

**PROGETTO AMPLIAMENTO – PER
SOPRAELEVAZIONE - DELLA NUOVA DISCARICA
CONSORTILE PER RIFIUTI NON PERICOLOSI
(LOTTO 1 + LOTTO 2)**

REL05

**Inquadramento geologico e Modello
idrogeologico**

Ing. Giovanni Maurelli – Progettista e Direttore tecnico

Ing. Marco Chessa – Gruppo di lavoro

Dott. Sandro Zizi – Gruppo di lavoro

Geom. Fabrizio Palitta - Gruppo di lavoro

Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Verificato e approvato
0	Dicembre 2025	PRIMA EMISSIONE	Gruppo di lavoro	Progettista e Direttore tecnico

SOMMARIO

1	PREMESSA E FINALITÀ DELL'ELABORATO	3
2	INQUADRAMENTO DELL'INTERVENTO E PRESUPPOSTI TECNICI	4
3	FUNZIONE E LIMITI DELLA PRESENTE REL05	5
4	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	6

1 Premessa e finalità dell'elaborato

Il presente elaborato REL05 – Inquadramento geologico e modello idrogeologico è predisposto nell'ambito della documentazione tecnica a supporto dell'istanza di verifica di assoggettabilità a Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) relativa al progetto di sopraelevazione dei Lotti 1 e 2 della discarica per rifiuti non pericolosi, ricadente nella Sezione A dell'impianto IPPC consortile di Spiritu Santu, nel Comune di Olbia.

La REL05 non costituisce una relazione geologica o idrogeologica di progetto, né è finalizzata allo svolgimento di nuove verifiche di compatibilità del sottosuolo o della falda. L'elaborato è redatto esclusivamente con funzione di inquadramento conoscitivo del contesto geologico e idrogeologico del sito, al fine di fornire un quadro di riferimento unitario a corredo della documentazione progettuale e ambientale.

2 Inquadramento dell'intervento e presupposti tecnici

L'intervento in progetto consiste nella sopraelevazione morfologica dei Lotti 1 e 2 della discarica per rifiuti non pericolosi, già realizzati, collaudati e autorizzati nell'ambito del procedimento congiunto di Valutazione di Impatto Ambientale e Autorizzazione Integrata Ambientale conclusosi con il rilascio della Determinazione provinciale n. 3946/2019.

La sopraelevazione si configura come una modifica esclusivamente altimetrica del corpo rifiuti, sviluppata integralmente all'interno del sedime autorizzato e al di sopra delle opere di fondo esistenti. Non sono previsti ampliamenti in pianta, nuove occupazioni di suolo, né interventi che interessino il terreno naturale o il substrato geologico.

In relazione alle caratteristiche dell'intervento, il progetto non richiede la redazione di una nuova relazione geologica o idrogeologica ai sensi della normativa tecnica vigente. In particolare:

- non sono previsti scavi o movimentazioni di terreno naturale;
- non vengono realizzate nuove opere di fondazione o di sostegno;
- non si modificano la quota del fondo vasca, le barriere geologiche o artificiali e i sistemi di impermeabilizzazione;
- non si introducono nuove interazioni tra il corpo discarica e il sottosuolo;
- non vengono alterate le condizioni di protezione della falda sotterranea.

Le condizioni geologiche e idrogeologiche del sito risultano pertanto già integralmente valutate e approvate in sede VIA/AIA e non sono oggetto di modifica da parte della sopraelevazione proposta.

3 Funzione e limiti della presente REL05

La presente REL05 è redatta con funzione esclusivamente descrittiva e ricognitiva. Essa non introduce nuovi modelli concettuali, parametri geologici o schemi idrogeologici, né svolge valutazioni progettuali autonome.

L'elaborato ha il solo scopo di:

- richiamare il quadro geologico e idrogeologico di riferimento del sito;
- contestualizzare l'intervento rispetto alle condizioni fisiche già valutate e autorizzate;
- rendere esplicito che la sopraelevazione non interferisce con il sottosuolo e con la falda.

Al solo fine di fornire un inquadramento del contesto fisico-ambientale del sito, si allegano alla presente REL05, quali documenti tecnici pregressi di riferimento:

- la relazione geologica predisposta e presentata nell'ambito del procedimento VIA/AIA che ha condotto all'autorizzazione della nuova discarica (Lotti 1 e 2), contenente la caratterizzazione geologica, geomorfologica, geotecnica e sismica del sito;
- il modello idrogeologico globale dell'intero sito di Spiritu Santu, elaborato e validato nell'ambito di un procedimento ambientale riferito al complesso impiantistico nel suo insieme, comprensivo della descrizione della circolazione idrica sotterranea, delle condizioni di vulnerabilità della falda e della rete di monitoraggio piezometrico.

La documentazione geologica e idrogeologica allegata alla presente REL05 è richiamata esclusivamente a fini di inquadramento conoscitivo e non è utilizzata per derivare nuove verifiche, valutazioni o conclusioni progettuali.

In particolare, tali elaborati:

- non sono direttamente connessi alla natura dell'intervento di sopraelevazione;
- non costituiscono parte integrante delle verifiche di compatibilità del progetto;
- mantengono la loro validità quale quadro autorizzato di riferimento.

Gli approfondimenti tecnici pertinenti alla compatibilità dell'intervento con il sistema di protezione del sottosuolo e della falda sono sviluppati nei rispettivi elaborati specialistici, ai quali si rimanda.

4 Considerazioni conclusive

Alla luce delle caratteristiche dell'intervento e del quadro autorizzativo vigente, la presente REL05 conferma che:

- il progetto di sopraelevazione dei Lotti 1 e 2 non richiede una nuova relazione geologica o idrogeologica;
- le condizioni del sottosuolo e della falda rimangono invariate rispetto allo scenario autorizzato;
- il quadro geologico e il modello idrogeologico approvati in sede VIA/AIA restano pienamente validi e applicabili.

Il presente elaborato deve pertanto essere inteso come documento di supporto istruttorio, redatto con livello di approfondimento coerente con la procedura di verifica di assoggettabilità a VIA e con la natura esclusivamente morfologica dell'intervento proposto.

CONSORZIO INDUSTRIALE PROV.LE NORD-EST
SARDEGNA-GALLURA

PROGETTO DI NUOVO LOTTO DI DISCARICA
PER RIFIUTI NON PERICOLOSI
LOCALITA' SPIRITU SANTU – OLBIA (OT)

RELAZIONE GEOLOGICA

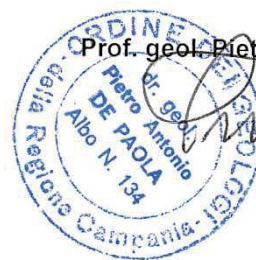
Visti di approvazione:

Data:

Maggio 2016

Il Consulente per la Geologia

Prof. geol. Pietro Antonio De Paola



INDICE

1	Premessa	pag.1
2	Articolazione dell'incarico	pag.1
3	Fonti normative	pag.4
4	Il sito	pag.5
5	Lineamenti geologici generali	pag.7
	5.1 Il Quaternario continentale olocenico	
	5.2 Il basamento cristallino dal Precambriano al Paleozoico sup.	
	5.2.1 Il Plutone granitico di Gallura e relativo corteo filoniano	
	5.2.2 Il Complesso metamorfico-migmatitico del pre-Cambriano	
6	Lineamenti tettonico-strutturali	pag.12
	6.1 I due sistemi di faglie trascorrenti aquitaniane	
	6.2 Il sistema di faglie N-S plio-pleistoceniche	
	6.3 I "graben" burdigaliani	
	6.4 Entità delle dislocazioni lungo le faglie trascorrenti aquitaniane	
	6.5 I sistemi di discontinuità minori e i rapporti con i processi alterativi e disgregativi dei granitoidi	
7	Lineamenti geomorfologici	pag.20
8	Lineamenti idrogeologici	pag.22
9	Lineamenti climatici	pag.23
10	Pericolosità sismica	pag.24
11	Indagini in campo ed in laboratorio	pag.28
	11.1 Indagini geognostiche	
	11.1.1 Sondaggi a carotaggio continuo	
	11.1.2 Piezometri	
	11.2 Indagini geotecniche	
	11.2.1 Rilevamento Indice RQD	
	11.2.2 Prove di compressione a carico concentrato PLT	
	11.3 Misura dei parametri idrogeologici	
	11.3.1 Misure della conducibilità idraulica in foro metodo Lugeon	
	11.3.2 Prove di emungimento	

11.4 Indagini geofisiche

11.4.1 Prospezione elettrotomografica

11.4.2 Prospezione sismica MASW

12 Esiti delle indagini

pag.35

12.1 Il sito: il profilo geolitologico, morfologico e idrografico

12.2 Esiti sondaggi geognostici e rilevamento Indice RQD

12.2.1 Sezione S7-1, S7-2, S7-3

12.2.2 Sezione S18-1, S18-2, S18-3

12.2.3 Sezione S28-1, S28-3

12.2.4 Discussione

12.2.4.1 I lavori di spianamento ed il nuovo assetto geologico del sito

12.2.4.2 Quadro generale litostratigrafico e fessurativo

12.2.4.2 a – Primo livello: coltre detritica rimaneggiata

12.2.4.2 b – Secondo livello: graniti molto fratturati

12.2.4.2 c – Terzo livello: graniti poco fratturati

12.2.4.3 Aspetti conclusivi

12.3 Esiti misure di permeabilità in foro Lugeon

12.3.1 Caratteristiche geometriche camera di prova

12.3.2 Elaborazione coefficiente di permeabilità K e

calcolo orientativo coefficiente di trasmissività T

12.3.3 Discussione

12.4 Esiti prove di punzonamento PLT

12.4.1 Risultati e correlazione con indice RQD

12.4.2 Discussione

12.5 Esiti prove indagini geofisiche

12.5.1 Tipologia di indagine

12.5.2 Indagine elettrotomografica 2D

12.5.3 Discussione

12.5.4 Indagine sismica MASW

12.5.5 Discussione

12.6 Prove di emungimento

12.6.1 Individuazione pozzi. Condizioni meteo. Tipologia prove

12.6.2 Elaborazione prove a portata costante in discesa e in risalita.

Ricerca di T (trasmissività) e impostazione del calcolo

12.6.2.1 Pozzo-piezometro S7-1 - Prova del 14.03.2016

12.6.2.2 Pozzo-piezometro S18-1 – Prova del 14.03.2016

12.6.2.3 Pozzo-piezometro S18-3 – Prova del 15.03.2016

12.6.2.4 Pozzo piezometro S7-1 – Prova del 01.04.2016

12.6.3 Elaborazione prove a gradini in discesa e risalita.

Qualificazione acquifero. Ricerca della portata critica e della trasmissività

12.6.3.1 Pozzo-piezometro S7-1 – Prova del 30.03.2016 - Ricerca di T e K

12.6.3.2 Calcolo della portata critica Q_c

12.6.3.3 Calcolo della portata specifica Q_s

12.6.4 Discussione

12.7 Valutazione della risorsa idrica sotterranea – Bilancio idrologico e

Potenzialità idrica dell'acquifero

12.7.1 Generalità

12.7.2 Bilancio idrologico e potenzialità idrica dell'acquifero

12.7.3 Discussione

12.8 Piezometria

12.9 Sintesi del sistema geologico-idraulico e classificazione tecnico-normativa

della risorsa idrica–Individuazione dei presidi idraulici per la tutela ambientale

12.9.1 Finalità

12.9.2 Il sistema fisico e la classificazione tecnico-normativa della risorsa idrica

12.9.3 Indirizzi concettuali per la individuazione dei presidi idraulici per la tutela ambientale

12.10 Rilievo geomeccanico e classificazione dell'ammasso roccioso

1. – PREMESSA

Il CIPNES – Gallura, Consorzio Industriale Provinciale Nord-Est Gallura, Ente Pubblico con sede legale in Olbia (OT), Zona industriale Località Cala Saccaia, ha affidato allo scrivente (Ref. 396/15 – CIG 62488813BB) l'esecuzione di uno studio geologico, da compendiarsi in una *Relazione geologica* finalizzata alla *Progettazione definitiva ed esecutiva di una discarica per rifiuti non pericolosi*, ubicata in località Spirito Santu del Comune di Olbia.

2. – ARTICOLAZIONE DELL'INCARICO

La presente Relazione geologica comprende, nel rispetto delle specifiche richieste come dettagliate nella lettera di incarico redatta dal CIPNES e di seguito trascritte, la trattazione dei seguenti aspetti, oltre a quant'altro necessario e prescritto dalle vigenti norme e regole tecniche per la progettazione ed esecuzione dell'opera in epigrafe:

- I) *Ricostruzione stratigrafica dei volumi interessati dalle operazioni preliminari di scavo.*
- II) *La ricostruzione stratigrafica dei terreni di fondazione della discarica, precisamente lo spessore e la permeabilità delle litologie sulle quali si imposterà l'impianto di discarica in progetto. A riguardo, come previsto dal D. Lgs. 36/2003, si dovrà valutare, con idonee tecniche,*

la litologia che andrà a costituire il piano di posa del pacchetto di impermeabilizzazione del fondo dell'ampliamento in progetto. Si dovrà valutare la potenza dello strato naturale di base (da D. Lgs. 36/2003 dovrà essere pari ad almeno 1.00 m di spessore) e la sua conducibilità idraulica (da D. Lgs. 36/2003 dovrà essere $\leq 10^{-7}$ cm/s, al fine di non intervenire con ulteriori accorgimenti artificiali).

- III) La determinazione di parametri utili alla successiva verifica della stabilità delle pareti della vasca e della capacità portante dei terreni di fondazione della discarica (verifica che sarà eseguita durante la futura fase di progettazione).*
- IV) La distanza della quota di fondo in progetto della discarica dalla quota massima di una eventuale falda (a riguardo il D. Lgs. 36/2003 prevede una distanza ≥ 1.50 m in caso di falda confinata e ≥ 2.00 m in caso di falda libera).*
- V) Ricostruzione delle interazioni prodotte nel sito dall'opera in progetto, con particolare riferimento alla circolazione idrica sotterranea (vedi modello idrogeologico) e superficiale.*

L'incarico include, inoltre, le seguenti ulteriori attività, oltre alla elaborazione dei capitoli tecnici d'appalto per l'affidamento delle indagini di campagna e di laboratorio:

- 1) Interfaccia, finalizzata al coordinamento e condivisione critica degli aspetti tecnico-progettuali per la parte qui d'interesse, con i Progettisti incaricati.*
- 2) Assistenza, con partecipazione, agli incontri tecnici, per la parte qui di interesse, inclusi chiarimenti ed integrazioni eventualmente richiesti dagli Enti interessati, fino all'approvazione degli atti di competenza.*
- 3) I sopralluoghi di campagna necessari per l'espletamento dei servizi in oggetto.*

In sintesi, il presente elaborato definisce la modellazione geologica del sito *latu sensu* (punto 6.2.1 delle NTC/2008 e punto C. 6.2.1 della relativa

Circolare applicativa) ed affronta le particolari problematiche connesse con la progettazione della discarica per rifiuti non pericolosi (di cui alla complessa normativa di seguito riportata).

Il supporto cognitivo su cui fonda la formulazione delle risposte alle attività richieste è dato, oltre che dai pregressi studi espletati dallo scrivente nell'area in oggetto, dai rilevamenti diretti di campagna, dalle analisi e dalle verifiche conseguenti all'acquisizione dei risultati delle indagini tecniche di campo e di laboratorio appositamente eseguite per il presente incarico nonché dall'esame delle fonti bibliografiche riguardanti gli aspetti geologici, idrogeologici e geomorfologici del distretto in esame, essenzialmente basati sulla cartografia geologica ufficiale del S.G.I., sulla cartografia a cura di Carmignani ed Altri, e su alcuni studi geologici a scala comunale conseguenti alla pianificazione urbanistico-territoriale.

3. – FONTI NORMATIVE

Le principali norme a cui si fa diretto riferimento per la trattazione dei diversi aspetti concernenti la progettazione e la realizzazione delle discariche per rifiuti non pericolosi sono di seguito elencate:

- 1) D. L.vo 152/2006, Norme in materia ambientale.
- 2) D. L.vo 31/2001, Attuazione della Direttiva 98/83/CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano.
- 3) D. L.vo 30/2009, Attuazione della Direttiva 2006/118/CE relativa alla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento.
- 4) D. L.vo 36/2003, Attuazione della Direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti.
- 5) D. L.vo 163/2006, Codice dei contratti pubblici di lavori, servizi e forniture.
- 6) D.P.R. n.207/2010, Regolamento di attuazione del Codice dei contratti pubblici.
- 7) D.M. Infrastrutture e Trasporti 18 gennaio 2008, Norme tecniche per le costruzioni.
- 8) Circolare C. S. LL.PP. n. 617/2009, Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008.

4. – IL SITO

L'area di interesse, relativa alla realizzazione del nuovo settore di discarica per rifiuti non pericolosi, è compresa nell'ambito della piattaforma IPPC dedicata al trattamento e smaltimento rifiuti, ubicata in località Spiritu Santu del Comune di Olbia (OT).

Il nuovo modulo di discarica per rifiuti non pericolosi risulta posizionato nel quadrante di SE dell'attuale piattaforma (Fig. 1) e si sviluppa su un'area di poco inferiore ai 40'000 m².

La superficie topografica dell'area destinata ad accogliere il nuovo impianto di smaltimento si presenta oggi con un andamento a pendenza contenuta, generalmente vergente verso N-NW.

L'attuale profilo altimetrico è piuttosto irregolare (Fig.2) essendo la risultante di uno spianamento operato anni addietro con l'uso congiunto di esplosivi e mezzi meccanici.

Tutta l'area è compresa tra quota 62.0 m/lm circa e quota 75.0 m l/m.



Fig.1 – Planimetria generale della piattaforma IPPC. A S-E il settore della nuova discarica con evidenza della relativa superficie topografica originaria.

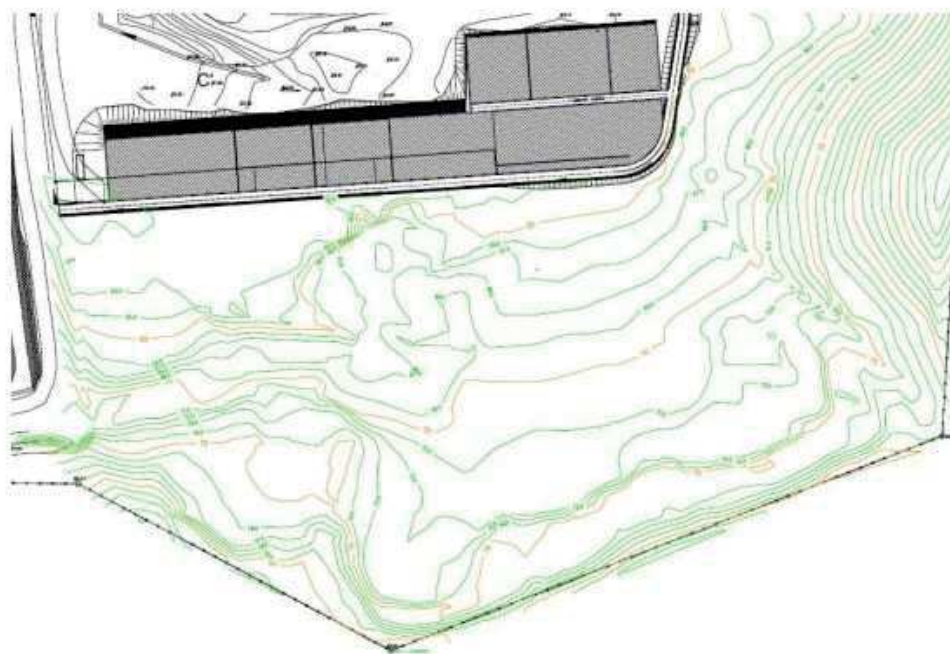


Fig. 2 - L'attuale assetto topografico dell'area destinata al nuovo impianto dopo gli interventi di parziale spianamento operati in passato.

5. - LINEAMENTI GEOLOGICI GENERALI

Gli aspetti geologici salienti di seguito descritti vengono desunti dalla letteratura geologica ufficiale, le cui fonti principali sono costituite dalla Carta Geologica d'Italia del 1967, in scala 1/100'000 (in particolare il Foglio 182 e limitrofi con le relative note illustrative), dalla Carta geologica della Sardegna del 1996, in scala 1/200'000 e dalla Carta geologica della Sardegna del 2008, in scala 1/250'000, a cura di Carmignani et Alii, con relative monografie illustrative.

La località Spiritu Santu del Comune di Olbia, nella quale ricade l'opera in progetto, è ubicata al margine di una blanda depressione della bassa Gallura, bordante verso meridione l'alto strutturale proprio dell'alta Gallura.

Detta depressione, all'incirca compresa tra le faglie terziarie trascorrenti sinistre di Olbia a N e del Rio Scalamala a S, rientra nel dominio idrografico del fiume Padrogiano, localmente costituito dalla propria asta fluviale e dal proprio apparato deltizio (sfociante nella rada di Olbia) nonché dai suoi due principali affluenti di destra, il Rio Nannuri ed il Rio Castagna, l'ultimo dei quali ubicato immediatamente ad W della località Spiritu Santu.

Caratterizzano l'area, sotto il profilo geologico, tre estesi affioramenti (Fig.3):

- i depositi quaternari in prevalente facies detritico-alluvionale;
- il complesso plutonico del Carbonifero sup. – Permiano, comprendente le monzoniti equigranulari ed inequigranulari nonché le granodioriti monzogranitiche equigranulari;
- il complesso migmatitico del Precambriano, principalmente rappresentato da migmatiti leucocratiche, diatessiti e metatessiti con ortogneiss granodioritici e monzogranitici.

5.1 Il Quaternario continentale olocenico

Il Quaternario, in particolare l'Olocene, affiora in tutta la piana con le alluvioni attuali e recenti del fiume Padrogiano, dei suoi affluenti e della rete scolante minore, con spessori massimi anche superiori ad decametro, rappresentati in prevalenza da corpi lenticolari interdigitati di ghiaie, sabbie e limi, spesso frammisti in proporzioni anche molto varie.

Verso monte, le alluvioni sciolte della piana alluvionale lasciano il campo a depositi conglomeratici più antichi, terrazzati, con spessori superiori, anche dell'ordine di un paio di decimetri.

Sulla costa, invece, a partire da N con l'apparato deltizio del fiume Padrogiano, i sedimenti sciolti granulari includono corpi torbosi con fauna palustre, che, procedendo verso S, lasciano il campo ai cordoni sabbiosi delle dune costiere e lagunari.

A ridosso dei rilievi bordanti la piana, all'uscita delle aste torrentizie prospicienti la piana e nelle aree sub-pianeggianti dei rilievi dove minore è l'azione della gravità e di trasporto da parte delle acque ruscellanti di origine meteorica, il Quaternario è rappresentato rispettivamente da depositi detritici sciolti di falda, dalle conoidi di deiezione, da depositi colluviali ed eluviali, derivanti dal disfacimento fisico e dall'alterazione chimica del substrato granitoide ercinico.

A questi ultimi fenomeni disaggregativi ed alterativi fisico-chimici, fanno capo le coltri eluviali derivanti dai processi di arenizzazione degli ammassi granitoidi, che, con spessori variabili da pochi decimetri ad alcuni metri e con una permeabilità secondaria per porosità, caratterizzano, tra l'altro, l'assetto idrogeologico locale e superficiale.

5.2 Il basamento cristallino, dal Precambriano al Paleozoico superiore

Nell'area di interesse ed in quelle contermini affiorano le rocce più antiche, di età compresa tra il Precambriano ed il Paleozoico superiore.

Tra le prime vengono annoverate le rocce metamorfiche del Complesso metamorfico-migmatitico, datato Precambriano; tra le seconde si rinvencono le rocce magmatiche intrusive del Ciclo magmatico ercinico di età compresa tra il Carbonifero superiore ed il Permiano; a questi ultimi si associa un diversificato corteo di rocce filoniane.

5.2.1 Il Plutone granitico paleozoico di Gallura e relativo corteo filoniano

Assumono particolare rilevanza nell'area in esame gli affioramenti tardo-paleozoici (Carbonifero superiore-Permiano) del Ciclo magmatico ercinico, ivi rappresentati da Complessi granitoidi e dai relativi cortei filoniani.

Si tratta di graniti rappresentati in prevalenza da monzograniti e granodioriti, associati molto frequentemente a sistemi filoniani, diversificati per composizione chimico-mineralogica e prevalentemente iso-orientati secondo direttrici NE-SW e subordinatamente N-S; questi ultimi sono rappresentati principalmente da ammassi quarziferi di origine idrotermale, da rioliti, da vulcaniti a composizione dacitica, basaltica, spessartitica.

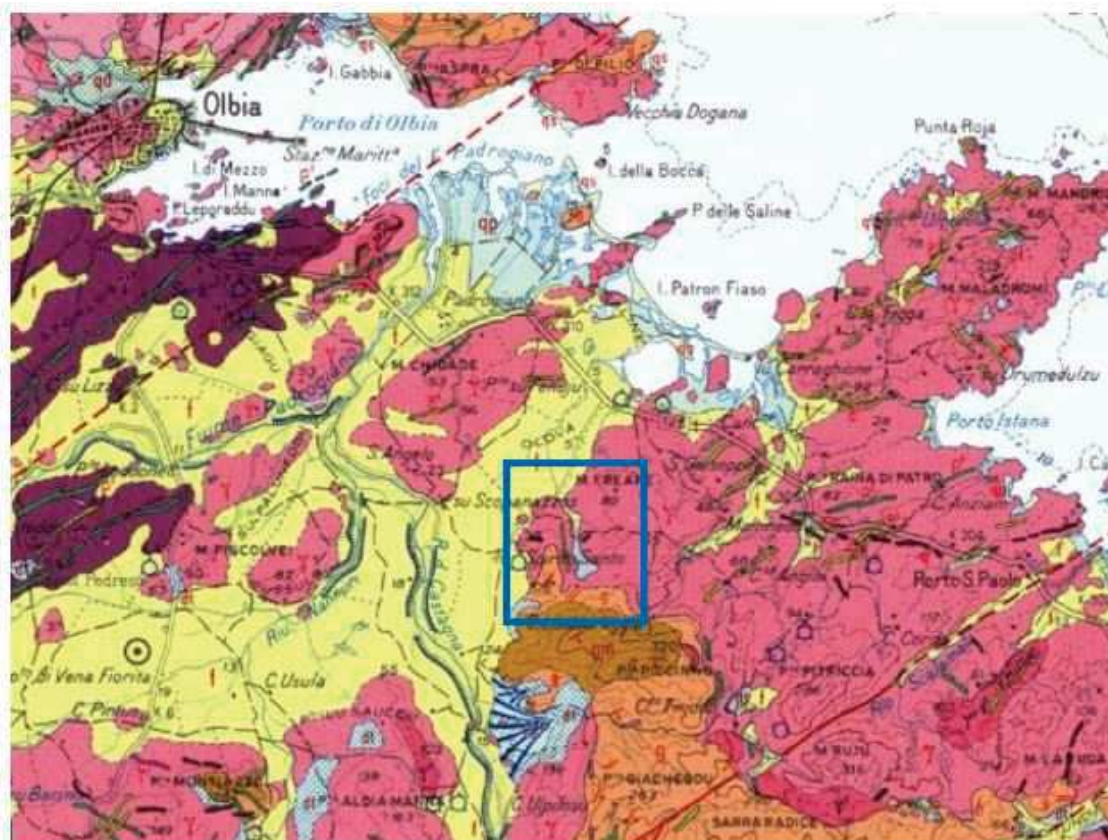
La loro distribuzione, con prevalente orientamento SW-NE, è legata a fratture primarie delle masse granitoidi generate dal processo di raffreddamento conseguente alla loro messa in posto.

Detti filoni contribuiscono a rendere ancora più variabile le descritte eterogeneità di granularità e di orientazione tessiturale dei granitoidi tardo-ercinici cui essi appartengono.

5.2.2 Il Complesso metamorfico-migmatitico del pre-Cambriano

Nel quadro sopra delineato assumono una minore rilevanza, per la più ridotta estensione areale rilevata nel distretto di interesse, gli ortogneiss, le diatessiti e le metatessiti del Complesso metamorfico-migmatitico pre-Cambriano.

Il Complesso, con litofacies diversificate, si ritrova in affioramento poco a sud dell'area in esame (Spiritu Santu), a diretto contatto con il Complesso granitoide di Gallura sopra descritto.



FORMAZIONI CONTINENTALI		QUATERNARIO RECENTE
qp	Formazione deltizia F. Padrogiano . Sabbie e limi, lenti torbose con fauna palustre e ceramica di età enea	Olocene
qs	Sabbie e dune costiere recenti	Olocene
dt	Detrito di falda, con di deiezione, suoli detritici, suoli alluvionali	Olocene
f	Alluvioni attuali e recenti talora terrazzate e parzialmente cementate (ghiaie, sabbie, detriti torrentizi)	Olocene
PLUTONE GRANITICO DI GALLURA E RELATIVO CORTEO FOLONIANO		PALEOZOICO
CORTEO FILONIANO		Carbonifero sup. - Permiano
q¹	Filoni quarziferi di origine idrotermale	
p¹	Filoni iolitici	
δ1	Filoni dacitici , basaltici , spessartitici	
GRANITI DI GALLURA		Carbonifero sup. - Permiano
γ	Graniti grigio-rosati biotitici e granodioriti a grana eterogenea con prevalenti componenti medio grosse	
γ¹	Graniti minuti o a grana media, rosei o raramente grigi, a sola biotite o a due miche	
γ²	Graniti porfirici a grana da media a piccola e fenocristalli di feldspato roseo o bianco	
COMPLESSO METAMORFICO – MIGMATITICO		PRECAMBRIANO
g	Gneiss occhiadini a composizione granitica, granodioritica e quarzodioritica ad una o due miche; migmatiti prevalentemente arteritiche	
gm	Migmatiti arteritiche a prevalente paleosoma con lenti pegmatitiche, aplitiche e microgranitiche	

Fig. 3 – Estratto Carta Geologica d'Italia – Scala 1/100'000 – F.182 Olbia

6. – LINEAMENTI TETTONICO-STRUTTURALI

Sui descritti Complessi cristallini, in tutta l'area nord-orientale della Sardegna, sono impostati due principali sistemi di faglie trascorrenti aquitaniane.

