



**Studio geologico, geofisico ed idrogeologico  
dell'areale compreso tra il pozzo GG3 e il  
Centro Olio Tempa Rossa, Basilicata**

**Fase II B**

**Aprile 2024**

## SOMMARIO

1	INTRODUZIONE .....	4
1.1	INQUADRAMENTO TERRITORIALE .....	5
2	GEOLOGIA .....	9
2.1	INTRODUZIONE.....	9
2.2	ANALISI MINERALOGICA E PETROGRAFICA .....	9
2.2.1	METODI.....	10
2.2.2	RISULTATI ANALITICI.....	13
2.2.3	MINERALOGIA, RISULTATI DELL'ANALISI QUANTITATIVA DELLA COMPONENTE TAL QUALE.....	13
2.2.4	PETROGRAFIA, RISULTATI DELL'ANALISI DELLE SEZIONI SOTTILI .....	16
2.3	ANALISI MICROSTRUTTURALE .....	22
2.3.1	METODI.....	22
2.3.2	RISULTATI.....	23
2.4	STUDIO PETROFISICO.....	28
2.4.1	METODI.....	30
2.4.2	RISULTATI.....	32
3	IDROGEOLOGIA .....	33
3.1	RILIEVO IDROGEOLOGICO DELL'AREA DI PROGETTO: ATTIVITÀ DI CENSIMENTO DEI PUNTI D'ACQUA E RICOSTRUZIONE DELLA SUPERFICIE PIEZOMETRICA (GENNAIO-APRILE 2024) .....	33
3.1.1	Complesso idrogeologico Pelitico-Arenaceo (Flysch di Gorgoglione - Litofacies A) .....	37
3.1.2	Complesso idrogeologico Arenaceo-Pelitico (Flysch di Gorgoglione - Litofacies B) .....	38
3.1.3	Complesso idrogeologico delle Argille Varicolori Inferiori.....	38
3.2	ANALISI GEOFISICA E IDROGEOFISICA: TOMOGRAFIA DI RESISTIVITÀ ELETTRICA (ERT-2D) E CARATTERIZZAZIONE DELL'AREA GG3 .....	40
3.2.1	ATTIVITÀ DI CAMPAGNA .....	41
3.2.2	RISULTATI.....	43
3.2.3	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE RELATIVE ALLE INDAGINI GEOFISICHE.....	53
3.3	IDROGEOCHIMICA .....	54
3.3.1	INTRODUZIONE.....	54
3.3.2	METODI.....	55
3.3.3	RISULTATI ANALISI IDROGEOCHIMICHE .....	55

3.3.4	VALUTAZIONI IDROGEOCHIMICHE E CLASSIFICAZIONE DELLE ACQUE SOTTERRANEE NELL'INTORNO DEL POZZO GG3.....	57
3.4	CARTA IDROGEOLOGICA: PREMESSA METODOLOGICA ED ANALISI IDRODINAMICA DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA ATTRAVERSO L'INTERPRETAZIONE DEL PANNELLO PIEZOMETRICO NELL'AREA GG3.....	65
3.4.1	METODI.....	65
3.4.2	ANALISI DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA.....	67
4	DISCUSSIONE DEI DATI E CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	70
5	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	74
6	ELENCO ALLEGATI.....	76

# 1 INTRODUZIONE

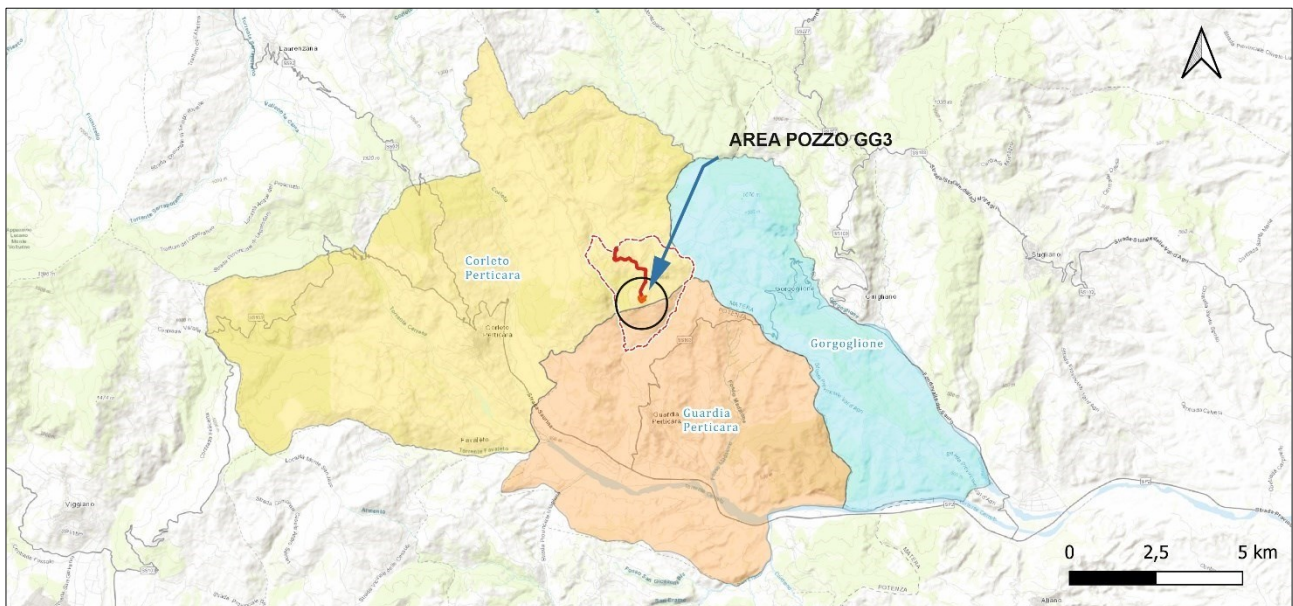
Nei mesi di dicembre 2023 – gennaio 2024 GEOSMART Italia s.r.l.s. ha eseguito uno studio geologico, geomorfologico ed idrogeologico nell'area, di circa 6 km<sup>2</sup>, compresa tra il pozzo GG3 e il Centro Olio Tempa Rossa, Basilicata (ALLEGATO I - STUDIO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREALE COMPRESO TRA IL POZZO GG3 E IL CENTRO OLIO TEMPA ROSSA, BASILICATA - GENNAIO 2024). Tale studio è poi proseguito nei mesi successivi per meglio comprendere l'assetto geologico e idrogeologico del territorio in esame attraverso la realizzazione di attività di campo e analisi di laboratorio di campioni di rocce ed acque sotterranee. Specificatamente, sono state condotte attività di rilevamento idrogeologico e prospezioni geofisiche indirette in situ, analisi mineralogiche, petrografiche, petrofisiche e microstrutturali di rocce e analisi idrochimiche di campioni di acqua sorgiva e sotterranee. La presente relazione include quindi i seguenti dati originali:

- i) risultati delle analisi mineralogica, petrografica, microstrutturale e petrofisica su campioni di rocce raccolti in affioramenti ritenuti significativi;
- ii) risultati delle analisi idrochimiche su campioni d'acqua prelevati nei piezometri ubicati nell'area e dalle sorgenti presenti;
- iii) studio geofisico (prospezioni Tomografia di Resistività Elettrica ERT) finalizzato alla caratterizzazione idrogeologica dell'area e in subordine alla conferma dell'assenza di fenomeni carsici e relative cavità;
- iv) dati provenienti dal monitoraggio idrogeologico (misure freaticometriche e campionamento) eseguito nell'arco temporale dicembre - aprile 2024.

I dati acquisiti e la loro elaborazione-interpretazione hanno permesso di definire e confermare con un buon dettaglio gli esiti dello studio precedente (Gennaio 2024) e, al contempo, caratterizzare gli aspetti petrofisici delle porzioni arenacee e siltose, definire le geometrie dei corpi rocciosi del sottosuolo e, infine, ricostruire l'andamento piezometrico della falda idrica sotterranea sia in prossimità del sito previsto per il pozzo GG3 che lungo il tracciato della *flowline* di collegamento con il Centro Olio di Tempa Rossa.

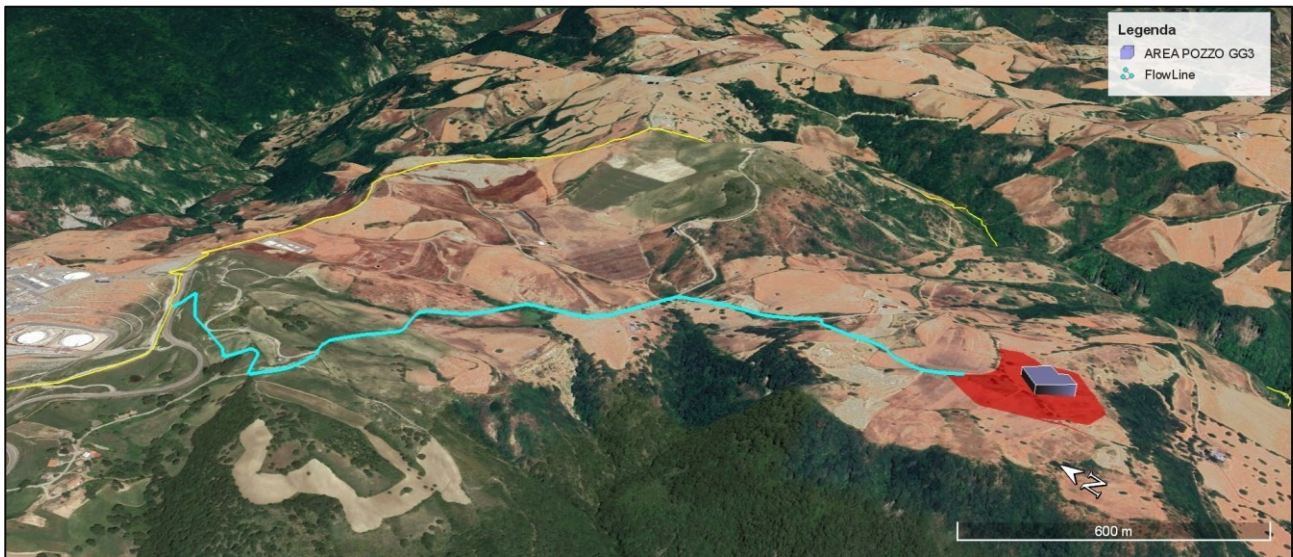
## 1.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'intera area in esame, comprendente l'area pozzo GG3 e dell'annessa flowline che lo collega al Centro Olio Tempa Rossa, ricade nel territorio comunale di Corleto Perticara (PZ) e Guardia Perticara (PZ). In particolare, essa è ubicata nella porzione orientale del territorio di Corleto Perticara, in quella settentrionale di Guardia Perticara e, per un breve tratto, confina con il bordo occidentale del territorio del comune di Gorgoglione (MT) (fig. 1.1.1). L'area pozzo GG3 dista circa 5 Km dal centro abitato di Corleto Perticara, circa 3,8 Km dal centro di Guardia Perticara e, infine, circa 4,2 Km dal centro di Gorgoglione. Nello specifico, l'area pozzo GG3 è sita in località "Piano dei Petrini", a circa 2 Km del Centro Olio Tempa Rossa.



**Figura 1.1.1 – Inquadramento territoriale con evidenziati i limiti amministrativi dei comuni che sottendono l'area di studio.**

La topografia dell'area è visibile dal rendering ottenuto attraverso l'utilizzo di un'immagine 3D in cui con il poligono rosso, visibile sulla destra, è rappresentato l'areale del pozzo GG3 (fig. 1.1.2).

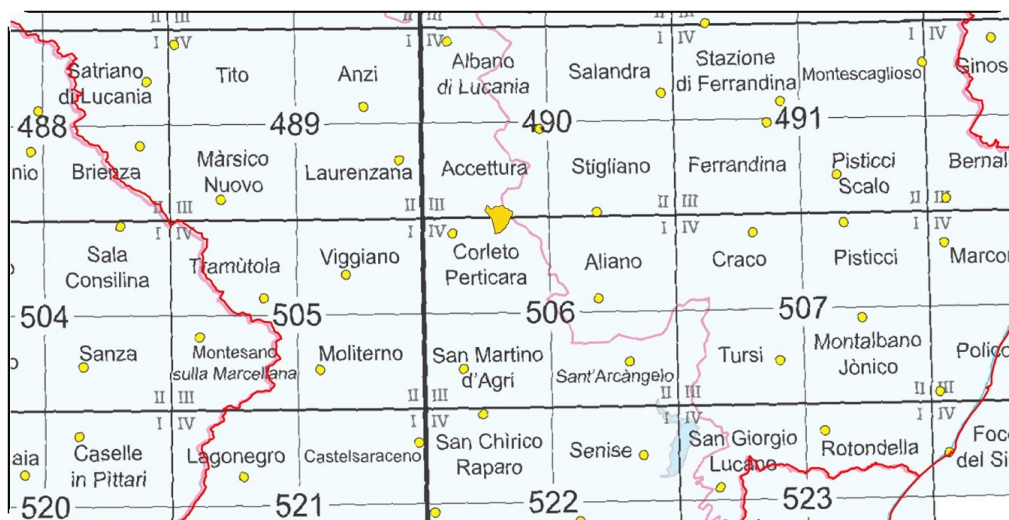


**Figura 1.1.2 - Inquadramento territoriale generale, con indicazione della flowline e dell'area pozzo GG3 (ortofoto 3D Google Earth).**

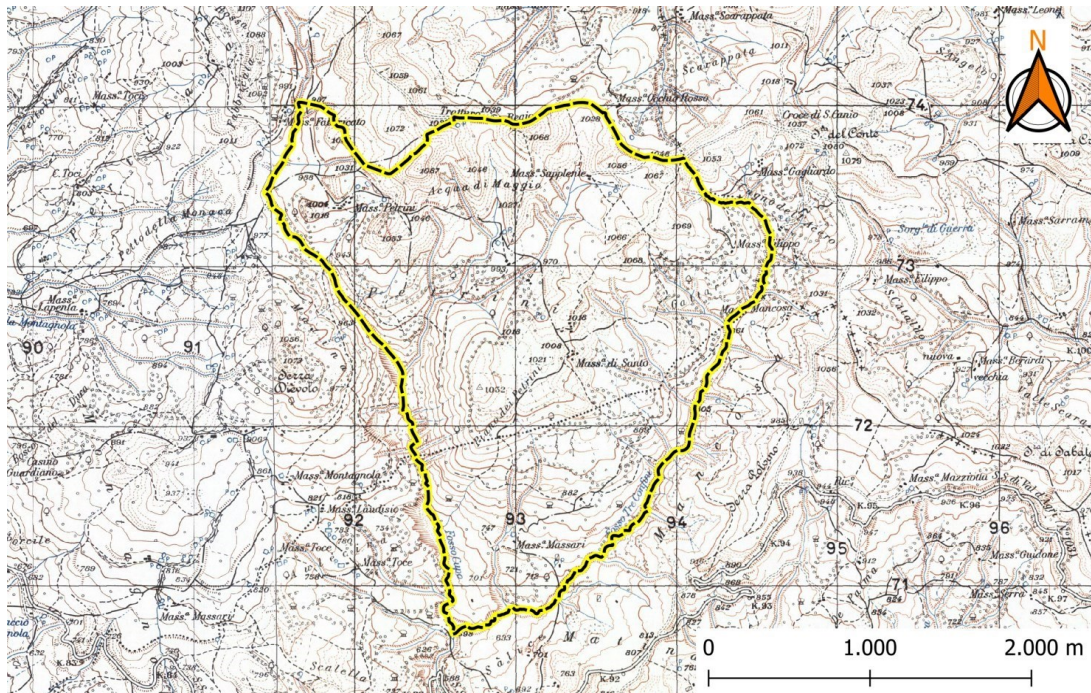
L'area di studio è riportata in figura 1.1.3, utilizzando la base cartografica dell'Istituto Geografico Militare (I.G.M.) in scala 1:25.000. Precisamente, essa ricade nei Fogli:

- 490 Stigliano (Sezione III, Accettura)
- 506 Sant'Arcangelo (Sezione IV, Corleto Perticara).

La medesima area è riportata sullo stralcio cartografico a scala 1:25.000 della cartografia I.G.M. (fig. 1.1.4).

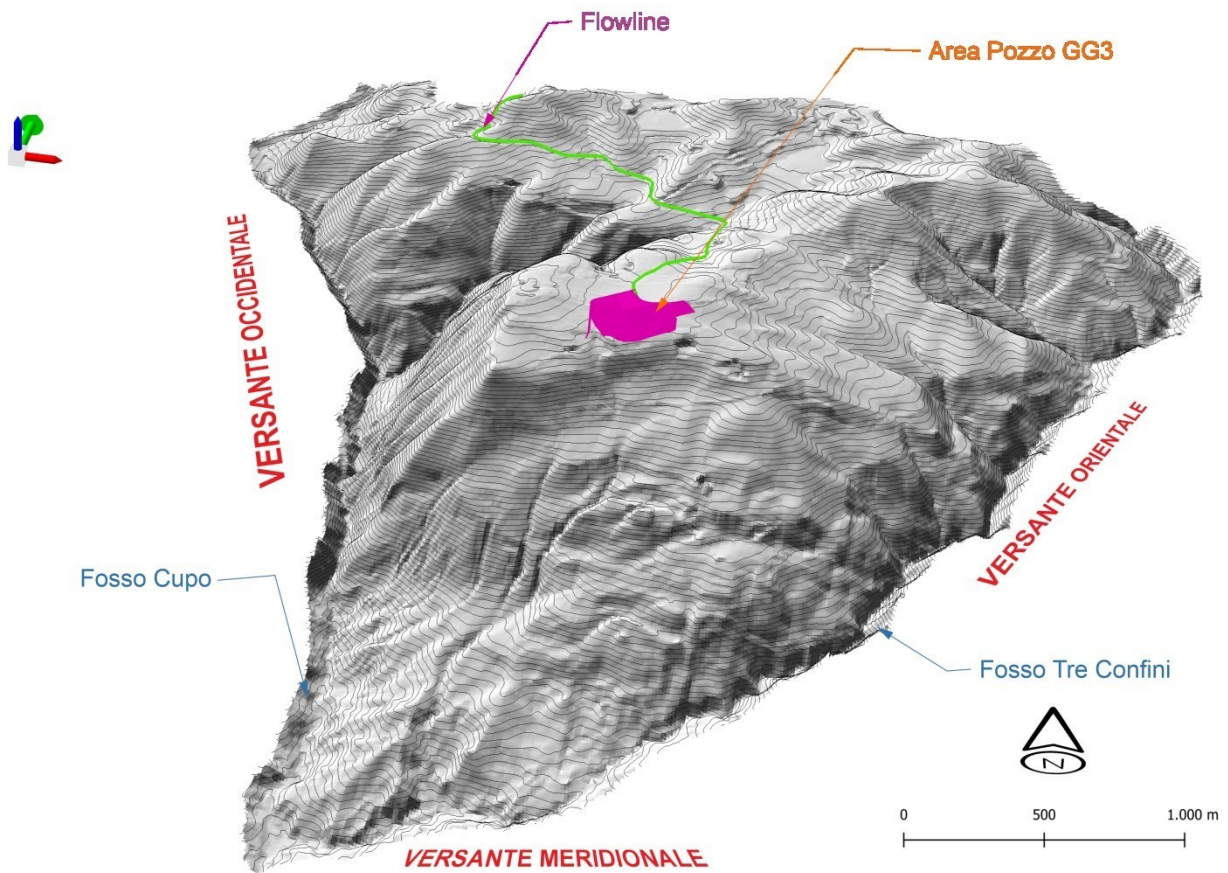


**Figura 1.1.3 - Stralcio della cartografia IGM con ubicazione dell'area di studio (poligono in giallo).**



**Figura 1.1.4 - Stralcio topografico IGM (1:25.000) con indicazione dell'area di studio (perimetro giallo).**

Per la redazione del seguente lavoro è stata utilizzata una base cartografica costituita dalla Carta Tecnica Regionale (CTR) a scala 1:5.000 della Regione Basilicata in formato vettoriale, la quale è scaricabile dal portale <https://rsdi.regione.basilicata.it/dbgt-ctr/>. Le coordinate geografiche dell'area pozzo GG3 (Sistema di riferimento WGS84) sono le seguenti: *Lat 40.393497° - Long 16.096217°*. Un modello 3D dell'area di studio con vista dal versante meridionale rende evidente il pianoro sommitale dell'area pozzo GG3 (Fig. 1.1.5).



**Figura 1.1.5 – Elaborazione 3D dell’area di studio (vista dal versante meridionale) con evidenza del pianoro sommitale dell’area pozzo GG3.**



## 2 GEOLOGIA

### 2.1 INTRODUZIONE

Alla luce del quadro geologico riportato nella precedente relazione (vedi ALLEGATO I - STUDIO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREALE COMPRESO TRA IL POZZO GG3 E IL CENTRO OLIO TEMPA ROSSA, BASILICATA - GENNAIO 2024), nella presente relazione vengono riportati i risultati delle analisi mineralogica-petrografica, microstrutturale e petrofisica condotte su campioni di roccia prelevati dall'area di studio (vedi ALLEGATO II – SCHEDE DEI CAMPIONI SELEZIONATI PER L'ANALISI MINERALOGICA E PETROGRAFICA).

### 2.2 ANALISI MINERALOGICA E PETROGRAFICA

I campioni di roccia prelevati lungo gli affioramenti precedentemente ispezionati durante il lavoro di rilevamento geologico sono stati prima catalogati (vedi ALLEGATO II) e, successivamente, inviati ai laboratori di diffrazione a raggi X e petrografia del Dipartimento di Scienze della Terra di “Sapienza Università di Roma”. Le rocce sono state così identificate:

- campione 4a
- campione 4b
- campione 5
- campione 6
- campione 7
- campione 8
- campione 9
- campione 10
- campione 11
- campione 12

Le schede identificative dei singoli campioni vengono riportate all'interno dell'ALLEGATO II.

## 2.2.1 METODI

### 2.2.1.1 METODI UTILIZZATI PER L'ANALISI MINERALOGICA

I campioni sono stati posti in forno ad una temperatura di 40°C per 24 h in modo da togliere l'umidità naturale. Successivamente sono stati macinati e quartati ed un'aliquota di 3 grammi è stata prelevata per la successiva macinazione in mortaio d'agata. La polvere è stata quindi utilizzata per il confezionamento di preparati con orientazione casuale dei cristalliti con il metodo del carico posteriore.

