono stati assunti in modo cautelativo a partire principalmente dai risultati delle prove di laboratorio.

Per quanto riguarda i valori di permeabilità si sono operate le seguenti scelte:

- Corpo diga: è stato assunto un valore prossimo alla media delle prove Lefranc;
- Coltri eluvio colluviali: non si hanno a disposizione prove di permeabilità per tale unità, ma dalle granulometrie si nota che i fusi granulometrici sono simili a quelli eseguiti sui campioni nel corpo diga e quindi si assume la stessa permeabilità;
- Depositi alluvionali: è stato assunto un valore intermedio tra la permeabilità ricavata dalla prova di pompaggio e la media dei risultati delle prove Lefranc eseguite in tale strato;
- Rioliti: dalle carte idrogeologiche è indicato che per tale unità la permeabilità è compresa tra 1.6x10<sup>-5</sup> e 1.6x10<sup>-6</sup> m/s, mentre la prova di pompaggio ha evidenziato una permeabilità di 3x10<sup>-6</sup> m/s e le prove Lefranc permeabilità minori;

- Andesiti: dalle carte idrogeologiche è indicato che per tale unità la permeabilità è pari a circa  $2 \times 10^{-5}$ , mentre le due prove Lefranc hanno individuato permeabilità notevolmente discordanti ( $2 \times 10^{-4}$  m/s e  $4 \times 10^{-7}$  m/s).

Tali valori di permeabilità delle varie unità simulano nei modelli di calcolo le condizioni piezometriche individuate dal monitoraggio piezometrico.

## 13 STUDI SISMICI DELL'AREA

In questa sezione è presentata una raccolta di dati bibliografici per la definizione sismica di base, ottenuta dai database INGV, ISPRA che sono supportati da portali e che delineano le più importanti informazioni geologico-strutturali e sismiche dell'area in studio (ITHACA, DISS, Catalogo Parametrico dei terremoti italiani, zonazione sismogenetica ZS9).

### 13.1 INGV, ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

#### Database macrosismico italiano (Locati et al., DBMI15 v.4.0, 2022)

Il Database macrosismico DBMI v4.0 fornisce un set di dati di intensità macrosismica relativo ai terremoti italiani, aggiornato alla finestra temporale 1000-2020. I dati provengono da studi di autori ed enti diversi, sia italiani che di paesi confinanti (Francia, Svizzera, Austria, Slovenia e Croazia).

In generale dalla consultazione del database si nota che l'area interessata dal progetto presenta una sismicità molto bassa; infatti, nell'estratto nella seguente Figura si può osservare la presenza di eventi con intensità medio bassa in tutta la Sardegna. L'evento più vicino al sito in studio si trova nei pressi del centro abitato di Giba (intensità 2-3, Mw 4.7) avvenuto in occasione del terremoto con area epicentrale nel Tirreno centrale nell'anno 2000.