6.1 I due sistemi di faglie trascorrenti aquitaniane

Il sistema di faglie più sviluppato, con orientamento NE-SW e con rigetti trascorrenti sinistri, comprende le faglie della Gallura, di Olbia, di Tavolara e, più a sud, di Nuoro.

Il secondo sistema di faglie, con orientamento all'incirca E-W e caratterizzato, invece, da rigetti trascorrenti destri, comprende le faglie del Cedrino, di Posada, di Trinità d'Agultu .

E' importante rilevare che al sistema di faglie a trascorrenza sinistra sopra descritto sono associati sul margine occidentale del basamento ercinico i bacini transtensivi di Castelsardo, dell'Angiona, di Chilivani-Berchidda, di Benetutti e di Ottana

6.2 Il sistema di faglie N-S Plio-Pleistocenico

Nel quadro strutturale della Sardegna nord-orientale compare un altro sistema di faglie con orientamento all'incirca N-S, quindi normale ai precedenti, che secondo letteratura corrente fa capo al dedotto basculamento del pilastro gallurese verso NE nel Plio-Pleistocene (Fig.4).

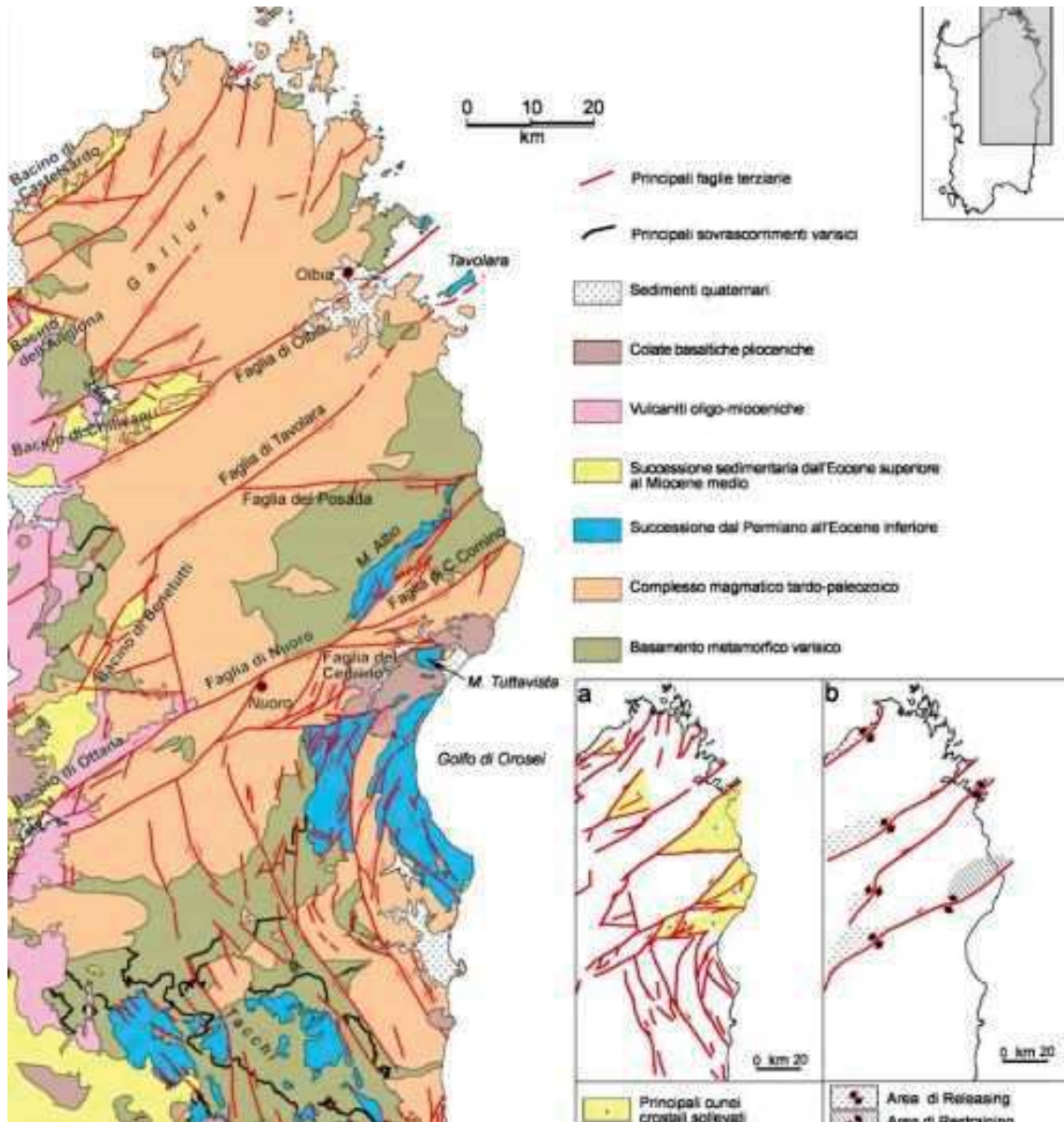


Fig. 4 - Schema tettonico della Sardegna nord-orientale.

Sono indicati i principali sistemi di faglie trascorrenti di età cenozoica.

Il primo sistema, a trascorrenza sinistra e con orientamento NE-SW, comprende le faglie della Gallura, di Olbia, di Tavolara, di Nuoro ed i connessi bacini transtensivi del margine occidentale di Castelsardo, dell'Angiona, di Chilivani-Berchidda, di Benetutti e di Ottana; il secondo sistema, a trascorrenza destra e con orientamento E-W, comprende le faglie di Trinità d'Agultu, di Posada, di Cedrino (da Oggiano et Al., 2009).

6.3 I “graben” burdigaliani

Detti bacini a direzione NE-SW vengono definitivamente intercettati, nel Burdigaliano superiore, dalle fosse estensionali a direttrice NNW-SSE, strutturalmente configurabili come “*graben*”; nella Fig. n.5, a chiarimento dei complessi e pervasivi processi tettonici cenozoici, viene rappresentato schematicamente il rapporto tettonico-evolutivo che lega il bacino transtensivo di Chilivani-Berchidda, di età aquitaniana ad orientazione NE-SW e delimitato dalle faglie trascorrenti sinistre di Berchidda e di Olbia, e la fossa estensionale di età burdigaliana ad orientazione NNW-SSE, strutturalmente configurabile come “*graben*” posto sul margine occidentale dell’alto strutturale della Gallura.

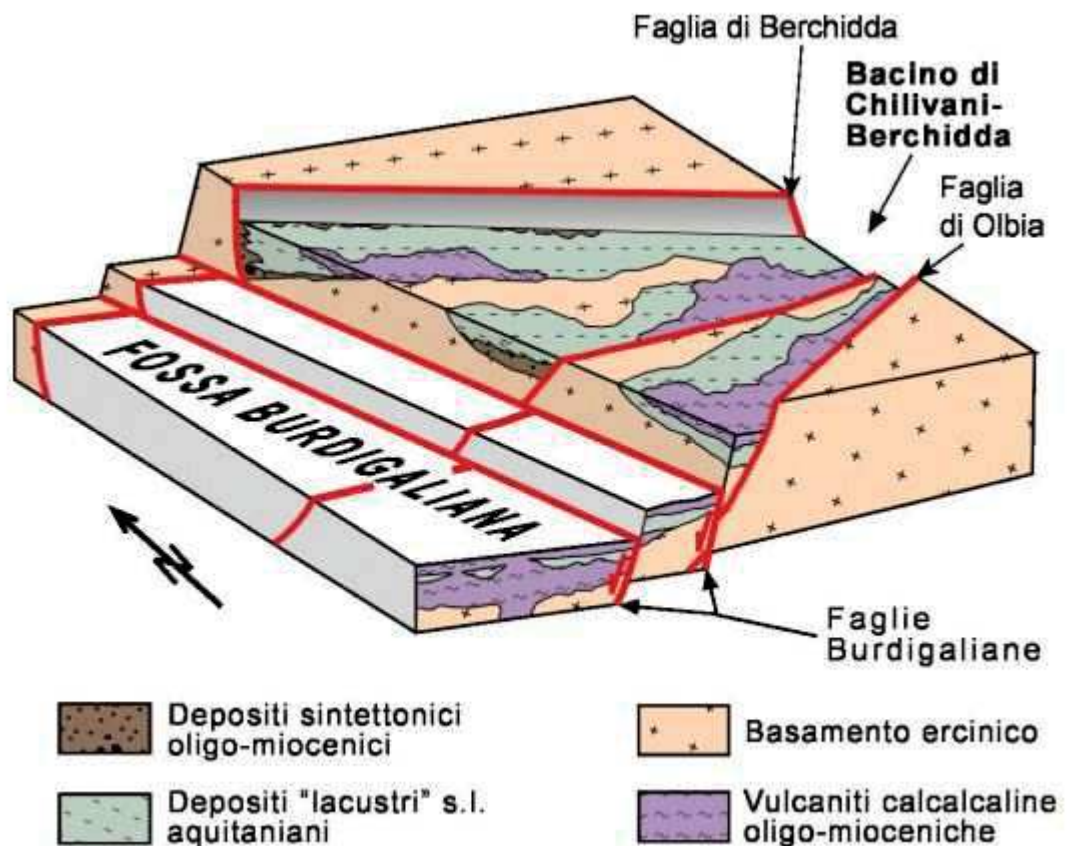


Fig. 5 – Schema delle relazioni tra bacini transtensivi aquitaniani N60 e bacini e estensionali burdigaliani N160 della Sardegna di NE.

Lo schema tettonico-evolutivo illustrato, evidenziando la complessità dei rapporti esistenti tra i bacini transtensivi aquitaniani e i “**graben**” burdigaliani, chiarisce altresì la genesi dell’ “**horst**” della Gallura, di diretto interesse del presente studio.

6.4 Entità delle dislocazioni lungo le faglie trascorrenti aquitaniane

L’entità delle dislocazioni orizzontali conseguente ai delineati processi tettonici è notevole.

Come esempio significativo e conclusivo si riporta il dato relativo al rigetto orizzontale sinistro della faglia trascorrente di Olbia stimato in circa 5.0 km; mentre per i rigetti verticali, subordinati rispetto a quelli trascorrenti, si stimano in genere valori di alcune centinaia di metri, fino al migliaio di metri nell’area del Monte Albo, lungo la faglia trascorrente sinistra di Nuoro (Fig.n.6).

Le stime vengono desunte da ricerche condotte sulle anomalie aeromagnetiche (Cassano et Al, 1979; Galdeano & Rossignol, 1977).

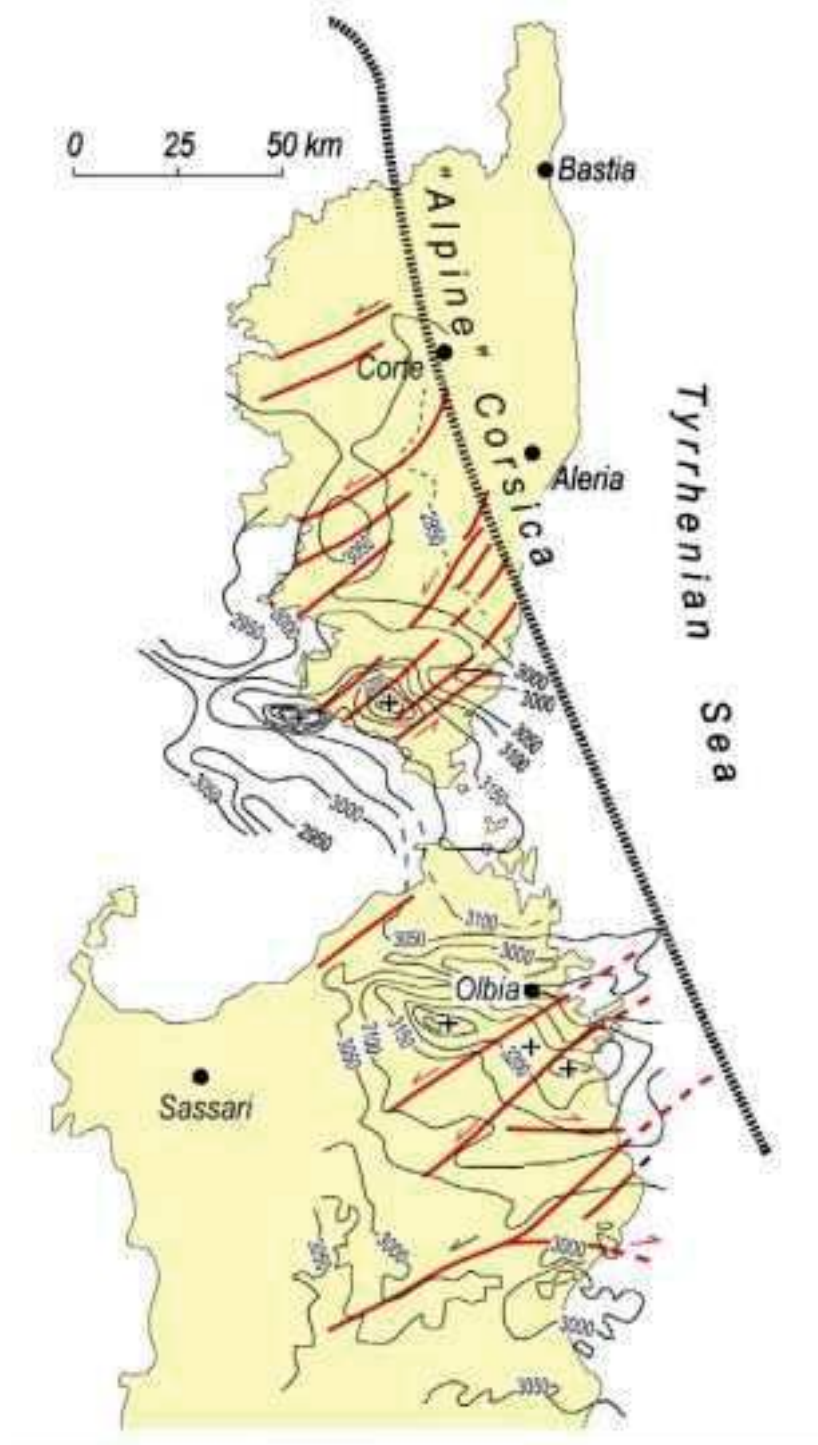


Fig. 6 – Entità delle dislocazioni lungo le faglie trascorrenti terziarie sardo-corse desunte dalle anomalie magnetiche.

Si osservi in particolare l'entità della dislocazione orizzontale della faglia trascorrente di Olbia valutabile attorno ai cinquemila metri (Cassano et Al., 1979; Galdeano e Rossignol, 1977, modificato).

6.5 I sistemi di discontinuità minori e i rapporti con i processi alterativi e disaggregativi dei granitoidi

Alle richiamate lineazioni tettoniche a scala regionale si aggiungono sistemi coniugati minori variamente orientati ed un ulteriore reticolo di discontinuità locali, da litoclasti a leptoclasti, che di fatto costituiscono le vie primarie attraverso cui evolvono i processi alterativi e disaggregativi a carico delle bande episuperficiali degli ammassi rocciosi.

Le accelerazioni temporali con le quali detti fenomeni si sviluppano dipendono dal grado di addensamento e dalle geometrie proprie dei sistemi locali dei giunti.

E' universalmente accettato come fattore principale dei processi alterativi l'attacco chimico idrolitico, che conduce alla disaggregazione dei graniti; il processo ammette, infatti, che l'azione combinata dei diversi agenti alterativi, cioè l'acqua, l'ossigeno e l'anidride carbonica, sulle rocce silicatiche conduca alla loro "caolinizzazione", con contestuale cessione di silice e, a seconda della loro composizione di base, altri ioni quali il sodio, il potassio, il magnesio, ecc., o composti come l'ossido di ferro (Fig. 7).

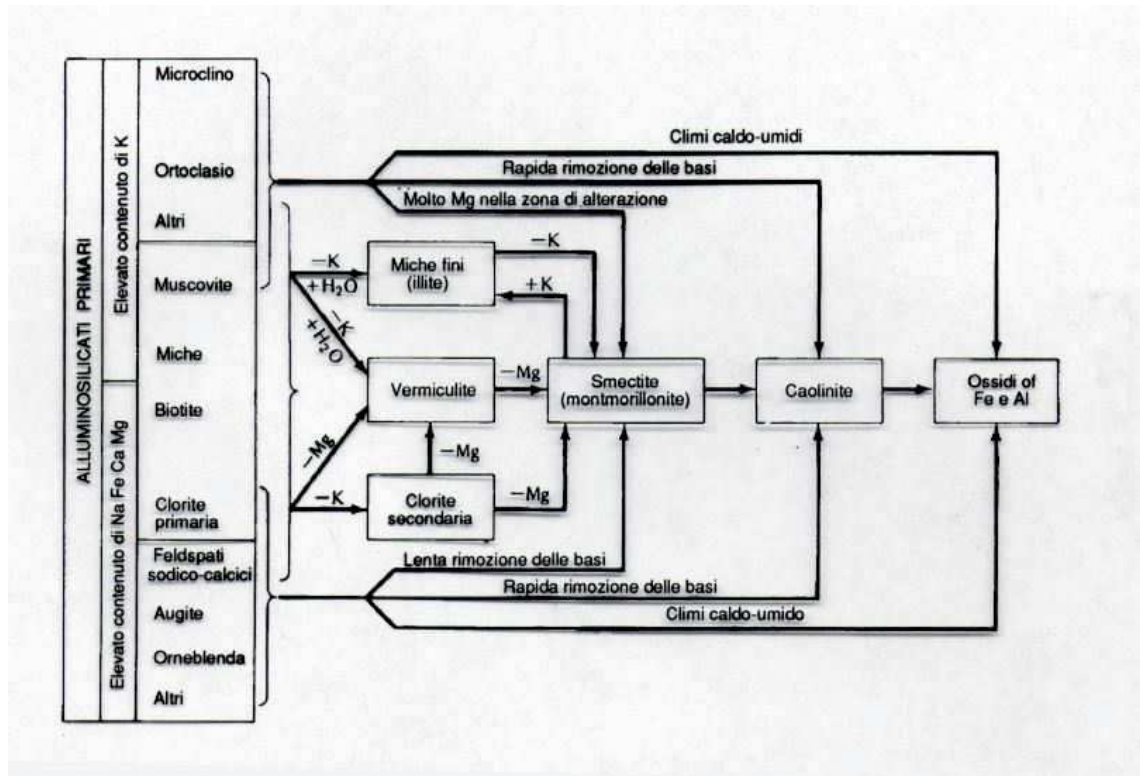


Fig. 7 – Vie di alterazione dei più importanti minerali delle rocce ignee e metamorfiche (fonte.: [www. unirc.it](http://www.unirc.it)).

All'appena accennato principale processo di alterazione chimica, si accompagnano anche i processi di degradazione fisica (crioclastismo, termoclastismo, aloclastismo, idroclastismo, ecc.) e di degradazione biologica.

A lungo termine, la risultante dei processi alterativi e disgregativi sulle masse granitoidi è rappresentata dalla completa perdita delle caratteristiche di compattezza e competenza proprie delle masse litoidi e dalla loro trasformazione in complessi sciolti parzialmente o totalmente arenizzati.

Il processo di arenizzazione si sviluppa, oltre che arealmente, anche e soprattutto verticalmente, iniziando dalle superfici esposte e spingendosi gradualmente in profondità.

Le coltri arenitiche così generate assumono spessori molto variabili, da pochi decimetri ad alcuni metri, in ragione della pendenza dei versanti, nonché

della densità, persistenza, spaziatura ed apertura dei sistemi di giunti presenti negli ammassi litoidi.

Detti sistemi di discontinuità e le connesse coltri arenitiche come sopra descritte assumono, come si dirà più avanti, un ruolo fondamentale nell'assetto idrogeologico generale.

7. – LINEAMENTI GEOMORFOLOGICI

L'attuale assetto geomorfologico del sito di interesse trae le proprie origini dai processi tettonico-evolutivi in precedenza delineati.

Il complesso collinare costituito dal Colle Piccinno a S e dalle due dorsali protese verso NNW di Spiritu Santu (ad W) e di Freare (ad E), divise da un solco vallivo identicamente orientato, si inserisce nelle complesse dislocazioni tettoniche mioceniche, evidenziate in zona, oltre che dalle grandi trascorrenze di Olbia e di Tavolara, da una serie di dislocazioni minori delimitanti localmente il complesso collinare, degradante con regolarità verso la costa.

Il descritto naturale assetto orografico connesso alla tettonica miocenica, i sistemi delle disgiunzioni conseguenti di cui si è detto nel precedente paragrafo, l'eustatismo del quaternario antico, unitamente alle disgregazioni ed alterazioni fisico-chimiche operanti sulle rocce, rappresentano la chiave di volta genetica delle attuali configurazioni delle pianure alluvionali, della rete idrografica, delle coperture detritiche ed eluvio-colluviali che, di volta in volta, cingono i versanti, colmano i solchi vallivi, coprono le masse litoidi costituenti il bed-rock.

Nell'area ad W di Spiritu Santu, cioè del sito di intervento, il distretto geomorfologico locale è di esclusivo dominio della piana alluvionale drenata dal Fiume Padrogiano e dai suoi affluenti di destra, il Rio Nannuri ed il Rio Castagna; mentre il solco vallivo, oggi ospitante la piattaforma IPPC, indirizza i propri scarsi deflussi idrici verso NE, perdendosi per evapotraspirazione ed infiltrazione nei depositi alluvionali presenti all'uscita della vallecchia, senza mai pervenire, salvo che nei periodi di eccezionale piovosità, allo stagno delle Tartanelle mediante il Rio Su Fenuju.

Sulla restante area all'intorno del sito di Spiritu Santu insistono, invece, le masse granitoidi, con le cime più alte a S e profili altimetrici degradanti verso NE con gradienti morfologici significativi.

Questa particolare configurazione morfologica determina effetti importanti di tipo idrologico e idrogeologico.

Gli effetti idrologici si manifestano con ridotti tempi di corrivazione delle acque di pioggia ed elevate velocità dei deflussi superficiali, cui conseguono elevate capacità di erosione e di trasporto solido con contestuale denudazione delle pendici dei rilievi e deposito delle masse detritiche nelle aree pianeggianti fino alla vicina linea costiera.

Gli effetti idrogeologici si rendono manifesti, invece, con la povertà degli acquiferi superficiali; povertà da ricondurre prioritariamente alla ridotta capacità di infiltrazione delle acque ruscellanti, regolata, come sopra evidenziato, dalla elevata velocità di deflusso e dai ridotti tempi di corrivazione, ed anche condizionata dalla intrinseca scarsa permeabilità dei complessi litologici affioranti.

La descritta caratterizzazione geomorfologica e conseguente dinamica geoidrologica si ritrova, nei suoi lineamenti principali e sia pure a scala ridotta, nel complesso collinare di Spiritu Santu e connesso piccolo solco vallivo centrale, sul quale, come detto, insiste la piattaforma IPPC.

8. – LINEAMENTI IDROGEOLOGICI

Le caratteristiche dei circuiti idrici sotterranei sono sottese dai valori di permeabilità dei livelli litologici che compongono gli acquiferi.

Nell'area in esame si possono individuare due distinte *“formazioni idrogeologiche”* e due distinti *“acquiferi”*.

La prima *“formazione idrogeologica”* riguarda la piana detritico-alluvionale di dominio del fiume Padrogiano, costituente *“acquifero”* autonomo, caratterizzato da permeabilità per porosità primaria ed ospitante una falda libera superficiale con deflussi orientati verso NNE; tale falda assume caratteri di estrema *“vulnerabilità”*.

La seconda *“formazione idrogeologica”* e relativo *“acquifero”* assumono, invece, caratteri di maggior complessità, in quanto costituiti dai complessi litoidi granitici fratturati basali e dalle sovrastanti coperture di diversa genesi ma simili sotto il profilo fisico-granulometrico, quali le coltri arenitiche, originate dalla stessa roccia madre granitica, ovvero i depositi detritico-alluvionali presenti nei solchi vallivi ovvero ancora le falde detritiche e le coltri eluvio-colluviali.

Questa *“formazione idrogeologica”* è caratterizzata da due distinti tipi di permeabilità, quella per fratturazione secondaria delle masse granitoidi basali, con permeabilità K generalmente compresa tra 10^{-7} e 10^{-9} m/s, e quella per porosità primaria delle coperture arenaceo-detritico-alluvionali ed eluvio-colluviali, con permeabilità K generalmente compresa tra 10^{-4} e 10^{-7} m/s.

Il descritto acquifero è caratterizzato da estrema superficialità, da spessori ridotti, da forte discontinuità areale, da modesti valori della trasmissività, dell'immagazzinamento e delle portate ed, infine, fortemente assoggettato ad elevata vulnerabilità.

9. – LINEAMENTI CLIMATICI

Ad Olbia, nell'arco di tempo compreso ***tra il 1922 ed il 2005***, quindi per 83 anni, è stata registrata una **precipitazione media annuale di 570 mm**.

In detto arco temporale è possibile distinguere due periodi caratterizzati da una diversa precipitazione media annuale.

Il primo periodo, lungo 48 anni e compreso tra il 1922 ed il 1970, risulta essere più umido rispetto al successivo periodo di 35 anni, compreso tra il 1970 ed il 2005; il primo periodo, infatti, è caratterizzato da una precipitazione media annuale pari a 650 mm, mentre il secondo è caratterizzato da una precipitazione media annuale pari a 480 mm, con una ***diminuzione, rispetto alla media totale di 570 mm, pari al 15.8%***.

I dati termometrici sono invece disponibili ***dal 1927 al 2005***, per complessivi 67 anni (mancano gli anni dal 1942 al 1950 e gli anni 1978 – 1979) nel corso dei quali è stata registrata una ***temperatura media annuale pari a 16.6° C***.

Negli ultimi 35 anni (1970-2005) ***la temperatura media annuale è passata dai 16.6 °C a 17°C, con un incremento del 2.5%***.

Si evidenzia la correlazione esistente tra pioggia e temperatura nel medesimo arco di tempo e quanto l'incremento della temperatura abbia influito sulla diminuzione delle precipitazioni nel periodo considerato (fonti varie: *Stazione meteo ENAV, aeroporto di Olbia; sardegna-clima.it; clima.meteoam.it; regione.sardegna.it/j/V, misure termopluviometriche ed idrometriche*).

10. – PERICOLOSITA' SISMICA

Il territorio della Regione Sardegna risulta inserito nella **Zona 4** della classificazione sismica nazionale, dettata dall'O.P.C.M. 3274/2003 e dalle successive norme, quali l'O.P.C.M. 3519/2006 ed il D.M. Infrastrutture del 14 gennaio 2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni).

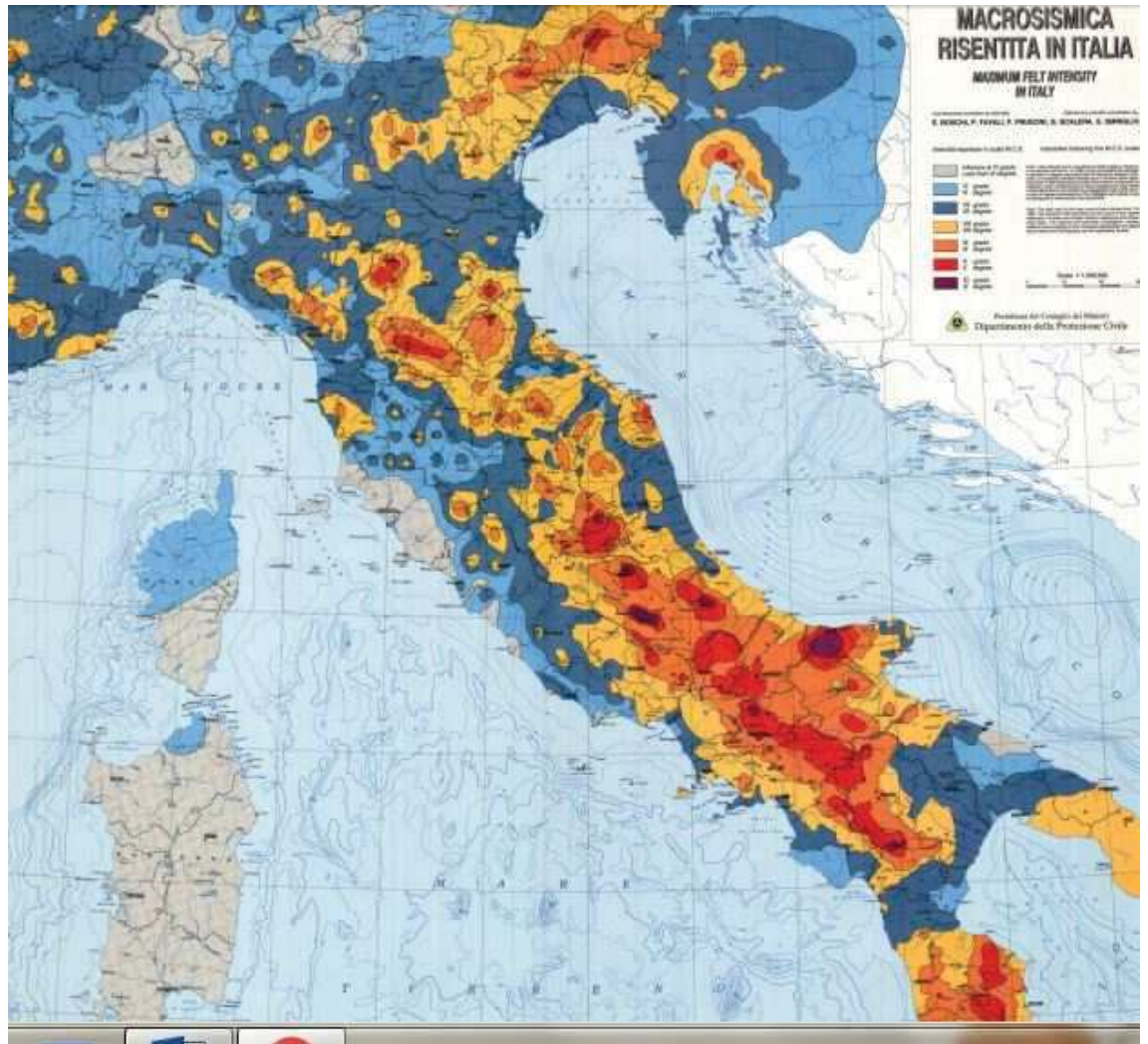
La Regione Sardegna, dal suo canto, si è limitata ad emanare la deliberazione di G.R. n.15/31 del 30 marzo 2004, recependo il dettato della citata OPCM, senza tener conto delle palesi differenziazioni geostrutturali del territorio regionale che postulano, anche se nell'ambito di una contenuta pericolosità sismica regionale, diversificati livelli di pericolosità sismica zonale.