La composizione mineralogica dei campioni è stata determinata in diffrazione a raggi X utilizzando un diffrattometro Bruker D8 Advance equipaggiato con un detector Lynxeye XE-T allo stato solido di silicio presso il Dipartimento di Scienze della Terra di Sapienza Università di Roma.

Il diffrattometro ha operato a 40 kV e 30 mA utilizzando una radiazione  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$ ). I campioni sono stati analizzati in un intervallo di scansione compreso tra 2 e 70° 2 $\theta$  con step di 0.02° 2 $\theta$  e tempi di conteggio di 1s per step. I tracciati diffrattometrici sono stati ottenuti con una configurazione a fenditure variabili per mantenere l'area di irraggiamento sulla superficie del campione costante e convertiti in tracciati a fenditura fissa per l'analisi quantitativa delle fasi mineralogiche presenti.

L'analisi quantitativa è stata eseguita mediante raffinamento Rietveld utilizzando il software Profex-BGMN 5.2 (Doebelin & Kleeberg, 2015). Profex-BGMN 5.2 è un'interfaccia grafica per la quantificazione dei dati XRD su polveri, che calcola la percentuale in peso dei minerali associando l'errore statistico a ogni singola fase minerale. Il software genera una serie di tracciati XRD di standard di minerali la cui sommatoria (tracciato calcolato) simula il tracciato sperimentale XRD variando il contributo in peso di ciascuna fase minerale. Il software consente di selezionare file di struttura predefiniti (minerali) disponibili nel database BGMN e di modificare diversi parametri (es., dimensione dei cristalliti, orientazione dei minerali, micro-strain, ampiezza dei picchi diffrattometrici) che incidono sulla forma dei picchi di diffrazione.

### 2.2.1.2 METODI UTILIZATI PER L'ANALISI PETROGRAFICA

Dieci sezioni sottili (28 mm x 48 mm; spessore 30  $\mu\text{m}$ ) comprensive di inglobamento preventivo in resina epossidica di colore blu e vetrino copri-oggetto sono state preparate dai campioni macroscopici. I campioni sono stati tagliati perpendicolarmente alla stratificazione (paralleli alla direzione d'immersione) per consentire l'identificazione delle principali caratteristiche tessiturali.

L'analisi in microscopia ottica in luce trasmessa polarizzata è stata condotta su ciascun campione al fine di identificare le caratteristiche microstrutturali, tessiturali e composizionali. In ciascun campione è stata misurata la taglia massima dei vari componenti e la loro percentuale modale è stata stimata visivamente. L'analisi in microscopia ottica è stata condotta usando sia un microscopio Olympus BX50 (Giappone) che uno Zeiss Axiophot (Germania). Per acquisire le immagini delle sezioni sottili è stata usata una fotocamera digitale. Il diagramma ternario usato per la classificazione dell'arenaria è il sistema QFL (quarzo, feldspati, litici; Fig. 2.2.1.2.1) presentato da Weltje (2006).

#### Legenda

Q = Qm (grani monocristallini di quarzo) + Qp (grani policristallini di quarzo)

F = P (grani monocristallini di plagioclasio) + K (grani monocristallini di feldspato alcalino)

L = Lv (frammenti litici vulcanici o metavulcanici) + Ls (frammenti litici sedimentari o metasedimentari).

La componente bioclastica è stata considerata come parte di Ls.

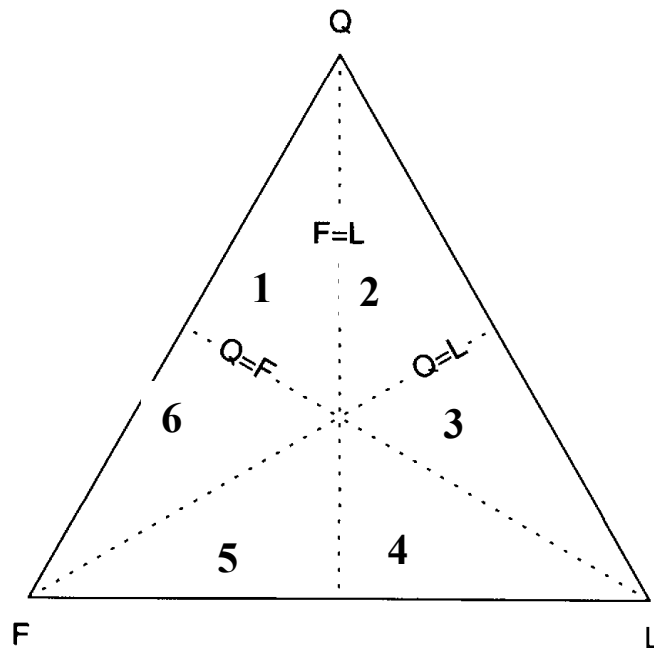


Figura 2.2.1.2.1 - Sistema QFL per la classificazione di arenarie, da Weltje (2006).

1 = arenaria feldspato-quarzosa

2 = arenaria lito-quarzosa

3 = arenaria quarzoso-litica

4 = arenaria feldspato-litica

5 = arenaria lito-feldspatica

6 = arenaria quarzoso-feldspatica

## 2.2.2 RISULTATI ANALITICI

I risultati dell'analisi quantitativa della componente tal quale vengono riportati nel paragrafo 2.2.3 e nella tabella 2.2.3.1, mentre i tracciati diffrattometrici e la relativa interpretazione di ogni campione sono riportati nelle figure in calce. I risultati dell'analisi in microscopia ottica in luce trasmessa polarizzata mirate all'identificazione delle caratteristiche microstrutturali, tessiturali e composizionali sono riportati nel paragrafo 2.2.4, mentre le immagini effettuate in luce trasmessa al solo polarizzatore e a polarizzatori incrociati sono riportate nelle figure in calce.

## 2.2.3 MINERALOGIA, RISULTATI DELL'ANALISI QUANTITATIVA DELLA COMPONENTE TAL QUALE

I **campioni 4a e 4b** sono interamente costituiti da calcite con un'incidenza percentuale pari al 100% (vedi figure 4a-c, 7a-c, ALLEGATO III).

Il **campione 5** presenta una composizione mineralogica costituita prevalentemente da quarzo (46%), feldspati (K-feldspato e albite, 24% in totale), e subordinatamente muscovite (8%) e minerali delle argille come caolinite (7%), clorite (3%) e smectite (11%). La componente carbonatica è costituita da una piccola percentuale di calcite (1%; vedi figure 10a-c, ALLEGATO III).

Il **campione 6** è costituito da quarzo (30%), feldspati (K-feldspato e albite, 15% in totale) muscovite (16%) e calcite (16%) e subordinatamente da minerali delle argille tra cui caolinite (8%), clorite (4%) e smectite (11%) e da tracce di ossidi di ferro (ematite; vedi figure 13a-c, ALLEGATO III).

Il **campione 7** è caratterizzato da una composizione mineralogica costituita da quarzo (24%), calcite (23%), feldspati (K-feldspato e albite, 17% in totale), muscovite (16%) e minerali delle argille come caolinite (9%), clorite (3%) e smectite (8%). Si osservano anche tracce di zeoliti (vedi figure 16a-c, ALLEGATO III).

Il **campione 8** mostra un contenuto in quarzo pari al 36% in peso, calcite (24%), feldspati (K-feldspato e albite, 21% in totale), minori quantità di muscovite (4%), caolinite (7%), clorite (3%) e smectite (4%). Oltre alla calcite, la componente carbonatica è costituita anche da dolomite con un'incidenza percentuale pari all'1% (vedi figure 19a-c, ALLEGATO III).

Il **campione 9** è composto da un'associazione mineralogica costituita da quarzo (33%), calcite (25%), feldspato potassico (9%), albite (11%), muscovite (11%) e minerali argillosi tra cui smectite (3%), clorite (4%) e caolinite (4%; vedi figure 22a-c, ALLEGATO III).

Il campione 10 contiene prevalentemente calcite (54%), quarzo (15%), feldspati (K-feldspato e albite, 15% in totale), muscovite (8%), clorite (4%), caolinite (4%) e tracce di pirite (vedi figure 25a-c, ALLEGATO III).

Il **campione 11** è caratterizzato da un'associazione mineralogica costituita da quarzo (47%), feldspati (K-feldspato e albite, 17% in totale), muscovite (9%) e minerali delle argille come caolinite (10%), clorite (6%) e smectite (10%). La componente carbonatica è costituita da una piccola percentuale di calcite (1%; vedi figure 28a-c, ALLEGATO III).

Il **campione 12** è costituito da quarzo (29%), feldspati (K-feldspato e albite, 17% in totale) muscovite (15%) e calcite (25%) e subordinatamente da minerali delle argille tra cui caolinite (5%), clorite (4%) e smectite (5%; vedi figure 31a-c, ALLEGATO III).

Campione	Analisi quantitativa della componente tal quale (%wt)											
	Qz	Kfs	Ab	Ms	Chl	Kln	Cal	Dol	Sm	Py	Hem	Zeo
4a	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-
4b	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-
5	46	9	15	8	3	7	1	-	11	-	-	-
6	30	7	8	16	4	8	16	-	11	-	tr	-
7	24	4	13	16	3	9	23	-	8	-	-	tr
8	36	11	10	4	3	7	24	1	4	-	-	-
9	33	9	11	11	4	4	25	-	3	-	-	-
10	15	8	7	8	4	4	54	-	-	Tr	-	-
11	47	6	11	9	6	10	1	-	10	-	-	-
12	29	6	11	15	4	5	25	-	5	-	-	-

**Tabella 2.2.3.1 – Analisi quantitativa della componente tal quale tramite raffinamento Rietveld. Qz-quarzo; Kfs-K-feldspato; Ab-albite; Ms-muscovite; Chl-clorite; Kln-caolinite; Cal-calcite; Dol-dolomite; Sm-smectite, Py-pirite, Hem-ematite; Zeo-zeoliti; tr-tracce (<1%). L'errore associato all'analisi quantitativa è  $\pm 1\%$  per ogni singola fase minerale.**

## 2.2.4 PETROGRAFIA, RISULTATI DELL'ANALISI DELLE SEZIONI SOTTILI

I risultati relativi alle analisi petrografiche (campioni 4a, 4b, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12) sono riportati all'interno dell'ALLEGATO III – RISULTATI DELL'ANALISI MINERALOGICA E PETROGRAFICA.

Il **campione 4a** si presenta olocristallino, eterogranulare, costituito da cristalli anedrali di calcite spatica geminata, con dimensione massima di circa 1,5 cm (vedi figura 2 dell'ALLEGATO III). I cristalli mostrano una tessitura blocky con contatti intergranulari spesso sinuosi e con punti tripli. Localmente, il campione mostra evidenze di eventi multipli di scivolamento e cristallizzazione con fibre di crescita delimitate da bordi netti. Sono presenti strutture sintassiali, con cristalli allungati verso la linea mediana che indicano crescita dei cristalli durante l'apertura delle fratture. Il campione presenta una minima porosità lungo i bordi dei cristalli (vedi figure 3a-d dell'ALLEGATO III).

Il **campione 4b** si presenta olocristallino, eterogranulare, costituito da cristalli anedrali di calcite spatica geminata, con dimensioni comprese fra 0,4 mm e 1,5 cm (vedi figura 5 dell'ALLEGATO III). I cristalli sono caratterizzati da contatti intergranulari spesso sinuosi e con punti tripli. Il campione mostra una minima porosità, localizzata soprattutto lungo i piani di taglio ed in alcuni contatti fra i cristalli. Il campione è attraversato da rare fratture vuote, di spessore sub-millimetrico. Alcune porzioni sono composte da cristalli di calcite a grana più minuta (anche fino a 0.1 mm), tagliati da fratture parallele, con superfici sia suturate che nette. Si osservano anche *inclusion trails*. Probabilmente queste porzioni hanno registrato eventi multipli di apertura, precipitazione e scivolamento in corrispondenza di zone di taglio. Il campione ingloba alcuni frammenti (< 2.7 mm) della roccia incassante, distribuiti parallelamente ai piani di taglio. Tali frammenti sono alterati, con forme da sub-angolari a sub-arrotondati e con bassa sfericità. Gli inclusi, di natura eterogenea, comprendono arenarie scheletriche, arenarie finissime (entrambe poco classate e contenenti sia grani monocristallini di quarzo, mica bianca, clorite, calcite, opachi ed idrossidi, che fossili di foraminiferi planctonici con matrice micritica e cemento carbonatico) e wackestone a planctonici con abbondante matrice micritica o calcisiltitica (vedi figure 6a-h dell'ALLEGATO III).

Il **campione 5** è un'arenaria ben classata, composta da grani privi di orientazione preferenziale, con taglia massima di circa 0,6 mm, forma da angolare a sub-arrotondata e sfericità medio-bassa (vedi la figura 8 dell'ALLEGATO III). Il campione si può classificare, secondo il diagramma ternario di



Weltje (2006) come un'arenaria da feldspato-quarzosa a lito-quarzosa. Si riconoscono grani monocristallini (circa 70%) e subordinati frammenti litici (25-30%) di rocce metamorfiche di basso grado (metabasiti, quarziti, metamorfiti quarzoso-feldspato-micacee e filladi) e di selce, spesso alterati. I grani monocristallini sono rappresentati da abbondante quarzo (circa 40%), feldspati (alcalino potassico e plagioclasio circa il 20%), mica bianca e mica bruna, variamente alterata (circa 5-10%). Subordinata clorite e minerali opachi completano i grani monocristallini. Nello spazio intergranulare è presente scarsa matrice (2-3%). La matrice è argillosa e spesso cloritizzata. Il campione appare abbastanza maturo dal punto di vista composizionale e granulometrico, ma non dal punto di vista tessiturale (i grani non sono arrotondati). La porosità, stimata visivamente, è circa il 10-20% ed è dovuta a spazi intergranulari vuoti di forma e taglia irregolare (vedi figure 9a-h dell'ALLEGATO III).

Il **campione 6** è un'arenaria scheletrica (componente bioclastica inferiore al 25%), eterogenea e moderatamente classata (vedi figura 11 dell'ALLEGATO III). Ponendo la sezione con la scritta del numero verso l'alto, si osserva una gradazione con la taglia massima dei grani che varia da circa 0,4 mm a 0,2 mm. La forma dei grani varia da sub-angolare a sub-arrotondata, con bassa sfericità. Il campione presenta una laminazione incrociata e si può classificare come un'arenaria quarzoso-litica. Il campione è costituito principalmente di grani monocristallini di quarzo (30%), feldspati (sia plagioclasio che feldspato alcalino potassico in alcuni casi sericitizzato, che raggiungono circa il 15-20%), mica bianca, variamente alterata ed isorientata e mica bruna (totale delle miche pari a circa 10%). Sono presenti subordinati minerali opachi e glauconite. Sono inoltre presenti subordinati (25%) frammenti litici di selce e di rocce metamorfiche di basso grado e frammenti micritici, parzialmente ricristallizzati e privi di struttura interna, riconducibili a peloidi. Il campione ospita anche una subordinata componente bioclastica (8-10%) formata da fossili carbonatici di foraminiferi planctonici (globigeniridi e globorotalie) e bentonici (rotalidi), frammenti di molluschi e di echinidi. Parte dei foraminiferi presenta un riempimento interno di probabile glauconite alterata in ossidi di ferro. Nello spazio intergranulare, è presente abbondante cemento carbonatico (10-12%). Il cemento appare ricristallizzato e probabilmente dovuto a diagenesi da seppellimento e/o fenomeni di pressione solution (come indicato dai contatti planari fra i minerali e dalla presenza di frammenti di bivalvi in parte disciolti). Il campione appare poco maturo. La porosità, stimata visivamente, è molto bassa (vedi figure 12a-l dell'ALLEGATO III).

Il **campione 7** è un'arenaria scheletrica (componente bioclastica inferiore al 25%), eterogenea, ben classata, con grani di taglia  $< 0,3$  mm (granulometria più fine rispetto alle altre arenarie scheletriche analizzate), di forma variabile da angolare a sub-arrotondata, con bassa/media sfericità (vedi figura 14 dell'ALLEGATO III). La sezione è laminata e alcune porzioni mostrano una forte iso-orientazione delle miche. Il campione si può classificare come un'arenaria da lito-quarzosa a quarzoso-litica. Il campione si compone di grani monocristallini di quarzo (20-25%), plagioclasio e k-feldspato (circa 10-15%), mica bianca, variamente alterata ed isorientata, e mica bruna (10-15%). Sono presenti più rari grani monocristallini di clorite, minerali opachi (ossidi) e tormalina. I feldspati possono apparire alterati e sericitizzati. Sono presenti frammenti litici (meno del 15%) di selce. Il campione ospita una frazione bioclastica (10-15%) formata da foraminiferi planctonici (globigeniridi e globorotalie), frammenti di molluschi e spicole di spugna. Alcune porzioni del campione presentano evidenze di bioturbazioni. Nello spazio intergranulare è presente (in media 7-10% vol) matrice mista (argillosa e micritica). In particolare, il campione appare eterogeneo e presenta delle porzioni più micritiche. È presente anche cemento carbonatico microcristallino (5-10%). Il cemento appare ricristallizzato a seguito di diagenesi da seppellimento e/o pressure solution (come indicato dalla parziale dissoluzione di alcuni foraminiferi planctonici e dalle stiloliti). Il campione appare poco maturo. La porosità, stimata visivamente, è bassa, inferiore al 5-7%, ed è dovuta a vuoti di forma e taglia irregolare, fratture e a distacco lungo i piani di stratificazione. Alcune fratture, con apertura inferiore a 0,3 mm, corrono lungo tutta la sezione per lo più parallele ai piani di laminazione. Nel complesso, il campione appare moderatamente alterato, in quanto la presenza di matrice fine e la mancanza di un cemento pervasivo rendono il litotipo particolarmente soggetto ad alterazione (vedi figure 15a-n dell'ALLEGATO III).

Il **campione 8** è un'arenaria scheletrica (componente bioclastica inferiore al 25%), eterogenea, moderatamente classata, con grani di dimensione inferiore a circa 0,4 mm (vedi figura 17 dell'ALLEGATO III). La forma dei grani varia da sub-angolare a sub-arrotondata, con bassa sfericità. Macroscopicamente, il campione mostra laminazione incrociata. Il campione si può classificare come arenaria quarzoso-litica. Il campione si compone di grani monocristallini di quarzo (30-35%), plagioclasio e K-feldspato (circa il 20%), mica bianca, variamente alterata ed isorientata e mica bruna (5-7%). Sono presenti anche rari grani monocristallini di clorite, minerali opachi (ossidi) e tormalina. I feldspati possono apparire come alterati e sericitizzati. Il campione presenta anche subordinati litoclasti (15-20%) di selce, metamorfiti di basso grado, quarziti e clay chips, strappati durante il

trasporto e poi 10-15% di componente bioclastica, formata da fossili carbonatici di foraminiferi planctonici (globigeniridi e globorotalie) e più abbondanti frammenti di molluschi. Nello spazio intergranulare, è presente scarsa matrice costituita da minerali argillosi e più abbondante cemento carbonatico microcristallino (circa 15%). Il cemento appare ricristallizzato a seguito di diagenesi da seppellimento e/o pressure solution (come indicato dai contatti planari fra i minerali). Il campione è eterogeneo, con porzioni più micritiche. Il campione appare poco maturo. Lungo alcuni piani di laminazione si notano concentrazioni di minerali opachi ed idrossidi. La porosità, stimata visivamente, è molto bassa, inferiore al 2%, ed è dovuta sia a vuoti intergranulari di forma e taglia irregolare che a fratture. Nel complesso, il campione appare moderatamente alterato in quanto la presenza di matrice fine e la mancanza di un cemento pervasivo rendono il litotipo particolarmente soggetto ad alterazione (vedi figure 18a-l dell'ALLEGATO III).

Il **campione 9** è un'arenaria scheletrica (componente bioclastica inferiore al 25%), eterogenea e scarsamente classata, con grani di dimensioni <0,4 mm (vedi figura 20 dell'ALLEGATO III). La forma dei grani varia da sub-angolare a sub-arrotondata, con bassa sfericità. Il campione appare estremamente eterogeneo, con porzioni a granulometria più fine (siltitiche e pelitiche). Il campione si può classificare come un'arenaria quarzoso-litica. Il campione è composto da grani monocristallini di quarzo (25-30%), plagioclasio e K-feldspato (circa il 15-20%), mica bianca, variamente alterata ed isorientata e mica bruna (meno del 5%). Minori minerali opachi (ossidi) sono presenti. I feldspati possono apparire come alterati e sericitizzati. Sono presenti anche subordinati (circa il 25-35%) frammenti litici (clay chips e rocce metamorfiche di basso grado fortemente alterate), frammenti micritici (peloidi), tritume bioclastico (frammenti di molluschi ed echinidi) e fossili carbonatici di foraminiferi planctonici (globigeniridi e globorotalie). Nello spazio intergranulare è presente abbondante cemento carbonatico microcristallino (15-18%). Il cemento appare ricristallizzato a seguito di diagenesi da seppellimento e/o pressure solution. Il campione appare poco maturo. La porosità, stimata visivamente, è circa 5%, ed è dovuta a vuoti (sia intergranulari che intragranulari) di forma e taglia irregolare. Il campione è tagliato da una vena, con spessore inferiore a 0,5 mm, costituita da calcite anedrale a mosaico, con cristalli di dimensione massima di 0,3 mm. Nel complesso, il campione appare moderatamente alterato, in quanto la presenza di matrice fine e la mancanza di un cemento pervasivo rendono il litotipo particolarmente soggetto ad alterazione (vedi figure 21a-n dell'ALLEGATO III).

Il **campione 10** è un'arenaria ibrida (componente bioclastica fino al 50%), eterogenea e moderatamente classata, con grani di forma variabile da angolare a sub-angolari, a bassa o media sfericità e di dimensione  $<0,3$  mm (vedi figura 23 dell'ALLEGATO III). Il campione mostra laminazione incrociata. Il campione si può classificare come un'arenaria quarzoso-litica/feldspato-litica. Il campione si compone di grani monocristallini di quarzo (10%), plagioclasio e K-feldspato (per un totale di circa 10-15%), mica bianca, variamente alterata ed isorientata e mica bruna (per un totale di circa 5%). Sono presenti anche più rari grani di clorite, tormalina, pirite, grani di glauconite e minerali opachi (ossidi). I feldspati possono apparire alterati e sericitizzati. Il campione presenta anche subordinati (circa 25-30%) litoclasti (selce e probabili rocce metamorfiche di basso grado molto alterate) e frammenti micritici (peloidi), più abbondante tritume bioclastico (frammenti di molluschi) e fossili carbonatici di foraminiferi planctonici (globigeniridi e globorotalie). Nello spazio intergranulare è presente matrice micritica (circa 18-20%) e più abbondante cemento carbonatico microcristallino (circa 20-22%). Il cemento appare ricristallizzato a seguito di diagenesi da seppellimento e/o pressure solution. Il campione appare poco maturo. La porosità, stimata visivamente, è  $<1\%$ . Sono presenti fratture, che corrono lungo tutta la sezione per lo più parallele ai piani di laminazione, con spessore inferiore a 0,2 mm (vedi figure 24a-l dell'ALLEGATO III).