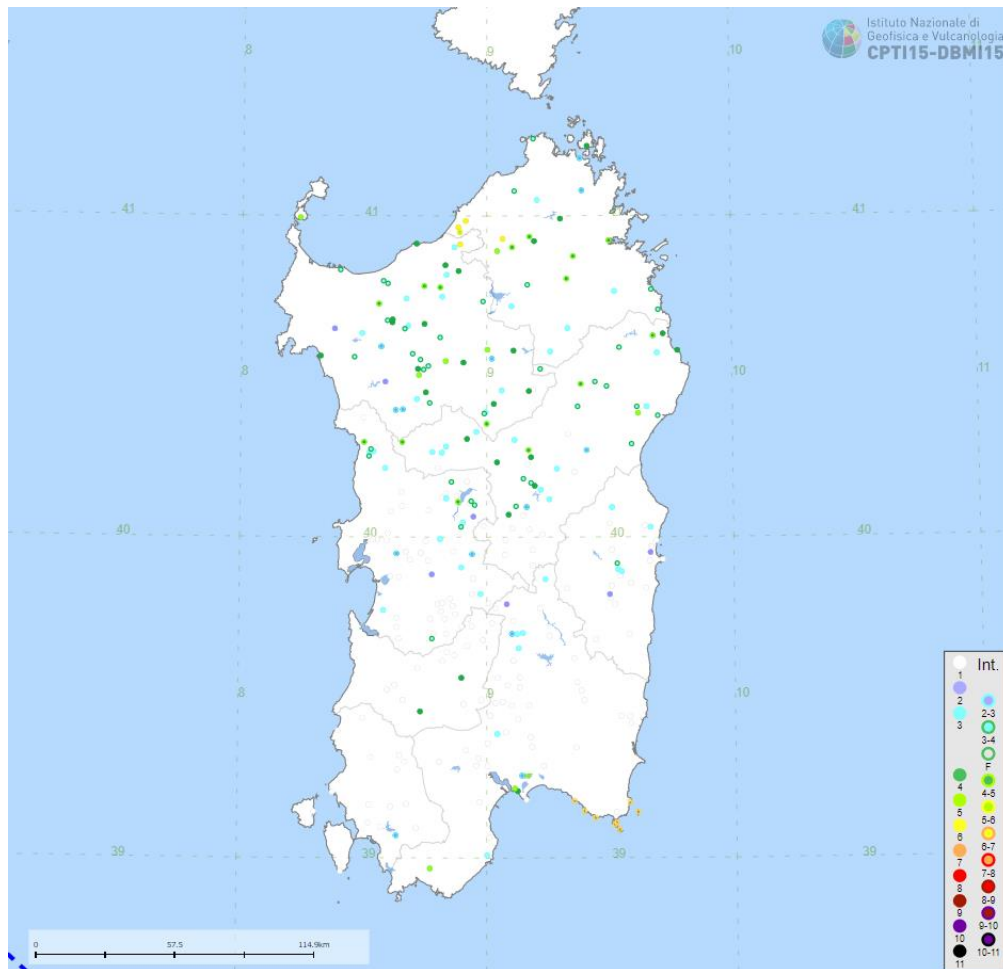


Figura 13.1 Estratto con la localizzazione degli epicentri dei terremoti storici avvenuti in Sardegna (INGV, Caralogo DBMI15)

#### INGV, zonazione sismogenetica ZS9- App.2 al Rapporto Conclusivo

In sostituzione alla vecchia “zonazione sismogenetica ZS4”, che era il punto di riferimento per la maggior parte delle valutazioni di pericolosità sismica nell’area italiana, è stato redatto da Meletti et al. (2004) il rapporto conclusivo che ha definito la “zonazione sismogenetica ZS9” per la redazione della mappa di pericolosità sismica. Questo progetto ha raccolto il background della zonazione ZS4 integrandolo con informazioni provenienti dal DISS 2.0 (Database of Individual Seismogenic Sources) e da informazioni raccolte in seguito ai recenti terremoti per creare un modello che: superasse il problema delle ridotte dimensioni delle zone-sorgente e della conseguente limitatezza del campione di terremoti che ricade in ciascuna di esse; fornisse una stima di profondità “efficace”, definita come l’intervallo di profondità nel quale viene rilasciato il maggior numero di terremoti in ogni zona-sorgente, utilizzabile in combinazione con le relazioni di attenuazione determinate su base regionale e, infine, che

fornisse per ogni Zona Sismica un meccanismo di fagliazione prevalente, utilizzabile in combinazione con le relazioni di attenuazione modulate sulla base dei coefficienti proposti da Bommer et al. (2003).

Consultando la nuova zonazione SZ9 l'area oggetto in studio non ricade all'interno di nessuna sorgente sismogenetica poiché a causa della bassa sismicità della regione risulta difficile individuare nessuna sorgente.

### 13.2 ITHACA, CATALOGO DELLE FAGLIE ATTIVE E CAPACI

Il portale Ithaca ITHACA è il catalogo delle faglie attive e capaci in Italia. Si tratta di una collezione delle informazioni disponibili su questo tipo di faglie che interessano il territorio italiano, redatta sulla base di una revisione critica della letteratura disponibile.

Una faglia è definita *attiva* quando si è attivata almeno una volta negli ultimi 40.000 anni (parte alta del Pleistocene Sup. - Olocene) e *capace* quando la faglia attiva raggiunge la superficie topografica, producendo una frattura/dislocazione del terreno e quindi quando ritenuta in grado di produrre, entro un intervallo di tempo di interesse per la società, una deformazione/dislocazione della superficie del terreno, e/o in prossimità di essa. La deformazione attesa può essere sia una dislocazione ben definita lungo un piano di rottura (fault displacement/offset) che una deformazione distribuita (warping).

La riattivazione attesa viene definita in funzione del regime tettonico in atto, rispetto al quale deve essere compatibile. Elementi secondari possono però mostrare rotture "anomale", ad esempio movimenti compressivi in un ambiente distensivo, a causa di geometrie locali delle strutture riattivate.

Le faglie capaci, come definite sopra, possono determinare un significativo pericolo di danneggiamento di strutture antropiche. La pericolosità può essere caratterizzata in termini di Probabilistic Fault Displacement Hazard o Deterministic Fault Displacement Hazard.