L'accennato problema va, dunque, affrontato e risolto con appropriati studi e tecniche di **microzonazione sismica** da recepirsi nella legislazione regionale.

Il territorio di Olbia, pertanto, è classificato in **Zona 4**, nonostante che alcune aree della Sardegna abbiano a più riprese denunciato risentimenti sismici, sia pure contenuti, derivanti dalle strutture sismogenetiche attive presenti nel Mar Tirreno, nel canale di Sardegna e nel Mar Mediterraneo occidentale.

Di questi eventi si trovano significativi documenti redatti a più riprese nel tempo da Enti di Ricerca istituzionali.

Il primo di tali documenti riguarda la Carta della "**MASSIMA INTENSITÀ MACROSISMICA RISENTITA IN ITALIA**", edita nel 1995 dall'Istituto Nazionale di Geofisica (ING) del CNR, nella quale una parte della **Gallura settentrionale** (così come la parte centro-settentrionale della Corsica) viene indicata come soggetta ad eventi sismici storici del VI grado della Scala M.C.S.; tale area è colorata in azzurro (Fig. 8).



26 04 2000
Capo Comino



Campo
Macrosismico
(M.C.S.)

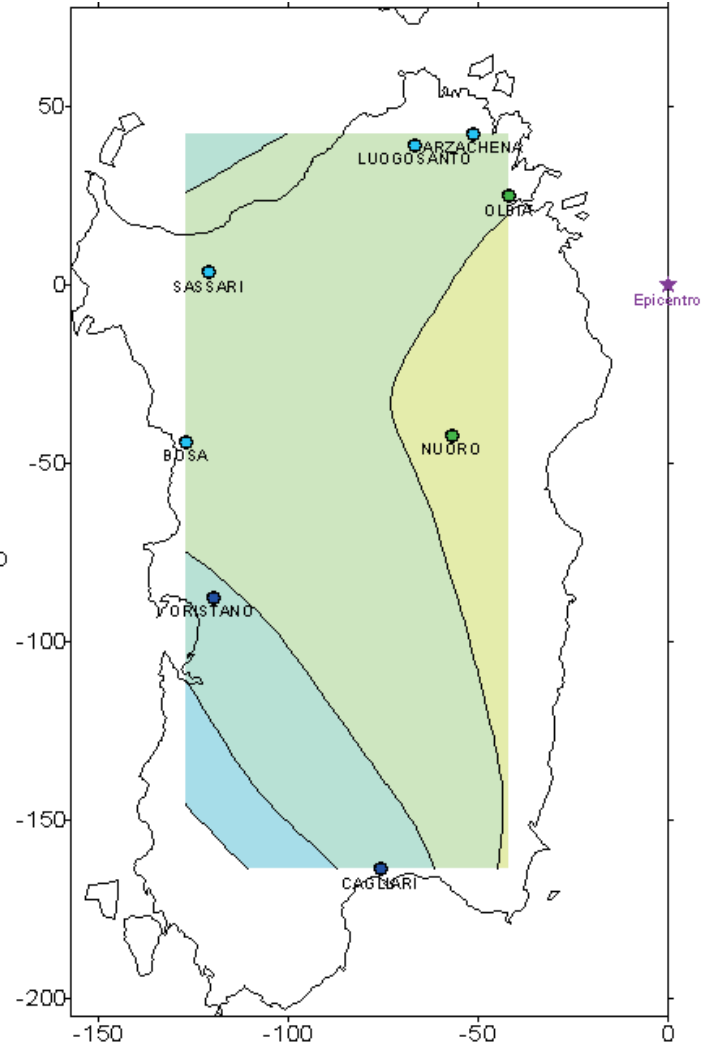
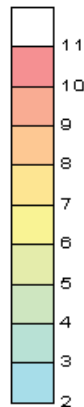


Fig. 9 – Mappa dell'intensità macrosismica regionale conseguente al sisma di Capo Comino del 26 aprile 2000 di $M_I = 4.8$ (fonte: legacy.ingv.it)

La ripetitività dei fenomeni sismici al largo della Sardegna è documentata anche da altra mappa dell'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), di seguito proposta (Fig.10), che riporta gli epicentri dei terremoti verificatisi nel Mar Tirreno e nel Mediterraneo occidentale nel solo periodo 2000 – 2012; nella mappa sono individuabili, in particolare, gli epicentri dei sismi verificatisi al largo della costa nord-orientale della Sardegna ed in particolare di Olbia, oltre che gli altri epicentri ubicati a NW, a SW ed a S dell'isola.

Nonostante risulti che alcuni risentimenti sismici possano aver sfiorato, in talune aree della Sardegna, il limite della soglia del danno, la sopra citata normativa classifica tutto il territorio della Sardegna in **Zona 4**, alla quale è assegnato un valore di accelerazione sismica orizzontale $ag/g \leq 0.05$, con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni.

Le NTC/2008, se da un lato non postulano obblighi in materia di esecuzione di studi di microzonazione sismica per una più dettagliata previsione dell'azione sismica di base, dall'altro fissano i criteri per la definizione dell'azione sismica, che resta ancorata a definite categorie di sottosuolo, alle quali vengono associati parametri numerici atti a modificare gli spettri di risposta per tener conto delle caratteristiche litostratigrafiche e geotecniche locali, da individuare mediante specifiche indagini tecniche in sito ed in laboratorio.



Fig. 10 – Epicentri dei terremoti con magnitudo maggiore di 1.6 avvenuti in Italia dal 2000 al 2012. Si notino gli epicentri dei sismi verificatisi al largo delle coste della Sardegna (fonte: labgis.gm.ingv.it)

11.- INDAGINI IN CAMPO E IN LABORATORIO

Nell'ambito dell'area destinata alla realizzazione della discarica per rifiuti non pericolosi sono state esperite le seguenti indagini tecniche in campo ed in laboratorio.

La fig. n.11 riporta l'ubicazione delle indagini di campo.

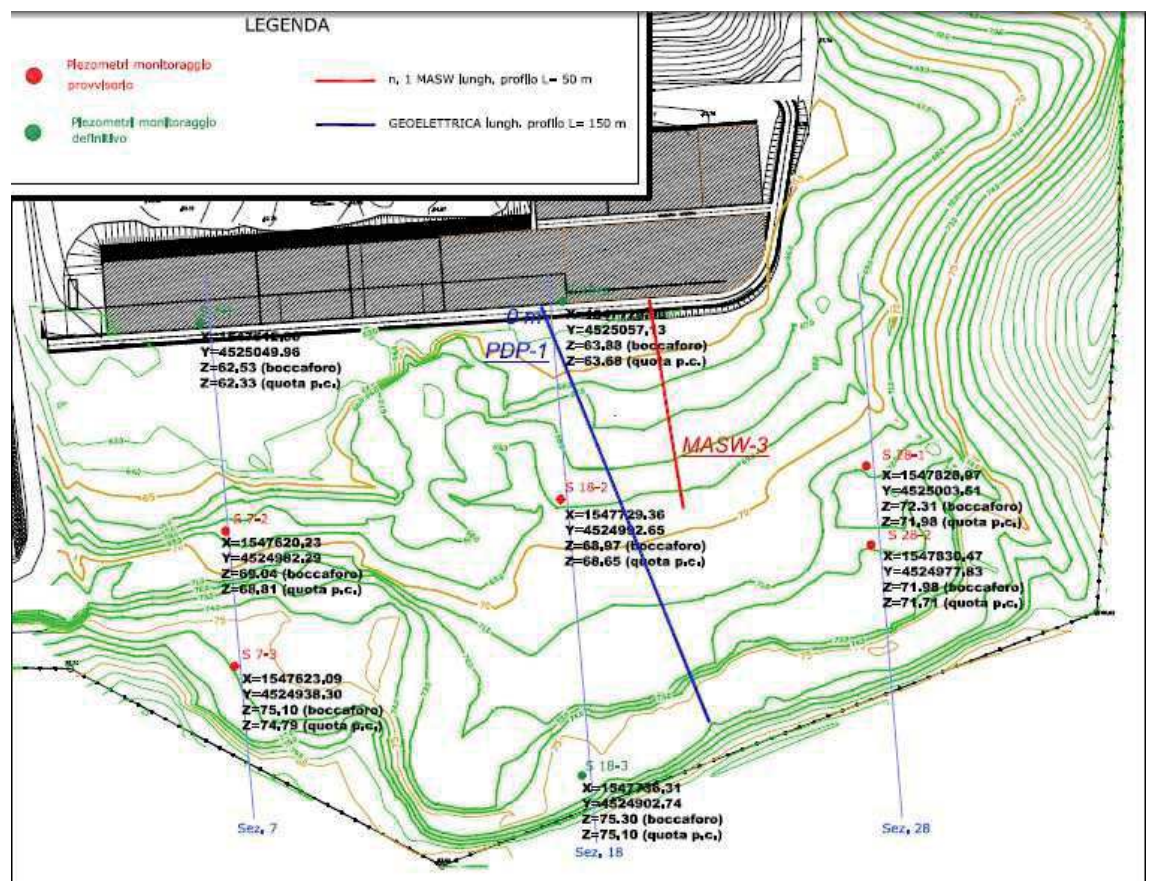


Fig. 11 – Ubicazione indagini di campo

11.1 INDAGINI GEOGNOSTICHE

11.1.1 Sondaggi a carotaggio continuo

Sono stati complessivamente eseguiti n.8 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, distribuiti lungo n.3 sezioni così distinti:

SEZIONE N.7		
Sondaggio	Profondità (m)	Quota p.c.
S7-1	10.00	62.33
S7-2	13.00	68.81
S7-3	13.00	74.79

SEZIONE N.18		
Sondaggio	Profondità (m)	Quota p.c.
S18-1	10.00	63.68
S18-2	14.80	68.65
S18-3	10.00	75.10

SEZIONE N.28		
Sondaggio	Profondità (m)	Quota p.c.
S28-1	16.00	71.98
S28-2	12.10	71.71

11.1.2 Piezometri

Tutti i fori di sondaggio di cui al precedente par.11.1.1 sono stati attrezzati a piezometri, destinati al rilevamento dei livelli piezometrici ed alle prove di emungimento.

- **Fori attrezzati a piezometri provvisori**

Sono stati attrezzati a piezometri provvisori, destinati al rilevamento dei livelli piezometrici in corso d'opera e perciò muniti solo di boccaforo con chiusino e privi di rivestimento-filtro, i seguenti n.5 fori:

- Sondaggio S7-2
- Sondaggio S7-3
- Sondaggio S18-2
- Sondaggio S28-1
- Sondaggio S28-2

- **Fori attrezzati a piezometri definitivi**

Sono stati attrezzati a piezometri definitivi, destinati al monitoraggio ambientale dell'area di discarica ed a prove di emungimento e perciò attrezzati con tubi-filtro, drenaggio e chiusino con lucchetto, i seguenti n.3 fori:

- Sondaggio S7-1
- Sondaggio S18-1
- Sondaggio S18-3

11.2 INDAGINI GEOTECNICHE

11.2.1 Rilevamento Indice RQD (Rock Quality Designation Index)

L'indice RQD è stato rilevato sull'intero carotaggio per ciascuno dei n.8 sondaggi di cui al precedente par. 11.1.1.

11.2.2 Prove di compressione a carico concentrato PLT (Point Load Test)

Sono state eseguite complessivamente n.8 prove di compressione a carico concentrato PLT, ciascuna delle quali condotta su n.3 provini, come di seguito indicato:

SONDAGGIO S7-3		
Prove	Numero provini estratti	Profondità dal p.c. (m)
Prima	3	da 5.00 a 6.00
Seconda	3	da 10.00 a 11.00
Terza	3	da 11.00 a 12.00

SONDAGGIO S18-3		
Prove	Numero provini estratti	Profondità dal p.c. (m)
Prima	3	da 4.00 a 5.00
Seconda	3	da 5.00 a 6.00
Terza	3	da 9.00 a 10.00

SONDAGGIO 28-2		
Prove	Numero provini estratti	Profondità dal p.c. (m)
Prima	3	da 4.00 a 5.00
Seconda	3	da 9.00 a 10.00

11.3 INDAGINI IDROGEOLOGICHE

11.3.1 Misure di permeabilità in foro Lugeon

Sono state eseguite n.4 prove di permeabilità in foro con metodo Lugeon in discesa.

Le quattro prove risultano così individuate:

SONDAGGIO	PROFONDITA' CAMERA DI PROVA (m)
S7-2	8.00 – 10.00
S18-1	4.00 – 6.00
S18-3	8.00 – 10.00
S28-1	12.00 – 14.00

11.3.2 Prove di emungimento

Sono state eseguite varie prove di emungimento su pozzi-piezometri singoli finalizzate alla caratterizzazione dell'acquifero.

I pozzi-piezometri prescelti sono quelli condizionati con filtro e prefiltro, come di seguito indicato:

POZZO-PIEZOMETRO	PROFONDITA' (m)
S7-1	10.00
S18-1	10.00
S28-3	10.00

- **Prove preliminari**

Sono state effettuate prove di pompaggio preliminari finalizzate ad una prima taratura della potenza delle pompe e delle portate.

Prima fase

In una prima fase sono state condotte prove con portate variabili solo in discesa ovvero solo in risalita:

PIEZOMETRO	PORTATE VARIABILI	DATA
S7-1	solo in discesa	07/03/2016
S18-1	solo in discesa	07/03/2016
S18-3	in discesa e in risalita	07/03/2016

Seconda fase

Nella seconda fase sono state condotte prove a portata costante con misura delle depressioni in discesa e in risalita onde ottenere indicazioni di base sulle risposte dell'acquifero alle sollecitazioni indotte con gli emungimenti e, nel contempo, individuare anche le portate ottimali per le successive prove:

PIEZOMETRO	PORTATA	DATA
S7-1	5.40 l/m	14/03/2016
S18-1	5.00 l/m	14/03/2016
S18-3	4.00 l/m	15/03/2016

- **Prove definitive**

Prova di emungimento a gradini di portate crescenti

La prova è stata condotta a *gradini di portate crescenti* con misura delle depressioni indotte in *discesa* e in *risalita*, calibrando le portate sulla base degli esiti delle prove preliminari.

PIEZOMETRO	PORTATE (Gradini n.3)	DATA
S7-1	0.60 l/min	31/03/2016
	1.20 l/min	
	2.40 l/min	

Prove di emungimento a portata costante

La prova è stata condotta a portata costante con misura delle depressioni indotte in discesa e i risalita, calibrando la portata sulla base degli esiti delle prove preliminari:

PIEZOMETRO	PORTATA	DATA
S7-1	0.90 l/min	01/04/2016

Nel corso della prova è stato tenuto sotto controllo il livello statico del limitrofo piezometro S18-1, ubicato ad una distanza di circa 130.00 m dal piezometro S7-1, per tentare di determinare sperimentalmente il raggio di influenza di quest'ultimo.

11.4 INDAGINI GEOFISICHE

Nell'ambito dell'area di interesse sono state eseguite indagini geofisiche con due diverse finalità, la prima delle quali, condotta con tecnica elettrotomografica tesa ad ottenere un profilo bidimensionale continuo del sottosuolo mediante misure di valori di resistività, la seconda, rappresentata da una indagine sismica attiva con metodologia MASW, tesa ad ottenere un profilo della velocità delle onde di taglio in rapporto alla profondità.

11.4.1 Prospezione elettrotomografica

E' stata ubicata in posizione all'incirca centrale nell'ambito dell'area di interesse:

- Direzione del profilo, NNW-SSE
- Lunghezza del profilo, 147.50 m.

11.4.2 Prospezione sismica MASW

E' stata ubicata in posizione decentrata verso E nell'area di interesse.

- Direzione del profilo all'incirca N - S
- Lunghezza del profilo, 72.00 m.

12 – ESITI DELLE INDAGINI

Nel presente paragrafo vengono ripresi, analizzati e discussi i risultati delle indagini tecniche esperite in campo ed in laboratorio, già in precedenza elencate.

12.1 Profilo geolitologico, morfologico e idrografico del sito

L'area sulla quale sono state condotte le indagini è caratterizzata, sotto il profilo geolitologico, da un basamento di roccia intrusiva, rappresentata da granitoidi tardo-ercinici, costituiti da monzograniti in genere inequigranulari e a diversificata orientazione tessiturale.

Il basamento granitoide è sottoposto a coperture quaternarie costituite da depositi eluvio-colluviali limoso-sabbioso-ghiaiosi, derivanti da processi di disfacimento della roccia di base fino alla sua completa "arenizzazione", e da depositi più francamente alluvionali e di analoga costituzione, che si ritrovano nelle linee di impluvio.

Gli spessori di dette coltri sono comprese tra qualche decimetro ed alcuni metri.

Una permeabilità, in genere bassa ($10^{-6} < k < 10^{-9}$ m/s) per fratturazione secondaria, caratterizza i granitoidi di base, in genere compresa entro una decina di metri dal piano di campagna; una permeabilità per porosità più elevata di quella caratterizzante il substrato granitoide ($10^{-4} < k < 10^{-7}$ m/s) accompagna, invece, la coltre eluvio-colluviale-alluvionale di superficie.

Sotto il profilo morfologico l'area destinata alla discarica deriva da uno sbancamento, operato anni addietro mediante l'impiego di esplosivi, che le ha conferito un andamento sub-planare con lievi pendenze vergenti verso NNW.

Fanno da cornice al pianoro, verso E, una pendice collinare, con pendenze ad andamento regolare dell'ordine del $28\% \div 32\%$, e, verso S, la costa rocciosa del Colle Lisandruggiu, con pendenze regolari mediamente pari a $40\% \div 45\%$.

Le operazioni di spianamento hanno dato luogo ad un diverso assetto stratigrafico-strutturale sia della originaria coltre eluvio-alluvionale sia del substrato granitoide.

La coltre quaternaria, a seguito di dette lavorazioni, è stata sostituita da una coltre detritica rimaneggiata, con spessore medio dell'ordine di qualche metro, derivante dalla frammentazione della roccia di base e mescolamento della stessa con la residua coltre limoso-sabbioso-ghiaiosa; il substrato granitoide di base è stato, invece, alterato strutturalmente dalle cariche esplosive delle quali, nelle carote estratte dai sondaggi geognostici fino ad oltre 4.00 m dall'attuale pino di campagna, sono stati osservati gli effetti, evidenziati da una frantumazione ed alterazione del granito circostante i punti di scoppio ovvero da una accentuazione dei caratteri delle discontinuità già presenti nell'ammasso roccioso.

Anche l'assetto idrografico risulta mutato a seguito dei lavori di spianamento, che hanno riguardato, si ripete, l'area destinata ad accogliere la discarica in progetto.

Prima della esecuzione di detti lavori, le acque di origine meteorica provenienti dalla sovrastante pendice di Colle Lisandruggiu defluivano liberamente verso valle, attraversando l'area di interesse seguendo due appena accennati impluvi; oggi, invece, sono costrette a ristagnare su quest'ultima, favorendo i processi di infiltrazione e di circolazione idrica sotterranea.

Questo tema sarà ripreso e analizzato più avanti, quando verrà impostato e sviluppato il bilancio idrologico per la parametrizzazione quantitativa delle acque sotterranee circolanti nell'area.

12.2 Esiti Sondaggi geognostici e rilevamento Indice RQD

Nell'area risultano eseguiti n.8 sondaggi geognostici a carotaggio continuo disposti lungo n.3 profili tra loro paralleli ed allineati secondo direttrici N –S.

12.2.1 Sezione S7-1, S7-2, S7-3

La prima sezione, partendo da W e procedendo da valle verso monte, comprende i seguenti sondaggi:

SONDAGGIO	PROFONDITA' (m)	QUOTA BOCCA FORO (m/lm)
S7-1	10.00	62.53
S7-2	13.00	69.04
S7-3	13.00	75.10

Segue la descrizione sintetica delle principali caratteristiche litostratigrafiche e del grado di fratturazione:

SONDAGGIO S7-1		
Profondità (m)	Litostratigrafia	RQD
da 0.00 a 1.00	Coltre detritica rimaneggiata limoso-sabbioso-ghiaiosa	
da 1.00 a 3.50	Granito poco fratturato	83%-84%
da 3.50 a 5.00	Granito allo stato detritico per probabile prossimità ad un punto di scoppio	0%
da 5.00 a 6.20	Granito molto fratturato	30%
da 6.20 a 10.00	Granito da mediamente a poco fratturato	62%-88%

SONDAGGIO S7-2

Profondità (m)	Litostratigrafia	RQD
da 0.00 a 2.90	Coltre detritica rimaneggiata limoso-sabbioso-ghiaiosa	
da 2.90 a 4.00	Granito poco fratturato	61%
da 4.00 a 5.00	Granito molto fratturato	37%
da 5.00 a 13.00	Granito poco fratturato	52%-96%

SONDAGGIO S7-3		
Profondità (m)	Litostratigrafia	RQD
da 0.00 a 0.60	Coltre detritica rimaneggiata limoso-sabbioso-ghiaiosa	
da 0.60 a 2.00	Granito poco fratturato	82%
da 2.00 a 4.00	Granito molto fratturato	38%-39%
da 4.00 a 13.00	Granito da mediamente a poco fratturato	51%-36%

12.2.2 Sezione S18-1, S18-2, S18-3

Il secondo profilo comprende i seguenti sondaggi a partire da valle verso monte:

SONDAGGIO	PROFONDITA' (m)	QUOTA BOCCA FORO (m/lm)
S18-1	10.00	63.88
S18-2	14.80	68.97
S18-3	10.00	75.30

Segue la descrizione sintetica delle principali caratteristiche litostratigrafiche e del grado di fratturazione:

SONDAGGIO S18-1		
Profondità (m)	Litostratigrafia	RQD
da 0.00 a 1.00	Coltre detritica rimaneggiata limoso-sabbioso-ghiaiosa	
da 1.00 a 1.20	Granito molto fratturato	0%
da 1.20 a 10.00	Granito da mediamente a poco fratturato	70%-86%

SONDAGGIO S18-2		
Profondità (m)	Litostratigrafia	RQD
da 0.00 a 1.15	Coltre detritica rimaneggiata limoso-sabbioso-ghiaiosa	
da 1.15 a 3.00	Granito molto fratturato	27%-43%
da 3.00 a 4.50	Granito poco fratturato	64%
da 4.50 a 9.00	Granito da mediamente a molto fratturato	51%-33%
da 9.00 a 11.00	Granito poco fratturato	min.77%
da 11.00 a 12.00	Granito molto fratturato	23%
da 12.00 a 14.80	Granito da mediamente a poco fratturato	56%-78%

SONDAGGIO S18-3		
Profondità (m)	Litostratigrafia	RQD
da 0.00 a 1.00	Coltre detritica rimaneggiata limoso-sabbioso-ghiaiosa	
da 1.00 a 7.00	Granito molto fratturato, a tratti allo stato detritico per probabile prossimità ad un punto di scoppio	min. 0%-30%
da 7.00 a 8.40	Granito poco fratturato	80%
da 8.40 a 9.30	Granito molto fratturato	10%
da 9.30 a 10.00	Granito poco fratturato	95%

12.2.3 Sezione S28-1, S28-2

Il terzo profilo comprende i seguenti sondaggi a partire da valle verso monte:

SONDAGGIO	PROFONDITA' (m)	QUOTA BOCCAFORO (m/lm)
S28-1	16.00	72.31
S28-2	12.10	71.98

Segue la descrizione sintetica delle principali caratteristiche litostratigrafiche e del grado di fratturazione:

SONDAGGIO S28-1		
Profondità (m)	Litostratigrafia	RQD
da 0.00 a 0.45	Coltre detritica rimaneggiata limoso-sabbioso-ghiaiosa	
da 0.45 a 1.45	Granito molto fratturato	31%
da 1.45 a 7.20	Granito da mediamente a poco fratturato	68%-91%
da 7.20 a 8.35	Granito da mediamente a molto fratturato	40%
da 8.35 a 16.00	Granito da mediamente a poco fratturato	51%-94%

SONDAGGIO S28-2		
Profondità (m)	Litostratigrafia	RQD
da 0.00 a 1.00	Coltre detritica rimaneggiata limoso-sabbioso-ghiaiosa	
da 1.00 a 1.40	Granito molto fratturato	0%
da 1.40 a 12.20	Granito da mediamente a poco fratturato	53%-95%

12.2.4 Discussione

12.2.4.1 I lavori di spianamento ed il nuovo assetto geologico del sito

Gli esiti delle litostratigrafie e dell'Indice RQD, congiuntamente sopra esaminati, completano il quadro cognitivo del sito sotto il profilo geolitologico, morfologico e idrografico così come esposto nel precedente paragrafo 12.1.

Chiariscono, altresì, in maniera sistematica e dettagliata, l'incidenza dei lavori di spianamento esperiti in passato nell'area sia nei confronti dell'attuale assetto morfologico e idrologico-idrografico di superficie, sia nei confronti dell'attuale assetto fessurativo dell'ammasso roccioso e connessa circolazione idrica sotterranea.

Per quanto concerne il primo punto è stata rilevata la totale asportazione della originaria coltre arenitica eluvio-colluvio-alluvionale al tetto del basamento granitico e la sua sostituzione con un deposito limoso-sabbioso-ghiaioso,

conseguente al rimaneggiamento-mescolamento delle primitive coperture con la roccia granitica di base, frammentata a seguito delle “volate”.

Questa sostituzione litologica non ha sostanzialmente mutato le originali condizioni di permeabilità dei terreni di copertura, rimaste sostanzialmente simili, ma ha modificato, invece, i tempi di ruscellamento superficiale delle acque di pioggia provenienti dal sovrastante costone roccioso di Colle Lisandraggiu.

Queste ultime, infatti, per l’attenuazione delle pendenze conseguente ai lavori di spianamento, ristagnano più a lungo nell’area di interesse, dando luogo ad un maggior tasso di infiltrazione in sotterraneo.

Relativamente al secondo punto, si osserva che il brillamento delle cariche esplosive nell’area in oggetto ha certamente determinato locali incrementi delle discontinuità presenti nell’ammasso roccioso con contestuale aumento del coefficiente di permeabilità.

In particolare, è stato possibile rilevare l’effetto delle esplosioni nel sondaggio S7-1, a profondità comprese tra 3.50 e 5.00 metri, nel sondaggio S7-2, a profondità comprese tra 3.00 e 4.70 metri, nel sondaggio S18-2, a profondità comprese tra 1.20 e 3.00 metri, nel sondaggio S18-3, a profondità comprese tra 1.00 e 5.00 metri.

Di seguito si illustra in dettaglio l’attuale assetto litostratigrafico e fessurativo emergente dalle indagini geognostiche.

12.2.4.2 Quadro generale litostratigrafico e fessurativo

Si dà luogo di seguito alla definizione del quadro litostratigrafico e fessurativo locale sotto il duplice aspetto qualitativo e quantitativo.

Si premette che sono stati individuati complessivamente tre livelli litostratigrafico-fessurativi principali ed un sub-livello, discontinuo ma significativo, intercalato nel secondo dei tre livelli principali.

Di seguito se ne descrivono sistematicamente le caratteristiche essenziali.

12.2.4.2a PRIMO LIVELLO: COLTRE DETRITICA RIMANEGGIATA

Il primo livello, a partire dall'alto, viene identificato con la coltre detritica osservata in continuo in superficie e, perciò, rilevata lungo la verticale degli otto sondaggi eseguiti nell'area di interesse.

Detta coltre è costituita da una frammistione rimaneggiata di natura limoso-sabbioso-ghiaiosa, i cui spessori accertati sono i seguenti:

- spessori minimi, pari a 0.60 m e a 0.45 m, nei sondaggi S7-3 e S28-1;
- spessori massimi, pari a 2.90 m e 1.15 m, nei sondaggi S7-2 e S18-2;
- spessori medi, pari a 1.00 m, nei sondaggi S7-1, S18-1, S18-3, S28-2.

In conclusione la coltre detritica rimaneggiata di superficie ha spessori compresi tra 0.45 e 2.90 metri.

I dati di cui sopra si riassumono e si correlano nella seguente tabella.

TABELLA N.1 – PRIMO LIVELLO: COLTRE DETRITICA RIMANEGGIATA

SONDAGGIO	PROFONDITA' (m)	SPESSORE (m)
S7-1	da 0.00 a 1.00	1.00
S7-2	da 0.00 a 2.90	2.90
S7-3	da 0.00 a 0.60	0.60
S18-1	da 0.00 a 1.00	1.00
S18-2	da 0.00 a 1.15	1.15
S18-3	da 0.00 a 1.00	1.00
S28-1	da 0.00 a 0.45	0.45
S28-3	da 0.00 a 1.00	1.00

Questo primo livello non riveste alcuna importanza progettuale in quanto dovrà essere completamente asportato per la realizzazione della vasca destinata a scarica di rifiuti non pericolosi.

12.2.4.2b SECONDO LIVELLO: GRANITI MOLTO FRATTURATI

A detta coltre segue un livello di matrice granitica, generalmente molto fratturato (comprendente un sub-livello discontinuo di roccia granitica poco fratturata, di cui si dirà in seguito), i cui spessori, profondità, indice RQD e indice Jv sono riportati nella seguente tabella.

TABELLA N.2 – SECONDO LIVELLO: GRANITI MOLTO FRATTURATI

SONDAGGIO	PROFONDITA' (m)	SPESSORE (m)	RQD (%) Classificazione Deer	Jv/m ³ (fratture/mc) Palmstrom (grandezza blocchi)
S7-1	da 1.00 a 6.20	5.20 (1)	0-30 molto scadente	da 34.85 a 25.75 da molto piccoli a piccoli
S7-2	da 2.90 a 5.00	2.10 (2)	37 scadente	23.64 piccoli
S7-3	da 0.60 a 4.00	3.40 (3)	38-39 scadente	23.33 piccoli
S18-1	da 1.00 a 1.20	0.20	0 molto scadente	34.85 molto piccoli
S18-2	da 1.15 a 12.00	10.85 (4)	23-51 molto scad.-discreta	da 27.88 a 19.39 da molto piccoli a medi
S18-3	da 1.00 a 9.30	8.30 (5)	0-30 molto scad.- scadente	da 34.85 a 25.75 da molto piccoli a medi
S28-1	da 0.45 a 1.45	0.85	31 scadente	25.45 piccoli
S28-3	da 1.00 a 1.40	0.40	0 molto scadente	34.85 molto piccoli

Note:

- (1) S7-1: comprende un livello poco fratturato tra 1.00 e 3.45 m di profondità (RQD = 83% - 100%)
- (2) S7-2: comprende un livello poco fratturato tra 3.00 e 4.00 m di profondità (RQD = 61%)
- (3) S7-3: comprende un livello poco fratturato tra 0.60 e 2.00 m di profondità (RQD = 82%)
- (4) S18-2: comprende due livelli poco fratturati tra 3.00 e 4.50 m di profondità (RQD = 64%) e tra 9.00 e 11.00 m di profondità (RQD = 77%)
- (5) S18-3: comprende un livello poco fratturato tra 7.00 e 8.40 m di profondità (RQD = 80%)

12.2.4.2c TERZO LIVELLO: GRANITI POCO FRATTURATI

Segue, infine, un livello basale continuo, generalmente ben qualificato sotto il profilo delle discontinuità, i cui spessori, profondità, indice RQD e indice Jv sono riportati nella seguente tabella.