Il **campione 11** è un'arenaria ben classata, priva di orientazione preferenziale dei grani (vedi figura 26 dell'ALLEGATO III). I grani hanno una forma da sub-angolare a sub-arrotondata, una sfericità medio-bassa e dimensioni  $<0,3$  mm. Il campione si può classificare come un'arenaria da feldspato-quarzosa a lito-quarzosa. Il campione si compone di grani monocristallini e subordinati frammenti litici (circa 15-20%, rocce metamorfiche di basso grado, spesso alterati, sia quarzosi che quarzoso-micacei, e selce). I grani monocristallini sono formati da abbondante quarzo (40%), plagioclasio e K-feldspato (15-20%), mica bianca e mica bruna (10-12%), variamente alterata. Sono presenti anche più rari grani monocristallini di clorite e minerali opachi. I feldspati possono apparire alterati e sericitizzati. Nello spazio intergranulare è presente scarsa matrice (2-5%). La matrice è argillosa e spesso cloritizzata. Il campione appare abbastanza maturo dal punto di vista composizionale e granulometrico, ma non dal punto di vista tessiturale (i grani non sono arrotondati). La porosità, stimata visivamente, è circa il 15% ed è dovuta a vuoti intergranulari di forma e dimensione irregolare (vedi figure 27a-h dell'ALLEGATO III).

Il **campione 12** è un'arenaria scheletrica (componente bioclastica inferiore al 25%), eterogenea e moderatamente classata, con grani di dimensione  $<0,5$  mm (vedi figura 29 dell'ALLEGATO III). La

forma dei grani varia da angolare a sub-arrotondata, con bassa o media sfericità. Il campione è laminato e si può classificare come un'arenaria litico-quarzosa. Il campione si compone di grani monocristallini di quarzo (25%), plagioclasio e K-feldspato (15%), mica bianca, variamente alterata ed isorientata, e mica bruna (10-12%). È possibile osservare anche subordinati grani di clorite, e minerali opachi (ossidi). I feldspati possono apparire alterati e sericitizzati. Il campione contiene abbondanti frammenti bioclastici di molluschi e resti di foraminiferi planctonici (globigeniridi e globorotalie) e subordinati frammenti micritici (peloidi) e litici (selce e rocce metamorfiche di basso grado, quarzoso e quarzoso micacee). I frammenti litici raggiungono un'abbondanza di circa 20-25%. Nello spazio intergranulare è presente scarsa matrice micritica (circa 5%) e più abbondante cemento carbonatico microcristallino (15-17%). Il cemento appare ricristallizzato a seguito di diagenesi da seppellimento e/o pressure solution (come indicato dai contatti planari fra i minerali). Il campione appare poco maturo. Lungo alcuni piani di laminazione sono presenti concentrazioni di minerali opachi ed idrossidi. La porosità, stimata visivamente, è circa 3-5%, ed è dovuta a vuoti di forma e taglia irregolare. Nel complesso il campione appare moderatamente alterato, in quanto la presenza di matrice fine e la mancanza di un cemento pervasivo rendono il litotipo particolarmente soggetto ad alterazione (vedi figure 30a-1 dell'ALLEGATO III).

## 2.3 ANALISI MICROSTRUTTURALE

### 2.3.1 METODI

Per l'analisi digitale della porosità sono state selezionate 8 sezioni sottili ottenute dai campioni di roccia utilizzati per le analisi petrografiche e, in parte, mineralogiche. Le sezioni sottili sono state ricavate perpendicolarmente alla giacitura dei giunti di stratificazione, lungo la direzione d'immersione degli stessi. Ogni sezione è stata ottenuta da rocce preventivamente impregnate con una resina epossidica tinta di blu per effettuare l'analisi digitale dell'immagine dello spazio dei pori connessi tra loro e, quindi, contenenti la resina colorata. Le sezioni sottili così ottenute sono state prima analizzate al microscopio ottico, in modo tale da ricavare 32 foto ottenute utilizzando nicols incrociati o paralleli. Le immagini di aree di 1 mm x 1 mm sono state raccolte, grazie all'adozione di lenti d'ingrandimento 2,5x, in modo tale da caratterizzare le possibili variazioni tessiturali riscontrate all'interno di ogni singola sezione sottile. Successivamente, le immagini sono state elaborate utilizzando l'applicazione software ImageJ per ricavare immagini binari in cui i pori risultano neri e grani, matrice e cementi di colore bianco. Le singole immagini binarie sono state quindi analizzate utilizzando il comando "Analizza particelle" del software ImageJ. Tutti gli oggetti di colore scuro presenti nelle immagini binarie sono stati conteggiati automaticamente per calcolare i seguenti parametri: (i) porosità connessa 2D (rapporto tra aree pori e area totale, in percentuale), (ii) circolarità (fattore di forma; 1,0 indica un cerchio perfetto e valori vicini allo zero che indicano forme molto allungate), (iii) rapporto di forma l'asse maggiore e quello minore di ellissi inscritte in ciascun poro). È stata inoltre calcolata la dimensione frattale attraverso l'adozione del metodo del box-counting  $D_{0(\text{pori})}$ , cioè del numero di aree (box) di dimensioni diverse contenenti pori. Questo perché la distribuzione del volume dei pori nei carbonati può essere frattale (Wu et al., 2019) e, quindi, descritta statisticamente da una legge di potenza (Mandelbrot, 1985). Il grafico della dimensione dell'area di campionamento (box) rispetto alla frequenza di riempimento permette di calcolare l'indice  $D_{0(\text{pori})}$  utilizzando il coefficiente angolare della linea di correlazione (Falconer, 2003). Questa dimensione  $D_{0(\text{pori})}$  ha un significato fisico simile a quello della dimensione frattale relativa alle distribuzioni dei pori e della porosità (Thompson, 1991; Ferraro et al., 2020). Tali operazioni sono state eseguite considerando due range di valori di saturazione del colore, rispettivamente 0-2 (conservativo) e 0-10.

## 2.3.2 RISULTATI

Il risultato delle analisi d'immagine permette di valutare la variazione di porosità 2D tra i campioni selezionati (Tabella 2.3.2.1). Sulla base dei dati ottenuti, si nota come la correlazione tra porosità 2D e indice  $D_{0(\text{pori})}$  sia molto bassa ( $R^2= 0,31$ ) andando a considerare tutti i valori ottenuti (Fig. 2.3.2.1), mentre questa correlazione sia più alta per dati ricavati utilizzando valori di saturazione del colore compresi tra 0 e 2 ( $R^2= 0,51$ ; Fig. 2.3.2.2) e tra 0 e 10 ( $R^2= 0,60$ ; Fig. 2.3.2.3).

Immagine	Saturazione	Porosità 2D (%)	$D_0$
<b>5°</b>	0-2	1,7	1,03
	0-10	10	1,07
<b>5b</b>	0-2	2	1,03
	0-10	8,5	1,06
<b>6°</b>	0-2	0,2	0,76
	0-10	0,7	0,81
<b>6b</b>	0-2	1	1,09
	0-10	3,1	0,91
7	0-2	0,1	0,45
	0-10	0,4	0,8
<b>8°</b>	0-2	0,6	0,9
	0-10	1,8	0,9
<b>8b</b>	0-2	0,1	0,77
	0-10	1,7	1,04
<b>9°</b>	0-2	0,2	0,76
	0-10	0,7	0,83
<b>9b</b>	0-2	0,1	0,6
	0-10	0,7	0,83
<b>9c</b>	0-2	0,3	0,77
	0-10	0,9	0,82
<b>10°</b>	0-2	0,2	0,85
	0-10	0,7	0,91
<b>10b</b>	0-2	0,2	0,73
	0-10	0,6	0,8
<b>11°</b>	0-2	0,2	0,87
	0-10	0,8	0,88
<b>11b</b>	0-2	0,2	0,86
	0-10	0,7	0,82
<b>12°</b>	0-2	0,1	0,82
	0-10	0,9	0,97
<b>12b</b>	0-2	0,2	0,81
	0-10	0,7	0,83

Tabella 2.3.2.1 - risultati dell'analisi d'immagine condotta su campioni di arenaria (rosso) e silt-silt argilloso (nero) per valori della saturazione del colore compresi tra 0 e 2 e tra 0 e 10 (il suffisso " a" è riportato come " °").

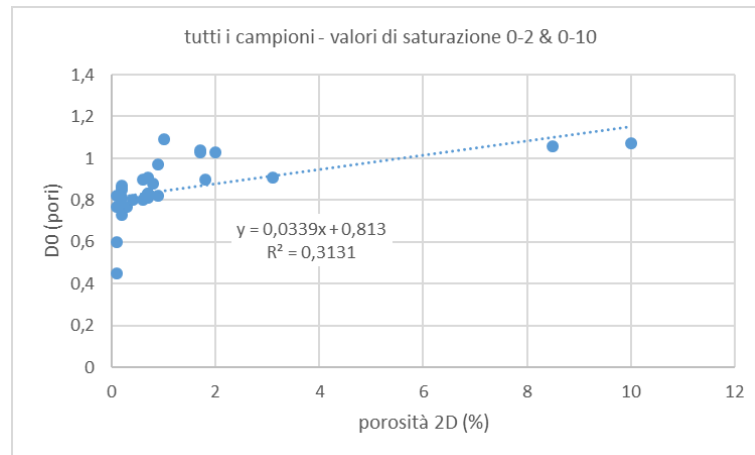


Figura 2.3.2.1 - Correlazione tra porosità 2D e indice D0(pori) per tutti i campioni analizzati.

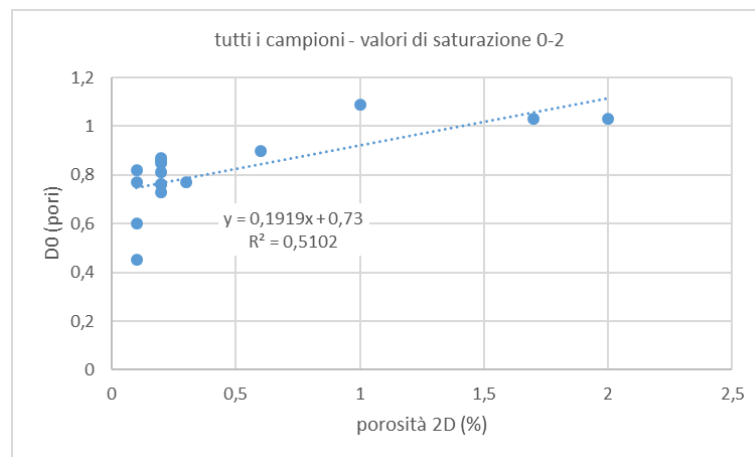


Figura 2.3.2.2 - Correlazione tra porosità 2D e indice D0(pori) utilizzando valori di saturazione del colore compresi tra 0 e 2.

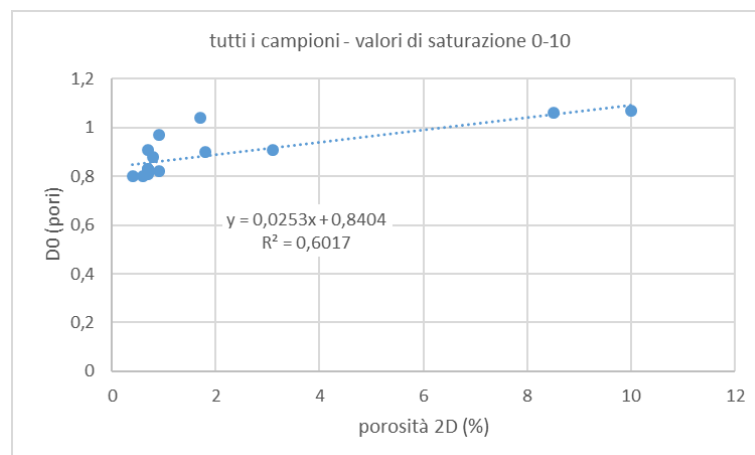


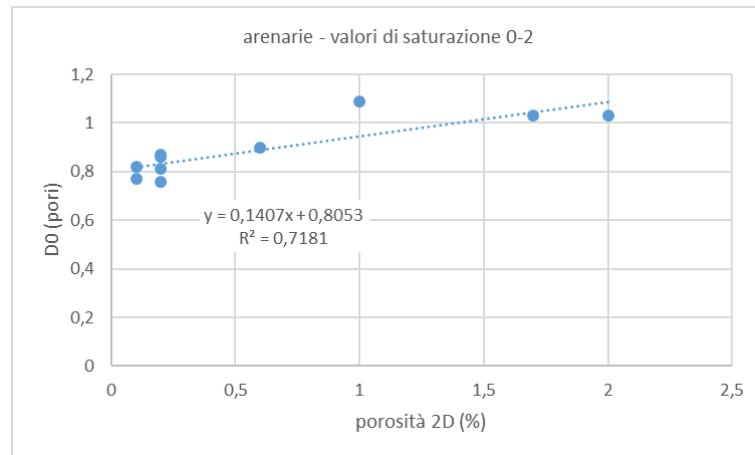
Figura 2.3.2.3 - Correlazione tra porosità 2D e indice D0(pori) utilizzando valori di saturazione del colore compresi tra 0 e 10.



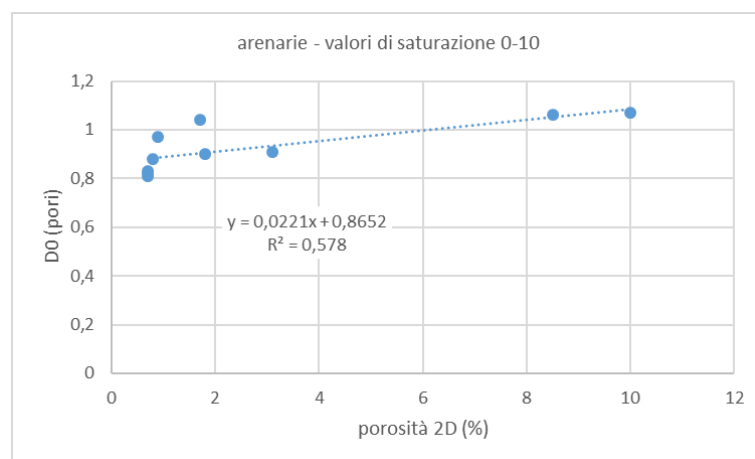
Per caratterizzare al meglio le proprietà dei pori presenti all'interno delle rocce studiate, i suddetti dati numerici sono successivamente analizzati per campioni arenacei (figure 2.3.2.4 e 2.3.2.5) e siltoso-argillosi (figure 2.3.2.6 e 2.3.2.7). I risultati relativi ai singoli campioni analizzati sono riportati interamente all'interno dell'ALLEGATO IV – RISULTATI ANALISI MICROSTRUTTURALE.

Per quanto riguarda i campioni arenacei, esso sono caratterizzati da valori di porosità 2D compresi tra ca. 0,1% e 1,7% (saturazione del colore 0-2) e ca. 0,7% e 10,0% (saturazione del colore 0-10) e, per i medesimi range di saturazione, valori  $D_{0(\text{pori})}$  rispettivamente compresi tra ca. 0,76 e 1,09 e 0,81 e 1,07. Questi dati permettono di capire come una variazione di porosità 2D di circa due ordini di grandezza (0,1-10%) corrisponda ad una poco significativa variazione dell'indice  $D_{0(\text{pori})}$  (0,76-1,09), consistente con la presenza di cluster di pori lungo microfrazture non totalmente mineralizzate. Inoltre, sulla base della variazione dell'indice di correlazione ( $R^2$ ), il range di saturazione del colore 0-2 meglio descrive la distribuzione dei pori all'interno della roccia alle diverse condizioni di porosità ( $R^2=0,71$ ).

I campioni siltoso-argillosi mostrano una variazione della porosità 2D compresa tra ca. 0,1% e 0,3% (saturazione del colore 0-2) e ca. 0,4% e 0,9% (saturazione del colore 0-10) e, per i medesimi range di saturazione, valori  $D_{0(\text{pori})}$  rispettivamente compresi tra ca. 0,45 e 0,85 e 0,8 e 0,91. Questi dati permettono di capire come una variazione di porosità 2D di circa un ordine di grandezza (0,1-0,9%) corrisponda ad una significativa variazione dell'indice  $D_{0(\text{pori})}$  (0,45-0,91), consistente con la presenza di micropori ben distribuiti all'interno dei campioni. Inoltre, sulla base della variazione dell'indice di correlazione ( $R^2$ ), il range di saturazione del colore 0-10 non permette un'analisi significativa della distribuzione dei pori all'interno della roccia ( $R^2=0,1$ ).



**Figura 2.3.2.4 - Correlazione tra porosità 2D e indice D0 (pori) per campioni arenacei utilizzando valori di saturazione del colore compresi tra 0 e 2.**



**Figura 2.3.2.5 - Correlazione tra porosità 2D e indice D0 (pori) per campioni arenacei utilizzando valori di saturazione del colore compresi tra 0 e 10.**

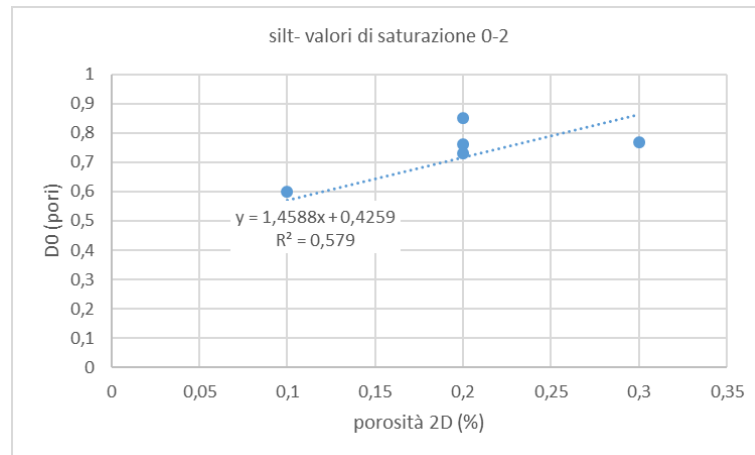


Figura 2.3.2.6 - Correlazione tra porosità 2D e indice D0 (pori) per campioni siltosi utilizzando valori di saturazione del colore compresi tra 0 e 2.

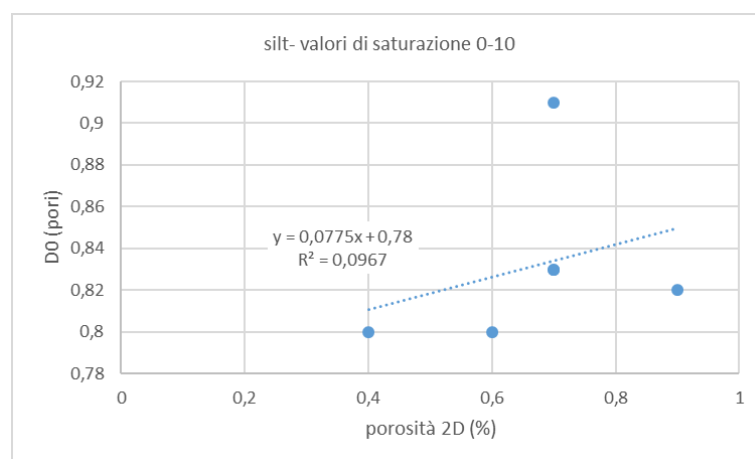


Figura 2.3.2.7 - Correlazione tra porosità 2D e indice D0 (pori) per campioni siltosi utilizzando valori di saturazione del colore compresi tra 0 e 10.

## 2.4 STUDIO PETROFISICO

Questo studio è finalizzato a determinare la densità e la porosità efficace di 10 campioni di roccia partendo dalle misurazioni del loro peso in condizioni secche e sature e del loro volume. I campioni di roccia consistono in arenarie, siltiti e siltiti argillose, hanno tutti una forma irregolare, presentando un intervallo piuttosto ampio di pesi e volumi. I campioni sono stati identificati con un numero: 1A, 3, 5, 6 (a, b), 9 (a, b), 10 (a, b), 11, 12, 13, 26 e, come si può vedere in figura 2.4.1 e tabella 2.4.1, i campioni 6, 9 e 10 sono a loro volta divisi in due parti.



Figura 2.4. 1 - Campioni esaminati.

<b>Campione</b>	<b>LITOLOGIA</b>
<b>1a</b>	ARENARIA
<b>3</b>	ARENARIA
<b>5</b>	ARENARIA
<b>6</b>	ARENARIA
<b>9</b>	SILTITE
<b>10</b>	SILTITE-ARGILLOSA
<b>11</b>	ARENARIA
<b>12</b>	ARENARIA
<b>13</b>	ARENARIA
<b>26</b>	ARENARIA

**Tabella 2.4.1 – Lista e denominazione dei campioni utilizzati per le analisi petrofisiche.**

## 2.4.1 METODI

Le misure di laboratorio sono state effettuate a temperatura e pressione ambientale in condizioni secche e in condizioni sature, secondo le indicazioni riportate da Franklin, J.A. (1979) in “Suggest Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties”. Da queste misure sono state calcolate la densità e la porosità efficace.

### 2.4.1.1 PESO E VOLUME

Come prima cosa, i campioni sono stati messi in un forno ventilato a 60C° per 12 ore; poi ne è stato misurato il peso con una bilancia *Bizerba* di precisione 0.001 kg. Per calcolare il volume, a causa dell’irregolarità della forma dei campioni, non si è potuto usare la classica formula:

$$volume = l * L * h$$

Il problema è stato risolto con il metodo dello spostamento d’acqua: una scatola trasparente di dimensioni note e regolari è stata riempita d’acqua e l’altezza dell’acqua misurata, dopodiché, una volta immerso il campione, la differenza di altezza della colonna d’acqua è stata misurata di nuovo (Fig. 2.4.1.1.1). Dalla differenza tra le due altezze si è così ottenuto il valore del volume del campione.



Figura 2.4.1.1.1 - Misurazione effettuata utilizzando il metodo dello spostamento d’acqua.

Successivamente a questa misura, i campioni sono stati immersi in acqua sotto vuoto per 12 ore, dopodiché il peso è stato misurato nuovamente.