L'area in studio non intercetta faglie capaci ma, le faglie attive e capaci più vicine sono riportate nella Figura seguente e sono:

- Faglia di Maladroxia del Golfo del Bacino di Palmas a circa 12 km a sud ovest del sito in studio. Si tratta di una faglia sepolta con una lunghezza di 25.5 km, uno strike di 5° e una dip direction E; la sua ultima attività è datata Pleistocene Medio (125.000- 700.000 anni fa);
- Faglia Sarroch 1 del Graben di Campidano a una trentina di km a nord est del sito in oggetto. Si tratta di una faglia con strike 340°, subverticale e con immersione ENE



con una profondità e cinematisimo normale; è una faglia sepolta la cui ultima attività è datata Pleistocene.

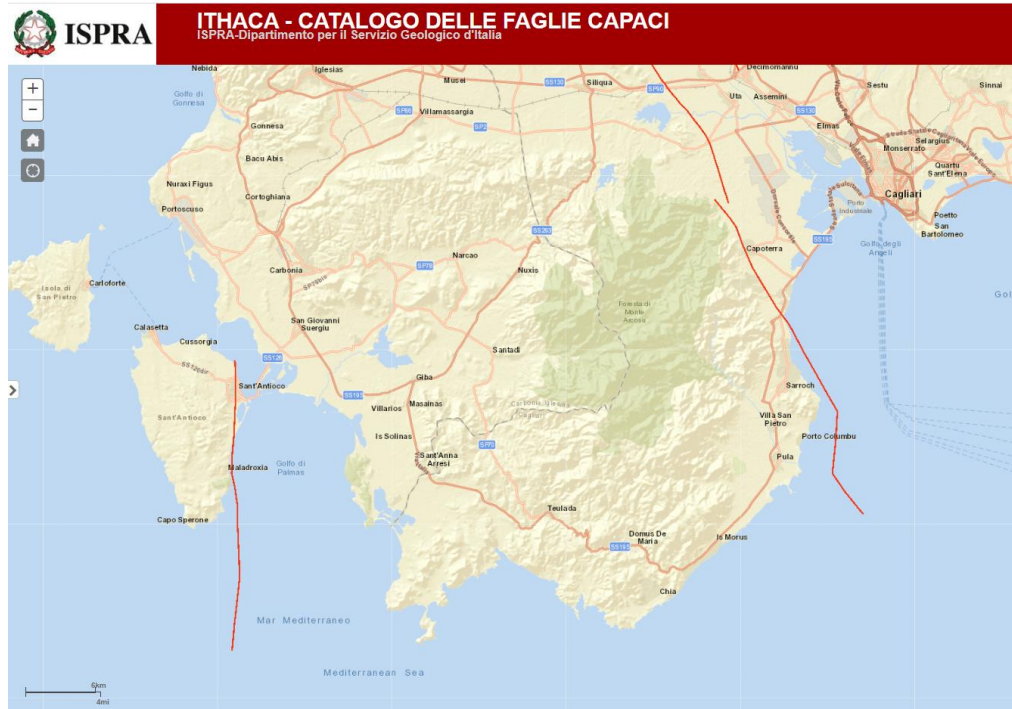


Figura 13.2 Ubicazione delle faglie attive e capaci nella Sardegna del sudoccidentale (ISPRA)

## 14 INQUADRAMENTO SISMICO

### 14.1 AZIONE SISMICA DI PROGETTO

Nel presente capitolo si riporta lo studio finalizzato alla definizione della azione sismica di progetto definita in termini di accelerazioni massime orizzontali.

La pericolosità sismica di un sito è descritta dalla probabilità che, in un fissato lasso di tempo, in un sito di riferimento, un parametro che descrive il moto sismico superi un valore prefissato. Nelle NTC 2018, tale lasso di tempo, espresso in anni, è denominato “periodo di riferimento”  $V_R$  e la probabilità è denominata “probabilità di eccedenza o di superamento nel periodo di riferimento”  $P_{VR}$ .

Ai fini della determinazione delle azioni sismiche di progetto nei modi previsti dalle NTC, la pericolosità sismica del territorio nazionale è definita convenzionalmente facendo riferimento ad un sito rigido (di categoria A) con superficie topografica orizzontale (di categoria T1), in condizioni di campo libero, cioè in assenza di manufatti. Successivamente risulta necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale, dipendente dalle caratteristiche del terreno di fondazione e dalla morfologia dell'area.

### 14.2 ACCELERAZIONE ORIZZONTALE MASSIMA SU SUOLO RIGIDO

Le NTD al paragrafo H.3.4.1. indicano di assumere per le dighe esistenti, salvo particolari situazioni, una vita nominale  $V_N$  pari a 50 anni. Inoltre, considerando che la diga appartenga alla categoria “rilevante”, il coefficiente d'uso indicato per le dighe esistenti per tale categoria è pari ad 1.5.