TABELLA N.3 – TERZO LIVELLO: GRANITI POCO FRATTURATI

SONDAGGIO	PROFONDITA' (m)	SPESSORE (m)	RQD (%) Classificazione Deer	Jv/m³ (fratture/mc) Palmstrom (grandezza blocchi)
S7-1	da 6.20 a 10.00	3.80	62-88 discreta-buona	16 - 8 medi-grandi
S7-2	da 5.00 a 13.00	8.00	52-96 discreta-eccellente	19 - 6 medi-molto grandi
S7-3	da 4.00 a 13.00	9.00 (1)	81-86 buona	10 - 9 grandi
S18-1	da 1.20 a 10.00	8.80	70-86 discreta-buona	14 - 9 medi-grandi
S18-2	da 12.00 a 14.80	2.80	56-78 discreta-buona	18-11 medi-grandi
S18-3	da 9.30 a 10.00	0.70	95 eccellente	6 molto grandi
S28-1	da 1.45 a 16.00	14.55 (2)	51-94 discreta-eccellente	19 - 6 medi-molto grandi
S28-3	da 1.40 a 12.20	10.80	53-95 discreta-eccellente	19-6 medi-molto grandi

Note:

- (1) S7-3: comprende un livello discretamente fratturato tra 10.50 e 11.00 m di profondità (RQD = 40%)
- (2) S28-1: comprende un livello discretamente fratturato tra 7.20 e 8.35 m di profondità (RQD = 40%)

12.2.4.3 Aspetti conclusivi

La dettagliata analisi rimarca i seguenti due aspetti fondamentali, destinati a condizionare ed a limitare fortemente la circolazione idrica sotterranea:

- 1) L'esistenza di una intercalazione, nell'ambito del secondo livello granitico molto fratturato, intermedia, spazialmente quasi continua, di granito poco fratturato, ottimamente qualificato dall'Indice RQD, riscontrato nei sondaggi di cui alla seguente tabella.

**TABELLA N.4 – SUBLIVELLO GRANITICO POCO FRATTURATO INTERCALATO
NEL LIVELLO GRANITICO MOLTO FRATTURATO**

SONDAGGIO	PROFONDITA' (m)	SPESSORE (m)	RQD (%) Classificazione Deer	Jv/m³ (fratture/mc) Palmstrom (grandezza blocchi)
S7-1	da 1.00 a 3.45	2.45	83-100 da buona a eccellente	9.4-4.54 da grandi a molto grandi
S7-2	da 3.00 a 4.00	1.00	61 discreta	16.36 medi
S7-3	da 0.60 a 2.00	1.40	82 buona	10 grandi
S18-2	da 3.00 a 4.50 da 9.00 a 11.0	1.50 2.00	64 discreta 77 buona	15.45 medi 11.51 grandi
S18-3	da 7.00 a 8.40	1.40	80 buona	12.12 medi
S28-1	da 1.45 a 5.00	3.55	95-91 eccellente	6.06-7.27 molto grandi

- 2) L'esistenza del livello basale continuo di granito poco fratturato sopra evidenziato, che limita verso il basso la circolazione idrica sotterranea. Nella fattispecie contribuiscono al decremento del coefficiente di permeabilità la pressione litostatica che tende a chiudere le fratture in profondità, il progressivo deposito nelle fratture della frazione fina limoso-argillosa derivante dal disfacimento chimico dei graniti, la cui porosità efficace – si evidenzia – è sempre molto bassa, generalmente dell'ordine dell'1%

L'argomento, qui evidenziato in relazione alle caratteristiche fisiche dell'acquifero, sarà ulteriormente ripreso quando verranno discusse le caratteristiche ed i parametri idrogeologici delle acque circolanti nel sottosuolo.

12.3 Esiti misure di permeabilità in foro Lugeon

12.3.1 Caratteristiche camere di prova

Lungo le verticali di quattro sondaggi sono state condotte altrettante prove di permeabilità in foro con metodologia Lugeon, in discesa, le cui caratteristiche si sintetizzano di seguito nella tabella seguente.

Tabella n.5 – CARATTERISTICHE GEOMETRICHE CAMERA DI PROVA

SONDAGGIO	DIAMETRO CAMERA DI PROVA (m)	LUNGHEZZA CAMERA DI PROVA (m)	PROFONDITA' DAL P.C. (m)
S7-2	0.10	2.00	8.00-10.00
S18-1	0.10	2.00	4.00-6.00
S18-3	0.10	2.00	8.00-10.00
S28-1	0.10	2.00	12.00-14.00

12.1.3.2 Elaborazione coefficiente di permeabilità K e calcolo orientativo del coefficiente di trasmissività T

Si evidenzia che il coefficiente di permeabilità K, espresso in m/s, viene rielaborato, prescegliendo per ciascuna prova il valore U.L. caratteristico in funzione del regime di assorbimento.

ANALISI PROVA S7-2

Dal diagramma Pressione/Portata si evince che il regime del deflusso è avvicinabile al laminare senza modifiche dello stato fessurativo della roccia, a

cui può farsi corrispondere un valore caratteristico di U.L. dato dalla media dei valori dei gradini 1, 2, 4, 5.

Il corrispondente valore caratteristico del coefficiente di permeabilità è $K = 1.08 \cdot 10^{-8}$ m/s, da cui, per questo tratto di prova, si può trarre indicativamente il valore della trasmissività T , da confrontarsi con i risultati delle prove di pompaggio illustrate di seguito, ponendo lo spessore dell'acquifero pari a 10.00 m: $T = 1.08 \cdot 10^{-8} \cdot 10 = 1.08 \cdot 10^{-7}$ m²/s.

ANALISI PROVA S18-1

Dal diagramma Pressione/Portata si evince che il regime del deflusso è di tipo laminare, a cui corrisponde un valore caratteristico di U.L. dato dalla media dei valori dei gradini 1, 2, 4, 5.

Il corrispondente valore caratteristico del coefficiente di permeabilità, per il tratto di prova in oggetto, è il seguente: $K = 2.59 \cdot 10^{-7}$ m/s, da cui, si può trarre indicativamente il valore della trasmissività T , da confrontarsi con i risultati delle prove di pompaggio illustrate di seguito, ponendo lo spessore dell'acquifero pari a 10.00 m: $T = 2.59 \cdot 10^{-7} \cdot 10 = 2.59 \cdot 10^{-6}$ m²/s.

ANALISI PROVA S18-3

Dal diagramma Pressione/Portata si evince che il regime del deflusso è di tipo laminare, con un leggerissimo intasamento delle discontinuità che dà luogo ad una riduzione minimale delle portate assorbite nella fase di ritorno.

Anche in questo caso il valore caratteristico di U.L. è dato dalla media dei valori dei gradini 1, 2, 4, 5.

Il corrispondente valore caratteristico del coefficiente di permeabilità, per il tratto di prova in oggetto, è il seguente: $K = 3.40 \cdot 10^{-7}$ m/s, da cui si può trarre indicativamente il valore della trasmissività T , da confrontarsi da confrontarsi

con i risultati delle prove di pompaggio illustrate di seguito, ponendo lo spessore dell'acquifero pari a 10.00 m: $T = 3.40 \cdot 10^{-7} \cdot 10 = 3.40 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

ANALISI PROVA S28-1

Dal diagramma Pressione/Portata si evince che il regime del deflusso si discosta dal tipo laminare ma è a quest'ultimo assimilabile, con uno svuotamento delle fessure a pressioni più elevate, a cui può farsi corrispondere un valore caratteristico di U.L. dato dalla media dei valori dei gradini 1, 2, 4, 5.

Il corrispondente valore caratteristico del coefficiente di permeabilità, per il tratto di prova, è il seguente: $K = 2.49 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$, da cui si può trarre indicativamente il valore della trasmissività T , da confrontarsi con i risultati delle prove di pompaggio illustrate di seguito, ponendo lo spessore dell'acquifero pari a 10.00 m: $T = 2.49 \cdot 10^{-8} \cdot 10 = 2.49 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

I coefficienti di permeabilità come sopra rielaborati ed i relativi valori di trasmissività come sopra valutati vengono correlati con l'Indice RQD proprio dei tratti di prova per testare la validità complessiva dei parametri sperimentali, esponendoli nella seguente tabella.

Tabella n.6 – CORRELAZIONI RQD-U.L.-K-T

SONDAGGIO	PROFONDITA' Camera di prova (m)	RQD Camera di prova (%)	U.L. Caratteristica media gradini 1,2,4,5 (l/min/m)	K Caratteristica media gradini 1,2,4,5 (m/s)	T	
					(m ² /s)	Classe (Krasny)
S7-2	8.00-10.00	88-52	0.11	$1.08 \cdot 10^{-8}$	$1.08 \cdot 10^{-7}$	VII non valutab.
S18-1	4.00-6.00	84-72	2.64	$2.59 \cdot 10^{-7}$	$2.59 \cdot 10^{-6}$	VI molto basso
S18-3	8.00-10.00	25-62	3.20	$3.14 \cdot 10^{-7}$	$3.14 \cdot 10^{-6}$	VI molto basso
S28-1	12.00-14.00	57-87	0.25	$2.49 \cdot 10^{-8}$	$2.49 \cdot 10^{-7}$	VII non valutab.

12.3.3 Discussione

Si osserva preliminarmente che le caratteristiche idrodinamiche nella fase di assorbimento sono tali da dar luogo ad un flusso in regime pressoché laminare, privo perciò di perdite di carico, consentendo di ottenere valori significativi del coefficiente di permeabilità K , calcolato proprio in relazione al rilevato regime di deflusso, sulla media di quattro gradini, precisamente i nn. 1, 2, 4, 5.

Poco rilevanti, in tutti i casi, i trasporti di materiali fini nelle fratture anche alle pressioni più elevate, comunque senza effetti significativi sulla determinazione del coefficiente di permeabilità K .

In tre casi (S7-2, S18-1, S28-1) sono state registrate lievissime asportazioni di materiale fine nella fase di andata e connesso lievissimo incremento delle portate in fase di ritorno; in un solo caso (S18-3) si è verificato un leggerissimo intasamento nella fase di andata con un lieve calo delle portate nella fase di ritorno.

I valori dei coefficienti di permeabilità sono in linea con il quadro fessurativo dell'ammasso roccioso in esame, essendo i valori caratteristici compresi tra un minimo di $1.08 \div 2.49 \cdot 10^{-8}$ m/s ed un massimo di $2.59 \div 3.14 \cdot 10^{-7}$ m/s ; mentre nel corso di alcuni gradini di prova sono stati raggiunti minimi pari a $9.60 \cdot 10^{-9}$ m/s.

Il “grado di permeabilità” ottenuto dalle illustrate misure in foro, secondo le correnti classificazioni, è da ritenersi “molto basso”, essendo compreso nel *range* $10^{-7} \div 10^{-8}$ m/s.

Il dato sopra espresso trova un'eccellente correlazione sia con i valori orientativi della trasmissività, ***collocabili nelle ultime due classi, la VI e la VII, della classificazione Krasny, relativa alla potenzialità di utilizzo degli acquiferi, ritenuta rispettivamente “molto bassa” o addirittura “non valutabile”***, sia con il valore sperimentale dell'Indice RQD rilevato nelle camere di prova, entrambi esposti nella tabella n.6.

Si osserva, infine, che le camere di prova dei sondaggi S7-2, S18-1, S28-1 ricadono nel livello del granito ben classificato nei confronti dell'Indice RQD, facendo registrare bassi valori del coefficiente di permeabilità, mentre la camera di prova del sondaggio S18-3, comprendente roccia granitica con due diversi gradi di fratturazione, da molto a poco fratturato, ha dato luogo a valori del coefficiente di permeabilità più alti tra tutte le prove eseguite.

12.4 Esiti prove di punzonamento PLT

12.4.1 Risultati e correlazione con indice RQD

Si espongono e si interpretano di seguito i risultati delle prove di resistenza al punzonamento *Point Load Test* condotte su n.8 campioni di roccia, ciascuno composto da n.3 provini.

Le prove eseguite sono esposte nella seguente tabella, comprendente i risultati delle prove e relative correlazioni con l'indice RQD.

E' stato adottato un fattore di conversione $K = 18$.

Tabella n.7 – RISULTATI PROVE PLT E CORRELAZIONE CON INDICE RQD

SONDAGGIO	PROFONDITA' PRELIEVO CAMPIONE (m)	PESO VOLUME (g/cm ³) (1)	RESISTENZA PUNZONAMENTO Is (50)		RESISTENZA A COMPRESSIONE σ_c		INDICE RQD (%)
			(MPA)	(Kg/cm ²)	(MPA)	(Kg/cm ²)	
S7-3	5.00-6.00	2562.00	3.01	30.69	54.24	553.14	70
S7-3	10.00-11.00	2509.00	1.03	10.50	18.60	189.67	38
S7-3	11.00-12.00	2471.70	1.42	14.48	25.48	259.87	56
S18-3	4.00-5.00	2676.70	0.30	3.06	5.42	55.22	20
S18-3	5.00-6.00	2766.30	0.35	3.57	6.33	64.59	58
S18-3	9.00-10.00	2550.30	2.24	22.84	40.31	410.99	62
S28-2	4.00-5.00	2736.00	1.52	15.50	27.47	279.87	32
S28-2	9.00-10.00	2575.00	2.22	22.64	40.04	408.25	78

Note: (1) Media su n.3 provini

12.4.2 Discussione

Dalla Tabella n.7 è possibile ricavare i seguenti dati:

- **PESO VOLUME**

Peso volume minimo, $P_{\min} = 2.47 \text{ t/m}^3$

Peso volume massimo, $P_{\min} = 2.77 \text{ t/m}^3$

Peso volume medio, $P_{\min} = 2.61 \text{ t/m}^3$

- **RESISTENZA A COMPRESSIONE**

Sono stati ottenuti valori dispersi in un ampio campo; il valore minimo, infatti, è pari a $\sigma_c = 55.42 \text{ Kg/cm}^2$ mentre il valore massimo è pari a $\sigma_c = 553.4 \text{ kg/cm}^2$.

Sono stati riscontrati due valori minimi, entrambi attinenti al sondaggio S18-3, come di seguito indicato:

SONDAGGIO	PROFONDITA' (m)	σ_c (Kg/cm ²)	RQD (%)
S18-3	4.00-5.00	55.22	20
S18-3	5.00-6.00	64.59	58

I valori di RQD denunciano, nel primo caso, l'elevata frammentazione della roccia mentre, nel secondo caso, è l'esame della documentazione fotografica ad evidenziare, anche nei tratti integri, la notevole frequenza di piani di discontinuità.

Si evidenzia, altresì, che la roccia compresa nell'intervallo 1.00 – 7.00 m di profondità si presenta allo stato quasi detritico perché prossima ad un “punto di scoppio” durante le fasi di abbattimento della roccia e spianamento del sito (v. par. 12.1.4.1) ed è stata perciò ricompresa nel livello granitico definito “molto fratturato” (v. Tab. n.2).

In linea generale, l'elevata frequenza dei punti di scoppio nell'area – testimoniata sul campo dai residui fori da mina ubicati ad un interasse di circa

5.00 m – ha determinato, oltre che la frantumazione della massa rocciosa nelle aree prossime alle cariche esplosive anche la creazione di microlesioni nelle aree più distanti, causa della notevole riduzione delle resistenze meccaniche della roccia.

Non è possibile, pertanto, correlare la resistenza a compressione monoassiale σ_c con le profondità dei campioni testati oppure con i valori di RQD, risultando i valori originari di σ_c , quelli cioè propri dell'ammasso roccioso, largamente compromessi dalle operazioni di abbattimento della roccia con l'uso di esplosivo.

Infatti, in tutte le prove di laboratorio esperite, σ_c resta al di sotto delle medie esposte in letteratura per la roccia in esame, come, ad esempio, riportato in Vallario (1987), che pone $\sigma_{c \text{ medio}} = 178 \text{ MPa}$, con valori più frequenti compresi nel *range* $82 \text{ MPa} < \sigma_c < 139 \text{ MPa}$.

Pertanto, il valore rappresentativo di σ_c per l'area in oggetto può essere ottenuto dalla media dei valori delle prove di laboratorio, escludendo però dal calcolo il valore massimo e i due valori minimi, per cui si ha:

$$\sigma_c = (18.60 + 25.48 + 40.31 + 27.47 + 40.04)/5 = 30.38 \text{ MPa} \quad (309.80 \text{ kg/cm}^2)$$

Restano, invece, nella norme i valori misurati del peso volume pari a $P_v = 2.61 \text{ t/m}^3$, che rientrano tra i valori medi riportati in letteratura dati da $P_v = 2.55 \text{ } 2.90 \text{ t/m}^3$.

12.5 Esiti prove indagini geofisiche

12.5.1 Tipologia di indagine

Sono state eseguite nell'area due esplorazioni geofisiche di superficie, di cui la prima, condotta con metodologia elettro-tomografica bidimensionale con misura della resistività e dispositivo multielettrodo Polo-Dipolo, finalizzata alla ricognizione del profilo stratigrafico e dell'assetto idrogeologico dell'area, la seconda, condotta con metodologia sismica MASW, finalizzata all'ottenimento

di profili verticali di velocità delle onde S_v e alla definizione del parametro V_{s30} secondo le norme di cui alle NTC-2008.

12.5.2 Indagine elettrotomografica 2D

Per la descrizione della strumentazione usata e della metodologia di indagine si rimanda al fascicolo delle prove in allegato al progetto.

Di seguito, invece, si procede alla interpretazione del profilo elettrotomografico di seguito riproposto (Fig. n. 12).

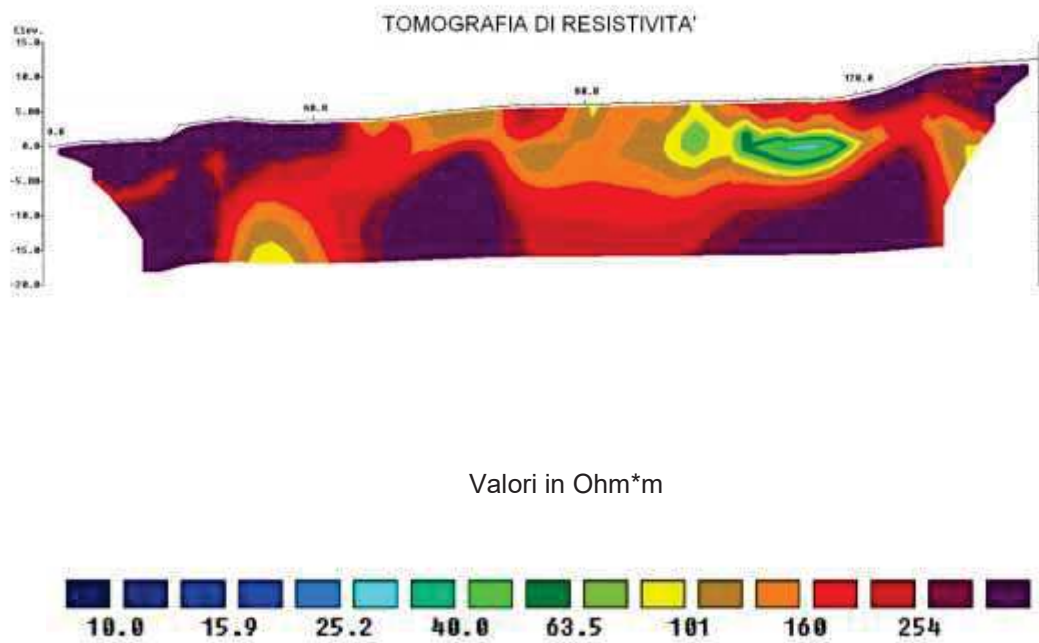


Fig. 12 – Tomografia di resistività

Si rileva, innanzi tutto, come il profilo elettrotomografico sia concordante con le caratteristiche litostratigrafiche e idrogeologiche illustrate in precedenza.

L'esame in dettaglio evidenzia un aspetto fondamentale caratterizzante il sito: la presenza di una "sacca" tra le progressive 44 e 120, profonda mediamente $10 \div 12$ metri, nella quale i valori della resistività risultano essere di gran lunga inferiori rispetto a quelli registrati all'intorno.

Nell'ambito della "sacca" i valori di resistività decrescono procedendo verso il basso e risultano compresi tra i 40 ed i 100 Ohm.m; questi valori ammettono la presenza di una modesta circolazione idrica sotterranea.

All'esterno della "sacca", la resistività assume valori immediatamente e notevolmente più alti, raggiungendo e superando i 300 Ohm.m, tipici della roccia massiva caratterizzata da bassissima permeabilità.

12.5.3 Discussione

Le caratteristiche principali del profilo elettrotomografico sopra illustrato denunciano in maniera evidente gli effetti causati dal brillamento delle cariche esplosive sull'ammasso roccioso locale.

La "sacca" evidenziata dal contrasto di resistività ne è l'effetto più appariscente ed importante, in quanto:

- a) delimita il volume interessato dalle sollecitazioni meccaniche indotte dalle esplosioni;
- b) consente di individuare il processo di base che ha dato luogo ad una apparente contrastante differenziazione da sito a sito, anche adiacenti, dei parametri concernenti la permeabilità, lo stato di fratturazione e la resistenza al taglio dell'ammasso roccioso.

Mentre il primo punto non necessita di ulteriori chiarimenti, si ritorna al secondo punto per evidenziare che il brillamento delle cariche giustifica lo sgretolamento della roccia, ridotta al rango di "detrito", in prossimità dei punti di

scoppio, come è stato rilevato nel corso del già prospettato esame delle “carote”, dando luogo all’azzeramento dei valori di RQD e ad un notevole incremento della permeabilità.

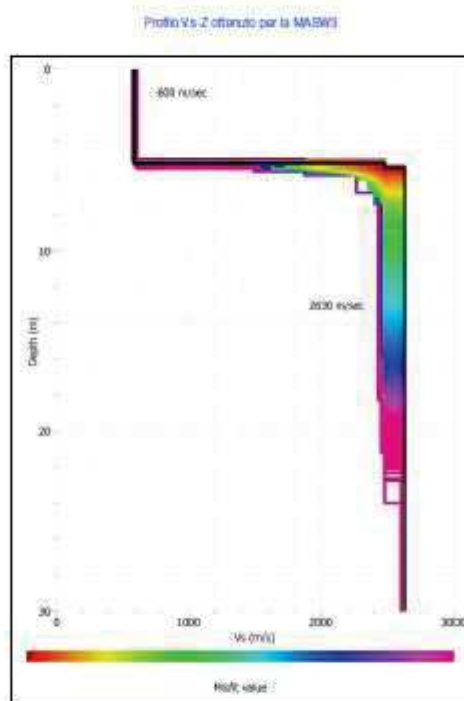
A distanza dai punti di scoppio gli effetti sono diversi, in quanto allo “sgretolamento” della roccia si sostituisce la “microfratturazione” della stessa, la quale non ha alcuna influenza sul coefficiente di permeabilità, i cui valori restano comunque molto bassi, influisce solo marginalmente sull’indice RQD, ma riduce, invece, radicalmente le resistenze meccaniche della roccia, come rilevano gli esiti delle prove meccaniche PLT illustrate in precedenza.

12.5.4 Indagine sismica MASW

L’indagine sismica condotta con metodologia MASW, oltre che completare il quadro conoscitivo di cui si è detto sopra, consente di dare risposta al dettato delle NTC-2008 ; l’esame del profilo V_s -Profondità, cioè della distribuzione della velocità delle onde S con la profondità (riportato nella fig. n.13), evidenzia la presenza di due sismo-strati:

- il primo è caratterizzato da una moderata velocità delle onde S fino a circa 6.00 m di profondità rispetto al piano di campagna, con valori di 600 m/sec, tipici di roccia granitica moderatamente alterata;
- il secondo sismo-strato è caratterizzato da un marcato aumento delle V_s pari a 2630 m/sec, da 6.00 m di profondità fino a 30.00 m dal piano di campagna.

Committente: Sigeco Srl - Nuoro	INDAGINI GEOFISICHE DEI TERRENI INDIVIDUATI PER LA REALIZZAZIONE DI NUOVI IMPIANTI CONSORTILI	Rapporto n. 2093/13 Pag. 25 / 27
------------------------------------	---	-------------------------------------



Data: Novembre 2015	Relazione geofisica	Approvato: gfc	Rev. (0)
MD 08 01 rapporto ISC9001 - rev.03			

Fig. 13 – Profilo MASW – Diagramma Vs-Profondità

Ai sensi delle NTC-2008, il terreno di fondazione dell'opera in progetto resta classificato in categoria A, risultando $VS_{30} = 1680$ m/sec.

12.5.5 Discussione

L'aspetto saliente che occorre evidenziare, a margine dei sopra esaminati profili MASW ed elettrotomografico, è la perfetta concordanza nella individuazione dello spessore della massa granitica alterata, che risulta compreso entro 6.00 m dal p.c. attuale, ma che altrove raggiunge circa 10.00 ÷ 12.00 m dal piano di campagna.

12.6 Prove di emungimento

12.6.1 Individuazione pozzi – Condizioni meteo – Tipologia prove

Sui pozzi-piezometri attrezzati per prove di emungimento S7-1, S18-1, S18-3 sono state condotte a più riprese nel tempo, precisamente il 07/03/2016 ed il 14/03/2016, prove preliminari finalizzate a testare le potenzialità dell'acquifero; in data 31/03/2016 e in data 01/04/2016, sul solo pozzo-piezometro S7-1 sono state eseguite prove definitive finalizzate all'ottenimento dei principali parametri idraulici.

Si precisa che le prove sono state condotte su pozzi-piezometri singoli in quanto privi di piezometri di controllo.

E' importante evidenziare che dette prove sono state condotte nel periodo di tempo immediatamente successivo al massimo apporto stagionale idrometeorico, con notevoli ed immediate influenze sul regime della circolazione idrica sotterranea.

Si elaborano di seguito le prove di emungimento che meglio si adattano alle caratteristiche idrogeologiche dell'area in esame e che vengono di seguito individuate:

Pozzo-piezometro S7-1	Prova a portata costante in discesa e in risalita del 14/03/2016
Pozzo-piezometro S18-1	Prova a portata costante in discesa e in risalita del 14/03/2016
Pozzo-piezometro S18-3	Prova a portata costante in discesa e in risalita del 15/03/2016
Pozzo S7-1	Prova a portata costante in discesa e in risalita del 01/04/2016
Pozzo S7-1	Prova a gradini in discesa e in risalita del 31/03/2016

12.6.2 Elaborazione prove a portata costante in discesa e in risalita

Si espongono innanzitutto le caratteristiche dell'acquifero in esplorazione:

- acquifero libero;
- spessore del saturo, $s = 10.00$ m;
- pozzo completo;
- prove condotte su pozzo singolo;
- prove a portata costante in regime transitorio.

In queste condizioni è possibile far ricorso alla approssimazione logaritmica della formula di Theis come sviluppata da Cooper-Jacob, utilizzando un unico ciclo di emungimento per ottenere il valore della trasmissività T direttamente dal pozzo di prova, senza usare piezometri di controllo (poiché nel nostro caso sono indisponibili).

Partendo dalla relazione Cooper-Jacob, secondo cui:

$$\Delta = (0.183 Q/T) \log (2.25 Tt/r^2S)$$

Ponendo:

$$\Delta' = \Delta - \Delta_R$$

in cui:

$$\Delta = (0.183 Q/T) \log (2.25 Tt/r^2S)$$

$$\Delta_R = (0.183 Q/T) \log (2.25 Tt_r/r^2S)$$

si ha:

$$\Delta' = (0.183 Q/T) \log (t/t_R)$$

e risolvendo in T si ha:

$$T = (0.183Q \cdot \log(t/t_R)/\Delta'$$

in cui:

T = trasmissività (m²/sec)

Q = portata a pompaggio costante (m³/sec)

t = durata del ciclo discesa –risalita (sec)

t_R = durata del ciclo di risalita (sec)

Δ = abbassamento in discesa (m)

Δ_R = dislivello guadagnato in risalita (m)

Δ' = dislivello residuo in risalita (m)

Ciò premesso, si passa al calcolo della trasmissività T per ciascun pozzo-piezometro.

12.6.2.1 Pozzo-Piezometro S7-1 - Prova del 14/03/2016 a portata costante

Le tabelle n.8 e n.9 di seguito allegate riportano i dati sperimentali di prova e i diagrammi semilogaritmici tempi-abbassamenti e tempi-risalita, dai quali vengono estratti i dati necessari per le successive elaborazioni.