### 2.4.1.2 DENSITÀ E POROSITÀ EFFICACE

Le misure delle proprietà fisiche come la densità  $\rho$  e la porosità  $n$  forniscono informazioni sulle caratteristiche geomeccaniche dei campioni. Infatti la presenza di pori all'interno del *fabric* di una roccia ne fanno diminuire la resistenza e aumentare la deformabilità e la permeabilità. Come spiegato in precedenza, la porosità è il rapporto tra il volume dei vuoti  $V_v$  e il volume totale  $V$ .

$$n = \frac{V_v}{V} * 100 \quad (1)$$

Seguendo le indicazioni di Frankling, J. A. (1979), il volume dei vuoti può essere definito come la differenza tra la massa satura e secca del campione, divisa per la densità dell'acqua.

$$V_v = \frac{M_{sat} - M_{dry}}{\rho_{h20}} * 100 \quad (2)$$

In questo caso, tuttavia, la porosità è stata trovata seguendo un altro metodo: si è calcolata la densità secca dividendo il peso secco per il volume.

$$\rho_{dry} = \frac{W_{dry}}{V} \quad (3)$$

La densità satura è calcolata dividendo il peso saturo per il volume.

$$\rho_{sat} = \frac{W_{sat}}{V} \quad (4)$$

La porosità è stata ottenuta dividendo la differenza tra la densità satura e la densità secca per la densità dell'acqua e viene espressa in percentuale.

$$n = \frac{\rho_{sat} - \rho_{dry}}{\rho_{h20}} * 100 \quad (6)$$

## 2.4.2 RISULTATI

Come si può vedere in tabella 2.4.2.1, i valori di porosità risultano essere piuttosto bassi, variando tra 1.66% a 5.35%, con i valori minori caratterizzanti i campioni arenacei 11 e 12. Questi dati sono spiegabili dato l'elevato grado di cementazione dei campioni, il quale ha determinato l'occlusione dei pori e delle microfratture con una riduzione significativa del volume e delle connessioni tra i vuoti.

SAMPLES	DRY WEIGHT	$\Delta h$	VOLUME	DRY DENSITY	SATURATED WEIGHT	SATURATED DENSITY	POROSITY
	kg	m	m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg	kg/m <sup>3</sup>	%
<b>1</b>	3.306	0.023	0.001290	2562.652	3.346	2593.658	<b>3.10</b>
<b>3</b>	6.01	0.039	0.002315	2595.821	6.124	2645.060	<b>4.92</b>
<b>5</b>	2.794	0.020	0.001122	2490.640	2.824	2517.383	<b>2.67</b>
<b>6a</b>	0.804	0.006	0.000308	2606.201	0.816	2645.100	<b>3.89</b>
<b>6b</b>	0.33	0.002	0.000112	2941.701	0.336	2995.186	<b>5.35</b>
<b>9</b>	0.408	0.003	0.000168	2424.675	0.412	2448.446	<b>2.38</b>
<b>10a</b>	1.402	0.012	0.000645	2173.525	1.418	2198.330	<b>2.48</b>
<b>10b</b>	0.564	0.004	0.000224	2513.817	0.572	2549.474	<b>3.57</b>
<b>11</b>	5.858	0.036	0.002137	2741.018	5.884	2753.183	<b>1.22</b>
<b>12</b>	2.946	0.029	0.001204	2446.298	2.966	2462.906	<b>1.66</b>
<b>13</b>	2.032	0.015	0.000841	2415.166	2.072	2462.709	<b>4.75</b>
<b>26</b>	4.812	0.034	0.001907	2523.256	4.888	2563.108	<b>3.99</b>

Tabella 2.4.2.1 – Risultati delle analisi petrofisiche.



## 3 IDROGEOLOGIA

### 3.1 RILIEVO IDROGEOLOGICO DELL'AREA DI PROGETTO: ATTIVITÀ DI CENSIMENTO DEI PUNTI D'ACQUA E RICOSTRUZIONE DELLA SUPERFICIE PIEZOMETRICA (GENNAIO-APRILE 2024)

Le attività di rilievo idrogeologico sono state svolte all'interno dell'areale di circa 6 km<sup>2</sup> compreso tra il sito del pozzo GG3 ed il Centro Olio Tempa Rossa. Il lavoro ha avuto come obiettivo quello di definire le caratteristiche idrogeologiche dell'area e ricostruire la piezometria della falda idrica sotterranea. Sono state svolte le seguenti attività:

- censimento e ubicazione dei punti d'acqua presenti;
- raccolta mensile dei dati freaticometrici dei livelli di falda in corrispondenza di pozzi e piezometri (periodo gennaio-aprile 2024);
- classificazione delle formazioni affioranti in chiave idrogeologica;
- ricostruzione piezometrica della falda idrica sotterranea ed analisi idrodinamica sui dati relativi ad aprile 2024;
- analisi delle escursioni della falda idrica sotterranea (gennaio-aprile 2024).

Il censimento dei punti d'acqua ha permesso di ubicare in modo esatto, tramite l'utilizzo di tecnologia GPS, sorgenti, pozzi e piezometri presenti nell'area oggetto di studio. Le misure sono state condotte mediante l'uso di una sondina freaticometrica inserita all'interno dei pozzi/piezometri in modo da misurarne il livello della falda rispetto al boccapozzo (o bordo del tubo piezometrico); la misura viene in seguito compensata in modo tale da riferirla alla quota del cosiddetto piano campagna (p.c.) da noi ottenuta attraverso il modello digitale del terreno (DTM) a risoluzione 5x5 (<https://rsdi.regione.basilicata.it>).

In particolare, durante le operazioni sul campo sono stati acquisiti una serie di dati riportati sulle schede di sintesi dei punti d'acqua (vedi ALLEGATO I e ALLEGATO VI – SCHEDE DI SINTESI PUNTI ACQUA). Durante l'attività di campo sono stati censiti in totale 22 punti d'acqua (Fig. 3.1.1), di cui:

- 4 sorgenti;
- 4 pozzi;

- 17 piezometri.

Successivamente al censimento e alla georeferenziazione dei punti d'acqua, l'attività è proseguita con la misura del livello freatico all'interno di pozzi e piezometri. Tali letture sono state eseguite nel minor tempo possibile, allo scopo di "fotografare" lo stato piezometrico dinamico della falda idrica sotterranea; la misura è stata effettuata avendo come riferimento il bocca-pozzo (tabella 3.1.1). I livelli freatici registrati sono stati successivamente riferiti al livello medio del mare sottraendo dalla quota altimetrica acquisita sia attraverso modalità GPS che utilizzando il DTM la misura effettuata (al netto dell'altezza del bocca-pozzo dal piano campagna). Oltre all'analisi del quadro effettivo dei punti d'acqua presenti, durante le attività di rilievo idrogeologico sono state valutate le caratteristiche idrogeologiche delle formazioni affioranti nell'area indagata, in modo tale da definirne i caratteri di permeabilità idraulica sulla base dell'osservazione dei siti e della raccolta di dati inerenti l'assetto stratigrafico dei litotipi affioranti, giacitura di fratture e piani di taglio, presenza di eventuali rocce di faglia, ecc.

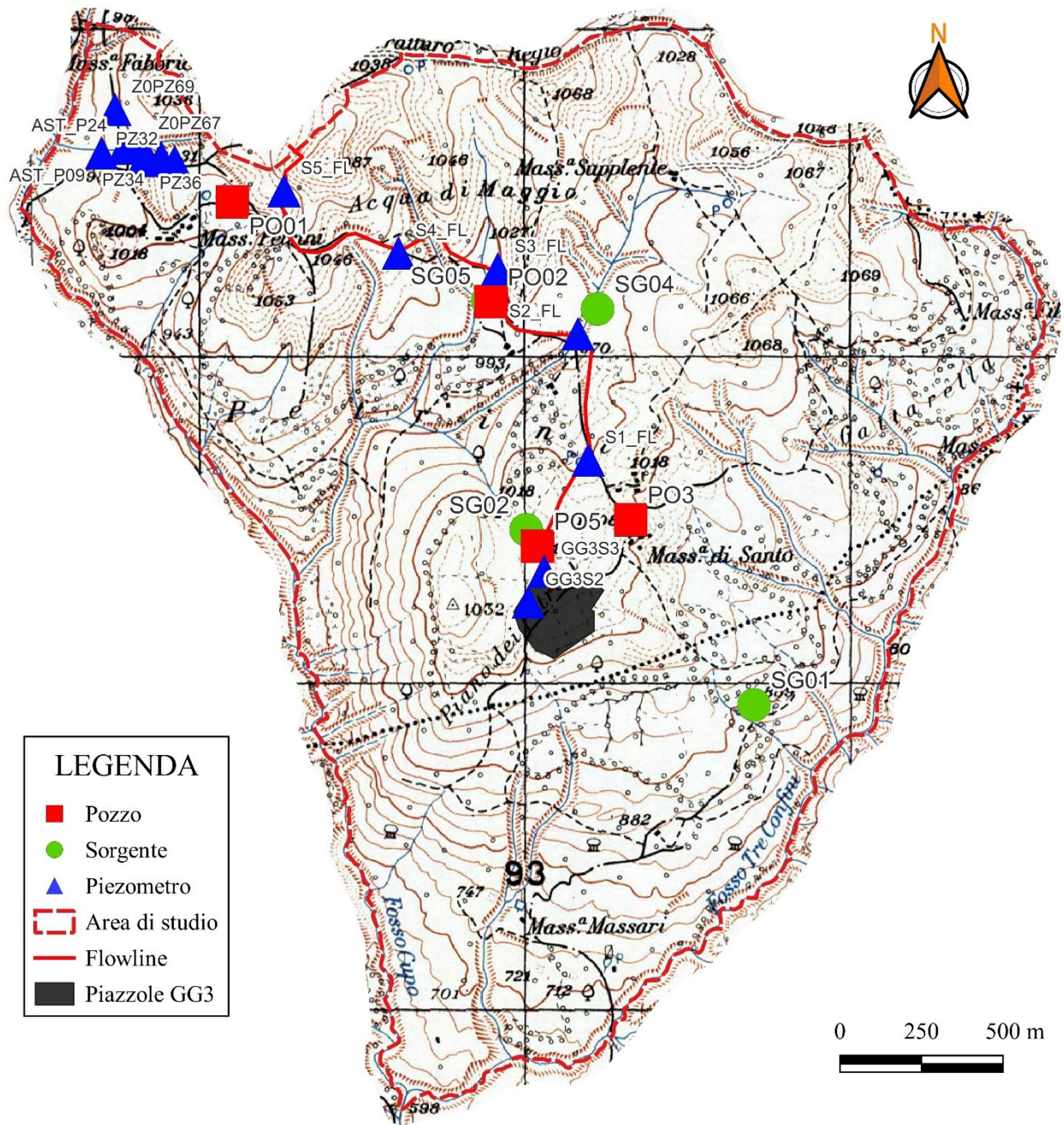


Figura 3.1.1 - Ubicazione dei punti d'acqua censiti nell'area di studio.

Codice	Tipo	Latitudine	Longitudine	H boccaforo	Prof./Cell	Quota DTM	Livello piezometrico rispetto al l.m.m. [m]				Escursione [m]
							Gennaio 24	Febbraio 24	Marzo 24	Aprile 24	
AST_P09	Piezometro a tubo aperto	40.40648	16.07988	0.23		971.37	969.03	969.33	969.22	969.19	-0.16
AST_P24	Piezometro a tubo aperto	40.40661	16.08068	0.18		978.78	976.20	976.70	976.43	976.25	-0.05
GG3S2	Piezometro a tubo aperto	40.39394	16.09510	0.23		1012.01	1002.17	1002.62	1002.99	1002.87	-0.70
GG3S3	Piezometro a tubo aperto	40.39478	16.09568	0.29		1011.45	1009.00	1010.48	1010.49	1010.18	-1.18
PZ32	Piezometro Casagrande	40.40622	16.08252	0.30	5.50	1013.86	secco	1008.81	secco	secco	
PZ32	Piezometro Casagrande	40.40622	16.08252	0.30	20.60	1013.86	1003.95	996.89	1004.68	1003.15	0.80
PZ34	Piezometro Casagrande	40.40634	16.08203	0.30	5.30	1003.20	secco	secco	secco	secco	
PZ34	Piezometro Casagrande	40.40634	16.08203	0.30	19.10	1003.20	996.42	996.54	996.41	996.14	0.28
PZ36	Piezometro Casagrande	40.40626	16.08136	0.30	11.50	993.10	987.58	982.35	982.14	982.12	5.46
PZ36	Piezometro Casagrande	40.40626	16.08136	0.30	19.10	993.10	987.58	secco	secco	974.53	13.05
S1_FL	Piezometro a tubo aperto	40.39784	16.09732	0.19		993.67	990.99	992.11	991.71	991.53	-0.54
S2_FL	Piezometro a tubo aperto	40.40132	16.09701	0.30		972.52	966.72	967.28	967.13	966.96	-0.24
S3_FL	Piezometro a tubo aperto	40.40315	16.09414	0.26		991.20	986.84	988.31	988.08	987.97	-1.13
S4_FL	Piezometro a tubo aperto	40.40362	16.09056	0.30		1014.10	1007.22	1008.59	1007.80	1007.43	-0.21
S5_FL	Piezometro a tubo aperto	40.40538	16.08645	0.30		1046.12			1042.46	1041.85	
Z0PZ67	Piezometro a tubo aperto	40.40666	16.08133	0.40		992.37	989.36	989.74	989.18	988.99	0.37
Z0PZ69	Piezometro a tubo aperto	40.40768	16.08038	0.25		991.87	985.46	983.77	983.96	983.66	1.80
PO01	Pozzo	40.40509	16.08458	0.00		1014.60	1004.03				
PO02	Pozzo	40.40224	16.09389	0.66		983.48	982.43				
PO03	Pozzo	40.39617	16.09883	0.61		1001.06	996.24				
PO05	Pozzo	40.39547	16.09545	0.18		1010.27	1006.98				
SG01	Sorgente	40.39102	16.10320			894.17					
SG02	Sorgente	40.39593	16.09505			1009.18					
SG04	Sorgente	40.40200	16.09773			973.60					
SG05	Sorgente	40.40227	16.09377			982.91					

**Tabella 3.1.1 - Tabella di sintesi dei dati idrogeologici dei punti d'acqua acquisiti durante le attività di rilievo (Gennaio 2024). La tabella contiene i dati freaticometrici registrati nel periodo di monitoraggio (gennaio-aprile 2024). Sistema di riferimento WGS84 - EPSG: 4326 Geografico (latitudine e longitudine in gradi).**

Sulla base di criteri idrogeologici caratterizzanti, il risultato del suddetto rilievo, correlato con quelli dello studio geologico, ha permesso di classificare le formazioni geologiche nei principali complessi idrogeologici. Questo è stato ovviamente eseguito in base al grado di dettaglio richiesto e riportato all'interno di carte tematiche. I tre principali complessi idrogeologici riconosciuti all'interno dell'area di studio, sono quindi distinti tra loro in base al grado e al tipo di permeabilità idraulica. Di seguito si riportano i principali complessi idrogeologici individuati nell'area di studio.

### **3.1.1 Complesso idrogeologico Pelitico-Arenaceo (Flysch di Gorgoglione - Litofacies A)**

- Tipo di permeabilità per porosità e fessurazione (nei livelli arenacei)
- Grado di permeabilità da sostanzialmente molto basso a medio

Il Complesso idrogeologico **pelitico-arenaceo** (vedi ALLEGATO V – CARTA IDROGEOLOGICA DELL'AREALE COMPRESO TRA IL POZZO GG3 E IL CENTRO OLIO TEMPA ROSSA, BASILICATA, SCALA 1:5.000) presenta un grado di permeabilità relativa variabile da basso a medio. Il grado di permeabilità è principalmente per fessurazione e, in subordine, per porosità primaria. Questo complesso comprende la Litofacies A pelitico-arenacee del Flysch di Gorgoglione, in particolare i membri FGOa2, FGOa1, FGOi. Nell'area indagata, il Complesso è costituito da una fitta alternanza di strati sottili, spessi fino a 20 cm, solitamente centimetrici comprendenti arenarie, siltiti, marne e argille. Si nota come la separazione tra i diversi strati sia netta. Rari gli strati arenacei caratterizzati da spessori maggiori di 20 cm. Si nota altresì come la presenza di intervalli pelitici continua alla scala dei singoli affioramenti abbia spesso compartimentalizzato le fratture all'interno dei singoli strati, non consentendo quindi l'infiltrazione di acque meteoriche in profondità e, di fatto, l'alimentazione di una possibile falda idrica profonda (falda di base). La presenza di una coltre di alterazione ha permesso inoltre l'instaurarsi di un flusso idrico limitato e superficiale, il quale alimenta sorgenti con portate idriche limitate.

### 3.1.2 Complesso idrogeologico Arenaceo-Pelitico (Flysch di Gorgoglione - Litofacies B)

- Tipo di permeabilità per porosità e fessurazione (nei livelli arenacei)
- Grado di permeabilità da medio – basso

Il Complesso idrogeologico **arenaceo-pelitico** è caratterizzato da un grado di permeabilità relativa localmente alto alla scala di affioramento, in riferimento alle rocce affioranti in superficie; generalmente il grado di permeabilità relativa risulta variabile da medio a basso. La permeabilità è principalmente per fessurazione e, in subordine, per porosità. Il Complesso idrogeologico è costituito dalla **litofacies B** del **Flysch di Gorgoglione** (FGOb) (vedi ALLEGATO V – CARTA IDROGEOLOGICA DELL'AREALE COMPRESO TRA IL POZZO GG3 E IL CENTRO OLIO TEMPA ROSSA, BASILICATA, SCALA 1:5.000), la quale è caratterizzata da un rapporto arenaria:pelite maggiore di 1. Gli strati arenacei hanno colori che vanno dall'ocra al grigiastro, sono ben distinti da quelli pelitici, hanno uno spessore variabile da qualche decimetro fino a circa 2,4 metri e sono ritagliati da tre set principali di fratture ad alto angolo (vedi capitolo 2 - Geologia). All'interno della Litofacies B si rinvengono intervalli metrici pelitico-arenacei afferenti alla Litofacies A. La presenza di intervalli pelitici continui intercalati agli strati arenacei non permette la formazione di un flusso idrico profondo e non facilita, quindi, l'alimentazione di un'eventuale falda idrica di base. La presenza di una coltre di alterazione permette un flusso idrico, limitato e superficiale, che giustifica la presenza di sorgenti di piccola entità, in termini di portata idrica.

### 3.1.3 Complesso idrogeologico delle Argille Varicolori Inferiori

- Tipo di permeabilità per porosità e fessurazione
- Grado di permeabilità nullo/impermeabile

Il Complesso idrogeologico delle **Argille Varicolori Inferiori** possiede un grado di permeabilità relativa nulla/impermeabile, in corrispondenza delle ampie porzioni argilloso-marnose, e medioscarso all'interno delle subordinate porzioni lapidee, molto fratturate. Esso è costituito da

argille di colore rossastro, verde e grigio, con livelli di diaspri e calcari selciosi varicolori di 2-40 cm di spessore. Si rinvencono livelli estremamente caotici e tettonizzati, i quali contengono al loro interno lembi o blocchi di alternanze calcarenitico-marnose o arenaceo marnose. Il complesso risulta sostanzialmente impermeabile nella prevalente componente argillosa, mentre le componenti lapidee hanno una permeabilità idraulica relativa media a scala locale di affioramento. A scala maggiore, essendo questi blocchi immersi all'interno della componente argillosa prevalente, il contributo dato dalle componenti lapidee al flusso è pari a zero.

### **3.2 ANALISI GEOFISICA E IDROGEOFISICA: TOMOGRAFIA DI RESISTIVITÀ ELETTRICA (ERT-2D) E CARATTERIZZAZIONE DELL'AREA GG3**

Le indagini geoelettriche sono state effettuate in corrispondenza dell'area GG3 e lungo la *flowline* di collegamento con il Centro Olio di Tempa Rossa. I risultati sono riportati nell'ALLEGATO VII – INDAGINI GEOELETTRICHE FINALIZZATE ALLA CARATTERIZZAZIONE DI UN'AREA UBICATA NEI PRESSI DEL CENTRO OLIO TEMPA ROSSA. Lo scopo del lavoro è stato quello di acquisire nuovi elementi utili per la comprensione delle geometrie dei corpi rocciosi del sottosuolo e, quindi, dell'assetto idrogeologico dell'area di studio. In particolare, i risultati sono stati interpretati per individuare la presenza di eventuali falde all'interno degli strati rocciosi superficiali, corpi di frana ubicati a ridosso della flowline ed escludere la presenza di cavità carsiche. Per una migliore interpretazione dei dati geofisici (ERT 2D) è stato effettuato il confronto con le stratigrafie ricavate da pozzi precedentemente realizzati nell'area di indagine.



### 3.2.1 ATTIVITÀ DI CAMPAGNA

L'attività di campagna, svolta dai ricercatori del CNR-IMAA nel mese di Marzo 2024, è consistita nell'esecuzione di n. 8 Tomografie di Resistività Elettrica (ERT) nei siti proposti da GEOSMART Italia (Figura 3.2.1.1).