Le azioni sismiche attese vengono valutate in relazione al periodo di riferimento  $V_R$ :

$$V_R = V_N \times C_U = 50 \times 1.5 = 75 \text{ anni}$$

Con riferimento al D.M. Infrastrutture 17 gennaio 2018, sono stati determinati i parametri sismici di progetto per la realizzazione delle opere previste. In particolare, sulla base delle Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 e dei dati relativi al progetto S1 dell'INGV-DPC, per tutto il territorio della Sardegna si assumono i parametri spettrali contenuti nella tabella 2 dell'allegato Isole. Per i valori di  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$ , necessari per la determinazione delle azioni sismiche, si fa riferimento agli Allegati A e B al Decreto del Ministro delle Infrastrutture 14 gennaio 2008 (come previsto dalle NTC 2018 cfr. paragr. 3.2). I parametri forniti possono essere direttamente utilizzati per la ricostruzione degli spettri di risposta del sito e, quindi, per la progettazione di tutte le opere previste in conformità con le vigenti normative a livello nazionale.

Tabella 14-1 - Parametri di riferimento del moto sismico in superficie per i differenti periodi di ritorno ( $T_R$ ) considerati validi per tutto il territorio della Sardegna (da NTC2008, come previsto dalle NTC2018)

$T_R$ anni	$a_g$ g	$F_0$ -	$T_c^*$ s
30	0.186	2.61	0.273
50	0.235	2.67	0.296
72	0.274	2.70	0.303
101	0.314	2.73	0.307
140	0.351	2.78	0.313
201	0.393	2.82	0.322
475	0.500	2.88	0.340
975	0.603	2.98	0.372
2475	0.747	3.09	0.401

Lo SLV, caratterizzato da possibilità di superamento pari al 10%, relativo ad un periodo di riferimento  $V_R$  di 75 anni è caratterizzato da un periodo di ritorno  $T_R$  pari a 712 anni.

Assumendo cautelativamente un periodo di ritorno  $T_R$  pari a 975 anni, l'accelerazione orizzontale massima  $a_g$  attesa su sito di riferimento rigido risulta, con riferimento allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV), pari a:

$$a_g = 0.0603 \text{ g}$$

### 14.3 RISPOSTA SISMICA LOCALE

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale che, secondo un approccio semplificato, consiste nell'individuazione di categorie di sottosuolo e categorie topografiche di riferimento.

Per quanto riguarda le categorie di sottosuolo è possibile fare riferimento alla Tab. 3.2 III delle NTC 2018, come riportato nella seguente Tabella.

Tabella 14-2 Categorie di sottosuolo, NTC 2018

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>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.

Ad ogni categoria viene associato un valore di un coefficiente di amplificazione stratigrafica  $S_S$  (Tab. 3.2.IV).

Per l'individuazione della categoria di suolo di fondazione si fa riferimento alle 3 indagini geofisiche sismiche effettuate nella campagna di indagini del 2022. I valori delle  $V_{s,eq}$  ricavati dalle prove RS01, RS02, RS03 sono i seguenti:

$$V_{s,eq} \text{ RS01} = 241 \text{ m/s}$$

$$V_{s,eq} \text{ RS02} = 247 \text{ m/s}$$

$$V_{s,eq} \text{ RS03} = 270 \text{ m/s}$$

Dato che generalmente il substrato roccioso risulta presente a profondità minori di 30 m dal p.c., la categoria di sottosuolo del sito risulta essere la categoria E, il cui coefficiente di amplificazione stratigrafica  $S_S$  assume il valore massimo di 1.6.

Per quanto riguarda la categoria topografia, nei casi di configurazioni superficiali semplici, è possibile fare riferimento alle classificazioni presentate nelle Tab. 3.2 III-V delle NTC 2018. In questi casi, per tener conto delle condizioni topografiche è possibile utilizzare il coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$  (Tab. 3.2, NTC 2018) in funzione delle categorie topografiche, come mostrano le seguenti Tabelle.

*Tabella 14-3 Categorie topografiche (Tab.3.2 III, NTC 2018)*

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

*Tabella 14-4 Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica,  $S_T$  (Tab.3.2 V, NTC 2018)*

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	Coefficiente di amplificazione topografica, $S_T$
T1	-	1.0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1.2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1.2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1.4

L'area in oggetto ricade nella categoria T1, alla quale è associato il coefficiente  $S_T$  pari a 1.

L'accelerazione massima orizzontale attesa con riferimento allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV), tenuto conto delle modifiche prodotte dalle condizioni stratigrafiche locali e da quelle morfologiche del sito è pari a:

$$a_{max} = a_g \times S_s \times S_T = 0.0603g \times 1.6 \times 1 = 0.097g$$

dove:

$S_s$  = coefficiente di amplificazione stratigrafia (funzione della categoria di suolo)

$S_T$  = coefficiente di amplificazione topografia (funzione della morfologia del sito)



## **ALLEGATO: INDAGINI GEOGNOSTICHE 2022**