Tabella n.8 – Prova di emungimento a portata costante in discesa

POZZO S7-1	Lunghezza 10 m	Diametro 152,44 mm	Prof.pompa 7,71 m	Quota boccaforo dal P.C. 35,0 cm
Prova in discesa	Data inizio prova 14-mar-16		Lettura iniziale 2,020	
	Ora inizio prova 12:18		Portata l/m 5,40	
Frequenza	Secondi	Minuti	Ore	Letture in m
da 0 a 5 minuti ogni 30 secondi (letture 10)	30	0,5		2,040
	60	1		2,045
	90	1,5		2,050
	120	2		2,060
	150	2,5		2,065
	180	3		2,075
	210	3,5		2,080
	240	4		2,090
	270	4,5		2,100
da 5 a 10 minuti ogni 1 minuto (letture 5)	300	5		2,110
	6			2,130
	7			2,150
	8			2,190
	9			2,205
da 10 a 20 minuti ogni 5 minuti (letture 2)	10			2,230
	15			2,430
	20			2,825
da 20 a 60 minuti ogni 10 minuti (letture 4)	30			3,730
	40			4,420
	50			5,270
	60	1		6,240
da 60 a 120 minuti ogni 20 minuti (letture 3)	65			6,700
	70			7,340
	71	2		7,450
da 120 a 180 minuti ogni 30 minuti (letture 2)	72			7,595
	73	3		7,740

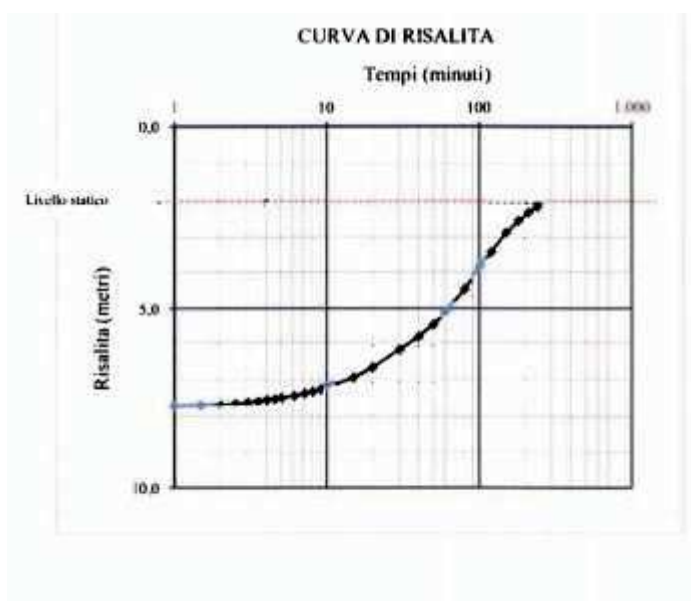
Letture al boccaforo



Tabella n.9 – Prova di emungimento a portata costante in risalita

POZZO S7-1	Lunghezza 10 m	Diametro 152,44 mm	Prof.pompa 7,71 m	Quota boccaforo dal P.C. 35,0 cm
Prova in risalita				
	Ora inizio prova		Lettura iniziale	
	13:32		7,740	
Frequenza	Secondi	Minuti	Ore	Letture in m
da 0 a 5 minuti ogni 30 secondi (letture 10)	30	0,5		7,730
	60	1		7,710
	90	1,5		7,685
	120	2		7,650
	150	2,5		7,610
	180	3		7,575
	210	3,5		7,540
	240	4		7,500
	270	4,5		7,470
da 5 a 10 minuti ogni 1 minuto (letture 5)	300	5		7,440
		6		7,385
		7		7,320
		8		7,270
		9		7,210
da 10 a 20 minuti ogni 5 minuti (letture 2)		10		7,150
		15		6,880
		20		6,610
da 20 a 60 minuti ogni 10 minuti (letture 4)		30		6,120
		40		5,750
		50		5,420
		60	1	5,090
da 60 a 120 minuti ogni 20 minuti (letture 3)		80		4,420
		100		3,850
		120	2	3,400
da 120 a 180 minuti ogni 30 minuti (letture 2)		150		2,860
		180	3	2,540
da 180 a 240 minuti ogni 30 minuti (letture 2)		210		2,310
		240	4	2,150
Letture risalita alle 24 ore		1440	24	2,04

Letture al boccaforo



Ponendo pertanto:

$$Q = 5.40 \text{ l/m} = 0.00009 \text{ m}^3/\text{sec} = 7.78 \text{ m}^3/\text{die}$$

$$t = 146 \text{ min}$$

$$t_R = 73 \text{ min}$$

$$\Delta_R = 2.73 \text{ m}$$

dalla relazione Jacob-Cooper sopra richiamata si ha:

$$T = (0.183 Q \log t/t_R)/\Delta_R = 0.16 \text{ m}^2/\text{die} = 1.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$$

12.6.2.2 Piezometro S18-1 - Prova del 14/03/2016 a portata costante

Le tabelle n.10 e n.11 di seguito allegate riportano i dati sperimentali di prova e i diagrammi semilogaritmici tempi-abbassamenti e tempi-risalita, dai quali vengono estratti i dati necessari per le successive elaborazioni.

Ponendo pertanto:

$$Q = 5.00 \text{ l/m} = 0.000083 \text{ m}^3/\text{sec} = 7.2 \text{ m}^3/\text{die}$$

$$t = 48 \text{ min}$$

$$t_R = 24 \text{ min}$$

$$\Delta_R = 6.47 \text{ m}$$

dalla relazione Jacob-Cooper sopra richiamata si ha:

$$T = (0.183 Q \log t/t_R)/\Delta_R = 0.06 \text{ m}^2/\text{die} = 0.7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$$

Tabella n.10 – Prova di emungimento a portata costante in discesa

POZZO S18-1		Lunghezza 10 m	Diametro 152,44 mm	Prof.pompa 8,50 m	Quota boccaforo dal P.C. 35,0 cm
Prova in discesa		Data inizio prova		Lettura iniziale	
		14-mar-16		1,500	
		Ora inizio prova		Portata l/m	
		10:47		5,00	
Frequenza	Secondi	Minuti	Ore	Lecture in m	
da 0 a 5 minuti ogni 30 secondi (letture 10)	30	0,5		1,600	
	60	1		1,970	
	90	1,5		2,110	
	120	2		2,350	
	150	2,5		2,590	
	180	3		2,810	
	210	3,5		3,070	
	240	4		3,300	
	270	4,5		3,550	
	300	5		3,770	
da 5 a 10 minuti ogni 1 minuto (letture 5)	6			4,255	
	7			4,625	
	8			4,925	
	9			5,140	
	10			5,395	
da 10 a 20 minuti ogni 5 minuti (letture 2)	15			6,570	
	20			7,750	
	24			8,490	
da 20 a 60 minuti ogni 10 minuti (letture 4)	40				
	50				
	60	1			
	80				
da 60 a 120 minuti ogni 20 minuti (letture 3)	100				
	120	2			
	150				
da 120 a 180 minuti ogni 30 minuti (letture 2)	180	3			

Lecture al boccaforo

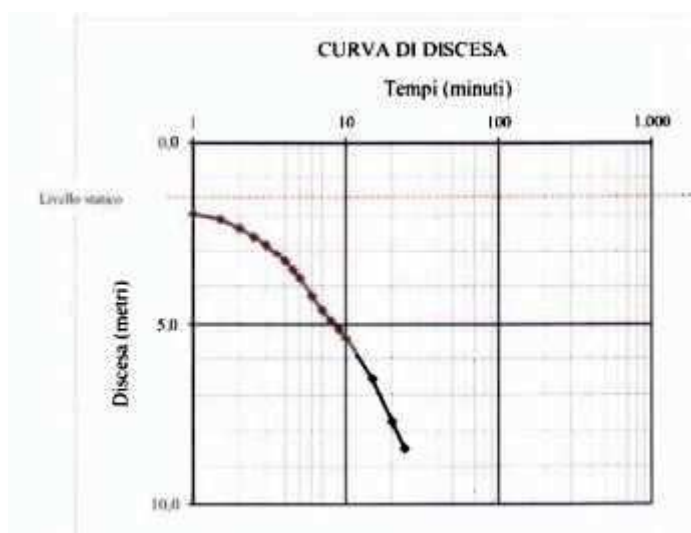


Tabella n.11 – Prova di emungimento a portata costante in risalita

POZZO S18-1	Lunghezza 10 m	Diametro 152,44 mm	Prof.pompa 8,50 m	Quota boccafaro dal P.C. 35,0 cm
Prova in risalita				
Ora inizio prova		Letture iniziali		
11,08		8,490		
Frequenza	Secondi	Minuti	Ore	Letture in m
da 0 a 5 minuti ogni 30 secondi (letture 10)	30	0,5		8,480
	60	1		8,470
	90	1,5		8,460
	120	2		8,450
	150	2,5		8,435
	180	3		8,410
	210	3,5		8,390
	240	4		8,375
	270	4,5		8,360
da 5 a 10 minuti ogni 1 minuto (letture 5)	300	5		8,345
		6		8,330
		7		8,310
		8		8,290
		9		8,260
da 10 a 20 minuti ogni 5 minuti (letture 2)		10		8,240
		15		8,140
		20		8,050
da 20 a 60 minuti ogni 10 minuti (letture 4)		30		7,900
		40		7,740
		50		7,585
		60	1	7,435
da 60 a 120 minuti ogni 20 minuti (letture 3)		80		7,140
		100		6,850
		120	2	6,570
da 120 a 180 minuti ogni 30 minuti (letture 2)		150		6,185
		180	3	5,825
da 180 a 240 minuti ogni 30 minuti (letture 2)		210		5,480
		240	4	5,160
Letture risalita alle 24 ore		1440	24	1,64

Letture al boccafaro



12.6.2.3 Piezometro S18-3 - Prova del 15/03/2016 a portata costante

Le tabelle n.12 e n.13 di seguito allegate riportano i dati sperimentali di prova e i diagrammi semilogaritmici tempi-abbassamenti e tempi-risalita, dai quali vengono estratti i dati necessari per le successive elaborazioni.

Ponendo pertanto:

$$Q = 4.00 \text{ l/m} = 0.000067 \text{ m}^3/\text{sec} = 5.76 \text{ m}^3/\text{die}$$

$$t = 66 \text{ min}$$

$$t_R = 33 \text{ min}$$

$$\Delta_R = 4.01 \text{ m}$$

dalla relazione Jacob-Cooper sopra richiamata si ha:

$$T = (0.183 Q \log t/t_R) / \Delta_R = 0.08 \text{ m}^2/\text{die} = 0.9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$$

Tabella n.12 – Prova di emungimento a portata costante in discesa

POZZO S18-3		Lunghezza	10 m	Diametro	152,44 mm	Prof.pompa	7,20 m	Quota boccaforo dal P.C.	29,0 cm
Prova in discesa		Data inizio prova			Letture iniziali				
		15-mar-16			2,010				
		Ora inizio prova			Portata l/m				
		09:01			4,00				
Frequenza	Secondi	Minuti	Ore	Letture in m					
da 0 a 5 minuti ogni 30 secondi (letture 10)	30	0,5		2,150					
	60	1		2,195					
	90	1,5		2,300					
	120	2		2,385					
	150	2,5		2,490					
	180	3		2,580					
	210	3,5		2,660					
	240	4		2,760					
	270	4,5		2,845					
	300	5		2,930					
da 5 a 10 minuti ogni 1 minuto (letture 5)	6			3,100					
	7			3,270					
	8			3,440					
	9			3,600					
	10			3,740					
da 10 a 20 minuti ogni 5 minuti (letture 2)	15			4,520					
	20			5,395					
da 20 a 60 minuti ogni 10 minuti (letture 4)	30			6,715					
	33			7,200					
	50								
	60	1							
da 60 a 120 minuti ogni 20 minuti (letture 3)	80								
	100								
	120	2							
da 120 a 180 minuti ogni 30 minuti (letture 2)	150								
	180	3							

Letture al boccaforo

Letture al boccaforo

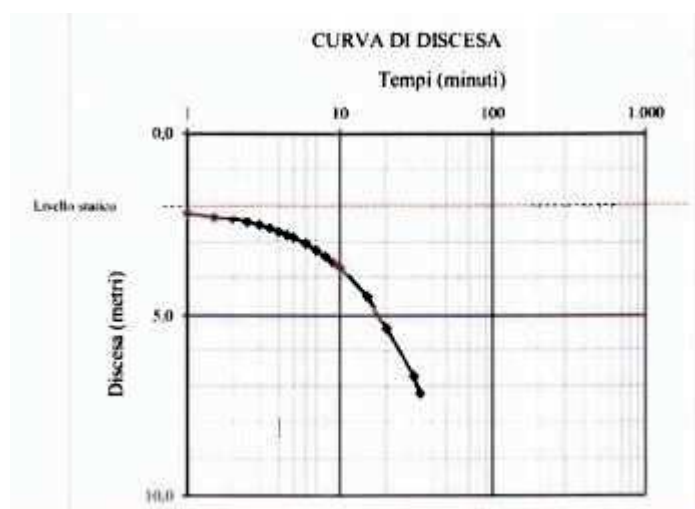
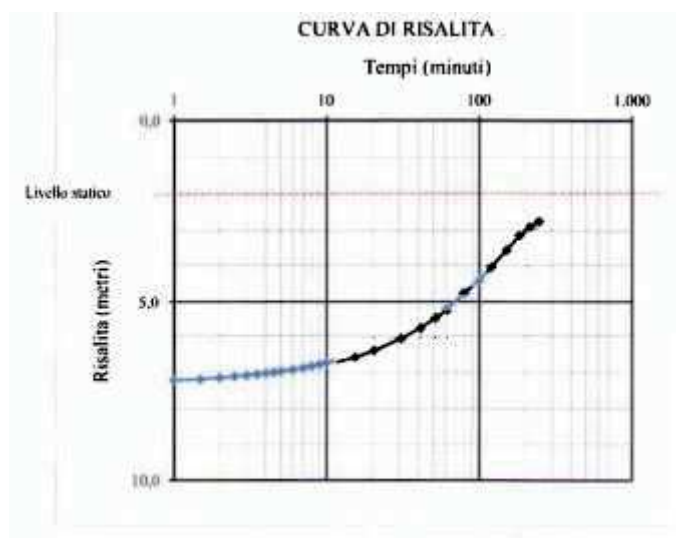


Tabella n.13 – Prova di emungimento a portata costante in risalita

POZZO S18-3		Lunghezza 10 m	Diametro 152,44 mm	Prof.pompa 7,20 m	Quota boccaforo dal P.C. 29,0 cm
Prova in risalita		Ora inizio prova 09:34		Lettura iniziale 7,300	
Frequenza	Secondi	Minuti	Ore	Lecture in m	
da 0 a 5 minuti ogni 30 secondi (letture 10)	30	0,5		7,230	
	60	1		7,210	
	90	1,5		7,180	
	120	2		7,140	
	150	2,5		7,110	
	180	3		7,080	
	210	3,5		7,050	
	240	4		7,020	
	270	4,5		6,995	
da > 10 minuti ogni 1 minuto (letture 5)	300	5		6,970	
		6		6,920	
		7		6,880	
		8		6,830	
		9		6,785	
da 10 a 20 minuti ogni 5 minuti (letture 2)		10		6,740	
		15		6,540	
da 20 a 60 minuti ogni 10 minuti (letture 4)		20		6,350	
		30		6,020	
		40		5,735	
		50		5,460	
da 60 a 120 minuti ogni 20 minuti (letture 3)		60	1	5,230	
		80		4,770	
		100		4,400	
da 120 a 180 minuti ogni 30 minuti (letture 2)		120	2	4,035	
		150		3,555	
da 180 a 240 minuti ogni 30 minuti (letture 2)		180	3	3,170	
		210		2,940	
		240	4	2,780	
Lettura risalita alle 24 ore		1440	24	1,29	

Lecture al boccaforo



12.6.2.4 Piezometro S7-1 - Prova del 01/04/2016 a portata costante

Le tabelle n.14 e n.15 di seguito allegate riportano i dati sperimentali di prova e i diagrammi semilogaritmici tempi-abbassamenti e tempi-risalita, dai quali vengono estratti i dati necessari per le successive elaborazioni.

Ponendo pertanto:

$$Q = 0.9 \text{ l/m} = 0.000015 \text{ m}^3/\text{sec} = 1.29 \text{ m}^3/\text{die}$$

$$t = 360 \text{ min}$$

$$t_R = 180 \text{ min}$$

$$\Delta_R = 0.18 \text{ m}$$

dalla relazione Jacob-Cooper sopra richiamata si ha:

$$T = (0.183 Q \log t/t_R) / \Delta_R = 1.31 \text{ m}^2/\text{die} = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$$

Tabella n.14 – Prova di emungimento a portata costante in discesa

POZZO S7-1

Lunghezza

10 m

Diametro

152,44 mm

Prof.pompa

8,00 m

Quota boccaforo dal P.C.

35,0 cm

Prova in discesa

Data inizio prova

1-apr-16

Letture iniziali

2,260

Ora inizio prova

08:30

Portata l/m

0,90

Frequenza	Secondi	Minuti	Ore	Letture in m
da 0 a 5 minuti ogni 30 secondi (letture 10)	30	0,5		2,270
	60	1		2,275
	90	1,5		2,280
	120	2		2,285
	150	2,5		2,290
	180	3		2,295
	210	3,5		2,300
	240	4		2,310
	270	4,5		2,315
da 5 a 10 minuti ogni 1 minuto (letture 5)	300	5		2,320
		6		2,330
		7		2,350
		8		2,370
		9		2,385
da 10 a 20 minuti ogni 5 minuti (letture 2)		10		2,405
		15		2,500
da 20 a 60 minuti ogni 10 minuti (letture 4)		20		2,580
		30		2,720
		40		2,820
		50		2,915
da 60 a 120 minuti ogni 20 minuti (letture 3)		60	1	3,010
		80		3,160
		100		3,310
da 120 a 180 minuti ogni 30 minuti (letture 2)		120	2	3,430
		150		3,570
	180	3	3,715	

Letture al boccaforo

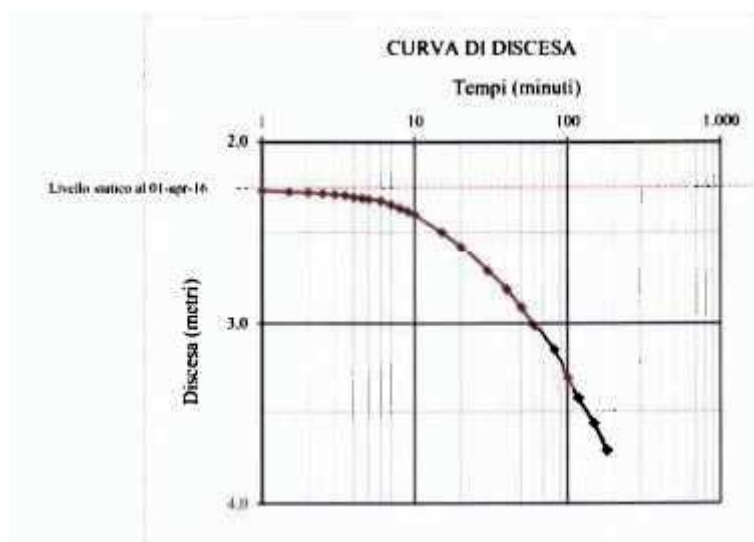
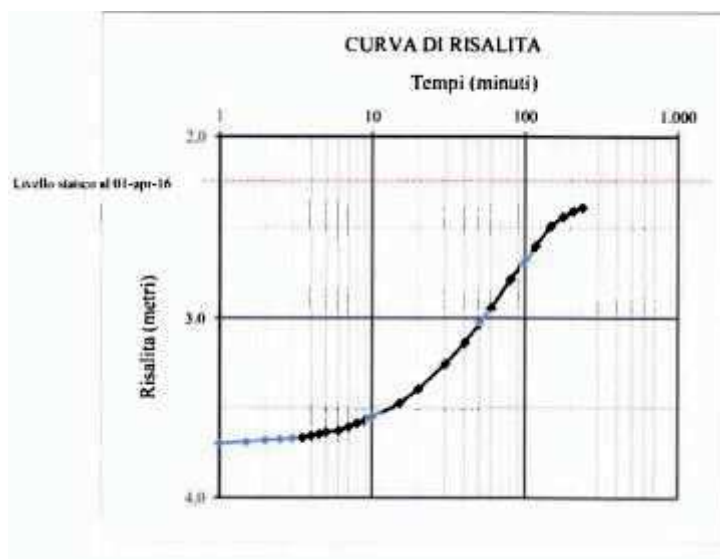


Tabella n.15 – Prova di emungimento a portata costante in risalita

POZZO S7-1		Lunghezza 10 m	Diametro 152,44 mm	Prof.pompa 8,00 m	Quota boccaforo dal P.C. 35,0 cm
Prova in risalita		Ora inizio prova 11:30		Lettura iniziale 3,710	
Frequenza	Secondi	Minuti	Ore	Letture in m	
da 0 a 5 minuti ogni 30 secondi (letture 10)	30	0,5		3,705	
	60	1		3,700	
	90	1,5		3,690	
	120	2		3,680	
	150	2,5		3,675	
	180	3		3,670	
	210	3,5		3,660	
	240	4		3,650	
	270	4,5		3,640	
	300	5		3,630	
da 5 a 10 minuti ogni 1 minuto (letture 5)	6			3,620	
	7			3,600	
	8			3,580	
	9			3,565	
	10			3,550	
da 10 a 20 minuti ogni 5 minuti (letture 2)	15			3,470	
	20			3,390	
da 20 a 60 minuti ogni 10 minuti (letture 4)	30			3,250	
	40			3,135	
	50			3,030	
	60	1		2,945	
da 60 a 120 minuti ogni 20 minuti (letture 3)	80			2,790	
	100			2,680	
	120	2		2,595	
da 120 a 180 minuti ogni 30 minuti (letture 2)	150			2,490	
	180	3		2,440	
da 180 a 240 minuti ogni 30 minuti (letture 2)	210			2,410	
	240	4		2,390	

Letture al boccaforo



12.6.3 Elaborazione prova a gradini in discesa ed in risalita – Qualificazione acquifero - Ricerca della portata critica (Qc) e della trasmissività (T)

La prova a gradini in discesa ed in risalita viene utilizzata per la individuazione della portata critica (Qc) e della trasmissività (T), utilizzando le notazioni già adottate nei precedenti paragrafi.

Le tabelle nn. 16, 17, 18 e 19 , tratte dal fascicolo delle prove eseguite dalla Soil-Tech e di seguito allegate, riportano i dati sperimentali di prova ed i diagrammi semilogaritmici tempi-abbassamenti e tempi-risalita, dai quali vengono estratti i dati utilizzati per le successive elaborazioni; la tab. n.20 riporta, invece, i dati sperimentali di prova ed il diagramma abbassamenti-portata per la elaborazione della **curva caratteristica**.

Tabella n.16 – Prova di emungimento a gradini in discesa

POZZO S7-1

Lunghezza

10 m

Diametro

152,44 mm

Prof.pompa

8,00 m

Quota boccaforo dal P.C.

35,0 cm

Prova in discesa

Gradino

1

Data inizio prova

31-mar-16

Portata Q l/m

0,6

Ora inizio prova

09:03:00

Lettura iniziale m.

2,160

Frequenza	Secondi	Minuti	Ore	Ora	Letture in m
da 0 a 5 minuti ogni 30 secondi (letture 10)	30	0,5			2,165
	60	1			2,165
	90	1,5			2,170
	120	2			2,170
	150	2,5			2,175
	180	3			2,175
	210	3,5			2,180
	240	4			2,180
	270	4,5			2,185
da 5 a 10 minuti ogni 1 minuto (letture 5)	300	5			2,185
		6			2,190
		7			2,195
		8			2,200
		9			2,205
da 10 a 20 minuti ogni 5 minuti (letture 2)		10			2,210
		15			2,225
da 20 a 60 minuti ogni 10 minuti (letture 4)		20			2,245
		30			2,270
		40			2,305
		50			2,340
da 60 a 120 minuti ogni 20 minuti (letture 3)		60	1	10:03	2,370
		80			2,460
		100			2,525
		120	2	11:03	2,565

Letture al boccaforo

Lecture al boccaforo

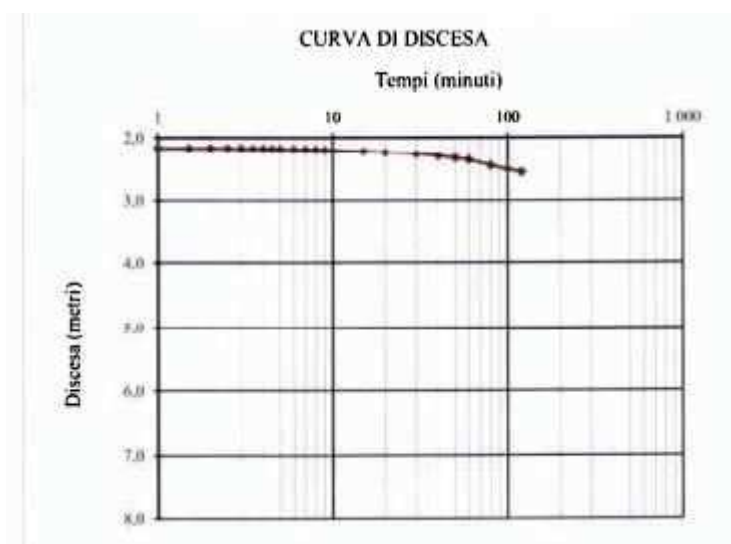


Tabella n.17 – Prova di emungimento a gradini in discesa

POZZO S7-I		Lunghezza 10 m	Diametro 152,44 mm	Prof.pompa 8,00 m	Quota boccaforo dal P.C. 35,0 cm
Prova in discesa					
Gradino		Data inizio prova			
2		31-mar-16			
Portata Q l/m		Ora inizio prova		Lettura iniziale m.	
1,2		11:05:00		2,570	
Frequenza	Secondi	Minuti	Ore	Ora	Lecture in m
da 0 a 5 minuti ogni 30 secondi (letture 10)	30	0,5			2,595
	60	1			2,610
	90	1,5			2,630
	120	2			2,640
	150	2,5			2,655
	180	3			2,665
	210	3,5			2,675
	240	4			2,685
	270	4,5			2,695
da 5 a 10 minuti ogni 1 minuto (letture 5)	300	5			2,705
		6			2,725
		7			2,745
		8			2,765
		9			2,785
da 10 a 20 minuti ogni 5 minuti (letture 2)		10			2,800
		15			2,880
da 20 a 60 minuti ogni 10 minuti (letture 4)		20			2,950
		30			3,065
		40			3,150
		50			3,220
da 60 a 120 minuti ogni 20 minuti (letture 3)		60	1	12:05	3,270
		80			3,342
		100			3,405
		120	2	13:05	3,440

Lecture al boccaforo



Tabella n.18 – Prova di emungimento a gradini in discesa

POZZO S7-1					
Lunghezza	10 m	Diametro	152,44 mm	Prof.pompa	8,00 m
					Quota boccaforo dal P.C. 35,0 cm
Prova in discesa					
Gradino		Data inizio prova			
3		31-mar-16			
Portata Q l/m		Ora inizio prova		Lettura iniziale m.	
2.4		13:07:00		3,370	
Frequenza	Secondi	Minuti	Ore	Ora	Lecture in m
da 0 a 5 minuti ogni 30 secondi (letture 10)	30	0,5			3,400
	60	1			3,430
	90	1,5			3,460
	120	2			3,495
	150	2,5			3,560
	180	3			3,580
	210	3,5			3,600
	240	4			3,635
	270	4,5			3,660
	300	5			3,670
da 5 a 10 minuti ogni 1 minuto (letture 5)	6				3,720
	7				3,750
	8				3,800
	9				3,825
	10				3,870
da 10 a 20 minuti ogni 5 minuti (letture 2)	15				4,000
	20				4,135
da 20 a 60 minuti ogni 10 minuti (letture 4)	30				4,530
	40				4,910
	50				5,240
	60	1	14:07		5,720
da 60 a 120 minuti ogni 20 minuti (letture 3)	80				6,780
	100				7,590
	120	2	15:07		-

Lecture al boccaforo



Tabella n.19 – Prova di emungimento a gradini in risalita

POZZO S7-1					
Lunghezza	10 m	Diametro	152,44 mm	Prof.pompa	8,00 m
				Quota boccaforo dal P.C.	35,0 cm
Prova in risalita					
Data inizio prova					
31-mar-16					
Ora inizio prova					
15:10:00					
Letture iniziali					
7,600					
Frequenza	Secondi	Minuti	Ore	Ora	Letture in m
da 0 a 5 minuti ogni 30 secondi (letture 10)	30	0,5			7,580
	60	1			7,570
	90	1,5			7,550
	120	2			7,530
	150	2,5			7,515
	180	3			7,500
	210	3,5			7,480
	240	4			7,460
	270	4,5			7,450
da 5 a 10 minuti ogni 1 minuto (letture 5)	300	5			7,430
		6			7,410
		7			7,370
		8			7,340
		9			7,310
da 10 a 20 minuti ogni 5 minuti (letture 2)		10			7,280
		15			7,120
da 20 a 60 minuti ogni 10 minuti (letture 4)		20			6,955
		30			6,635
		40			6,345
		50			6,095
da 60 a 120 minuti ogni 20 minuti (letture 3)		60	1	16:10	5,875
		80			5,455
		100			5,035
		120	2	17:10	4,705
da 120 a 180 minuti ogni 30 minuti (letture 2)		150			4,130
		180	3	18:10	3,750

Letture al boccaforo

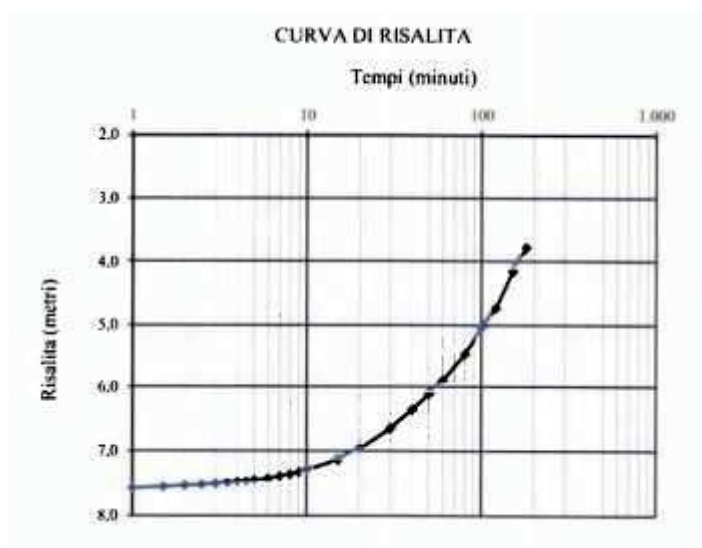
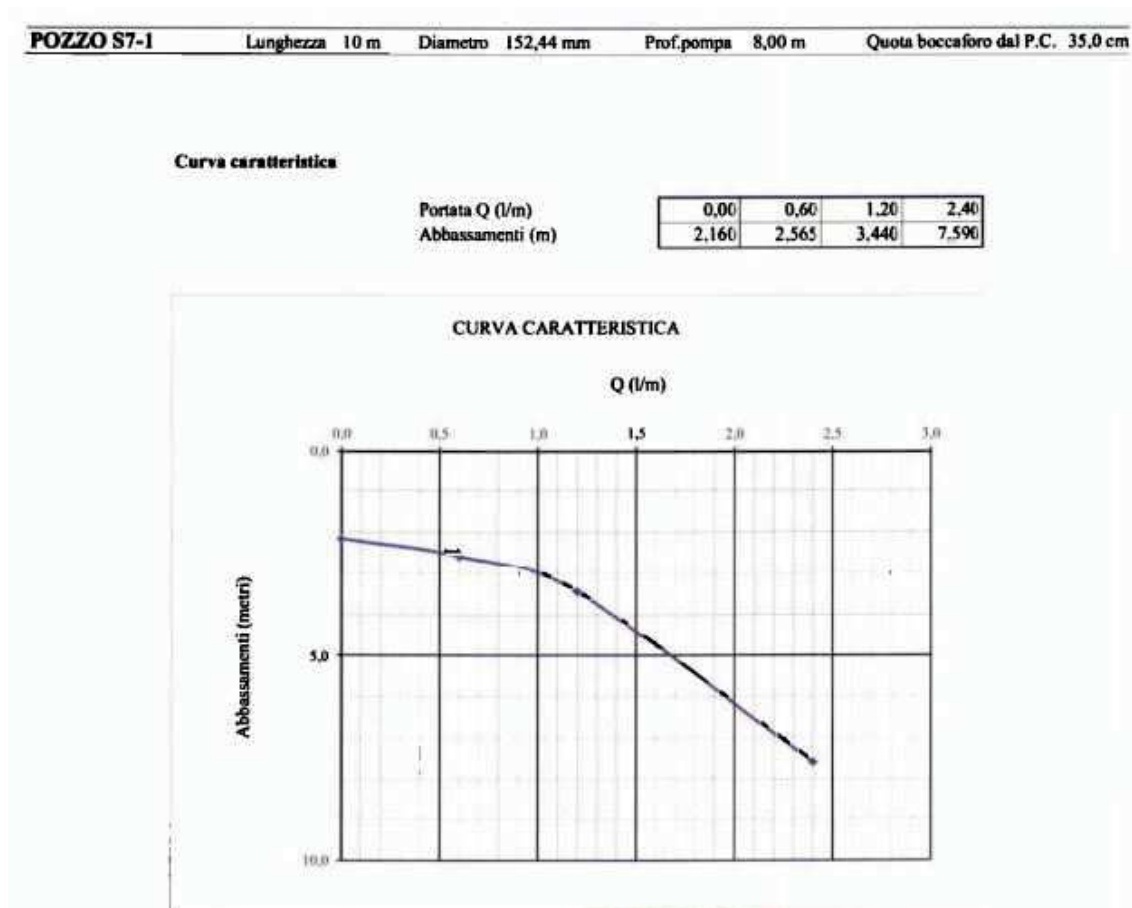


Tabella n.20 – Prova di emungimento a gradini in discesa e in risalita

Curva caratteristica



12.6.3.1 Pozzo-piezometro S7-1 – Prova del 30/03/2016 - Ricerca di T e K

La prova a gradini di portata crescente in discesa ed in risalita è stata eseguita solamente sul pozzo-piezometro S7-1, che le precedenti prove di emungimento hanno indicato come più “produttivo” e, quindi, meglio qualificato sotto il profilo della trasmissività e permeabilità locali.