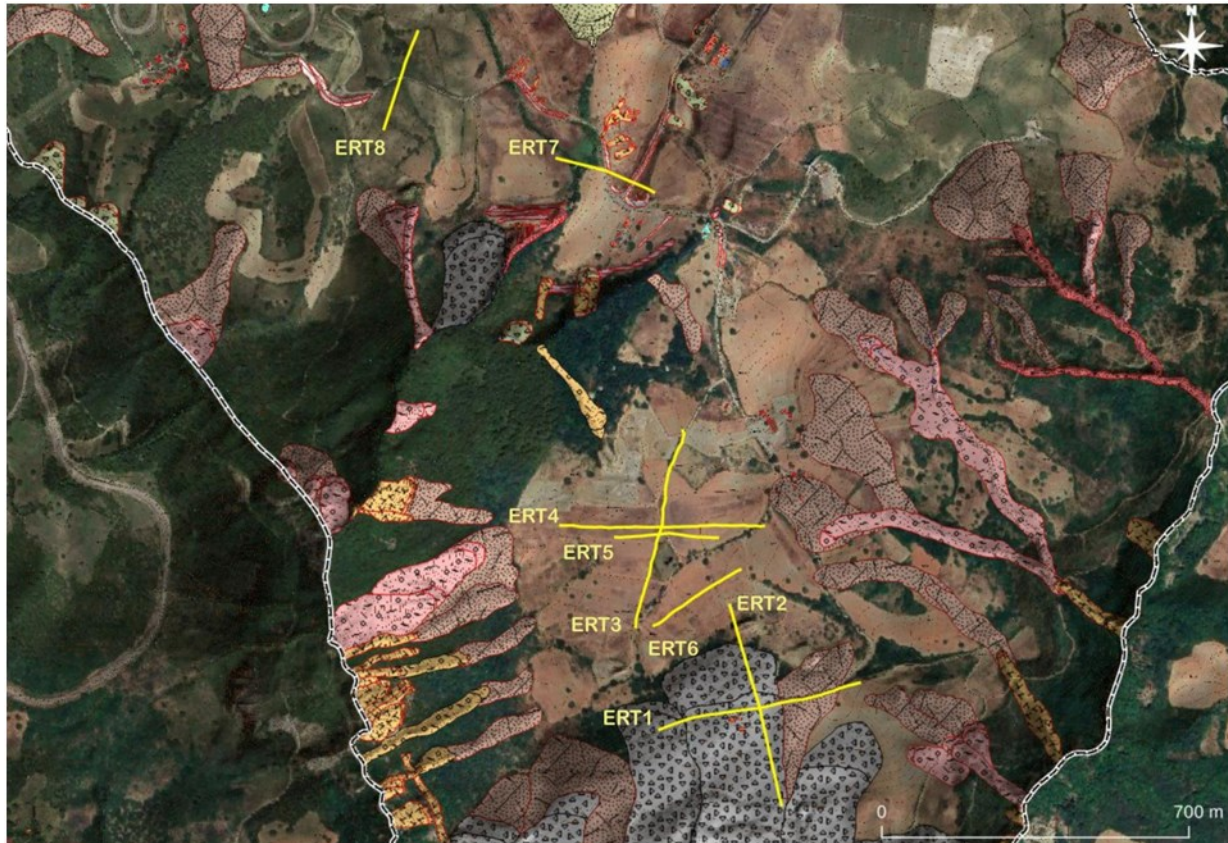


Figura 3.2.1.1 - Ubicazione dei profili ERT nell'area investigata sovrapposti alla mappa geomorfologica.

### 3.2.1.1 TOMOGRAFIE DI RESISTIVITÀ ELETTRICA – ERT – ACQUISIZIONE DATI

Le ERT sono state effettuate utilizzando un georesistivimetro Syscal Pro della IRIS Instruments, accoppiato ad un sistema multielettrodo a 48 elettrodi (Figura 3.2.1.1.1).

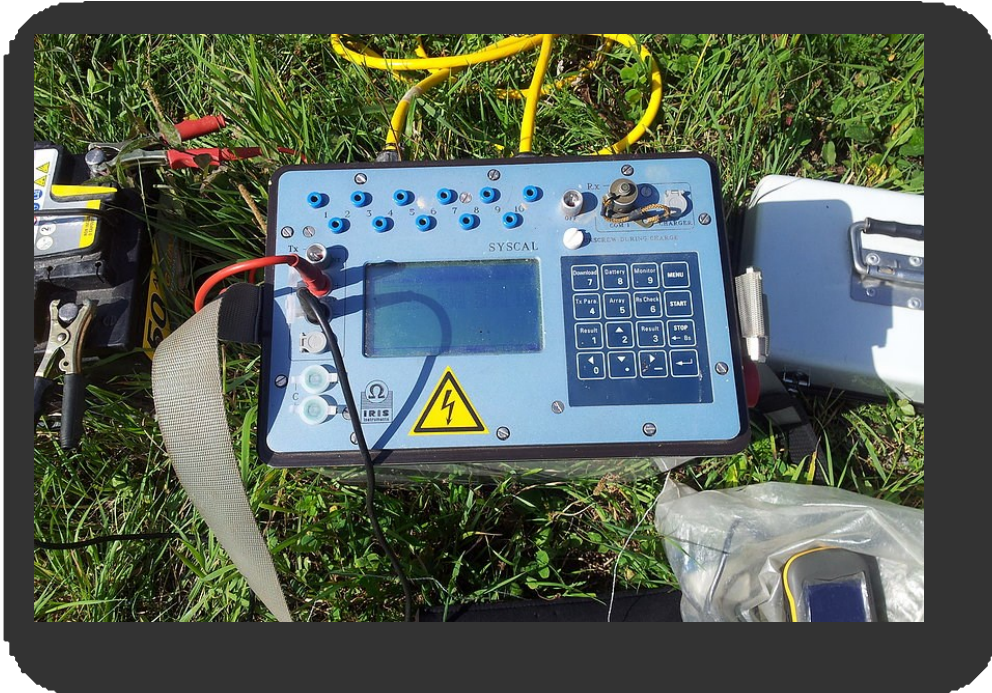


Figura 3.2.1.1.1 - Strumentazione geoelettrica (Syscal Pro della IRIS Instruments) per la realizzazione delle ERT.

I dati di resistività apparente sono stati acquisiti mediante i dispositivi elettrodoici dipolo-dipolo e Wenner-Schlumberger. La scelta dei due dispositivi ha tenuto conto della capacità del primo di rilevare meglio le variazioni verticali della resistività e del secondo di fornire dati caratterizzati da una buona risoluzione sia orizzontale sia verticale. Sono state adottate due spaziature interelettrodiche, 5 e 10 metri, in modo tale da ottenere profili di diversa lunghezza e differente profondità d'investigazione (tabella 3.2.1.1.1).

ERT	N. Elettr.	Array	Spaziat. Elettr. (m)	Lungh. ERT(m)	Profond. Invest. (m)
ERT 1	48	WS, DD	10	470	~ 70
ERT 2	48	WS, DD	10	470	~ 70
ERT 3	48	WS, DD	10	470	~ 70
ERT 4	48	WS, DD	10	470	~ 70
ERT 5	48	WS, DD	5	235	~35-40
ERT 6	48	WS, DD	5	235	~ 35-40
ERT 7	48	WS, DD	5	235	~ 35-40
ERT 8	48	WS, DD	5	235	~ 35-40

**Tabella 3.2.1.1.1 - Dettagli tecnici e caratteristiche geometriche delle ERT eseguite nell'area di indagine.**

## 3.2.2 RISULTATI

Di seguito, per ciascuna ERT si riporta un particolare della mappa delle indagini con l'ubicazione del profilo lungo cui i dati sono stati acquisiti e il modello di inversione ottenuto con il dispositivo Wenner-Schlumberger, caratterizzato da una minore rumorosità rispetto al dipolo-dipolo e quindi da una migliore qualità del dato acquisito. I dati sono stati invertiti con il software RES2DINV applicando il *conventional smoothness-constrained least squares method (smooth - L2 norm)*.

Nell'area di indagine affiora estesamente la formazione del Flysch di Gorgoglione caratterizzata da due litofacies distinte tra loro sulla base del rapporto tra arenarie e peliti. La prima litofacies,

denominata pelitico-arenacea (A), è caratterizzata da una prevalenza di siltiti e peliti. La seconda litofacies, denominata arenaceo-pelitica (B), che affiora ampiamente nell'area investigata, consiste in corpi lenticolari arenacei potenti fino a circa 2,4 m e intercalazioni siltoso-argillose. All'interno della Litofacies B, lo spessore degli strati arenacei è generalmente superiore a quello che si riscontra all'interno della Litofacies A.

### 3.2.2.1 ERT1 E ERT2: CORPO DI FRANA

La ERT 1 e la ERT 2 sono state realizzate nell'area di indagine lungo due profili, disposti rispettivamente in direzione trasversale e longitudinale ad uno dei corpi di frana in essa presenti, con lo scopo di ricostruirne la geometria, individuarne la superficie di scivolamento, definire lo spessore del materiale in frana e verificare la presenza di aree a maggior contenuto di acqua (fig. 3.2.2.1.1).

In entrambi i casi i dati di resistività apparente sono stati acquisiti mediante 48 elettrodi con spaziatura interelettrodica di 10 m, ottenendo un'immagine elettrica con una lunghezza di 470 m ed una profondità di investigazione di circa 70 m.

Entrambi i modelli di resistività, ottenuti invertendo i dati acquisiti con il dispositivo elettrodo Wenner-Schlumberger, sono caratterizzati da valori di resistività che variano da circa 10 m ad oltre 200 m.

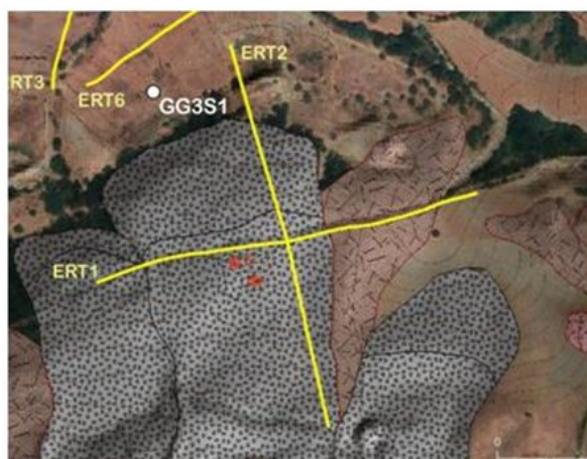
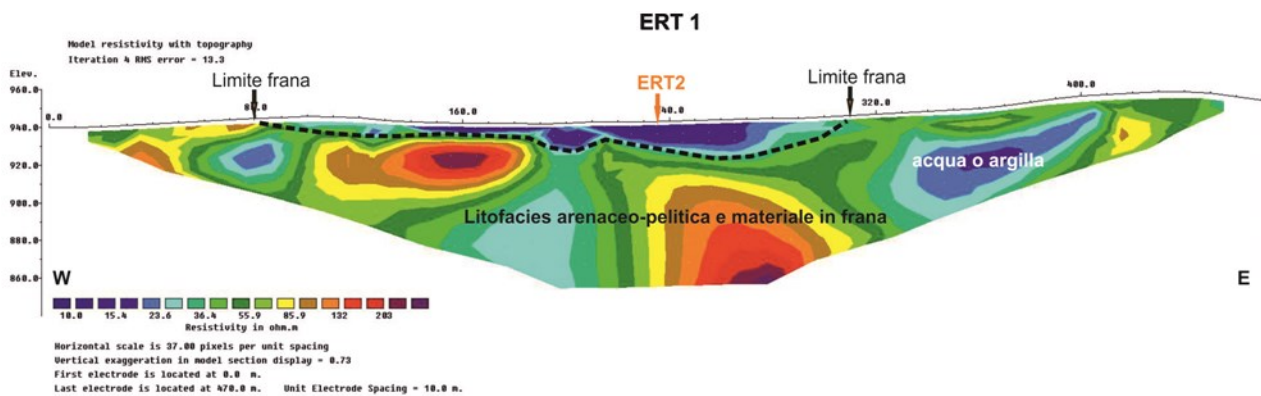


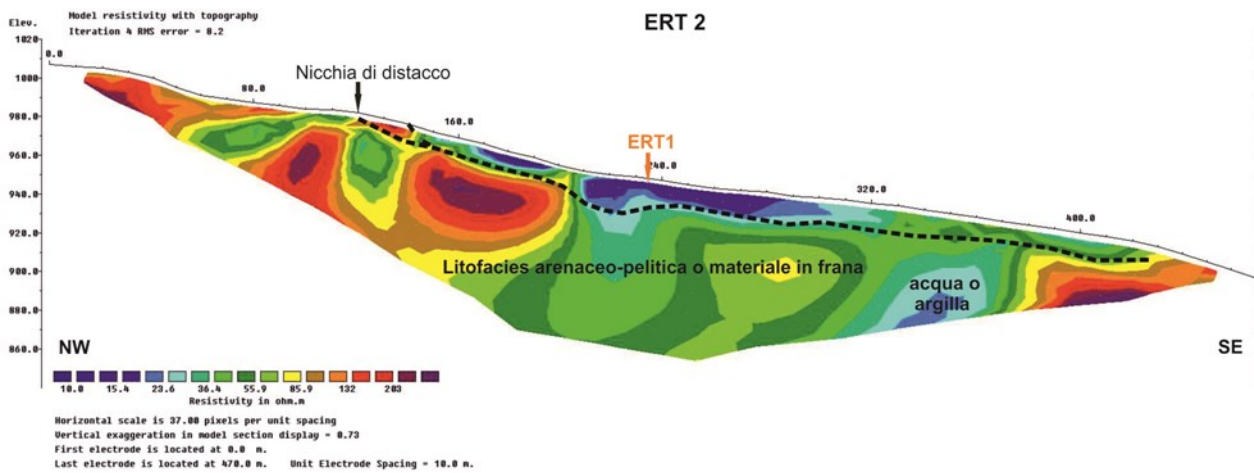
Figura 3.2.2.1.1 - Dettaglio della mappa delle indagini con ubicazione della ERT 1 e della ERT 2.

Nel complesso la ERT1 (figura 3.2.2.1.2) mostra del materiale conduttivo superficiale ( $\rho < 30 \Omega\text{m}$ ), compreso tra 80 e 310 m dall'origine del profilo e con uno spessore massimo di 20 m, associabile al materiale in frana e caratterizzato da un maggior contenuto di acqua. La parte sottostante mostra invece una distribuzione di resistività più disomogenea, associabile alla litofacies B del Flysch di Gorgoglione, con materiale relativamente resistivo ( $\rho > 80 \Omega\text{m}$ ) inglobato in materiale più conduttivo. L'aspetto caotico del materiale più profondo può essere giustificato sia dalla presenza di blocchi arenacei inglobati in una matrice pelitica, sia dall'assetto geomorfologico dell'area caratterizzata da più corpi di frana.



**Figura 3.2.2.1.2 - Modello di inversione della ERT1 ottenuto con il dispositivo Wenner-Schlumberger. Nelle ERT sono riportati il contrasto di resistività sub-parallelo tra materiale in frana e materiale in posto (linea tratteggiata nera) e i limiti laterali del corpo di frana ricavati dalla mappa geomorfologica.**

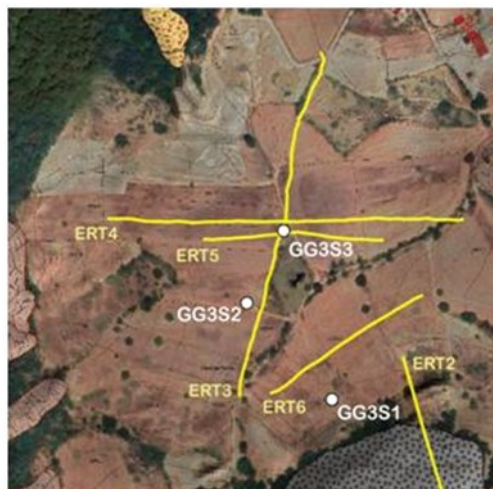
Allo stesso modo la ERT 2 (Fig. 3.2.2.1.3), il cui profilo si incrocia al centro con quello della ERT1, mostra del materiale conduttivo superficiale (spessore max 20m) ascrivibile al materiale in frana, che poggia su del materiale dalla distribuzione di resistività più disomogenea sempre associabile alla litofacies B del Flysch di Gorgoglione. Come per il caso precedente si evidenzia sempre la presenza di nuclei resistivi (possibili blocchi arenacei) inglobati in materiale relativamente conduttivo. In entrambe le ERT sono presenti due nuclei profondi più conduttivi che potrebbero essere dovuti sia alla presenza di un maggior contenuto di acqua sia a materiale argilloso.



**Figura 3.2.2.1.3 - Modello di inversione della ERT2 ottenuto con il dispositivo Wenner-Schlumberger. Nelle ERT sono riportati il contrasto di resistività sub-parallelo tra materiale in frana e materiale in posto (linea tratteggiata nera) e l'indicazione della nicchia di distacco del corpo di frana ricavata dalla mappa geomorfologica.**

### 3.2.2.2 ERT3, ERT4, ERT5, ERT6 - AREA POZZO GG3

Le quattro ERT (3,4,5 e 6) di seguito descritte sono state effettuate nell'area in cui sarà realizzato il pozzo di estrazione GG3 (figura 3.2.2.2.1) con lo scopo di contribuire alla definizione dell'assetto stratigrafico e idrogeologico. Per le ERT 3 e 4 sono stati utilizzati 48 elettrodi spazati di 10 m ottenendo un profilo di 470 m e raggiungendo una profondità di investigazione di circa 70 m. Le ERT 5 e 6 sono invece state realizzate utilizzando sempre 48 elettrodi spazati però di 5 m, ottenendo quindi un profilo di 235 m e raggiungendo una profondità di investigazione di circa 35-40 m. I profili delle ERT3, 4 e 5 sono stati ubicati al centro dell'area dove si realizzerà il pozzo e si incrociano tra loro. La ERT5 è stata realizzata parallelamente alla ERT4 ad una distanza tale da poterla considerare un suo dettaglio. La ERT6 è invece stata effettuata in una posizione un po' più distante dalle altre e ad una quota leggermente più bassa.



**Figura 3.2.2.2.1 - Dettaglio della mappa di indagini eseguite nei pressi dell'area in cui sarà realizzato il pozzo GG3 con indicati i profili ERT e le ubicazioni dei sondaggi geognostici precedentemente realizzati nell'area.**

Le ERT 3 (fig. 3.2.2.2.2) e 4 (fig. 3.2.2.2.3) evidenziano una distribuzione di resistività simile caratterizzata da materiale superficiale relativamente conduttivo ( $\rho < 60 \Omega\text{m}$ ) che poggia su materiale più resistivo ( $\rho > 80 \Omega\text{m}$ ). Il confronto con la stratigrafia ottenuta dal pozzo S3, lungo 10 m e precedentemente realizzato nell'area, ha consentito solo di confermare che il materiale superficiale è rappresentato da una alternanza di siltiti e livelli di arenarie ascrivibile alla litofacies pelitico-arenacea del Flysch di Gorgoglione. Lo spessore di tale materiale nel punto di incrocio delle due ERT è di circa 25 m e sembra però approfondirsi in direzione E-NE. All'interno di questo materiale relativamente conduttivo si ritrovano dei nuclei di materiale decisamente più conduttivo ( $\rho < 25 \Omega\text{m}$ ) che può essere associato sia ad un'area a maggior contenuto di acqua, come nel caso della ERT3 tra 280 e 330 m dall'origine del profilo dove era visibile acqua a piano campagna, sia alla presenza di intercalazioni argillose. Al fine di migliorare l'interpretazione della ERT3 si è provato a riproiettare sulla stessa immagine anche la stratigrafia ricavata dal pozzo S2 lungo 15 m. Il pozzo dista dal profilo circa 20 m e fornendo una informazione puntuale potrebbe non essere indicativo di quello che viene mostrato dalla ERT. La sua stratigrafia riporta la presenza di un bancone arenaceo che a causa del suo piccolo spessore non è stato possibile discriminare nella ERT per la risoluzione spaziale utilizzata in fase di acquisizione.

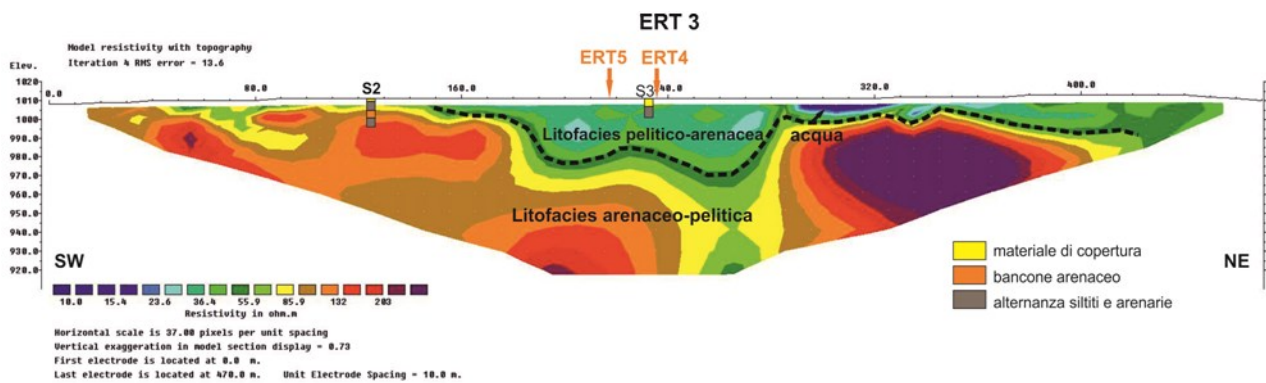


Figura 3.2.2.2.2. - Modello di inversione della ERT3 ottenuto con il dispositivo Wenner-Schlumberger confrontato con le stratigrafie dei pozzi S2 e S3.

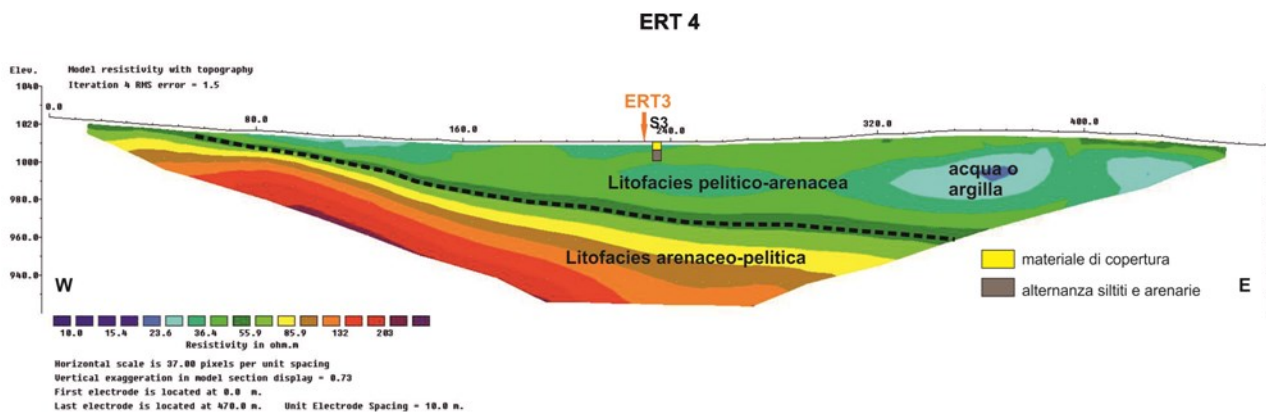


Figura 3.2.2.2.3 - Modello di inversione della ERT4 ottenuto con il dispositivo Wenner-Schlumberger confrontato con la stratigrafia del pozzo S3.

Come già anticipato, la ERT5 (fig. 3.2.2.2.4) è stata realizzata parallelamente alla ERT4 e ne può essere considerata un dettaglio. Entrambe le ERT mostrano del materiale conduttivo più superficiale, spesso circa 25 m nel punto di incrocio, ascrivibile alla litofacies pelitico-arenacea del Flysch di Gorgoglione, che poggia su materiale più resistivo associabile alla litofacies arenaceo-pelitica. Anche la ERT 5 presenta dei nuclei più conduttivi di cui uno, quello che si individua nei primissimi metri dall'origine fino a metà del profilo, è sicuramente associabile alla presenza di acqua, essendo il profilo di misura posizionato molto vicino ad un laghetto presente nella zona. Quelli più profondi, come già detto in precedenza, potrebbero essere correlati sia ad un maggiore contenuto di acqua sia alla presenza di materiale argilloso.



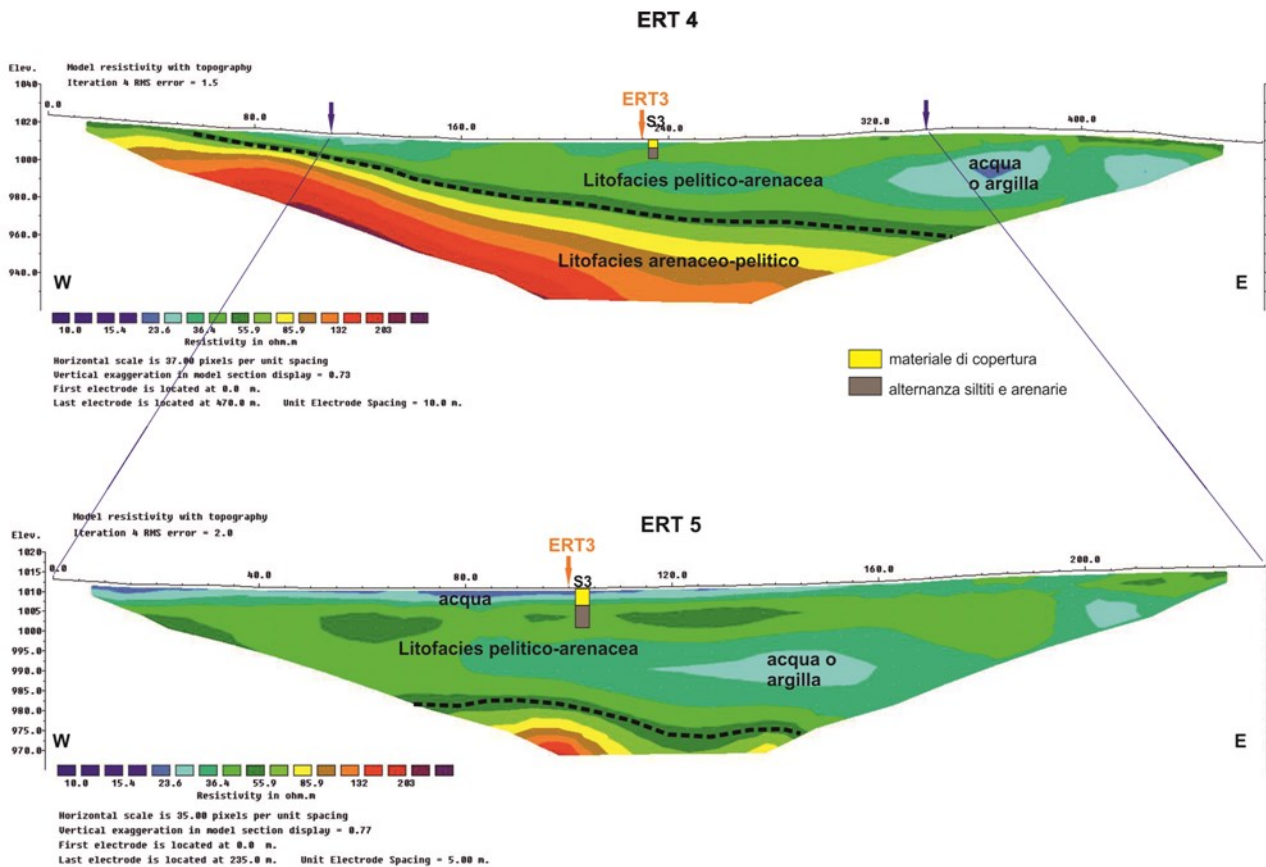


Figura 3.2.2.2.4 - Confronto da il modello di inversione della ERT4 e quello della ERT 5 ottenuti con il dispositivo Wenner-Schlumberger e realizzati lungo due profili paralleli tra loro. Entrambi i modelli sono stati confrontati con la stratigrafia del sondaggio S3.

La ERT6 (fig. 3.2.2.2.5) è stata realizzata sempre nei pressi dell'area in cui verrà realizzato il pozzo GG3 ma ad una quota leggermente più bassa. Come nel caso della ERT5 si tratta di una modello con una risoluzione spaziale maggiore che mette in evidenza la distribuzione della resistività nei primi 35-40 m di profondità. L'immagine presenta una distribuzione di resistività omogenea, evidenziando uno strato superficiale conduttivo e molto sottile che poggia su un substrato resistivo. Come nei casi precedenti si sono associati i valori più resistivi alla litofacies arenaceo-pelitica. Per migliorare l'interpretazione della ERT si è scelto di riproiettare su di essa la stratigrafia del pozzo S1, l'unico lungo 30 m ma distante circa 50 m dal profilo della ERT, che mostra la stessa alternanza delle stratigrafie precedenti.

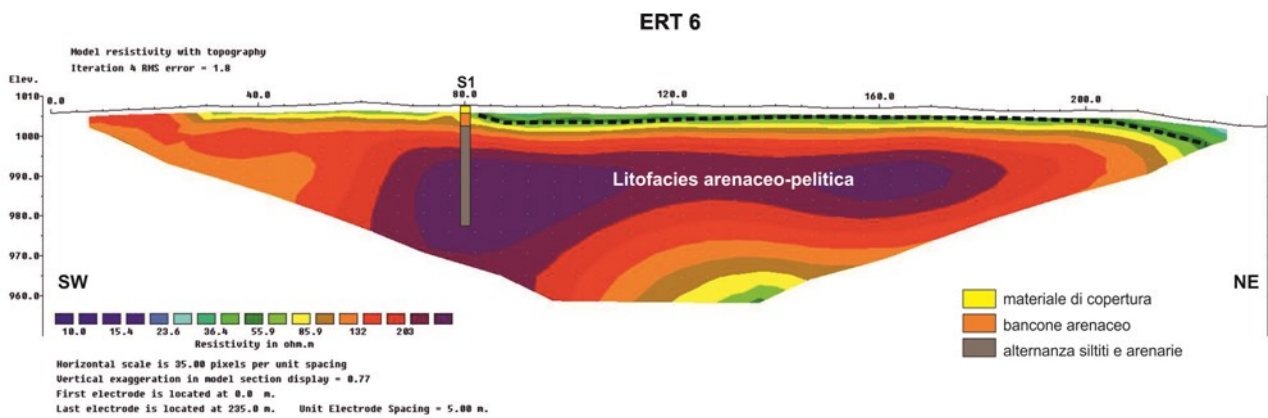


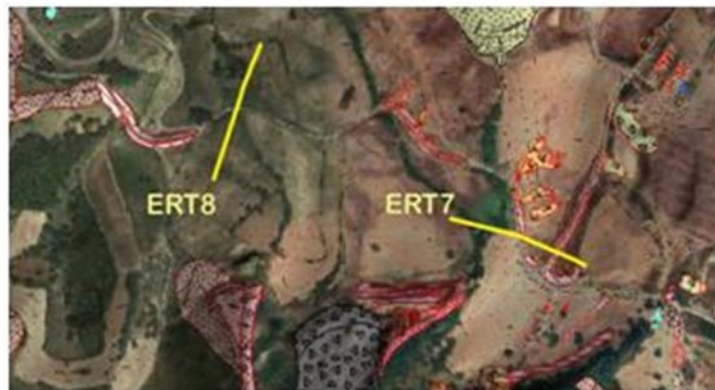
Figura 3.2.2.2.5 - Modello di inversione della ERT6 ottenuto con il dispositivo Wenner-Schlumberger confrontato con la stratigrafia del pozzo S1 riproiettato.

L'interpretazione complessiva delle 4 ERT presentate in questo paragrafo sembra suggerire che l'area dove sarà realizzato il pozzo GG3 è caratterizzata da uno strato conduttivo più superficiale che si approfondisce andando da ovest verso est e che invece sembra ridursi fino a sparire andando da NE a SW. Si noti infatti come sia la ERT3 sia la ERT6 sono caratterizzate nella loro parte iniziale, posta appunto a SW, da materiale resistivo.

Si rende necessario specificare che, tra i sondaggi utilizzati per la taratura delle ERT, la stratigrafia ottenuta da S3 è risultata essere la migliore per lo scopo in quanto ubicata centralmente rispetto all'area investigata dalle ERT e molto vicina ai profili delle ERT 3,4 e 5.

### 3.2.2.3 ERT7 E ERT8: FLOWLINE

Le ERT 7 e 8 sono state realizzate in due diversi punti lungo quello che dovrebbe rappresentare il tracciato della futura flowline (fig. 3.2.2.3.1), utilizzando una spaziatura di 5 m quindi ottenendo una immagine a più alta risoluzione fino ad una profondità di indagine di circa 40 m.



**Figura 3.2.2.3.1 - Dettaglio della mappa di indagini eseguite lungo il tracciato della flowline.**

Sono entrambe caratterizzate da valori di resistività più bassi rispetto alle ERT precedenti e compresi nel range 10-140  $\Omega\text{m}$  (fig. 3.2.2.3.2 e fig. 3.2.2.3.3). Come nei casi precedenti è possibile evidenziare del materiale superficiale relativamente conduttivo, con uno spessore massimo di circa 25 m, che poggia su del materiale più resistivo. Osservando i modelli di resistività si potrebbe ipotizzare che nella zona di indagine, posta a nord-ovest della piazzola GG3, affiori principalmente la litofacies pelitico-arenacea del Flysch di Gorgoglione. I nuclei superficiali più conduttivi, presenti in entrambe le ERT, sono associabili alla presenza di acqua visibile a piano campagna durante le misure.



**Figura 3.2.2.3.2 - Modello di inversione della ERT7 ottenuto con il dispositivo Wenner-Schlumberger.**

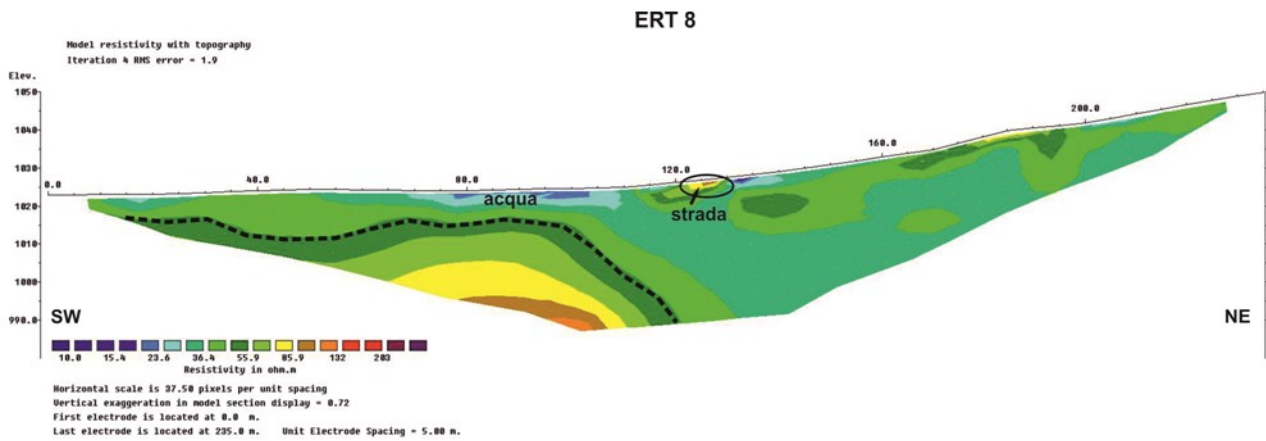


Figura 3.2.2.3.3 - Modello di inversione della ERT8 ottenuto con il dispositivo Wenner-Schlumberger.

### **3.2.3 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE RELATIVE ALLE INDAGINI GEOFISICHE**

Lo scopo delle indagini geofisiche è stato quello di fornire informazioni utili a migliorare la caratterizzazione stratigrafica ed idrogeologica del sottosuolo, contribuendo alla ricostruzione dello strato di alterazione del Flysch di Gorgoglione che affiora nell'area di indagine, alla individuazione delle eventuali falde presenti soprattutto negli strati più superficiali, alla definizione della geometria di corpi di frana e alla identificazione di eventuali cavità da carsismo.

Le ERT hanno mostrato dei pattern di resistività caratterizzati principalmente dalla presenza di variazioni verticali, associabili a contatti di natura litologico-stratigrafica tra due diverse litofacies della stessa formazione geologica. Sebbene nell'area fossero stati precedentemente realizzati dei pozzi, la profondità da essi raggiunti non ha consentito una totale taratura delle ERT. Le stratigrafie descritte nella relazione geologica evidenziano un sottosuolo caratterizzato principalmente da una "alternanza di siltiti, peliti e arenarie" nella quale, a seconda della porzione di sottosuolo investigato, può prevalere l'una o l'altra componente.

I risultati hanno anche evidenziato che il materiale pelitico-arenaceo più superficiale è caratterizzato da uno spessore variabile, che risulta essere maggiore nella zona più orientale dell'area investigata, e che al suo interno sono presenti zone caratterizzate da un maggior contenuto di acqua o argilla. I risultati non hanno invece evidenziato la presenza di discontinuità generate da eventuali corpi di frana nelle ERT realizzate lungo il tracciato della flowline.

## 3.3 IDROGEOCHIMICA

### 3.3.1 INTRODUZIONE

Nel periodo febbraio-marzo 2024 sono state campionate le acque di tre sorgenti e di tre piezometri, presenti nell'area in studio. Nello specifico, i punti campionati sono riportati nella figura 3.3.1.1 in cui si riporta la Carta geologica dell'area in studio con ubicazione dei punti campionati (acqua sorgiva SG05, SG01, SG04 e da piezometri PZ12, AST\_P24, AST\_P09). Tali campioni sono stati consegnati al Laboratorio di idrogeochimica del Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Roma "La Sapienza" per le analisi idrogeochimiche (ALLEGATO VIII - RISULTATI ANALISI IDROGEOCHIMICHE).

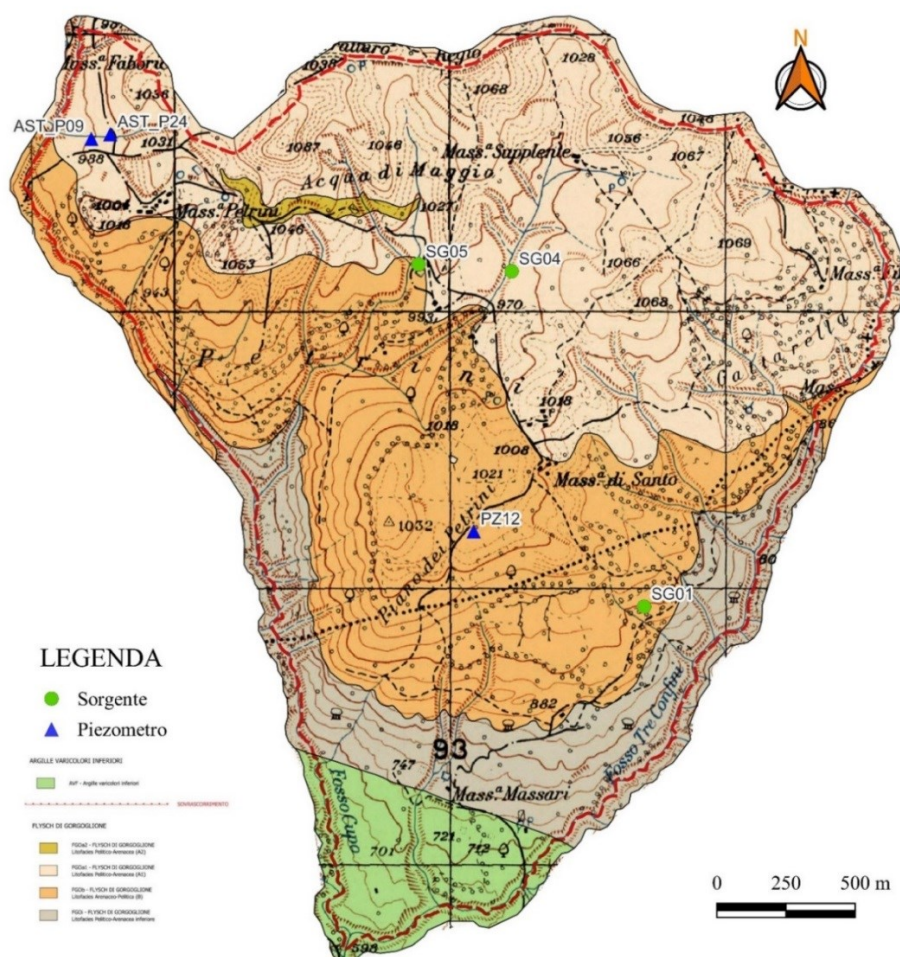


Figura 3.3.1.1 – Carta geologica dell'area in studio con ubicazione dei campioni di acqua sorgiva (SG05, SG01, SG04) e da piezometri (PZ12-GG3S1, AST\_P24, AST\_P09).

### 3.3.2 METODI

La determinazione degli elementi chimici maggiori (sodio, potassio, calcio, magnesio, fluoro, cloro, nitriti, nitrati, fosfati e solfati) è stata effettuata mediante cromatografia ionica in fase liquida (Ion Chromatography System Dionex ICS-1100 e ICS-5000).

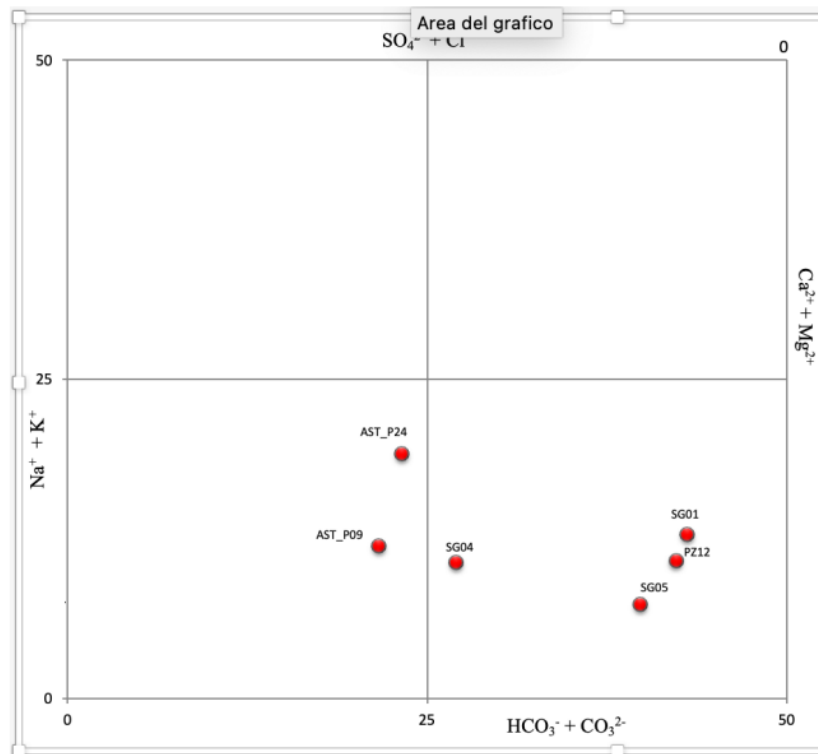
### 3.3.3 RISULTATI ANALISI IDROGEOCHIMICHE

Gli esiti delle analisi condotte sui campioni di acqua prelevati sono sintetizzati nelle tabelle 3.3.3.1 e 3.3.3.2.

Sigla	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Br	F	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
<b>PZ12</b>	62,5	20,7	35,7	4,2	14,1	22,8	333	< 0,1	0,2	< 0,1	2,8
<b>SG05</b>	135,2	14,4	30,8	0,7	26,2	48,9	422	0,4	0,2	< 0,1	0,1
<b>SG01</b>	144,2	23,7	56,8	1,6	19,4	53,4	558	0,4	0,2	< 0,1	3,4
<b>SG04</b>	198,7	21,1	71,2	1,9	111,5	147,5	445	< 0,1	0,3	< 0,1	4,1
<b>AST_P24</b>	149,7	43,6	156,2	2,2	212,9	148,8	482	< 0,1	0,3	< 0,1	1,4
<b>AST_P09</b>	168,3	92,1	111,8	4,7	310,1	117,6	521	0,3	0,3	< 0,1	0,7

Tabella 3.3.3.1 – Risultati elementi maggiori (mg/L). ). Il punto PZ\_12 corrisponde in realtà al sondaggio GG3\_S1 utilizzato per indagini sismiche in foro.

La classificazione e suddivisione delle acque è stata realizzata, in questa prima fase, mediante l'utilizzo del diagramma di Chebotarev (fig. 3.3.3.1). Tutte le acque campionate ed analizzate risultano appartenere alle **facies bicarbonato-calcica e solfato-clorurate alcaline**.



**Figura 3.3.3.1– Diagramma di Chebotarev. L'idrofacies delle acque campionate risultano appartenere alla Facies bicarbonato-calcica e solfato-clorurate alcaline.**

Sulla base degli esiti delle analisi è stato possibile supportare le ipotesi sui percorsi di circolazione idrica sotterranea ed i relativi tempi di interazione acqua-roccia. Le acque dei campioni **SG01**, **PZ12** (**GG3S1**) e **SG05** appartengono alle acque più schiettamente **bicarbonato-calcica** mentre le acque dei campioni **AST\_P24**, **AST\_P09** appartengono alla facies delle acque a **solfori e cloruri alcalino-terrosi**. Il campione **SG04** presenta una **composizione intermedia tra queste due facies**. Le acque a solfori e cloruri alcalino-terrosi (**AST\_P24**, **AST\_P09**) presentano concentrazioni in boro e litio, una firma geochemica compatibile con una circolazione all'interno delle litologie che costituiscono il Flysch di Gorgoglione (alternanza di arenarie e di argille leggermente marnose - arenarie da fini a grossolane con intercalazioni di peliti (arenaria/pelite = 9/1).