Tanto per evidenziare, in un contesto idrogeologico caratterizzato da bassa trasmissività e da bassa permeabilità, anche il sito in cui tali parametri risultano meno penalizzati, probabilmente perché il sito stesso si trova ubicato

in un'area prossima, se non addirittura la include, a quella direttamente interessata dal brillamento di una carica esplosiva.

Per enfatizzare ed evidenziare detti migliori caratteri idraulici locali, si utilizzano per la ricerca della trasmissività T , i dati abbassamenti-portata relativi al primo gradino in discesa, utilizzando i dati di cui alla tabella n.16, in cui:

- portata $Q = 0.6 \text{ l/min}$
- abbassamento $s = 0.405 \text{ m}$

E' possibile utilizzare il metodo Thiem-Dupuit in quanto la modalità di prova prescelta, limitata al primo gradino in discesa con linearità tra pompaggio e abbassamenti, può essere assimilata ad una prova a portata costante in regime stazionario.

Pertanto, si ha:

$$T = a (Q/s)$$

ove

$a = 1.00$ per acquifero libero

$$Q = 0.6 \text{ l/min} = 0.00001 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$s = 0.405$$

si ha:

$$T = 1 \cdot (0.1 \cdot 10^{-5})/0.405 = 0.0000247 \text{ m}^2/\text{s} = 2.13 \text{ m}^2/\text{die}$$

Ferme restando le sopra esposte considerazioni idrauliche sembra opportuno ricercare la permeabilità K utilizzando la relazione di Boulton-Neumann ossia $K = T/b$, ove

$$T = \text{trasmissività pari a } 0.0000247 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$b = \text{spessore saturo pari a } 10.00 \text{ m}$$

per cui

$$k = 0.0000247/10 = 0.0000025 \text{ m/s} = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

12.6.3.2 Ricerca della portata critica Q_c

La portata critica è ottenibile dalla prova a gradini elaborando prioritariamente la curva caratteristica, riportando su diagramma matematico le portate dei vari gradini e gli abbassamenti corrispondenti; la curva è rappresentata sulla allegata tab. n.20.

Si evidenzia prioritariamente che la curva caratteristica così ottenuta è tipica di acquifero libero.

La portata critica Q_c , ricavata con il metodo delle tangenti, risulta pari a:

$$Q_c = \sim 1.0 \text{ l/min}$$

Di seguito si ricercano le portate specifiche per singolo gradino.

	Portata Q (l/min)	Abbassamenti s (m)	Dislivello Δs (m)
Livello statico (m)	0.00	2.16	-
Primo gradino (m)	0.60	2.565	0.405
Secondo gradino (m)	1.20	3.44	0.875
Terzo gradino (m)	2.40	7.59	4.15

da cui le portate specifiche:

- Primo gradino: $Q_s = Q/s = 0.60/0.405 = 1.48 \text{ l/min/m}$
- Secondo gradino $Q_s = Q/s = 1.20/0.875 = 1.37 \text{ l/min/m}$
- Terzo gradino $Q_s = Q/s = 2.40/4.15 = 0.58 \text{ l/min/m}$

Si osserva che si conserva la linearità tra emungimenti e abbassamenti fino ad una portata di circa 1.00 litro al minuto, per cui la portata di esercizio di un eventuale pozzo di sfruttamento della risorsa idrica dovrebbe attestarsi attorno a 0.7 l/min, ovviamente al massimo regime di piovosità, quale registrato nel periodo.

L'argomento verrà ripreso più avanti quando si tratterà del bilancio idrogeologico del bacino idrogeologico insistente sull'area di interesse.

12.6.4 Discussione

Le prove di emungimento condotte nell'area sui pozzi-piezometri S7-1, S18-1, S18-3, di cui ai paragrafi precedenti, fissano saldamente le principali caratteristiche dell'acquifero presente nell'area, di seguito riassunte.

- 1) La curva caratteristica ottenuta con la prova a gradini indica trattarsi di un acquifero libero.
- 2) La falda libera presente è caratterizzata da bassi valori della trasmissività, della permeabilità e soprattutto della portata emungibile dai tre pozzi-piezometri sottoposti a prova di emungimento. Pur avendo prescelto tra i tre pozzi-piezometri testati quello più "produttivo", cioè il pozzo-piezometro S7-1, i tre parametri di cui sopra denunciano valori molto bassi.

Infatti, con portate anche di poco eccedenti 1 litro/minuto il ramo discendente della curva caratteristica assume pendenze significative; la linearità tra tempi di emungimento e abbassamenti, con una portata di soli 0.60 litri/minuto, è conservata per non più di 10 ÷ 12 minuti, mentre con una portata di 0.90 litri/minuto la linearità non supera i 5 minuti.

Ciò significa che la portata di esercizio di un ipotetico pozzo destinato allo sfruttamento della risorsa idrica attuale non potrebbe superare l'irrisorio valore di 0.60 ÷ 0.80 litri/minuto nonostante ci si trovi nel periodo di piena della falda, conseguente al regime di piovosità invernale-primaverile, il più consistente dell'anno meteorologico.

- 3) I valori di K e T ottenuti con le descritte prove di emungimento risultano in qualche caso di un ordine di grandezza più alti di quelli ottenuti con le prove di permeabilità Lugeon, come viene evidenziato dal raffronto di seguito proposto.

Tabella n.21 – Valori di K e T da prova Lugeon e di emungimento

PROVE LUGEON				PROVE EMUNGIMENTO	
SONDAGGIO	PROFONDITA' (m)	K (m/s)	T (m ² /s)	K m/s	T m ² /s
S7-1	-			2.50 · 10 ⁻⁶	1.08 · 10 ⁻⁶ 1.50 · 10 ⁻⁵ 2.50 · 10 ⁻⁵
S7-2	8.00 – 10.00	1.08 · 10 ⁻⁸	1.08 · 10 ⁻⁷	-	-
S18-1	4.00 – 6.00	2.59 · 10 ⁻⁷	2.59 · 10 ⁻⁶	-	0.70 · 10 ⁻⁶
S18-3	8.00 – 10.00	3.14 · 10 ⁻⁷	3.14 · 10 ⁻⁶	-	0.90 · 10 ⁻⁶
S28-1	12.00 – 14.00	2.49 · 10 ⁻⁸	2.49 · 10 ⁻⁷	-	-

Le variazioni osservate dipendono da vari fattori tra i quali vanno evidenziate la piovosità, fluttuante nel periodo, le portate emunte, la discreta permeabilità e la quasi planarità della coltre detritica rimaneggiata che favoriscono il ristagno in superficie delle acque di pioggia, la loro successiva infiltrazione ed alimentazione della circolazione idrica sotterranea, la distanza del piezometro dai punti delle esplosioni, la diversa caratterizzazione della roccia sotto il profilo della densità, apertura, persistenza, ecc., delle discontinuità per volume unitario.

Senza entrare in dettagli dispersivi, si evidenziano solo alcuni aspetti essenziali rispetto al problema in esame, quali l'entità delle portate emunte, che, quando eccedenti le portate critiche, come accaduto, portano il livello dinamico in prossimità del fondo pozzo, sollecitando perciò anche i livelli meno permeabili e meno trasmissivi con conseguenti basse risposte in termini di permeabilità e trasmissività; nel caso contrario, come rilevato per il pozzo S7-1 con la prova a gradini, nella quale per il primo gradino è stata prescelta una portata di soli 0.60 litri/minuto, il livello dinamico si è abbassato di soli 40.00 cm circa, interessando, perciò, livelli più permeabili e trasmissivi, con conseguenti più alte risposte in termini di permeabilità e trasmissività.

Restano, comunque, consolidati i bassi valori di permeabilità e di trasmissività, tipici di acquiferi poco permeabili, di bassissimo se non nullo interesse sotto l'aspetto quantitativo della risorsa, come dimostrano le contenutissime portate di esercizio dei pozzi sperimentati, i cui valori si attestano attorno a $0.50 \div 0.60$ litri/minuto, in un periodo, peraltro, di massima portata della falda.

Alla modestia di detti parametri si associa anche il limitato spessore dell'acquifero mediamente pari a circa 10.00 m o poco più, con piezometrica che dal 07/03/2016 al 01/04/2016 si porta dagli iniziali $1.15 \div 1.91$ (minimo e massimo) metri circa dal p.c., ai circa 2.00 metri dal p.c. del 14/03/2016 e ai successivi 2.27 metri dal p.c. dell'01/04/2016.

Questi valori sono destinati ad abbassarsi ulteriormente, ed in maniera molto consistente, nel trimestre estivo caratterizzato da precipitazioni idrometeoriche prossime allo zero, con ulteriori cadute di tutti i parametri idraulici della falda.

L'argomento verrà ripreso nel prossimo paragrafo, a conclusione del bilancio idrogeologico sotteso dall'area della discarica, finalizzato alla valutazione degli aspetti quantitativi, cioè della potenzialità della falda presente nell'area.

12.7 Valutazione della risorsa idrica sotterranea

Bilancio idrologico e potenzialità idrica sotterranea

12.7.1 Generalità

In questo paragrafo verrà impostato e risolto il calcolo del ***bilancio idrologico*** finalizzato alla valutazione della ***potenzialità idrica*** della falda libera presente nell'area.

I parametri derivanti dal bilancio idrologico potranno essere utilizzati in sede di progettazione dell'impianto, specificamente della parte destinata, se non ad eliminare del tutto, almeno a limitare drasticamente l'attuale già debolissima circolazione idrica sotterranea; intervento certamente possibile, vista la limitata estensione areale del bacino idrogeologico sotteso dal sito destinato a discarica e la scarsità delle precipitazioni idrometeoriche medie annuali, le quali, peraltro, costituiscono l'unica fonte di alimentazione della falda freatica posta sotto esame.

12.7.2 Bilancio idrologico

I dati esposti nei precedenti paragrafi rivelano che la locale circolazione idrica sotterranea è attestata nella parte superficiale del basamento granitico, caratterizzata da fratture più aperte rispetto a quelle più profonde.

Lo spessore medio dell'acquifero, quale emerge dalle indagini eseguite, è dell'ordine di una decina di metri o poco più.

In concordanza con questo parametro è stato anche rilevato che la superficie piezometrica si adatta e segue la morfologia della superficie topografica.

Nel sito d'interesse la situazione topografica è tale da consentire la sovrapposizione del bacino idrografico con il bacino idrogeologico, nel senso che i limiti dei due bacini sono coincidenti.

Sull'allegato estratto topografico (Fig. n.14) è stato delimitato il bacino idrografico comprendente tutti gli impianti della piattaforma rifiuti IPPC e, colorata in giallo, la superficie del bacino idrografico che insiste sull'area della nuova discarica.

Per quanto sopra detto, la superficie del bacino idrogeologico ha la medesima estensione del bacino idrografico.

Ciò premesso, si indicano di seguito i parametri necessari per la esecuzione del bilancio idrologico:

- Superficie totale del bacino idrografico alla sezione di chiusura rappresentata dal limite di valle della discarica in progetto $A_T = \sim 189.000 \text{ m}^2 = \sim 18.90 \text{ ha}$
- Superficie dell'area destinata alla realizzazione della nuova discarica $A_D = \sim 37.000 \text{ m}^2 = \sim 3.70 \text{ ha}$
- Superficie del bacino idrografico al netto dell'area discarica $A_N = \sim 152.000 \text{ m}^2 = \sim 15.20 \text{ ha}$
- Pendenza media del bacino idrografico a monte dell'area discarica $P/m = 40\%$
- Precipitazione media annuale (anni dal 1922 al 2005) $P_m = 570.00 \text{ mm}$
- Temperatura media annuale (anni dal 1927 al 2010) $T_m = 16^\circ.6 \text{ C}$

- **IMPOSTAZIONE DEL BILANCIO IDROLOGICO**

Il bilancio idrologico è dato dalla somma dei seguenti parametri:

$$P_m = ETR + R + I$$

ove

P_m = precipitazione media annua idrometeorica (mm/anno)

ETR = evapotraspirazione reale (mm/anno)

R = ruscellamento superficiale (mm/anno)

I = infiltrazione efficace (mm)

- IMPOSTAZIONE DEL CALCOLO DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE REALE ETR

Risultando il bacino idrografico non molto esteso può essere adottata con profitto la formula di Turc che, oltretutto, si adatta a diverse condizioni climatiche:

$$ETR = Pm / \sqrt{0.9 + (P^2/L^2)}$$

ove:

Pm = altezza pioggia media annua (mm/anno)

L = $300 + 25 T_m + 0.05 T_m^3$ = potere evaporante dell'atmosfera

Tm = temperatura media annua dell'aria (°C)

- CALCOLO DEL POTERE EVAPORANTE DELL'ATMOSFERA L

$$L = 300 + 25 \times 16^\circ.6 + 0.05 \times 16^\circ.6^3 = 300 + 415 + 228.71 = 943.71$$

- CALCOLO DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE REALE ETR

Secondo Turc:

$$ETR = 570 / \sqrt{0.9 + (570^2/943.71^2)} = 570 / \sqrt{0.9 + 0.365} = 570 / 1.125 = 507 \text{ mm}$$

pari a circa l'89% di P = 570 mm

Si calcola ETR anche con l'equazione di Coutagne, secondo cui:

$$ETR = P - \lambda P^2$$

ove

$$\lambda = 1/(0.8 + 0.14T)$$

$$P = 0.57 \text{ (m/anno)}$$

quindi

$$\lambda = 0.32$$

per cui

$$ETR = 466 \text{ mm/anno}$$

Il risultato si può ritenere valido essendo P compreso tra $(1/8)\lambda$ e $1/\lambda$, condizione posta dall'Autore.

Ai fini del calcolo del bilancio idrologico si riepilogano di seguito i valori di ETR ottenuti:

- ETR = 466 mm/a, secondo Coutagne
- ETR = 507 mm/a, secondo Turc.

- **CALCOLO DEL DEFLUSSO IDRICO GLOBALE D (mm/a)**

Il deflusso idrico globale è dato dalla somma dei deflussi superficiali (R) e sotterranei (I), cioè

$$P_m - ETR = R + I$$

e quindi:

$$D = P_m - ETR \quad \text{da cui:}$$

$$D = 570 - 466 = 104 \text{ mm/a (secondo Coutagne)}$$

$$D = 570 - 507 = 63 \text{ mm/a (secondo Turc).}$$

- **CALCOLO DELL'INFILTRAZIONE EFFICACE I (mm/a)**

Essendo il deflusso idrico globale D la somma dei deflussi superficiali (R) e sotterranei (I), cioè del ruscellamento e della infiltrazione, si ha:

$$D = R + I$$

da cui

$$I = D - R$$

e facendo riferimento al coefficiente di infiltrazione potenziale (c.i.p.), si ottiene:

$$I = D \cdot \text{c.i.p.}$$

Si pone il c.i.p. = 10%, che si ritiene possa meglio rispecchiare le caratteristiche proprie del bacino idrografico, di cui si individuano quattro fattori principali di seguito descritti:

- 1) Il primo fattore viene individuato dagli elevati picchi di pendenza che caratterizzano estesi tratti del versante prospiciente l'area destinata a discarica.

Detti picchi di pendenza riducono notevolmente il tempo di corrivazione e conseguentemente anche l'infiltrazione, con il risultato finale di incrementare in maniera considerevole il ruscellamento superficiale.

Le pendenze maggiori si riscontrano negli alvei dei due fossi di scolo che drenano l'intera superficie del versante, nei tratti compresi tra le seguenti quote:

- da q. 249.60 a q. 100, lunghezza vers. 412 m, $p = 36\%$
- da q. 200.00 a q. 100, lunghezza vers. 217 m, $p = 46\%$
- da q. 225.00 a q. 100, lunghezza vers. 285 m, $p = 44\%$.

- 2) Il secondo fattore è dato da una permeabilità dei litotipi in affioramento da media a bassa ($K = 10^{-4} \div 10^{-7}$ m/s) che ostacola l'infiltrazione.
- 3) Il terzo fattore è dato dalla copertura vegetale prevalentemente boschiva-arbustiva che assume, perciò, un ruolo non marginale nei processi di infiltrazione ed evapotraspirazione.
- 4) Il quarto fattore viene individuato in una canaletta che raccoglie, alla base del versante, le acque drenate da uno dei due fossi di scolo presenti sul versante di Colle Lisandruggiu, precisamente quello ad E, avviandole a valle ed evitando, perciò, che esse possano contribuire ad alimentare con la propria aliquota le acque di infiltrazione nell'area destinata ad accogliere il nuovo impianto.

Si passa, quindi, al calcolo della infiltrazione efficace, data da:

$$I = D - R \text{ (deflusso globale meno ruscellamento)}$$

ovvero: $I = D \cdot c.i.p.$

$$I = 104 \cdot 0.10 = 10.4 \text{ mm/a (secondo Coutagne)}$$

$$I = 63 \cdot 0.10 = 6.3 \text{ mm/a (secondo Turc)}$$

- **CALCOLO DELLA POTENZIALITA' IDRICA U (m^3/s)**

Non essendovi alimentazioni o afflussi di altro genere, l'infiltrazione efficace I si identifica con la **potenzialità idrica U** della falda libera di superficie presente nel **dominio idrogeologico** in esame.

Pertanto, la **potenzialità idrica U** è pari a:

- Secondo Coutagne

$$U (m^3/a) = I (m/a) \cdot A (m^2) = 0.0104 \cdot 189.000 = 1965 m^3/a$$

pari a:

$$0.00006 m^3/s = 0.06 l/s = 3.6 l/min$$

- Secondo Turc

$$U (m^3/a) = I (m/a) \cdot A (m^2) = 0.0063 \cdot 189.000 = 1190 m^3/a$$

pari a:

$$0.000037 m^3/s = 0.037 l/s = 2.22 l/min$$

Detti valori di $U = 0.06 \div 0.037 l/s$, estremamente contenuti e tipici di acquiferi poveri (Custodio, 1996), sono correlabili, in quanto caratterizzati dallo stesso ordine di grandezza, con i valori delle portate critiche misurate con le prove di emungimento di poco superiori a $Q_c = \sim 1 l/min$.

- **CALCOLO DELL'ALIMENTAZIONE UNITARIA SPECIFICA I_s ($l/s \cdot km^2$)**

L'alimentazione unitaria specifica è data in $l/s \cdot km^2$

$$I_s = I \cdot 1000/A$$

dove I = infiltrazione efficace (m^3/s)

A = area del dominio idrogeologico (km^2)

per cui:

$$I_s = 0.00006 \cdot 1000/0.189 = 0.32 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2 \text{ secondo Coutagne;}$$

$$I_s = 0.000037 \cdot 1000/0.189 = 0.19 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2 \text{ secondo Turc.}$$

12.7.3 Discussione

Concludendo sul punto, si osserva che i valori della **potenzialità idrica U** , e conseguentemente quelli dell'**alimentazione unitaria specifica I_s** , sono estremamente contenuti e tipici di un acquifero povero (Custodio, 1996), sia sotto il profilo qualitativo in quanto superficiale, idrogeologicamente privo di copertura protettiva e quindi estremamente vulnerabile, sia sotto il profilo quantitativo, considerati i ridotti apporti delle ricariche, rappresentate da un'unica fonte di alimentazione, quella meteorica, e l'esiguità del bacino idrogeologico.

Infatti, **i valori di U ottenuti sono compresi tra un minimo di 1190 m^3/a ad un massimo di 1965 m^3/a** e sono destinati a **ridursi ancora del 20%** per effetto della sottrazione, all'area del bacino idrogeologico di alimentazione pari a 0.189 km^2 , dell'area della nuova discarica, pari a 37'000 m^2 cioè 0.037 km^2 , per effetto della sua completa impermeabilizzazione come disposto normativo.

Pertanto, **il valore effettivo di U sarà rispettivamente pari a**

$$U = 952 \text{ m}^3/\text{a} \div 1572 \text{ m}^3/\text{a}$$

In tutti i casi, comunque, il valore di U risulta inferiore a quello previsto in normativa, cioè nel D. L.vo 152/2006 – Allegato 1 alla Parte terza, che tra i criteri fissati per l'identificazione degli acquiferi pone, per la **quantità significativa**, il limite minimo a 10 m^3 al giorno (quindi 3650 m^3/anno) per il prelievo e, per il **flusso significativo**, la interruzione idrica sotterranea che dà luogo ad una diminuzione della qualità ecologica di un corpo idrico superficiale o di un dipendente ecosistema terrestre.

Quindi, non sussistendo nessuno dei due criteri fissati da dettato normativo, ***la risorsa idrica in oggetto non è classificabile come acquifero.***

I limiti imposti dalla prescrizione normativa, come si vede, concordano pienamente con le classificazioni degli acquiferi, elaborate sulla base di parametri idraulici da Krasny (1993) e Custodio (1996), autori accreditati nella letteratura scientifica internazionale.

12.8 Piezometria

La caratterizzazione piezometrica è stata ottenuta con rilevamenti periodici sui piezometri S7-1, S18-1, S18-3, attrezzati per il monitoraggio definitivo dell'area, e sui piezometri temporanei S7-2, S18-2, S28-1, S28-2 (da smantellare nel corso dei lavori); il piezometro temporaneo S7-3 è andato fuori uso subito dopo la sua realizzazione.

I risultati vengono esposti nella tabella n. 21, nella quale sono riepilogati i dati più significativi compresi tra il 22.12.2015 ed il 05.05.2016, in quanto relativi al periodo di massima piovosità e di massima piena della falda; analizzando le misure della piezometrica e della soggiacenza si rileva che i relativi andamenti assumono una tendenza all'incirca stazionaria, con lievissime oscillazioni dei livelli idrici, tranne che nei piezometri S7-2 e S18-3, nei quali si registrano incrementi nel mese di gennaio 2016 per il piezometro S7-2 con + 2.09 m rispetto al mese precedente, e in data 14.03/2016 per il piezometro S18-3, con + 1.14 m rispetto al mese precedente.

Tabella n.21 – Sintesi misure piezometriche dal 22/12/2015 al 05/05/2016

			Quote piezometriche dal p.c. (m/lm)						
Piezometro	Profondità (m)	Quota pc (m)	22/12 2015	05/01 2016	28/01 2016	07/03 2016	14/03 2016	30/03 2016	05/05 2016
S7-1 Sogg. (m)	10	62.33	60.58 - 1.75	60.29 - 2.04	61.05 - 1.28	60.77 - 1.56	60.66 - 1.67	60.52 - 1.81	60.42 - 1.91
S7-2 Sogg. (m)	13	68.81	64.94 - 3.87	64.36 - 4.46	66.44 - 2.37				66.70 - 2.11
S18-1 Sogg. (m)	10	63.68	62.58 - 1.10	62.42 - 1.26	62.38 - 1.30	62.54 - 1.14	62.53 - 1.15		62.58 - 1.10
S18-2 Sogg. (m)	14.8	68.65	67.67 - 1.01	67.65 - 1.00	67.81 - 0.84				67.75 - 0.90
S18-3 Sogg. (m)	10	75.10	72.20 - 2.90	72.10 - 3.00	72.35 - 2.75	72.24 - 2.86	73.38 - 1.72		73.43 - 1.67
S28-1 Sogg. (m)	16	71.98	69.41 - 2.57	69.37 - 2.61	69.46 - 2.52				69.58 - 2.40
S28-2 Sogg. (m)	12.1	71.71	70.98 - 0.73	70.83 - 0.88	70.86 - 0.85				70.95 - 0.76

L'apparente discrasia si giustifica richiamando il comportamento idraulico delle rocce fessurate, in cui la circolazione dell'acqua è condizionata dalle caratteristiche geometriche proprie delle singole fessure e dalla loro singola collocazione e rapporto con l'intera rete delle discontinuità; caratteristiche che possono facilitare od ostacolare la circolazione idrica, come ad esempio la maggiore o minore ampiezza delle fratture ovvero l'interconnessione o meno con fratture in cui vi è circolazione idrica.

Pertanto, fessure inclinate o poco inclinate rispetto alla verticale o addirittura verticali, quindi con migliore permeabilità verticale, o più interconnesse con la rete delle fratture, ovvero ancora direttamente comunicanti

con l'esterno, possono dar luogo, in occasione di periodi piovosi intensi o prolungati, alla formazione di un livello freatico virtuale, cioè di un locale livello piezometrico localmente più elevato.

Le due carte isopiezometriche (fig. 15 e fig.16), redatte a seguito delle misurazioni effettuate in data 22.12.2015 e 05.05.2016 ed a queste date contestualizzate, evidenziano l'esistenza di due assi di drenaggio, di cui quello meglio rappresentato è posto a W dell'area di interesse, ed uno meno accentuato posto ad E, con direzioni di flusso orientate da SSE verso NNW.

E' altresì importante sottolineare che i due assi drenanti alimentano, quello ad W, il piezometro S7-1 e quello ad E il piezometro S18-1.

Ciò chiarisce i risultati delle prove di emungimento, la cui migliore risposta è stata registrata in corrispondenza del piezometro S7-1, ubicato proprio lungo l'asse drenante principale.

Si osserva, infine, che l'andamento delle isopiezometriche nel tempo dimostra che la falda, ancora alimentata dalle precipitazioni idrometeoriche del periodo primaverile, è caratterizzata dal regime di massima piena.

Figura n.15 - Carta isopiezometrica al 22/12/2015

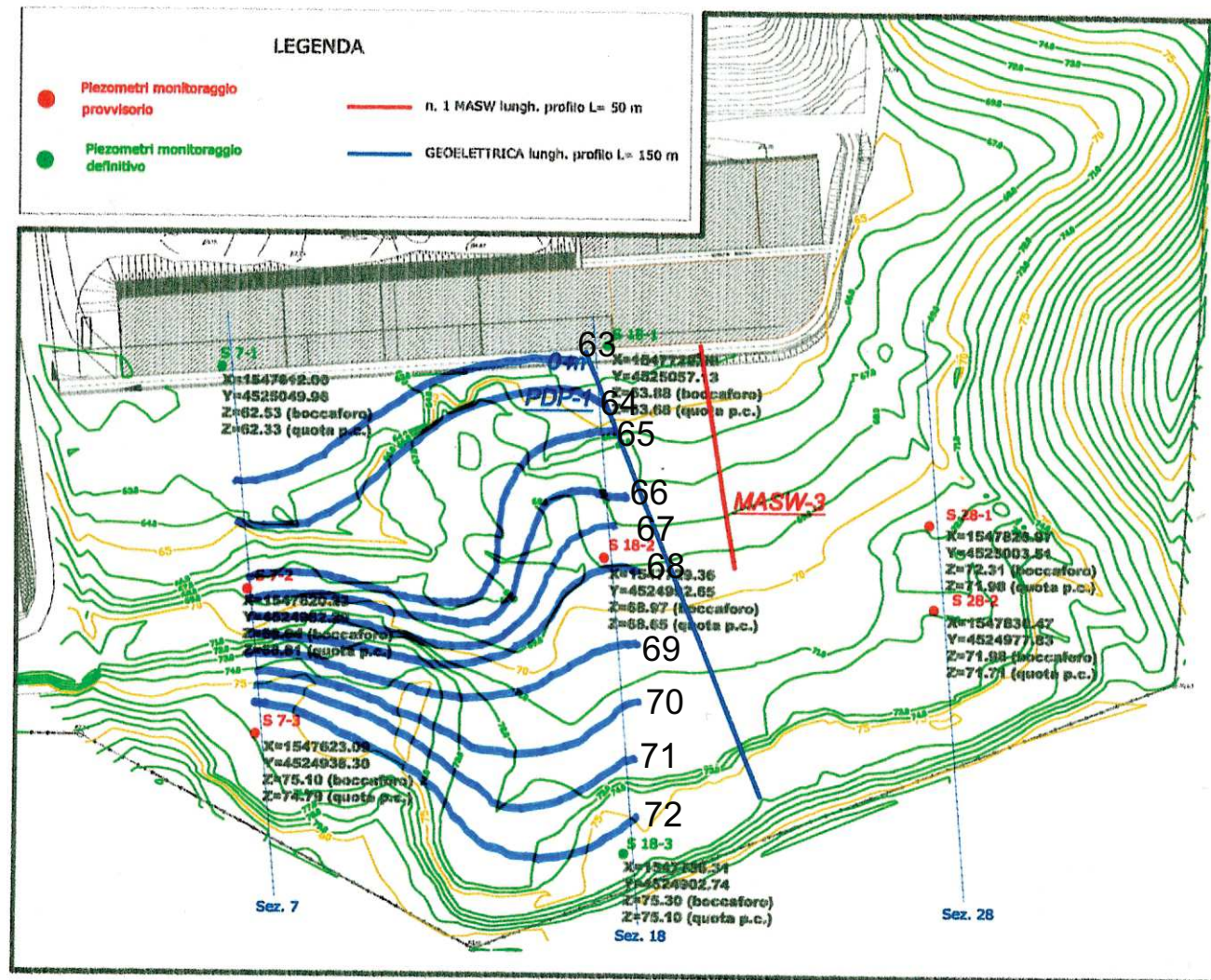
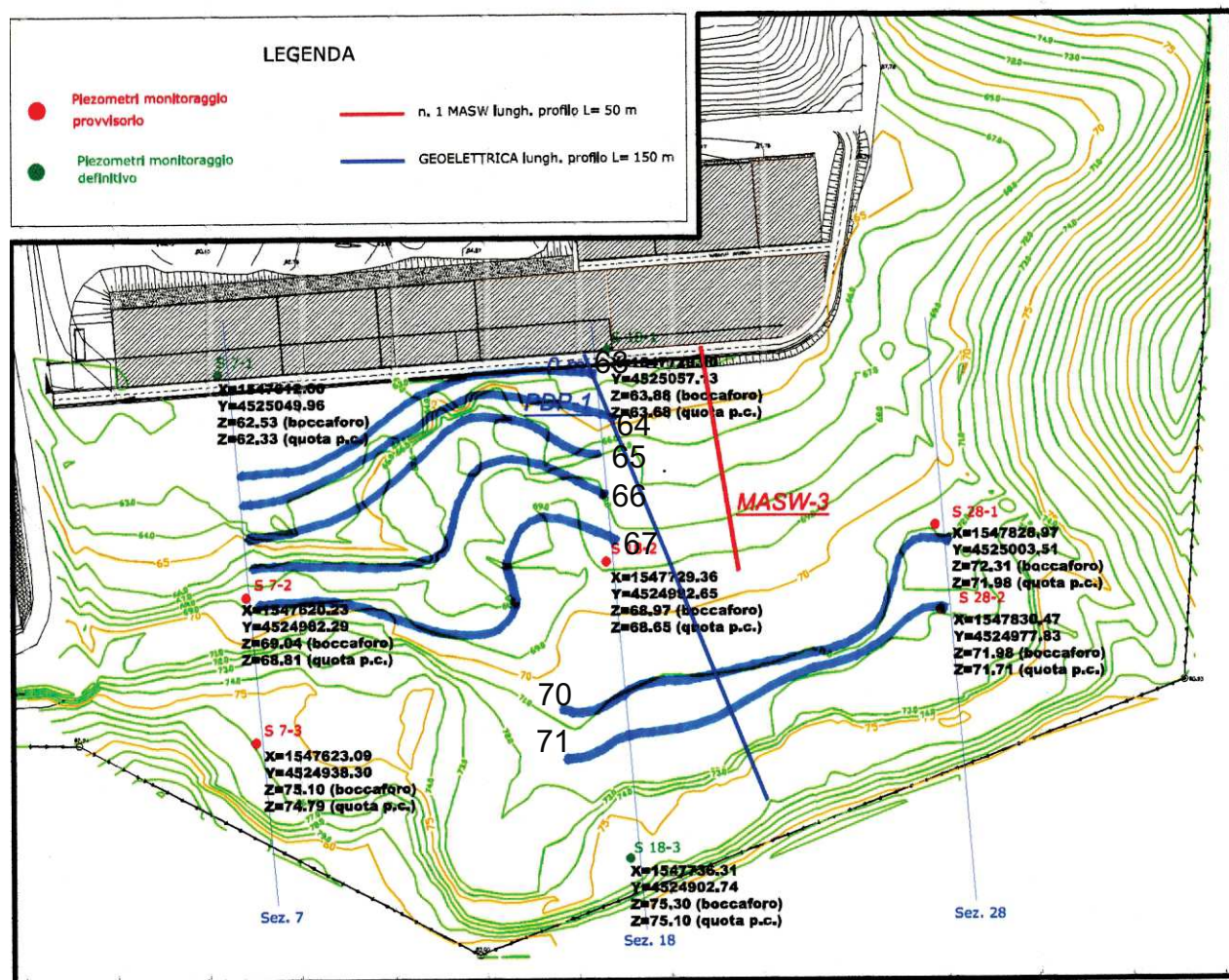


Fig. 16 - Carta isopiezometrica al 05/05/2016



12.9 Sintesi del sistema geologico-idraulico e classificazione tecnico - normativa della risorsa idrica - Individuazione dei presidi idraulici destinati alla tutela ambientale

12.9.1. Finalità

Si procede di seguito ad un inquadramento di sintesi degli elementi geologici, idrogeologici e idraulici di base finalizzato a :

- a) qualificare quantitativamente la circolazione idrica sotterranea presente nel sito di interesse;
- b) verificare se detta risorsa idrica possa o meno essere classificata come acquifero;
- c) individuare, in caso negativo, cioè nel caso in cui la risorsa non sia classificabile come “acquifero”, i presidi idraulici superficiali tesi a garantire stabilmente nel tempo i requisiti ambientali previsti dalle vigenti norme in tema di realizzazione di discariche per rifiuti non pericolosi.

12.9.2 Il sistema fisico e la classificazione tecnico-normativa della risorsa idrica

Nell'area di interesse è presente una modestissima circolazione idrica sotterranea, la cui qualificazione scaturisce direttamente dagli elementi analitici e sperimentali esposti e discussi nei precedenti paragrafi, di seguito riassunti:

Nel sito a monte dell'area destinata a discarica, costituito dal pendio di Colle Lisandraggiu, le caratteristiche litostratigrafiche sono date dal complesso granitoide di base e dalle sovrastanti coperture detritiche quaternarie; queste ultime sono costituite da sedimenti più francamente alluvionali negli alvei dei due fossi che drenano longitudinalmente con direzione S – N la pendice collinare, mentre le restanti aree sono coperte da sedimenti arenitico-limoso-argillosi, derivanti dalla alterazione e degradazione dei graniti.

In ogni caso lo spessore di dette coltri è dell'ordine di pochissimi metri, da 1.00 a 3.00 ÷ 4.00 metri, con permeabilità medio-bassa, in relazione alla quantità di "fino" presente, in genere data da $K = 10^{-4} \div 10^{-6}$ m/s.

In queste coperture si svolgono i processi di ruscellamento, di infiltrazione e di gran parte della circolazione idrica sotterranea.

L'elevata pendenza del versante, mediamente di poco al di sotto del 40 % ma per lunghi tratti con punte del 44 ÷ 46%, e la contenuta permeabilità, limitano considerevolmente l'infiltrazione, a vantaggio di un alto tasso di ruscellamento superficiale.

A dette coltri segue il complesso granitico, caratterizzato da una rete di fratture generalmente poco persistenti e con aperture mediamente inferiori al millimetro, a limitata permeabilità, in genere compresa tra $K = 2.59 \cdot 10^{-7} \div 2.49 \cdot 10^{-8}$ m/s ma con punte di $K = 9.6 \cdot 10^{-9}$ m/s e trasmissività altrettanto limitata, con valori compresi tra $T = 2.59 \cdot 10^{-6} \div 2.49 \cdot 10^{-7}$ m²/s, propri di acquiferi delle classi VI e VII secondo Krasny con capacità da "molto bassa" a "non valutabile" (v. tabella n.6, par. 12.3.1).

Il valore dell'indice RQD, come per la permeabilità e la trasmissività, migliora sensibilmente con la profondità (v. tabella n.3, par.12.1.4.2c).

Mentre le bande granitiche prossime alla superficie, anche e soprattutto a causa dell'uso di esplosivi usato per lo spianamento dell'area, assumono valori di RQD bassi, compresi tra il 20% ed il 35%, i livelli più profondi assumono, invece, valori consistenti, mediamente compresi tra minimi del 55% ÷ 60% e massimi dell'85% ÷ 95%.

In questo contesto, nel quale vanno evidenziate, altresì, la limitatissima estensione del bacino idrogeologico, inferiore ai 20ha, coincidente per altro con il bacino imbrifero, e la altrettanto molto limitata ricarica idrica identificata con le sole piogge zenitali, le prove di emungimento non potevano che confermare la povertà dell'acquifero come sopra descritto, facendo misurare portate critiche attorno al litro per minuto primo e valori di K e T correlabili con quelli sopra riportati e ottenuti con prove Lugeon.

Il bilancio idrologico, infine, a conferma di tutto quanto innanzi desunto in via sperimentale, ha evidenziato analiticamente la scarsa entità delle “entrate” idriche, rappresentate da una lama d’acqua compresa tra un minimo di 6.3 mm/a ed un massimo non superiore a 10.4 mm/a, a cui corrisponde **la potenzialità idrica U compresa tra 1190 m³/a e 1965 m³/a**, tipici di acquiferi molto poveri secondo criteri dettati da Custodio.

Detti valori, **per effetto della impermeabilizzazione dell’area discarica** dovuta alle norme vigenti, **si ridurranno ulteriormente del 20% circa**, per cui i **valori di U da assumere per le calcolazioni saranno i seguenti: $U = 952 \div 1572$ m³/a.**

Secondo il D. L.vo 152/2006, All.1, Parte terza, la risorsa idrica in oggetto è esplicitamente classificata come “**non acquifero**” dato **che i descritti valori di $U = 952 \div 1572$ m³/a sono largamente inferiori a quelli minimi prescritti da detta norma e resi pari a 3650 m³/a.**

Completano il quadro geologico, idrogeologico e idraulico sopra riassunto, le risultanze delle indagini geofisiche che danno contezza dello **spessore maggiormente fratturato del complesso granitoide di base**, che consente una minima circolazione idrica sotterranea; detto **spessore è pari a 10.00 ÷ 12.00 m**, rilevato sia dalla elettrotomografia sia dalla sismica MASW.

Si osserva, per inciso, che detto spessore è quasi doppio rispetto a quelli misurati in altre aree della piattaforma IPPC.

La piezometria, infine, consente di **rilevare l’immediata risposta tra pioggia e quote piezometriche**, ad ulteriore dimostrazione della superficialità della circolazione idrica, della ridotta estensione del bacino idrografico e dell’assenza di altre fonti di alimentazione.

Tutti gli elementi di sintesi sopra richiamati sono riportati sulle allegate sezioni geologiche di cui alle fig. n.17, 18, 19.

Legenda

- Coltre detritica rimaneggiata
- Granito molto fratturato
RQD = 0-30%, molto scadente, scadente
- Granito poco fratturato
RQD = 51%-96%, medio-eccezionale

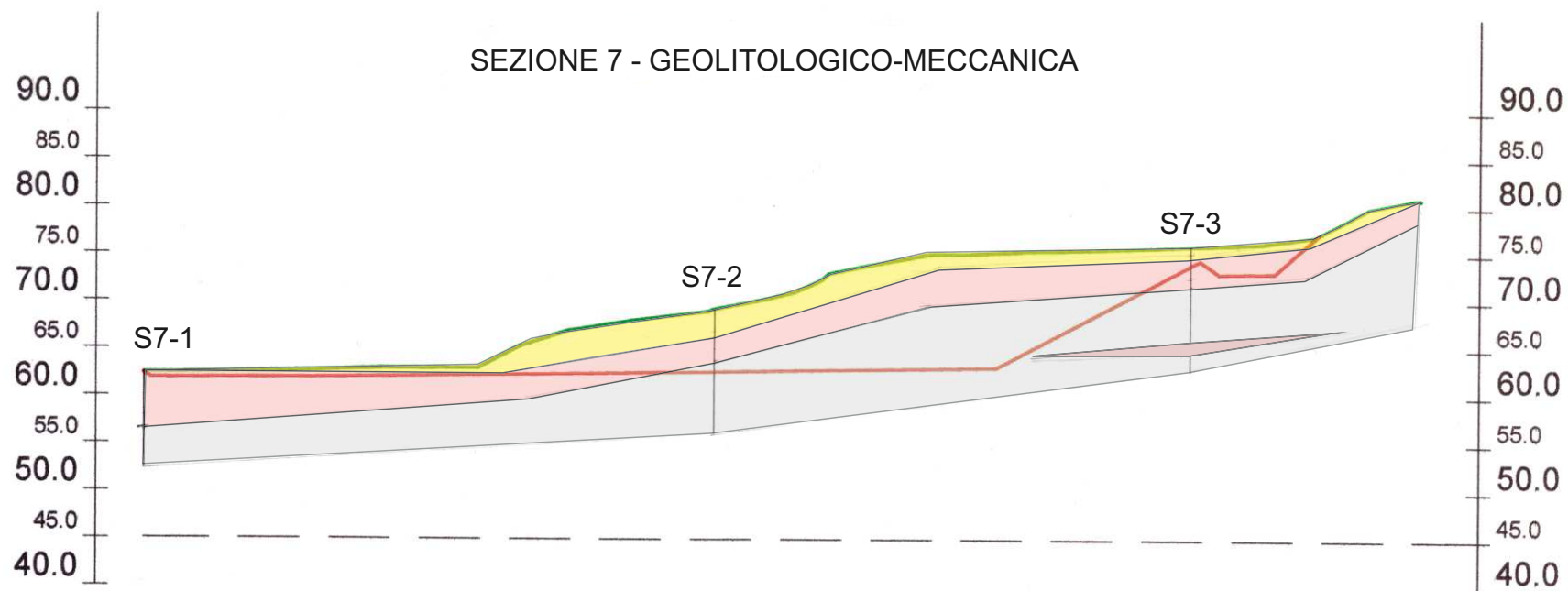


Figura n. 17

SEZIONE 18 - GEOLITOLOGICO-MECCANICA

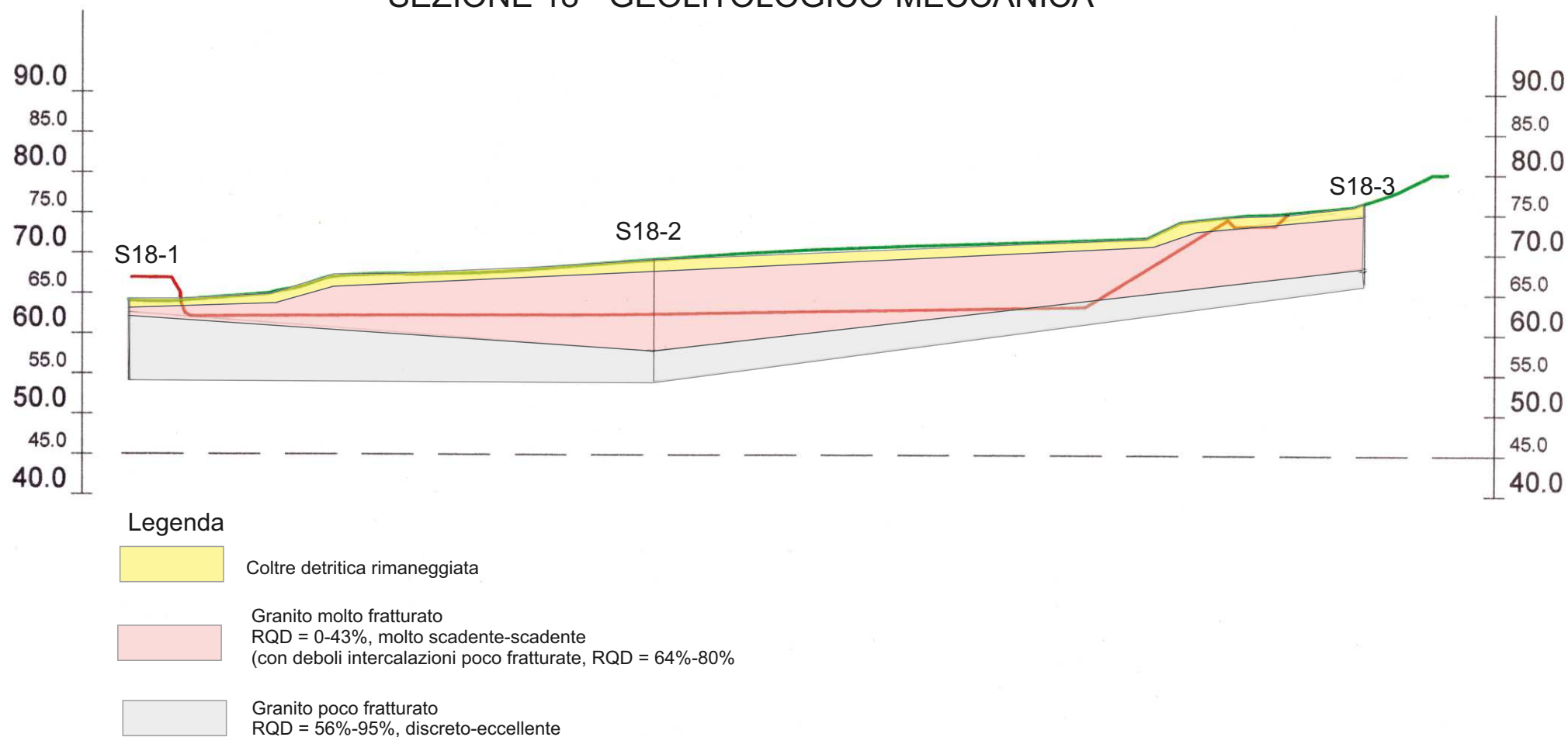


Figura n.18

SEZIONE 28 - GEOLITOLOGICO-MECCANICA

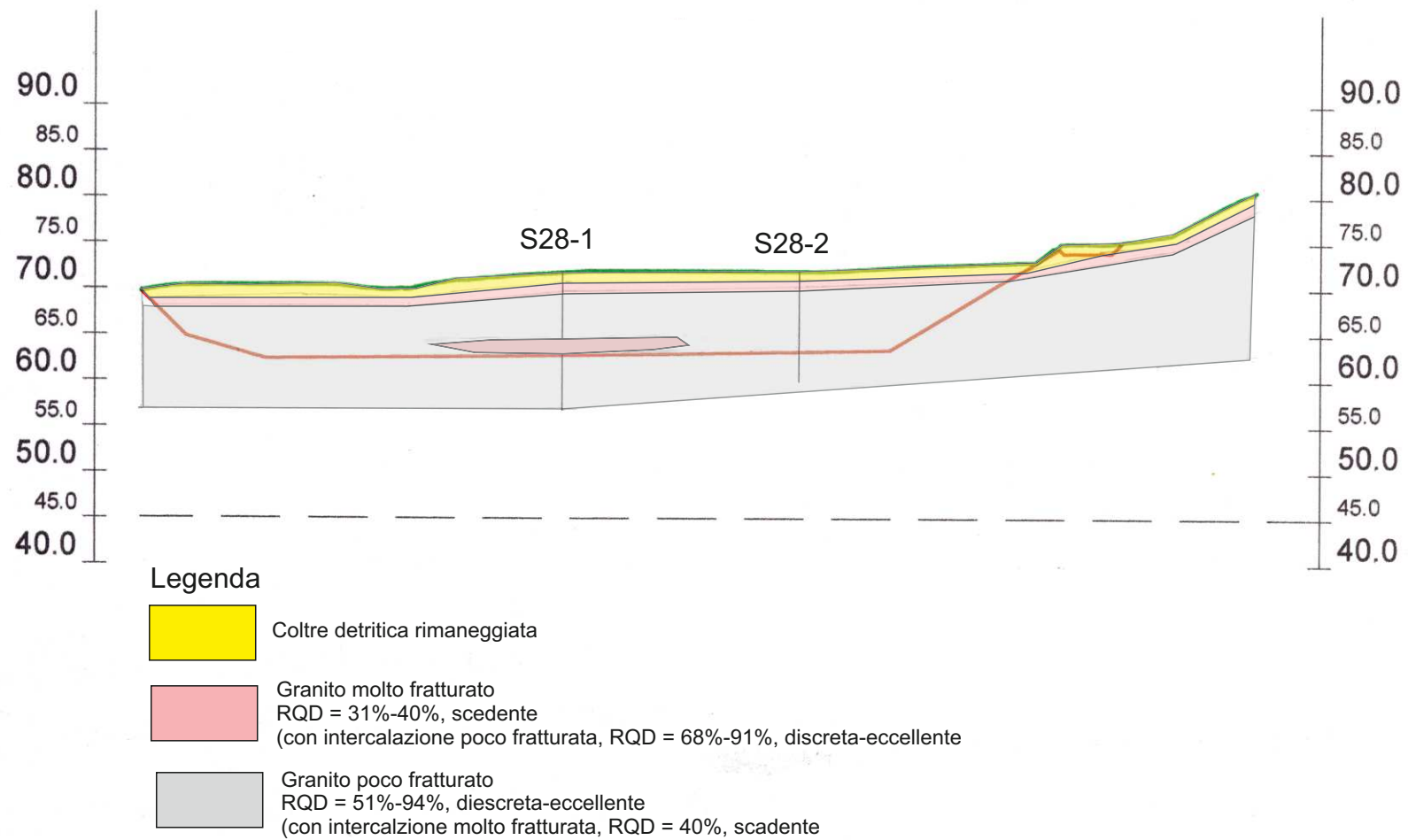


Figura n.19

12.9.3 Indirizzi concettuali per la individuazione dei presidi idraulici destinati alla tutela ambientale

Rilevato che la circolazione idrica sotterranea presente nel sito è irrilevante sotto il profilo quantitativo ed è **estremamente vulnerabile sotto il profilo qualitativo** data la sua superficialità e l'assenza di protezione naturale di tipo idrogeologico, si procede ad individuare gli interventi atti, se non ad eliminarla del tutto, a ridurre drasticamente, già nell'area a monte della discarica, la esigua quantità di acqua di infiltrazione che alimenta la circolazione idrica sotterranea nell'area di interesse.

Per la individuazione degli interventi più razionali ai fini di cui sopra, si ricorda che le **acque di ruscellamento** superficiale (da 63 a 104 mm/a) **sono per l'80% localizzate negli alvei dei due fossi longitudinali** che drenano il pendio a monte del sito destinato a discarica e che le **acque di infiltrazione** (da ~ 6 a 10 mm/a), circolanti soprattutto nella coltre detritica superficiale e in misura minore nella parte alta dei graniti alterati e fratturati, sono **anch'esse localizzate per il 70 ÷ 80% nei litotipi costituenti il substrato degli alvei dei due già citati fossi** ubicati sul versante.

Pertanto, onde ridurre l'afflusso, nell'ambito dell'attuale area spianata su cui realizzare la discarica, sia delle acque ruscellanti in superficie sia delle acque di infiltrazione circolanti in sottterraneo, **occorrerà realizzare** sul versante, immediatamente a monte dell'area destinata a discarica, **un canale trasversale al pendio stesso**, di sezione idonea a **raccogliere ed a convogliare a valle del nuovo impianto tutte le acque come sopra individuate**.

La profondità del canale, che si prevede pari a 2.50 m, dovrà essere tale da **pervenire ai graniti di base**, a seguito dell'**asportazione delle coltri detritiche** di superficie; in corrispondenza degli alvei dei due fossi, stante il maggior spessore delle coltri detritiche presenti, sarà necessario attingere **profondità superiori, probabilmente fino a 3.00 ÷ 3.50 m**.

Con l'intervento proposto **la circolazione idrica sotterranea nell'area della discarica si ridurrà a percentuali davvero irrisorie**, considerando anche che l'attuale alimentazione e circolazione idrica sotterranea si ridurrà di circa il 20%, per effetto della impermeabilizzazione dell'area del nuovo impianto.

La canalizzazione di cui sopra si estenderà per **l'intero perimetro dell'area** del nuovo impianto.

Sintetizzando sul punto, **la canalizzazione proposta dovrà essere in grado di smaltire le acque ruscellanti in superficie e le acque di infiltrazione, costituenti il deflusso idrico globale**, che per il bacino in esame assume un valore $D = 63 \div 104\% \text{ mm/a}$, a cui va sottratta l'aliquota competente all'area della discarica pari al 20%, per cui il **deflusso idrico globale a cui bisognerà far fronte con l'intervento proposto sarà pari a: $D = (63 \div 104) - 20\% = 50 \div 83 \text{ mm/a}$** di cui circa il 90% ($45 \div 75 \text{ mm/a}$) ruscellerà in superficie ed il restante 10% circa ($5 \div 8 \text{ mm/a}$) costituirà l'aliquota circolante in sotterraneo.

12.10 Rilievo geomeccanico e classificazione dell'ammasso roccioso

Al fine di fornire i parametri utili per caratterizzare i litotipi granitoidi, è stato effettuato un rilievo geomeccanico sulla scarpata che, al momento, delimita il piede del versante di Colle Lisandraggiu rispetto al ripiano destinato al nuovo impianto di smaltimento dei rifiuti non pericolosi.

La scarpata in questione è stata ottenuta abbattendo la roccia con l'utilizzo di esplosivi e mezzi meccanici.

Onde pervenire alla caratterizzazione dell'ammasso roccioso, sono state rilevate, sulla stazione prescelta, n.37 discontinuità, per ciascuna delle quali sono state individuate l'orientazione spaziale, le condizioni geostrutturali, le condizioni idrauliche e di resistenza delle discontinuità.

Per la definizione della qualità dell'ammasso roccioso viene utilizzato il metodo Bieniawsky (1989), basato sul rilievo di sei parametri, ad ognuno dei quali è assegnato un peso:

- R1, resistenza a compressione uniassiale della roccia;
- R2, indice RQD
- R3, spaziatura delle discontinuità;
- R4, condizione delle discontinuità;
- R5, condizioni idrauliche
- R6, orientamento delle discontinuità.

La classificazione definisce due valori dell'indice R.M.R.:

- $R.M.R._{base} = R1 + R2 + R3 + R4 + R5$
- $R.M.R._{corretto} = R.M.R._{base} + R6$

I parametri di resistenza ed elasticità sono dedotti dall' $R.M.R._{base}$:

- Coesione in termini di tensioni efficaci:
$$c' = 5 \cdot R.M.R._{base} \text{ (KPa)}$$
- Angolo d'attrito in termini di tensioni efficaci:
$$\varphi' = 5 + R.M.R._{base}/2 \text{ (}^\circ\text{)}$$
- Modulo di deformabilità:
 - Relazione di Bieniawsky (1978)
$$E_d = 2 R.M.R._{base} - 100 \text{ (Gpa) con } R.M.R._{base} > 50$$
 - Relazione di Serafim e Pereira (1983)
$$E_d = 10 E (R.M.R._{base} - 10/40) \text{ (Gpa) con } R.M.R._{base} < 50.$$

Sui seguenti parametri di ingresso, mediati in corrispondenza di misurazioni effettuate in campo sul complesso granitico fratturato e mediamente alterato, si applicano i coefficienti numerici previsti dalla procedura, ottenendo i risultati seguenti:

**Tabella n.22 – Parametri per la classificazione dell’ammasso roccioso
(Bieniawsky, 1989)**

PARAMETRI		COEFFICIENTE NUMERICO
R1	Indice di resistenza al PLT Is(50) (MPa) = 1.51 MPa (media di n.8 misure)	4
R2	RQD (%) Media pesata RQD per ciascun sondaggio = 61.11%	10
R3	Spaziatura discontinuità (mm): 60 ÷ 200 mm	8
R4	Condizioni delle discontinuità: 10 ÷ 20	17
R5	Condizioni idrauliche della roccia a luoghi umida: 10	10
Totale coefficienti numerici		49

Il punteggio di qualità attribuito all’ammasso granitico esaminato risulta, pertanto, pari a **RMR = 49** a cui corrisponde la seguente classe di qualità della roccia:

- Classe della roccia: III
- Descrizione: mediocre

ed i seguenti parametri meccanici:

- Coesione efficace: $c' = \text{RMR} \cdot 0.05 = 49 \cdot 0.005 = 0.25 \text{ MPa}$
- Angolo d’attrito efficace: $\varphi' = 5 + 0.5 \text{ RMR} = 5 + 0.5 \cdot 49 = 30^\circ$
- Modulo di deformabilità: $E_d = 10E(\text{RMR} - 10/40) = 10^{0.975} = 9.44 \text{ Gpa}$

Si riportano di seguito (tabella n.23) i valori di inclinazione ed immersione delle discontinuità misurate in campo e le relative proiezioni stereografiche utilizzate per la valutazione della stabilità della scarpata di progetto.