### **3.3.4 VALUTAZIONI IDROGEOCHIMICHE E CLASSIFICAZIONE DELLE ACQUE SOTTERRANEE NELL'INTORNO DEL POZZO GG3**

#### **3.3.4.1 PREMESSA**

Per poter ottenere informazioni idrogeologiche dai dati chimici delle acque di falda è necessario ricostruire il “cammino” dell’evoluzione idrogeochimica, cioè la sequenza dei vari processi attraverso i quali l’acqua acquista la sua composizione chimica. Quasi tutte le acque sotterranee si originano dalle precipitazioni o dalle acque di scioglimento nivale che si infiltrano, attraverso il suolo, negli acquiferi sottostanti. Quando l’infiltrazione avviene attraverso lo strato sottile e biologicamente attivo del suolo, le acque interagiscono con esso e modificano il proprio chimismo. Nelle aree di ricarica, la porzione del suolo subisce un netto impoverimento in sostanze minerali ad opera dell’acqua che defluisce nel sottosuolo. Durante il deflusso sotterraneo dalle aree di ricarica fino ai punti di recapito, il chimismo dell’acqua viene alterato dall’effetto di una moltitudine di processi geochimici.

Infatti, le caratteristiche idrogeochimiche delle acque sotterranee dipendono solo in minima parte dalla composizione chimica delle acque di precipitazione. Esse risultano essere maggiormente influenzate dalle reazioni chimico-fisiche che avvengono tra acqua e matrice solida nel percorso, più o meno profondo, delle acque attraverso gli strati di terreno e roccia.

Durante il percorso delle acque sotterranee nella zona satura, si assiste generalmente ad un aumento dei solidi disciolti totali e della maggior parte degli ioni principali. In accordo con questa generalizzazione, indagini idrogeologiche condotte in diverse parti del mondo hanno evidenziato che le acque sotterranee che si rinvergono nelle aree di ricarica a bassa profondità sono caratterizzate da un minor contenuto in solidi disciolti rispetto ad acque dello stesso sistema idrogeologico presenti più in profondità, ma anche rispetto ad acque sotterranee presenti nelle zone più superficiali dell’acquifero nelle aree di recapito.

Conseguentemente, lo studio delle proprietà chimiche delle acque sotterranee è, in molti casi, un importante supporto per la comprensione delle dinamiche, dei percorsi e delle eventuali interazioni tra corpi idrici. Tale studio consente di caratterizzare la componente organica e inorganica trasportata dalle acque sotterranee, stabilirne la qualità e, al contempo, pianificare interventi volti al mantenimento di un buono stato di qualità e/o rendere razionale lo sfruttamento idrico in modo

sostenibile ed ecologicamente compatibile. L'analisi dei dati chimici consente, quindi, di formulare alcune ipotesi idrogeologiche inerenti i possibili percorsi sotterranei seguiti ed i tempi di residenza relativi. Infatti, infiltrando zone diverse, più o meno profonde, della crosta terrestre l'acqua viene a contatto con rocce di natura differente, portando in soluzione e scambiando ioni di diversa natura e cambiando il suo connotato idrochimico. I sali più solubili tra quelli presenti nelle rocce sono  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaSO}_4$ . Congruentemente, gli ioni principali più abbondanti presenti nelle acque sotterranee sono  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{=}$  anche se, a causa della composizione acida delle precipitazioni e dell'effetto dell'acido carbonico sulla dissoluzione dei carbonati e dei silicati, sono spesso i seguenti:  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  e  $\text{HCO}_3^-$ .

Le acque sotterranee in insiemi stratificati o misti di sedimenti non consolidati o di rocce possono seguire diversi percorsi di evoluzione geochemica, a seconda di fattori come l'ordine di incontro dei minerali, i relativi tassi di dissoluzione minerale, la disponibilità e la solubilità dei minerali, la presenza di materia organica e di batteri, le condizioni di  $\text{CO}_2$  e la temperatura. L'idrochimica dei sistemi di deflusso sotterranei è sottoposta a cambiamenti progressivi e per lo più irreversibili su lunghi periodi del tempo geologico poiché le acque sotterranee attraversano continuamente i materiali geologici. I piccoli quantitativi di gesso e di altri minerali solubili che hanno una forte influenza sull'evoluzione chimica delle acque sotterranee di molti sistemi idrogeologici vengono gradualmente rimossi da questi sistemi. Il sodio, che viene scambiato con  $\text{Ca}^{++}$  nello sviluppo di acque sotterranee ricche in Na, viene rimosso dai siti di scambio dei minerali argillosi. I minerali silicatici come i feldspati e le miche vengono continuamente trasformati in minerali argillosi. Le caratteristiche dei profili di suolo nelle aree di ricarica, che controllano la composizione iniziale delle acque sotterranee al momento dell'infiltrazione, cambiano lentamente per via del dilavamento causato dai ripetuti eventi di infiltrazione.

### 3.3.4.2 PUNTI D'ACQUA CAMPIONATI

Nell'area intorno al pozzo GG3 (fig. 3.3.1.1) sono stati campionati, tra fine febbraio e inizio marzo 2024, i seguenti punti d'acqua (tab. 3.3.4.2.1):

CODICE CAMPIONE	TIPO	DATA CAMPIONAMENTO	LATITUDINE	LONGITUDINE	pH	Cond. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	T [°C]
AST_P24	PIEZOMETRO TUBO APERTO	27/02/2024	40.406609	16.080679	7.00	1493	13.2
AST_P09	PIEZOMETRO TUBO APERTO	27/02/2024	40.406480	16.079877	6.97	1714	16.3
PZ12 (GG3S1)	PIEZOMETRO TUBO APERTO	06/03/2024	40.393536	16.095973	7.86	264	14.05
SG01	SORGENTE	06/03/2024	40.391015	16.1032039	7.9	835	10.81
SG04	SORGENTE	06/03/2024	40.402003	16.0977327	6.94	1125	12.83
SG05	SORGENTE	06/03/2024	40.402269	16.0939651	7.18	365	8.68

**Tabella 3.3.4.2.1.: Elenco punti d'acqua (piezometri e sorgenti) campionati e caratteri fisico-chimici delle acque in sito (Sonda multiparametrica tipo Hanna Instruments mod. HI9829).**

I campioni provenienti dai piezometri sono stati campionati in modalità statica. Il piezometro PZ12, risultato sterile all'atto della realizzazione, conteneva un po' d'acqua sul fondo di dubbia provenienza (infiltrazione diretta di acqua piovana o acqua derivante dalle operazioni di realizzazione), è stato comunque campionato. Per le sorgenti campionate, tutte a quote intorno a 900 m slm, non è stato possibile misurare la portata che in ogni caso risulta molto modesta (pochi l/min). I campioni sono stati inviati per le analisi al laboratorio di geochimica del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università "La Sapienza". La determinazione degli elementi chimici maggiori (sodio, potassio, calcio, magnesio, fluoro, cloro, nitriti, nitrati, bromuri, bicarbonati e solfati) è stata effettuata mediante cromatografia ionica in fase liquida (Ion Chromatography System Dionex ICS-1100 e ICS-5000). Si riportano i risultati (tab. 3.3.3.1; Allegato VIII - Risultati analisi idrogeochimiche e valutazioni idrogeochimiche delle acque sotterranee nell'intorno del pozzo GG3).

### 3.3.4.3 INTERPRETAZIONE DEI DATI GEOCHIMICI

Sulla base delle analisi effettuate è stato possibile procedere alla classificazione ed al confronto delle acque campionate. La formula ionica permette di classificare un'acqua (facies chimica) e si determina ordinando i principali anioni ( $\text{HCO}_3^-$ ;  $\text{SO}_4^{--}$ ;  $\text{Cl}^-$ ) e cationi ( $\text{Na}^+$ ;  $\text{Ca}^{++}$ ;  $\text{Mg}^{++}$ ) per quantità in percentuali decrescenti da sinistra verso destra. In tabella 3.3.4.3.1 si riportano le formule ioniche delle acque campionate:

Punti campionati	Formula ionica
AST_P09	Ca-Mg-Na-Cl- $\text{HCO}_3$
AST_P24	Ca-Na-Mg- $\text{HCO}_3$ -Cl
PZ12 (GG3S1)	Ca-Mg-Na- $\text{HCO}_3$
SG01	Ca-Na- $\text{HCO}_3$
SG04	Ca-Na- $\text{HCO}_3$ -Cl- $\text{SO}_4$
SG05	Ca- $\text{HCO}_3$

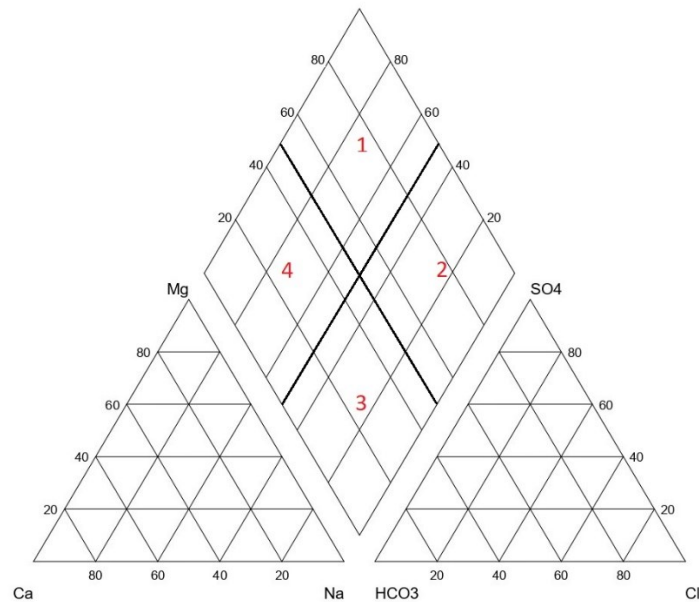
Tabella 3.3.4.3.1- Formule ioniche delle acque campionate.

Dall'analisi dei dati (tabella 3.3.4.3.1) si evince che tutte le acque campionate hanno una formula ionica diversa. Questa estrema variabilità è compatibile con **una circolazione molto frazionata, per lo più superficiale, all'interno di materiali poco permeabili**. Nell'area di studio affiora il Flysch di Gorgoglione, il quale consiste in un'alternanza di arenarie e peliti (fig. 3.3.1). Il dettaglio del rilevamento ha permesso di identificare due diverse facies all'interno del Flysch di Gorgoglione: Sono state, pertanto, individuate una litofacies A (pelitico-arenacea) ed una litofacies B (arenaceo-pelitica).

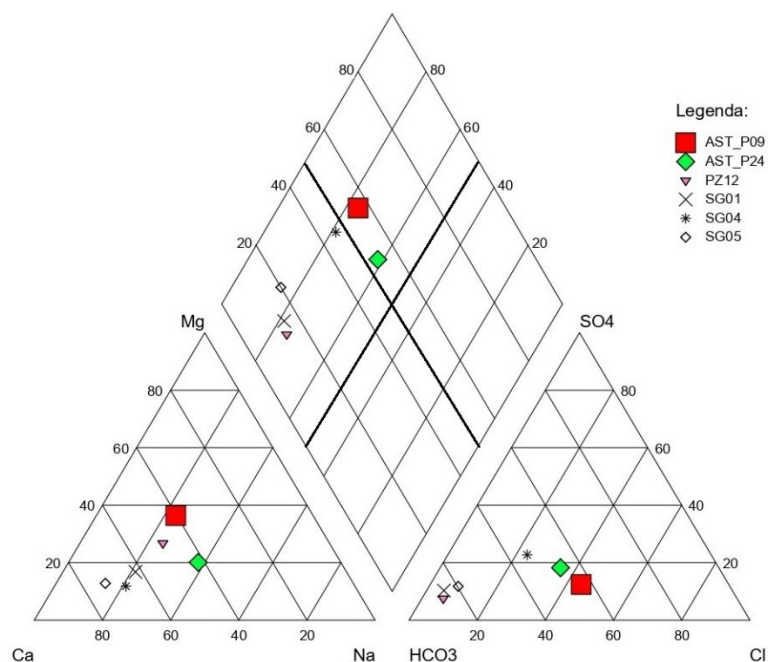
La componente argillosa all'interno delle litofacies affioranti sembra essere la responsabile dell'estrema variabilità chimica delle acque, delle basse portate e dell'estremo frazionamento.

Per meglio analizzare i dati geochimici si utilizzano i **diagrammi di comparazione**, che oltre ad individuare la facies idrochimica, permettono un confronto tra le varie acque campionate. Tra i diagrammi di comparazione i più usati sono: il **diagramma di Piper** e il **diagramma di Schoeller**. Il diagramma di Piper a diamante (fig. 3.3.4.3.1) è costituito da un rombo al di sotto del quale ci sono due triangoli equilateri, uno per i cationi e l'altro per gli anioni. Nella losanga viene rappresentato il

punto rappresentativo dell'intera analisi e permette di classificare l'acqua e di confrontare più acque tra loro.



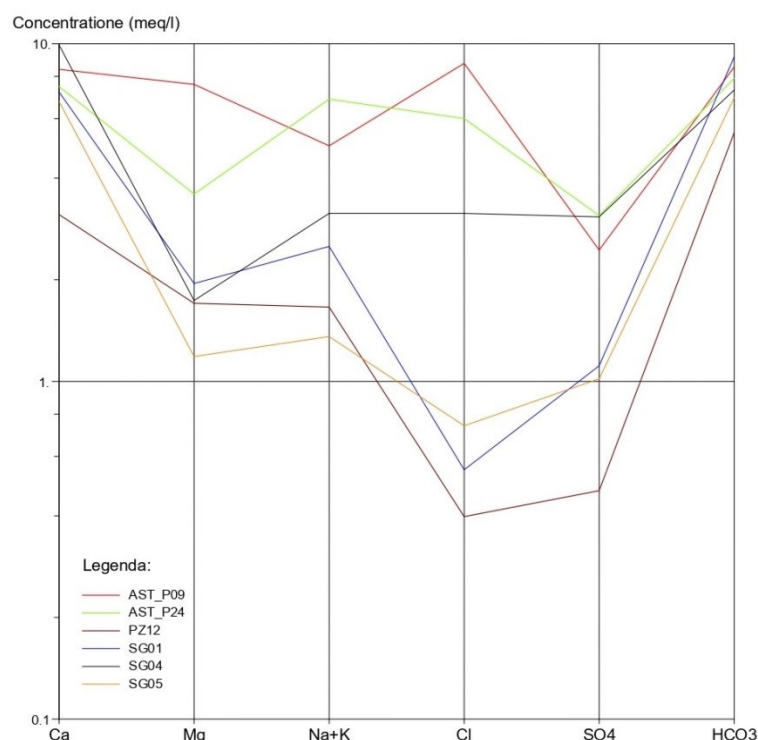
**Figura 3.3.4.3.1 - Diagramma di Piper. Tipi di acque: 1) solfato-clorurato-alcantino-terrose (SCAT); 2) solfato-clorurate-alcaline (SCA); 3) bicarbonato-alcantine (BA); 4) bicarbonato-alcantino-terrose (BAT).**



**Figura 3.3.4.3.2 - Diagramma di Piper delle acque analizzate. I punti a colore pieno sono relativi ai piezometri. La dimensione è rappresentativa della conducibilità elettrica (CE).**

Per le acque analizzate è stato costruito il diagramma di Piper (fig. 3.3.4.3.2). Dall'esame del diagramma di Piper è possibile individuare due facies idrochimiche distinte: la SCAT, per i piezometri AST\_P09 e AST\_P24, e la BAT per gli altri punti.

Oltre al diagramma di Piper è stato costruito anche il diagramma di Schoeller (fig. 3.3.4.3.3). Il diagramma semilogaritmico di Schoeller è quello che meglio si presta a paragonare tra loro acque diverse. Esso è costituito da più ordinate lungo le quali vengono riportate, in scala logaritmica, le concentrazioni dei singoli elementi in meq/l. I punti vengono poi uniti da una spezzata. Il primo vantaggio è che vengono conservati i valori assoluti delle concentrazioni dei singoli ioni, ciò consente di distinguere acque a debole mineralizzazione da quelle più mineralizzate. La pendenza della spezzata, che unisce le concentrazioni degli ioni adiacenti, permette di correlare acque della stessa famiglia con tenori salini diversi, evidenziandone così il rapporto caratteristico. Mediante il diagramma di Schoeller è dunque possibile evidenziare sia anomalie del singolo punto di campionamento nei confronti dell'andamento tipico dell'area che la congruenza tra campioni dello stesso tipo chimico più o meno diluiti.



**Figura 3.3.4.3.3 - Diagramma di Schoeller delle acque campionate.**

Dall'esame del diagramma di Schoeller possiamo individuare una certa somiglianza delle acque delle sorgenti SG01 e SG05. Tutte le altre hanno andamenti diversi tra loro. In particolare, le acque dei piezometri risultano sia le meno mineralizzate (PZ12) che le più mineralizzate (AST\_P09 e AST\_P24) tra quelle analizzate. Il campione denominato PZ12 (corrispondente al sondaggio GG3-S1), presenta caratteri di forte anomalia giustificata dall'origine dell'acqua campionata, probabilmente costituita da acqua di perforazione miscelata ad infiltrazioni di acqua di falda; di fatto il sondaggio risulta essere stato cementato ed utilizzato per le indagini sismiche in foro.

Le acque campionate nei piezometri presentano inversione dei rapporti caratteristici:  $rMg/(Na+K)$  per PZ12 e AST\_P09;  $r(Na+K)/Cl$  per AST\_P09;  $rCl/SO_4$  per AST\_P09 e AST\_P024.

I rapporti caratteristici indicano **una netta differenza** delle acque dei piezometri da quelle delle sorgenti. Fatta eccezione per il **piezometro PZ12 (GG3S1), il quale presenta una debole mineralizzazione** probabilmente associata a problemi costruttivi dello stesso, tale differenza è anche evidenziata dal diagramma di Piper che attribuisce la classificazione SCAT ai soli piezometri AST\_P09 e AST\_P24.

**Il basso valore di salinità suggerisce una circolazione superficiale con modesti tempi di contatto acqua/roccia.** Fanno eccezione i due piezometri **AST\_P09 e AST\_P24, di facies diversa (SCAT)**, che mostrano valori di conducibilità più elevati e quindi, essendo ubicati all'interno delle medesime litologie della sorgente SG04, di un possibile aumento dei tempi di contatto acqua roccia. La loro vicinanza suggerisce la possibilità che possano interessare il medesimo acquifero anche se mostrano una inversione di alcuni rapporti caratteristici (fig. 3.3.4.3.3).

### 3.3.4.4 CONCLUSIONI

Tutte le acque campionate ed analizzate risultano appartenere alle facies (fig. 3.3.4.3.2) bicarbonato-alcalino-terrose (BAT) e solfato-clorurato-alcalino-terrose (SCAT). Sulla base delle analisi effettuate è stato possibile supportare le ipotesi sui percorsi di circolazione idrica sotterranea ed i relativi tempi di interazione acqua-roccia.

Le acque dei campioni SG01, PZ12 (GG3-S1) e SG05 appartengono alla facies bicarbonato-alcalino-terrose (BAT) mentre le acque dei campioni AST\_P24, AST\_P09 alla facies delle acque solfato-clorurato-alcalino-terrose (SCAT). Il campione relativo al piezometro PZ12 (GG3-S1), sia

per la bassa salinità che per caratteristiche costruttive, è da ritenersi non rappresentativo delle acque sotterranee circolanti. I piezometri AST\_P09 e AST\_P24 mostrano valori di salinità compatibili con tempi di residenza superiori a quelli delle sorgenti SG01 e SG05.

**Il campione SG04 presenta una composizione intermedia tra queste due facies.** Questa composizione intermedia è probabilmente **da mettere in relazione alle condizioni di emergenza.**

La sorgente è ubicata in una zona interessata da una rottura di pendenza che permetterebbe la venuta a giorno di acque con circolazione più profonda rispetto alle altre sorgenti.

Tutte le acque presentano concentrazioni compatibili con una circolazione all'interno delle litologie che costituiscono il Flysch di Gorgoglione (alternanza di arenarie e di argille leggermente marnose - arenarie da fini a grossolane con intercalazioni di peliti). Questa compatibilità di circolazione con la litologia non è identificativa di una circolazione unitaria.

Infine, le esigue portate delle sorgenti, le ubicazioni delle stesse, i bassi valori di salinità delle acque e le anomalie riscontrate (vedi PZ12 - GG3-S1) indicano **che la circolazione è molto frazionata, superficiale e di modesta entità.** Tale conclusione è congruente con la natura geochimica e con la permeabilità idraulica dei termini litologici affioranti nell'area.



### **3.4 CARTA IDROGEOLOGICA: PREMESSA METODOLOGICA ED ANALISI IDRODINAMICA DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA ATTRAVERSO L'INTERPRETAZIONE DEL PANNEGGIO PIEZOMETRICO NELL'AREA GG3**

#### **3.4.1 METODI**

La condizione di sostanziale bassa o nulla permeabilità idrica relativa ed il condizionamento orografico determinano la presenza di piccole falde idriche superficiali, spesso frammentate. Nella fase di ricostruzione della superficie piezometrica e sulla base del modello concettuale di circolazione idrica sotterranea è stato necessario fornire determinate condizioni al contorno inerenti il carico idraulico imposto al modello di flusso. I vincoli imposti alle condizioni di deflusso idrico sotterraneo sono stati dunque i seguenti:

- corsi d'acqua, specificatamente la loro quota lungo gli assi d'impluvio;
- livelli piezometrici dei punti d'acqua censiti (pozzi e piezometri);
- quota degli spartiacque superficiale ribassata di 5 m rispetto al piano campagna, equivalente allo spessore medio dell'insaturo (zona vadosa);
- quota del piano campagna (la superficie della falda idrica libera non può avere quote superiori al piano campagna).

L'interpolazione dei dati puntuali relativi alle quote piezometriche delle acque sotterranee presenti nelle aree di studio è stata ottenuta attraverso l'utilizzo del software open source QGIS mediante il metodo di interpolazione TIN (Triangulated Irregular Network) (Enrile & Ferrando, 2013). In breve, l'algoritmo costruisce una serie di triangoli ai vertici dei quali sono localizzati i punti d'acqua di cui, ovviamente, sono note le coordinate spaziali, in modo da poter essere georiferiti tridimensionalmente, e la quota piezometrica. Si sottolinea come il metodo TIN, basato sul tracciamento di curve isopotenziali non sia applicabile, dal punto di vista idrogeologico, a dati spaziali acquisiti in tempi differenti. A tal riguardo, i dati inerenti le quote dei livelli piezometrici sono stati acquisiti nel periodo gennaio-aprile 2024 (tab. 3.1.1). È importante, a questo punto,

evidenziare che il suddetto metodo permette di ottenere risultati migliori soprattutto all'interno di areali caratterizzati da un numero significativo di punti d'acqua quotati; diversamente, quelli con poche informazioni inerenti i livelli piezometrici, possono essere caratterizzati da risultati approssimativi o, addirittura, errati. In fase di modellazione e, soprattutto, in fase interpretativa, la conoscenza di tale rischio ha permesso di procedere in modo estremamente critico e cautelativo. A tal riguardo, si è spesso modificato, area per area, il risultato delle elaborazioni in modo da rispettare sempre i suddetti vincoli. Il risultato ottenuto attraverso l'utilizzo del sopraccitato algoritmo non può, quindi, essere utilizzato in modo estemporaneo, senza una necessaria analisi della densità dei dati inseriti e della natura idrogeologica del territorio analizzato. Infatti, i fattori di seguito elencati possono influenzare la corrispondenza o meno del dato elaborato da quello reale:

- il livello di falda idrica sotterranea dipende e varia nel tempo;
- la superficie piezometrica ottenuta come risultato dell'elaborazione non certifica la continuità e/o presenza della falda acquifera nel punto considerato;
- in aree caratterizzate da una scarsa densità di punti d'acqua (sorgenti, pozzi, piezometri), il risultato della suddetta elaborazione costituisce un dato puramente qualitativo.

### 3.4.2 ANALISI DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA

L'elaborazione dei livelli piezometrici ottenuti dai punti d'acqua (sorgenti, pozzi e piezometri) censiti nel gennaio 2024 e, successivamente, monitorati durante la campagna idrogeologica gennaio - aprile 2024 (vedi ALLEGATO V – CARTA IDROGEOLOGICA DELL'AREALE COMPRESO TRA IL POZZO GG3 E IL CENTRO OLIO TEMPA ROSSA, BASILICATA, SCALA 1:5.000) ha permesso di definire le modalità di circolazione idrica sotterranea nell'area di studio. La ricostruzione della superficie piezometrica e la sua interpretazione in chiave idrodinamica hanno consentito d'individuare la geometria della rete di deflusso idrico sotterraneo. Si nota come il grado di risoluzione della rete drenante che descrive la falda idrica sotterranea sia direttamente proporzionale alla densità dei punti d'acqua quotati e alla loro distribuzione spaziale. Le zone sature presenti, evidenziate dai punti d'acqua censiti, mostrano una limitata profondità dal piano campagna (tab. 3.1.1), la quale nel mese di gennaio 2024 era compresa tra m. -1.71 (pozzo PO\_02) e m. -10.57 (PO\_01) e nei mesi di aprile 2024 tra m. -1.56 (piezometro GG3S3) e m. -18.87 (PZ36). Alcuni dei piezometri censiti sono risultati sterili (privi d'acqua). Questi sono classificati come PZ\_32, PZ\_34 e PZ\_36.

Per quanto riguarda le escursioni idriche registrate nel periodo compreso tra gennaio e aprile 2024, queste risultano negative in corrispondenza di quasi tutti i piezometri a tubo aperto (ad eccezione di ZOPZ67 e ZOPZ69). Il picco di escursione massima è stato registrato in una delle canne del PZ36 (+13,05 m). Nella stessa data, i piezometri Casagrande presentano differenti misure piezometriche lungo le due canne (tabella 3.1.1, ALLEGATO V). La scarsa permeabilità relativa dei terreni che affiorano nel settore investigato (definiti, infatti, come acquitardi), fa ritenere come le coltri detritiche di alterazione in superficie possano contenere, generalmente, l'aliquota più significativa di acqua sotterranea. All'interno di tali coltri, spesso costituite anche da detriti di frana, s'ipotizza l'instaurarsi di una circolazione idrica sotterranea limitata, come si evince dalle esigue portate sorgive ( $< 1$  l/s). La superficie piezometrica si adatta, quindi, alla morfologia esterna. Le acque tendono a defluire verso i fondivalle mantenendo una pendenza della superficie piezometrica elevata, compatibile con quella della morfologia di superficie. I modelli di circolazione idrica in litotipi con permeabilità relativa bassa, o nulla, prevedono infatti che ci sia una marcata corrispondenza tra gli spartiacque superficiali e profondi.

La rete di deflusso elaborata (Enrile & Ferrando, 2013) consente, quindi, d'interpretare le modalità di circolazione idrica nel sottosuolo. La superficie piezometrica ottenuta mostra come le direzioni del deflusso idrico corrispondano, solitamente, alle linee di massima pendenza. Ovviamente, il verso del deflusso è determinato dalle quote altimetriche della suddetta superficie. Le direzioni di drenaggio principali/probabile sono riportate nella carta idrogeologica allegata (ALLEGATO V). Le curve isopiezometriche mostrano un andamento concentrico, chiuso, il quale è tipico del fenomeno di adattamento della piezometria alla morfologia del suolo. A tal riguardo, si nota come gli assi che definiscono gli spartiacque sotterranei coincidano con gli spartiacque superficiali. Quest'ultimi costituiscono, quindi, la zona di alimentazione da cui le acque sotterranee tendono ad allontanarsi per confluire verso gli assi di drenaggio.

Nel settore meridionale dell'area di progetto l'evoluzione geomorfologica dei versanti è condizionata in buona parte dai movimenti gravitativi; quest'ultimi, di varia tipologia e dimensione, hanno mobilitato masse rocciose, divenute detritiche, che i processi erosivi, nel tempo, hanno modellato dando luogo ad accumuli lungo la base dei versanti più acclivi, mascherando spesso la roccia in posto. L'assetto geomorfologico, in questo settore meridionale, registra la presenza di numerose scarpate di frana, leggere contropendenze (terrazzi di frana) e trincee, che costituiscono importanti indicatori geomorfologici del modellamento gravitativo dei versanti. Il contrasto di permeabilità nei terreni interessati dalle frane e l'assetto geometrico dei bacini determinati dai movimenti franosi agevolano la formazione di piccoli serbatoi che fungono da contenitore di falde idriche condizionando il deflusso idrico sotterraneo.

### **3.4.2.1 AREA DI TEMPÀ ROSSA – GORGOGLIONE (POZZO GG3)**

Il sito previsto per il Pozzo GG3 è ubicato in un'area a SE di Tempà Rossa, in località Piano del Petrino. Morfologicamente l'area si presenta come un pianoro compreso tra quota 1000 m e quota 1031 m s.l.m., il quale è delimitato da versanti che declinano a S verso il fosso dei tre confini, ad E verso il fosso Cupo e a N, in località Petrino, verso il fosso Calabrese. I punti d'acqua (fig. 3.1.1. - tabella 3.1.1) censiti, costituiti in massima parte da piezometri, hanno consentito un discreto dettaglio ricostruttivo della superficie piezometrica presente nei dintorni del sito del pozzo GG3 e, quindi, delle modalità di circolazione idrica sotterranea; considerata la distribuzione non omogenea sull'intero settore indagato, la ricostruzione del pannello piezometrico è più accurata nei settori

prossimi alla presenza dei punti d'acqua. Il modello di circolazione idrica sotterranea ricostruito rispecchia, quindi, quello proposto per le aree circostanti. Essi sono infatti affini dal punto di vista morfologico, geologico e petrofisico. Infine, è stata accertata la presenza di falde idriche superficiali, probabilmente anche non in continuità idraulica tra loro, poste ad una profondità dal p.c. compresa tra circa 2 m e i 19 m (tab. 3.1.1).

## 4 DISCUSSIONE DEI DATI E CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La finalità di tutte le indagini eseguite e dei documenti redatti a corredo della presente relazione è stata quella di caratterizzare l'assetto geologico, geomorfologico e idrogeologico, nel modo più completo possibile, dell'area nei dintorni del pozzo GG3 e del suo collegamento (*flowline*) con il centro Olio di Tempa Rossa. La moltitudine di dati raccolti, d'informazioni e di considerazioni è contenuta, oltre che in questa relazione e nei suoi allegati, nella Relazione Fase II A di gennaio 2024 - ALLEGATO I).

Di seguito vengono ripresi, sintetizzati e discussi gli esiti delle indagini di questa fase (Fase II B).

I risultati dello **studio geologico e petrofisico** (analisi mineralogiche, petrografiche, microstrutturali e petrofisiche) convergono tra loro accertando come la porosità primaria (2D, 3D) risulti molto bassa nei campioni arenacei (range di valori simili a silt e silt argillosi). Ciò è dovuto alla presenza di cementi (vedi risultati delle analisi petrografiche e mineralogiche). Si ritiene, quindi, come il sistema di fratture riportato nella relazione geologico-strutturale (vedi ALLEGATO I) formi il principale volume per l'immagazzinamento dei fluidi nel sottosuolo. Si nota come tali fratture siano spesso confinate all'interno dei singoli strati arenacei. Ad una scala più grande, le zone di faglia altresì documentate formano i principali condotti idraulici per l'infiltrazione dei fluidi meteorici nel sottosuolo e, al contempo, determinano i valori di trasmissività idraulica all'interno della zona satura (freatica) caratterizzante i poco cospicui volumi idrici sotterranei sostanti principalmente nella prima decina di metri di suolo e sottosuolo (fascia o coltre di alterazione superficiale) poggiante spesso su litotipi arenaceo-pelitici più profondi e meno permeabili.

Le **indagini geofisiche** (ERT-2D) hanno, in gran parte, permesso di definire il dettaglio il modello di circolazione idrica sotterranea superficiale attraverso l'individuazione della geometria del substrato roccioso in profondità. Questo è stato reso possibile attraverso il netto contrasto di resistività elettrica esistente tra litofacies A (pelitico-arenacea) e B (arenaceo-pelitica) come riportato in figure 3.2.2.2.3-4-5 riportanti i dati elaborati per le ERT 4-6. I risultati, inoltre, hanno consentito di definire la profondità della superficie di scorrimento gravitativo e, quindi, ricostruire la geometria profonda di

una paleofrana (vedi figure 3.2.2.1.1 e 3.2.2.1.2-3 inerenti i dati ottenuti per le ERT 1 - ERT 2). Tali dati hanno inoltre permesso d'individuare la falda idrica sotterranea circolante all'interno dei terreni detritici del corpo di frana. Gli esiti delle indagini geofisiche (ERT-2D) hanno, infine, confermato la totale assenza di cavità carsiche nel sottosuolo indagato. Si specifica come tale conclusione era già stata proposta nella relazione precedente (vedi ALLEGATO I) sulla base della natura litologica dei corpi rocciosi affioranti.

I risultati delle **analisi idrogeochimiche** eseguite su campioni d'acqua prelevati in corrispondenza di piezometri e sorgenti mostrano come i campioni SG01, PZ12 (GG3-S1) e SG05 appartengano alle acque più schiettamente bicarbonato-calcica, mentre i campioni AST\_P24, AST\_P09 appartengano alla facies delle acque a solfati e cloruri alcalino-terrosi. Il campione SG04 presenta una composizione intermedia tra queste due facies. Le acque a solfati e cloruri alcalino-terrosi (AST\_P24, AST\_P09) presentano una firma geochimica compatibile con una circolazione all'interno delle litologie che costituiscono il Flysch di Gorgoglione (alternanza di arenarie e di argille leggermente marnose - arenarie da fini a grossolane con intercalazioni di peliti (arenaria/pelite = 9/1; vedi tabelle 3.3.3.1-3.3.4.2.1, figure.3.3.1-2).

Sulla base dei suddetti risultati è stato possibile definire i percorsi di circolazione idrica sotterranea e i relativi tempi di interazione acqua-roccia. Tutte le acque presentano concentrazioni compatibili con una circolazione all'interno delle litologie che costituiscono il Flysch di Gorgoglione (alternanza di arenarie e di argille leggermente marnose - arenarie da fini a grossolane con intercalazioni di peliti). Questa compatibilità di circolazione con la litologia non è identificativa di una circolazione unitaria. Le basse portate mostrate dalle sorgenti, la loro ubicazione, la bassa salinità e le anomalie riscontrate indicano che **la circolazione è molto frazionata, principalmente superficiale e di modesta entità**. Il tutto è congruente con la natura geochimica e con la permeabilità idraulica dei termini litologici affioranti nell'area.

Per quanto attiene la **circolazione idrica sotterranea** nell'area di Piano del Petrino, la falda idrica risulta essere presente a pochi metri di profondità. A tratti e, ovviamente, nei periodi umidi la falda sfiora il piano campagna formando zone umide e pozze d'acqua (evidenti nelle figure 3.2.2.2.2-4 e 3.2.2.3.2-3 relative alle ERT3-5-7-8). Le escursioni del livello freatico registrate nel periodo monitorato (gennaio-aprile 2024) sono generalmente negative, da qualche decina di centimetri a

circa un metro. Solo alcuni piezometri mostrano trend positivi (rispetto alla lettura di gennaio 2024). Uno addirittura è caratterizzato da una risalita di 13 m circa (PZ\_36; tab. 3.1.1; ALLEGATO V). Le acque sotterranee circolano prevalentemente all'interno della componente più francamente lapidea del Flysch di Gorgoglione e, specificatamente, nella fascia di alterazione superficiale. Le zone altamente conduttive (in termini di conducibilità elettrica CE) sono presenti soprattutto all'interno della componente prevalentemente pelitica della litofacies pelitico-arenacea (fig. 3.2.2.2.3-4, ERT 4-5). Gli spartiacque sotterranei sono condizionati dall'andamento dei colmi morfologici. Piano del Petrino rappresenta, di fatto, uno spartiacque sotterraneo mostrando di avere un andamento grossomodo NE-SO per poi, verso sud divenire E-O. Analogamente alle zone circostanti, la falda idrica probabilmente assume un andamento frazionato e centrifugo, rispetto al Piano del Petrino, con direzioni di deflusso radiale verso NO, con recapito nel Fosso Calabrese, verso SS-E, con recapito nel Fosso Tre Confini, e ad O, con recapito nell'impluvio di Fosso del Cupo

Ai fini di una migliore ricostruzione dell'andamento della falda idrica di superficie e per il controllo qualitativo della stessa, è stata pianificata e suggerita, tenendo conto delle direzioni di deflusso della circolazione idrica sotterranea, una rete piezometrica, nei dintorni della piazzola del pozzo GG3 e lungo la flowline, costituita da almeno 12 punti piezometrici (tra cui alcuni "cluster" cioè piezometri raggruppati, per un monitoraggio multilivello, in particolare attorno alla piazzola del pozzo GG3). In totale la rete sarà di 20 piezometri. Nella fig. 4.1 (ALLEGATO V) sono riportate le ubicazioni dei piezometri proposti che andrebbero a costituire la rete definitiva.



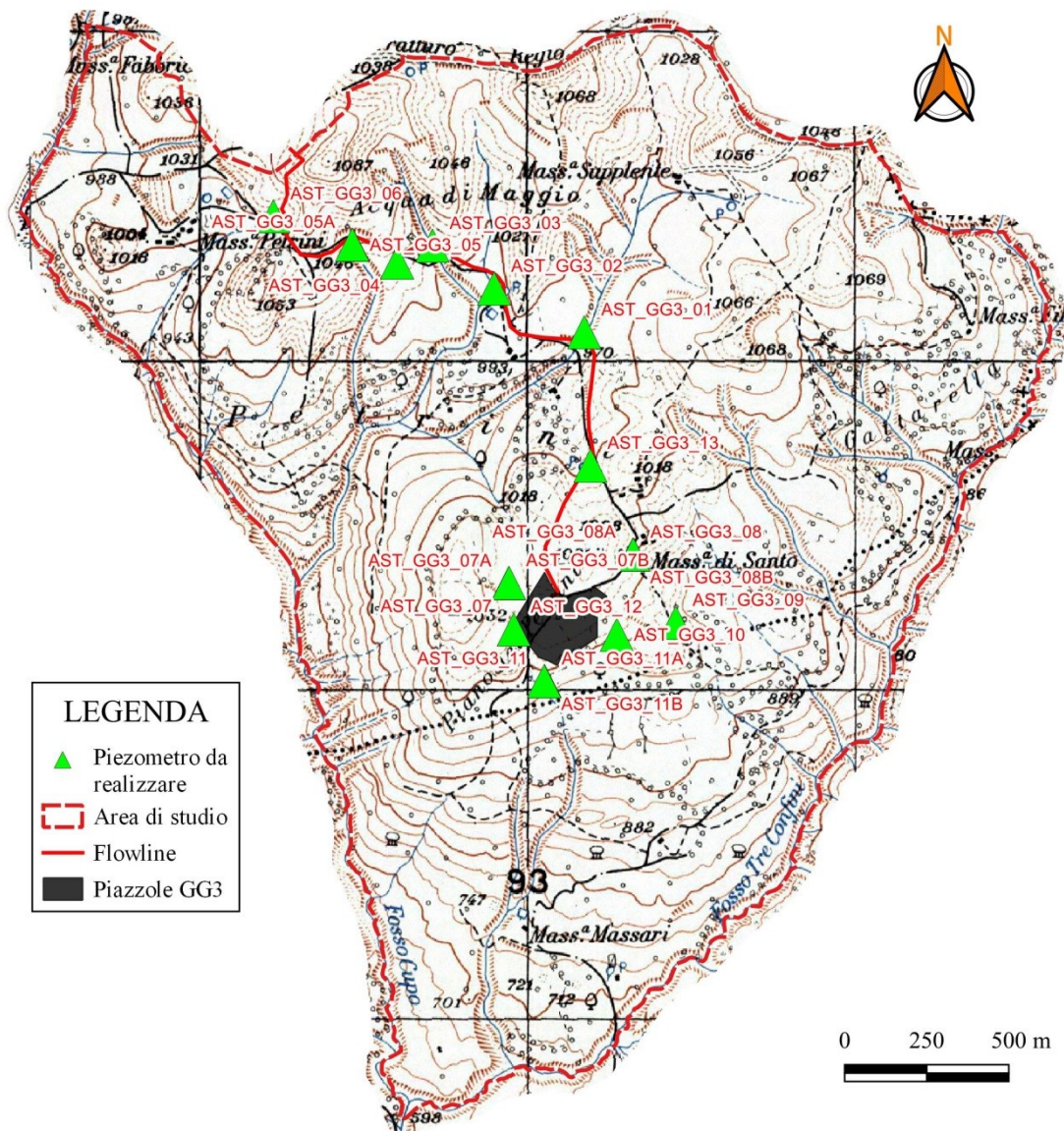


Figura 4.1 - Ubicazione dei piezometri suggeriti ai fini del monitoraggio piezometrico/ambientale nell'area di studio. La rete piezometrica utilizzata per questo studio è riportata in fig. 3.1.1.

## 5 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Carta Tecnica Regionale - <https://rsdi.regione.basilicata.it/dbgt-ctr/>.

Celico P. (1988) – Prospezioni idrogeologiche. Voll. I e II, Liguori editore, Napoli.

Chiesa G. (2002) - Idrogeochimica. Ed. Geo-Grapp - Segrate.

Digital Terrain Model (DTM) a risoluzione 5x5 - <https://rsdi.regione.basilicata.it>.

Doebelin, N. & Kleeberg, R. (2015) - Profex: a graphical user interface for the Rietveld refinement program BGMN. *J. Appl. Cryst.*, 48, 1573-1580. <https://doi.org/10.1107/S1600576715014685>.

Enrile, F. & Ferrando, I. (2013) - Modellazione 3D del substrato roccioso e del livello di falda mediante interpolazione di punti in GRASS. *Geomatics Workbooks n° 11* - "FOSS4G-it: Genova 2013".

Falconer K. (2003) - *Fractal Geometry, Mathematical Foundations and Applications*. 2nd Edition, John Wiley and Sons, New York and London. <http://dx.doi.org/10.1002/0470013850>.

Ferraro F., Agosta F., Prasad M., Vinciguerra S., Violay M. & Giorgioni M. (2020) - Pore space properties in carbonate fault rocks of peninsular Italy. *Journal of Structural Geology* 130, 103913.

Franklin J.A. (1979) - Suggest Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 16, 143-151.

Freeze R.A. & Cherry J.A. (1979) - *Groundwater*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, Vol. 7632, 604.

Mandelbrot B.B. (1985) - Self-affine fractals and fractal dimension. *Physica Scripta* 32, 257–260.

Piper A.M. (1944) - A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water-Analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25, 914-928.

Schoeller H. (1935) - Utilité de la notion des échanges de bases pour le comparision des eaux souterraines. *Soc Geol Compt Rend Somm Bull.* 5, 651–657.

Thompson, A.H. (1991) - Fractals in rock physics. *Annual Review of Earth Planet Science* 19, 237–262.

Weltje G. J. (2006) - Ternary sandstone composition and provenance: an evaluation of the 'Dickinson model'. *Geological Society, London, Special Publications*, 264, 79-99.

Wu, J., Fan, T., Rivas, E.G., Gao, Z., Yao, S., Li, W., Zhang, C., Sun, Q., Gu, Y. & Xiang, M. (2019)  
- Impact of pore structure and fractal characteristics on the sealing capacity of Ordovician carbonate cap rock in the Tarim Basin, China. *Marine and Petroleum Geology* 102, 557–559.

## 6 ELENCO ALLEGATI

ALLEGATO I - RELAZIONE FASE IIA - STUDIO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREALE COMPRESO TRA IL POZZO GG3 E IL CENTRO OLIO TEMPA ROSSA, BASILICATA - GENNAIO 2024

ALLEGATO II – SCHEDE DEI CAMPIONI SELEZIONATI PER L'ANALISI MINERALOGICA E PETROGRAFICA

ALLEGATO III –PETROGRAFIA, RISULTATI DELLE ANALISI DELLE SEZIONI SOTTILI

ALLEGATO IV– RISULTATI ANALISI MICROSTRUTTURALE

ALLEGATO V – CARTA IDROGEOLOGICA DELL'AREALE COMPRESO TRA IL POZZO GG3 E IL CENTRO OLIO TEMPA ROSSA, BASILICATA (SCALA 1:5.000)

ALLEGATO VI – SCHEDE DI SINTESI PUNTI ACQUA

ALLEGATO VII – INDAGINI GEOELETTRICHE FINALIZZATE ALLA CARATTERIZZAZIONE DI UN'AREA UBICATA NEI PRESSI DEL CENTRO OLIO TEMPA ROSSA VAL D'AGRI (BASILICATA) – RELAZIONE SCIENTIFICA ATTIVITÀ CNR-IMAA, 2024

ALLEGATO VIII - RISULTATI ANALISI IDROGEOCHIMICHE E VALUTAZIONI IDROGEOCHIMICHE DELLE ACQUE SOTTERRANEE NELL'INTORNO DEL POZZO GG3