Tabella n.23 – Orientazione delle discontinuità

RILIEVO DELLE DISCONTINUITA'		
1	286	32
2	303	39
3	25	48
4	47	28
5	71	26
6	151	27
7	327	32
8	264	38
9	253	40
10	249	55
11	277	48
12	62	36
13	320	10
14	246	48
15	347	60
16	135	63
17	105	70
18	140	53
19	130	57
20	133	50
21	299	57
22	118	50
23	129	51
24	296	90
25	252	79
26	281	86
27	287	85
28	244	60
29	70	40
30	307	72
31	284	76
32	224	57
33	214	54
34	216	56
35	181	75
36	266	63
37	32	38

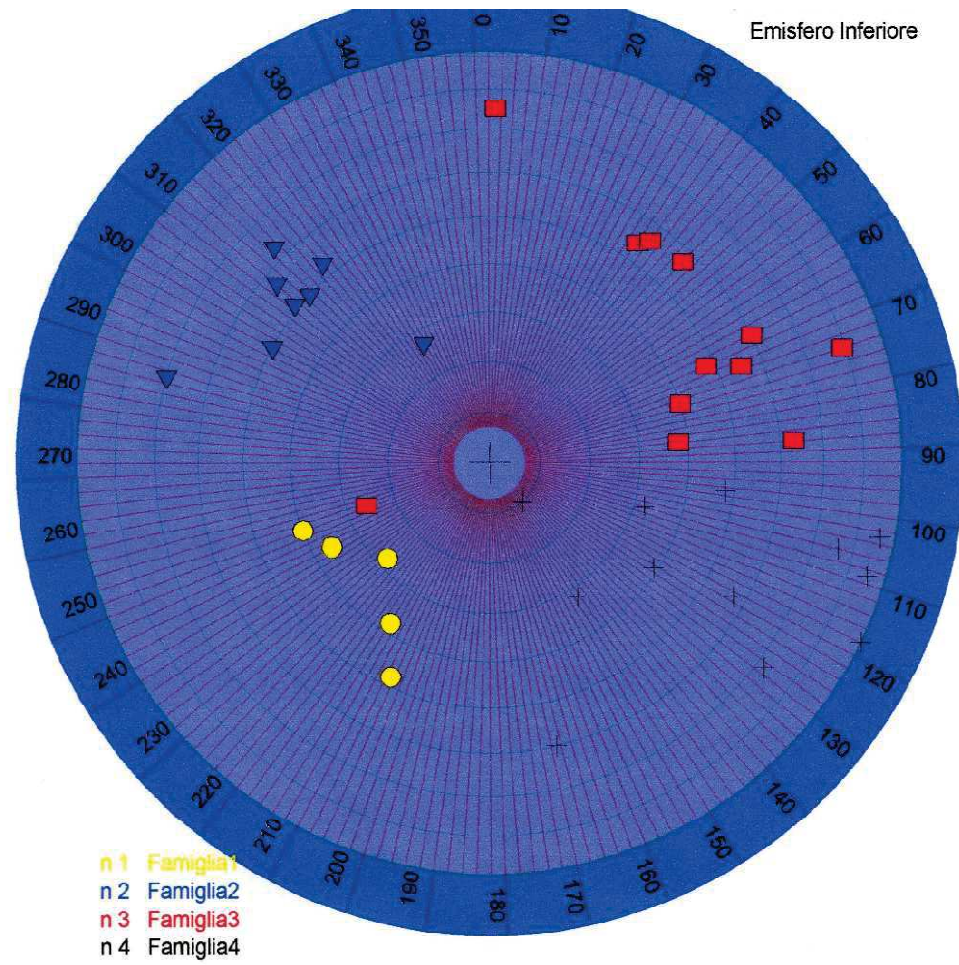


Fig. n.20 – Poli di discontinuità in proiezione polare

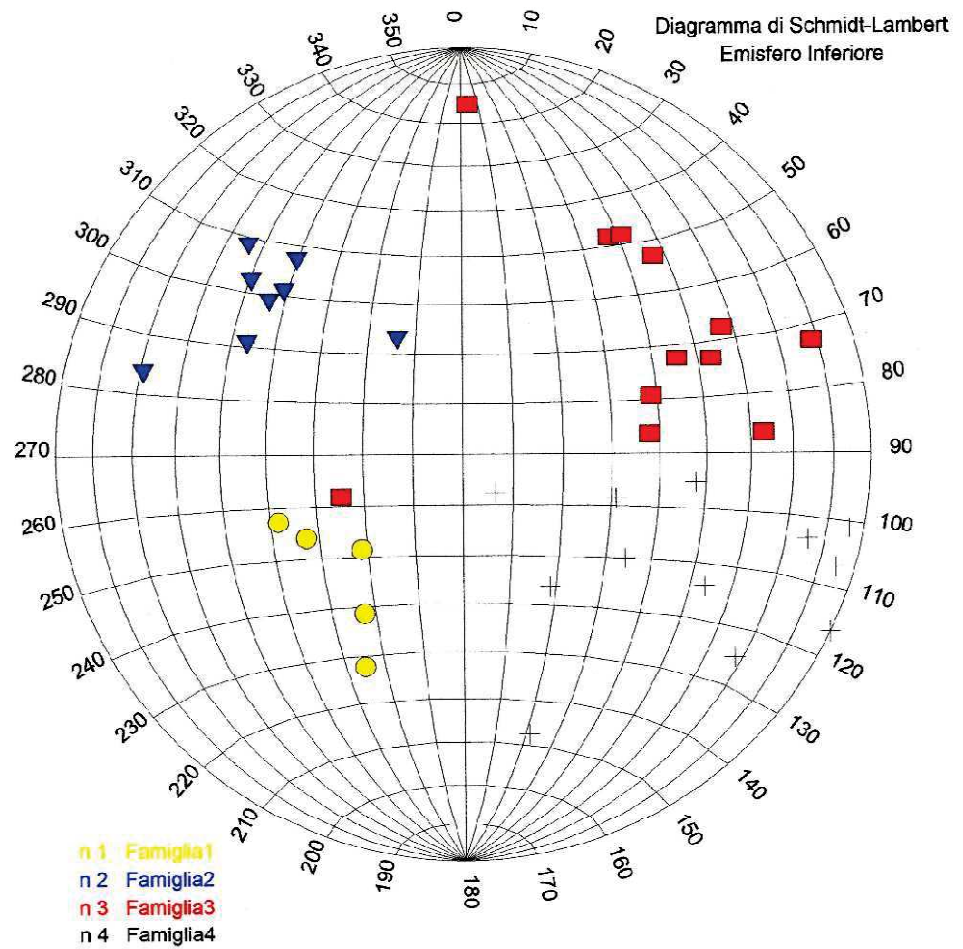


Fig. n.21 – Poli di discontinuità in proiezione equatoriale

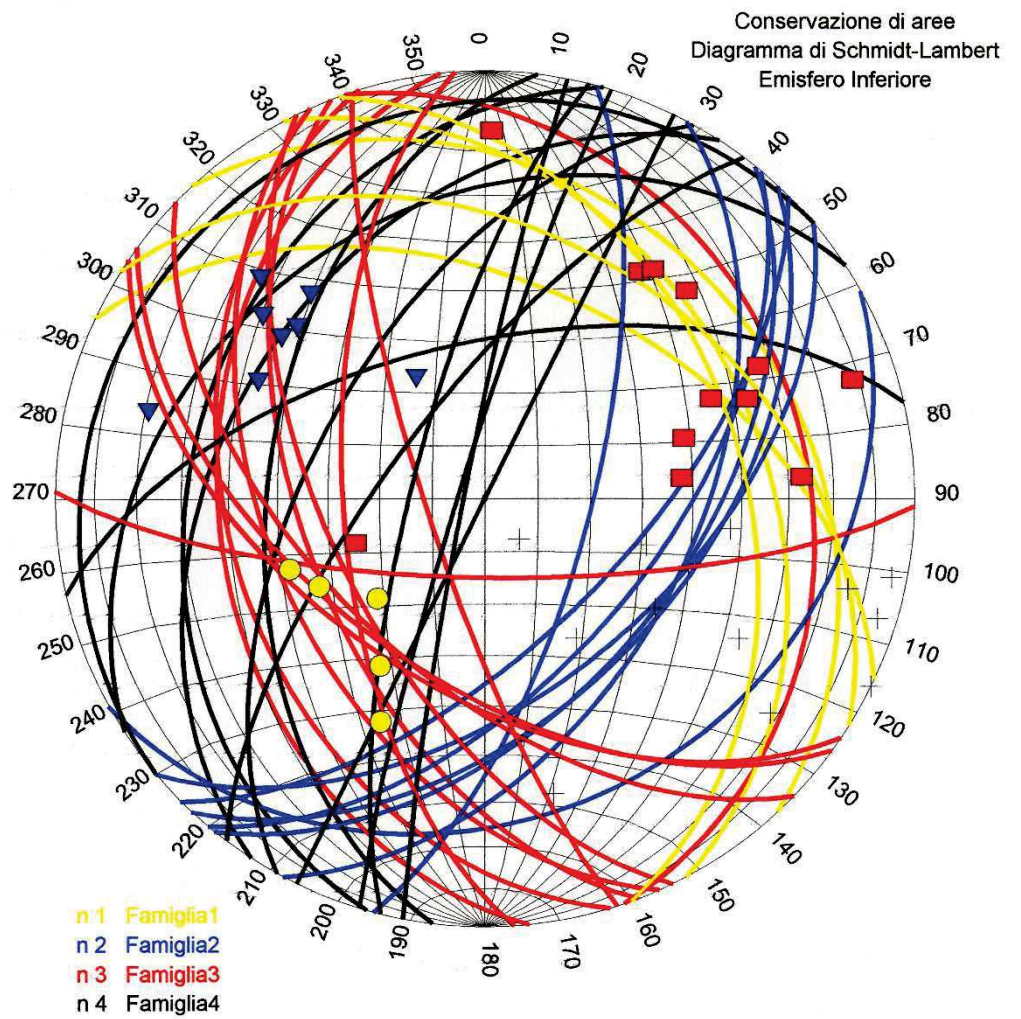


Fig. n.22 – Piani e poli di discontinuità in proiezione equatoriale

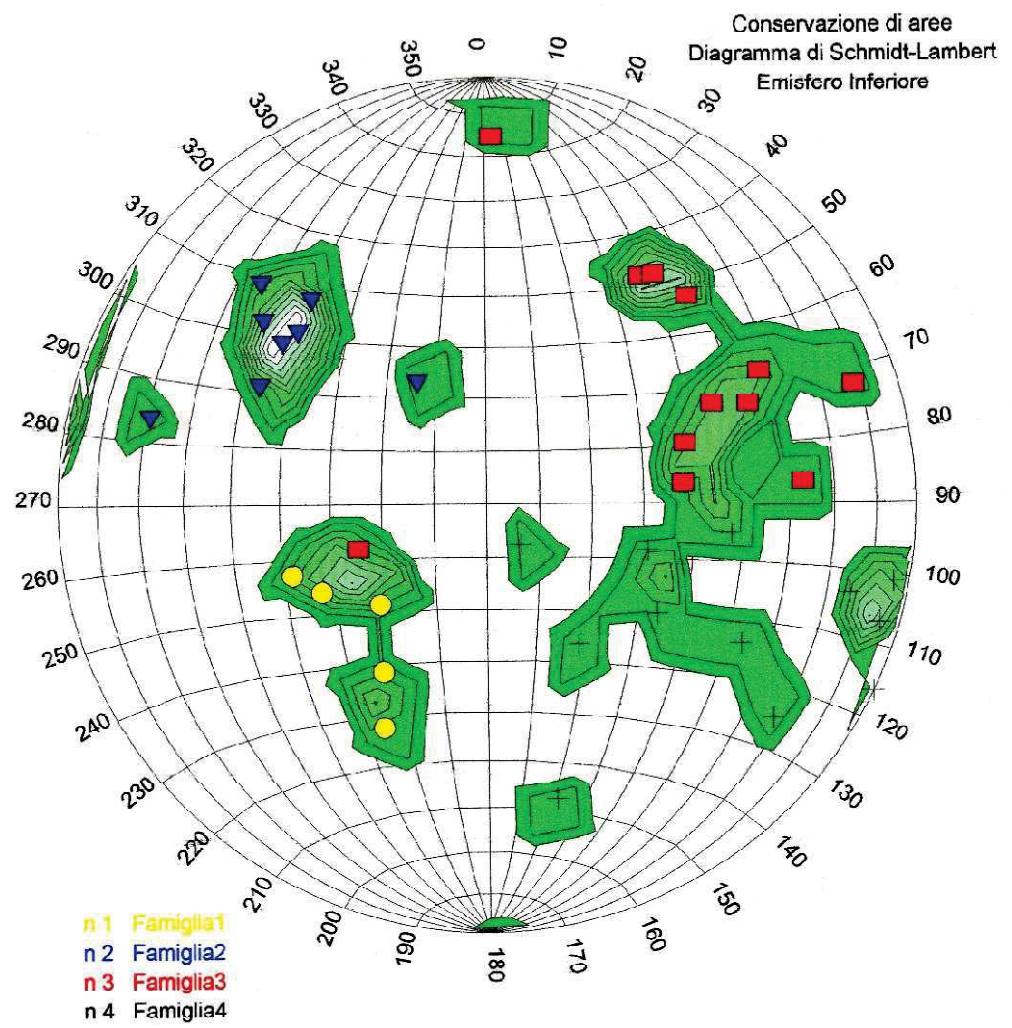


Fig. n.23 – Aree di isofrequenze di poli in proiezione equatoriale

Si precisa che la classificazione meccanica dell'ammasso roccioso di cui sopra deriva da osservazioni di campagna eseguite nel periodo invernale, caratterizzato da piogge frequenti, che hanno notevolmente influenzato il coefficiente numerico attribuito al parametro R5, conferendo alla classe della roccia un coefficiente numerico eccessivamente cautelativo; da cui, altrettanto cautelativi risultano essere i parametri di resistenza e di elasticità dell'ammasso roccioso.

Benevento, maggio 2016

Prof. geol. Pietro Antonio De Paola



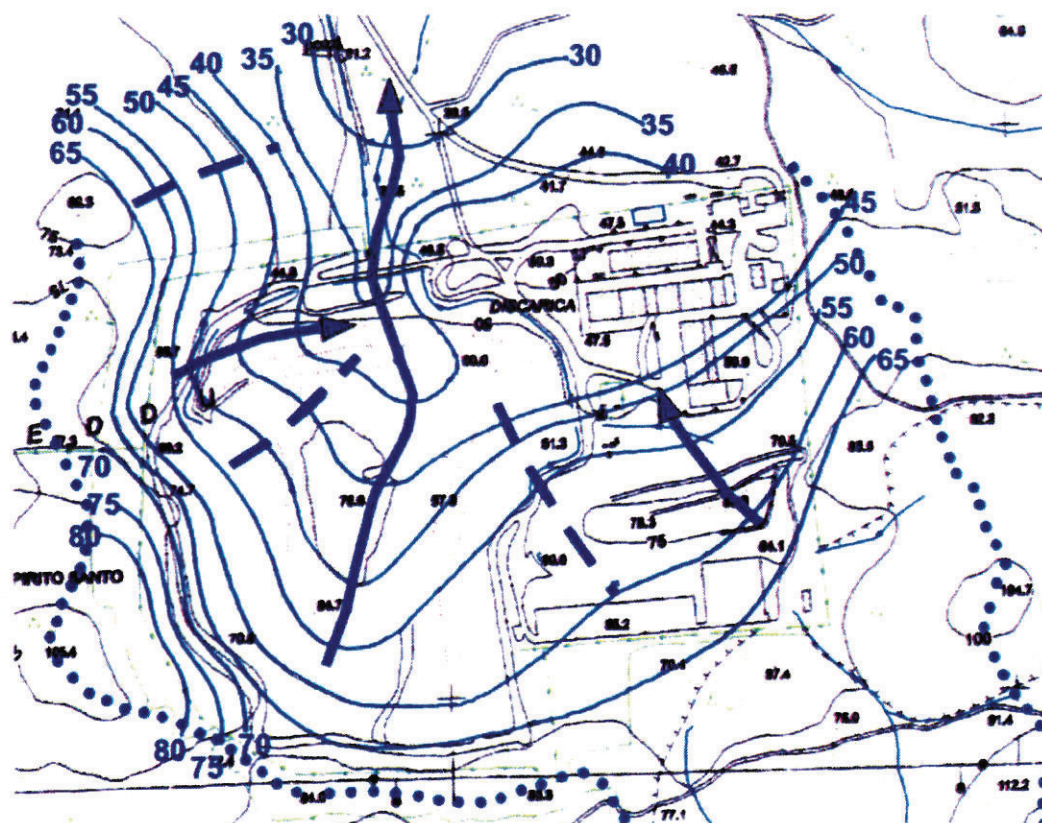


Città di Olbia
Settore Ambiente



GALLURA
Settore Progettazione e
Direzione dei lavori

LA MODELLAZIONE IDROGEOLOGICA DEL SITO DI OLBIA-SPIRITU SANTU DAI PARAMETRI SPERIMENTALI DI STUDI PREGRESSI (2005-2013)



De Paola 2014

	REV.	DATA	DESCRIZIONE
CONSULENTE: Prof. PIETRO ANTONIO DE PAOLA	00	13.06.2014	Prima emissione
	01	23.06.2014	Seconda emissione
	02	07.07.2014	Terza emissione

INDICE

1. INTRODUZIONE	pag. 1
2. SINTESI DELLA RELAZIONE VIVARELLI	pag. 3
2.1 La "Relazione tecnica descrittiva"	pag. 3
2.1.1. Capitolo 1 – "Premessa"	pag. 3
2.1.2 Capitolo 2 – "Norme di riferimento"	pag. 4
2.1.3 Capitolo 3 – "Inquadramento dell'area in esame"	pag. 5
2.1.4 Capitolo 4 – "Caratteristiche geologiche, idrogeologiche e climatologiche"	pag. 8
2.1.4.1 Inquadramento geologico	pag. 8
2.1.4.2 Inquadramento idrogeologico	pag. 10
2.2.4.3 Climatologia	pag. 13
2.1.5 Capitolo 5 – "Indagini preliminari svolte in situ"	pag. 13
2.1.5.1 Articolazione e tipologia delle indagini	pag. 13
2.1.5.2 Esiti dei sondaggi geognostici	pag. 15
2.1.5.3 Esiti indagini idrogeologiche	pag. 27
2.1.5.4 Esiti analisi dei terreni	pag. 41
2.1.5.5. Esiti analisi delle acque superficiali, di falda, del percolato	pag. 46
2.1.5.5.a) Ubicazione punti di prelievo	pag. 46
2.1.5.5.b) Analisi acque superficiali	pag. 49
2.1.5.5.c) Analisi acque di falda	pag. 53
2.1.5.5.d) Analisi del percolato	pag. 55
2.1.5.6 Analisi dei rifiuti	pag. 71
2.1.5.7 Analisi gas interstiziali	pag. 72
2.1.6 Capitolo 6 – "Formulazione del modello concettuale"	pag. 73
2.1.7 Capitolo 7 – "Sintesi conclusiva"	pag. 73
2.1.8 Allegati alla Relazione	pag. 74
3. SINTESI DELLA RELAZIONE DE PAOLA	pag. 76
3.1 Partizione della Relazione	pag. 76
3.2 Parte prima – Analisi delle risultanze pregresse	pag. 76
3.3 Parte seconda – Risultanze e deduzioni della campagna indagini geofisiche 2013	pag. 85
3.4 Parte terza – Definizione del quadro conoscitivo idrogeologico, bilancio idrogeologico e osservazioni conclusive	pag. 102
4. ULTERIORI CONTRIBUTI PER LA DEFINIZIONE DEL MODELLO CONCETTUALE DEL SITO (MCS)	pag. 110
4.1 Diffusione degli inquinanti nell'area	pag. 110
4.1.1 Moti dell'acqua nel sottosuolo	pag. 110
4.1.2 Moti dell'atmosfera: i venti	pag. 118
4.1.3 Moti dell'acqua sul suolo	pag. 119
4.2 Immissioni secondarie di inquinanti nell'ambiente	pag. 121
4.2.1 Attività inceneritore (in disuso al 2005)	pag. 121
4.2.2 Movimentazione degli autocompattatori da e per i siti di stoccaggio e di lavaggio e di altre macchine operatrici	pag. 122
4.3 Prove sperimentali relative alla tenuta del fondo della discarica CIPNES	pag. 126
5. DEFINIZIONE DELL MODELLO IDROGEOLOGICO	pag. 129
5.1 Le fonti	pag. 129
5.2 Il modello di flusso e trasporto degli inquinanti nella Relazione Vorlicek-2008	pag. 130
5.3 La trincea drenante e le prove di emungimento nella Relazione Integrativa Calderaro-2012	pag. 130
5.4 La progettazione della barriera idraulica a monte della discarica comunale	pag. 131
5.5 La Relazione Vivarelli-2005 e la Relazione De Paola-2013: convergenze sul modello idrogeologico	pag. 132
6. IL MODELLO IDROGEOLOGICO	pag. 137

1. INTRODUZIONE

In data Aprile 2014, il CIPNES “Gallura”, con sede ad Olbia (OT), attuale gestore del Complesso IPPC, ubicato in località Spiritu Santu del Comune di Olbia e destinato al trattamento ed allo smaltimento dei RSU/RS del sub-ambito D2 della provincia di Olbia Tempio, ha conferito allo scrivente incarico professionale nei termini di seguito trascritti.

“ Si specifica che lo studio oggetto dell’affidamento, considerata la rimarcata affinità dello studio eseguito nel 2013, per conto del CIPNES – Gallura con lo studio idrogeologico messo a punto nel 2005, in ambito di Piano di caratterizzazione della discarica comunale (regolarmente approvato dagli Enti competenti) per conto del Comune di Olbia, dovrà rendere organici i n.2 studi in parola, al fine di costituire, dall’analisi dei risultati ottenuti dagli stessi, il modello idrogeologico del sito di Spiritu Santu (Olbia).

Dai due studi pregressi si evincono, infatti, informazioni concordanti sull’assetto idrogeologico dell’area, nonché circa la mancata evidenza della presenza di una falda idrica profonda “sensu stricto”.

Pertanto, viste le affinità interpretative succitate, appare opportuno procedere ad un riesame, comparazione ed integrazione dello studio del Comune di Olbia (anno 2005) con lo studio del

CIPNES Gallura (anno 2013) nonché ad una più approfondita e critica interpretazione delle prove ed analisi eseguite nell'area; in particolare delle prove di emungimento, delle prove di permeabilità e delle prove idro-chimiche, in quanto da ritenersi prove sperimentali dirimenti dell'assetto idrogeologico “.

Si precisa, infine, che lo studio prodotto dal Comune di Olbia, con titolo “Piano di caratterizzazione della “Vecchia Discarica” località Spiritu Santu – Olbia”, risulta redatto, in data 29/07/2005, dal Gruppo di Progettazione facente capo al dott. ing. Danilo Vivarelli con sede ad Imola (BO), mentre lo studio prodotto dal CIPNES “Gallura”, con titolo “*Indagini geoelettriche 2013 nel quadro degli studi precedenti e reinterpretazione del modello idrogeologico*”, è stato redatto dallo scrivente, con sede a Benevento, in data 11 ottobre 2013.

In prosieguo i due citati elaborati tecnici, per comodità espositiva, verranno rispettivamente indicati come Relazione Vivarelli e Relazione De Paola .

2. – LA RELAZIONE VIVARELLI

La Relazione Vivarelli è costituita dai seguenti elaborati:

1. *Relazione tecnica descrittiva*
2. *Allegati*
3. *Tavole*

Se ne descrivono, di seguito e sinteticamente, i contenuti e gli aspetti salienti e peculiari, successivamente ripresi, discussi e correlati con i principali parametri della Relazione De Paola ai fini della modellazione idrogeologica del sito.

2.1 La “Relazione tecnica descrittiva”

E' articolata su sette capitoli, così titolati:

- 1 – Premessa
- 2 – Norme di riferimento
- 3 – Inquadramento dell'area in esame
- 4 – caratteristiche geologiche, idrogeologiche e inquadramento climatologico
- 5 – Indagini preliminari svolte in situ
- 6 – Formulazione del modello concettuale
- 7 – Sintesi conclusiva

2.1.1 Capitolo 1: “Premessa”

In questo capitolo si riferisce che la discarica comunale è stata inquadrata nel “*Piano regionale di gestione dei rifiuti – Piano di bonifica siti*”

inquinati", redatto dalla Regione Autonoma della Sardegna nel 2003, come *"sito potenzialmente inquinato"* e, quindi, assoggettato alla normativa nazionale all'epoca vigente.

Quest'ultima viene individuata nel D.M. n.471/1999, il quale definisce i tre livelli di progettazione costituenti il *"Progetto di Bonifica"*, cioè il *"Piano di Caratterizzazione"*, il *"Progetto Preliminare"*, il *"Progetto Definitivo"*.

Lo studio in esame si identifica con il *"Piano di Caratterizzazione"*, prima fase conoscitiva del *"Progetto di Bonifica"*.

Si chiarisce che il Comune di Olbia, avendo avuto nel 2005 *"segnalazioni sulla presenza di percolato"*, ha conferito incarico all'ing. Vivarelli per la predisposizione di un piano di lavoro relativo alla *"investigazione iniziale per la determinazione dello stato ambientale del sito"*.

Tale investigazione costituisce, in definitiva, la principale fonte conoscitiva del piano di caratterizzazione del sito.

Il capitolo si chiude con un elenco della documentazione raccolta ed elaborata e di quella allegata.

2.1.2 Capitolo 2: "Norme di riferimento"

Si riportano ivi i titoli delle norme ed i relativi articoli di interesse all'epoca vigenti, così riassumibili:

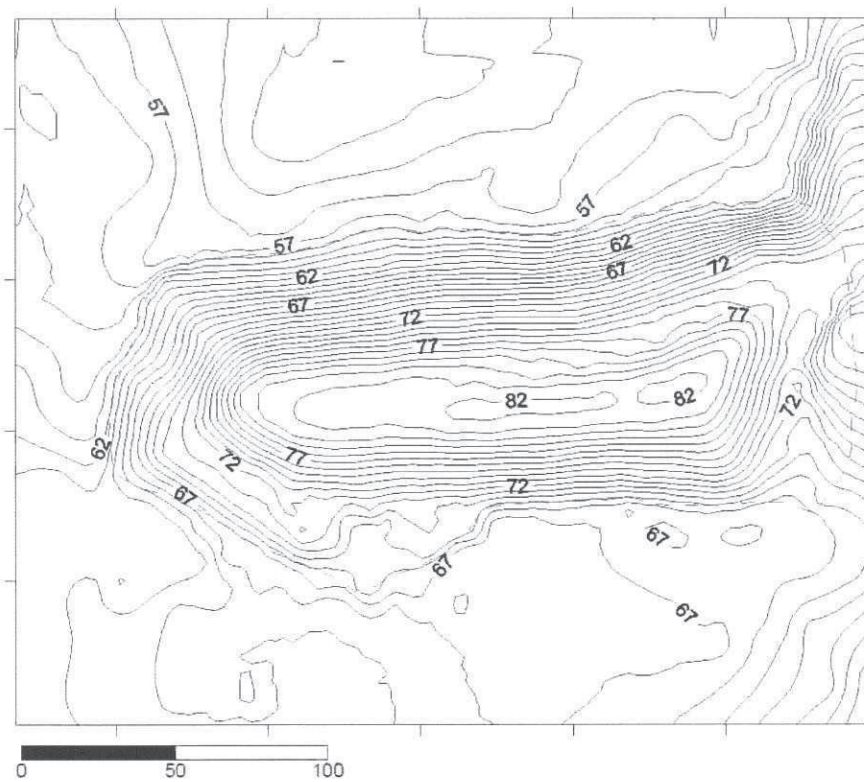
- D. L.vo n. 22/1997, "Attuazione delle Direttive 91/156 sui rifiuti, 91/689 sui rifiuti pericolosi e 94/62 sugli imballaggi";
- D.M. n. 471/1999, "Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi del D.Lvo n.22/1997 e smi:
 - artt. 2, 3, 4

- Titoli degli Allegati 1, 2, 3, 4, 5.

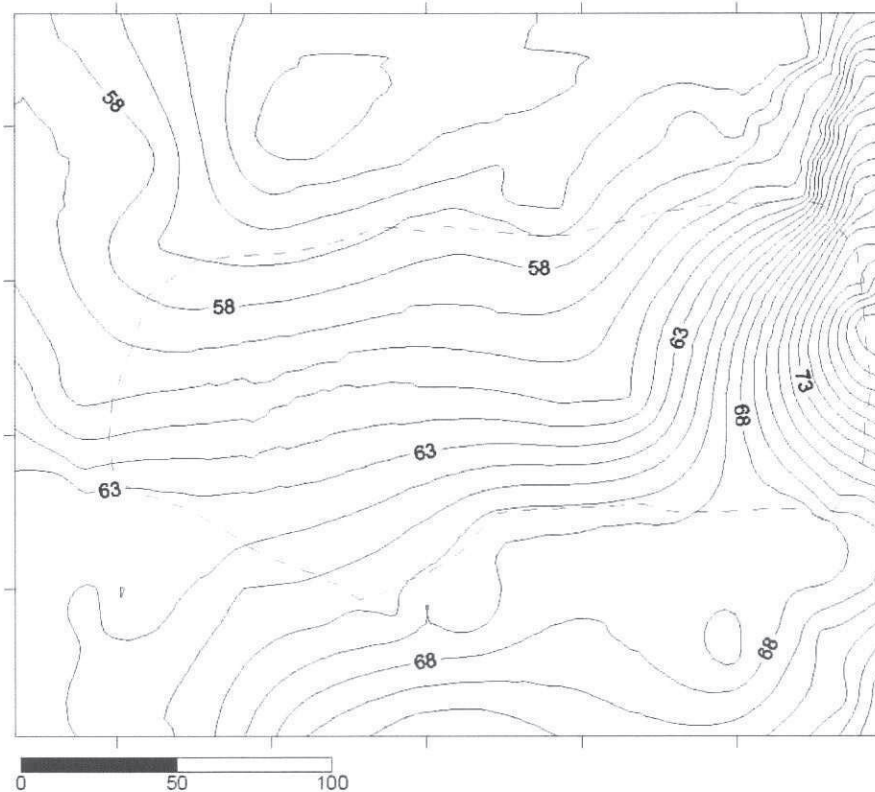
2.1.3 Capitolo 3: "Inquadramento dell'area in esame"

In questo capitolo vengono descritte le caratteristiche geografiche (inquadramento territoriale) del sito di interesse, l'area e la distribuzione degli impianti di trattamento e smaltimento dei rifiuti, le caratteristiche della discarica comunale sotto l'aspetto planimetrico (lato maggiore E-W pari a circa 230.00 m, lato minore N-S pari a circa 100.00 m, superficie occupata dalla discarica pari a 23'063 mq), altimetrico (lato nord a quota media di 57.00 m/lm, lato sud a quota media di 66.00 m/lm, coronamento a quota massima di 82.00 m/lm), volumetrico (volume discarica pari a 222'269.00 mc).

Di interesse lo stralcio topografico dell'attuale superficie della discarica e la ricostruzione topografica del fondo della discarica.



Topografia attuale – vista planimetrica



Ricostruzione topografia del fondo – vista planimetrica

Nel successivo paragrafo, intitolato “Descrizioni visive”, viene evidenziata e documentata fotograficamente ***una pozza d’acqua***, ubicata immediatamente a valle della discarica sul lato nord, ***nella quale è stata accertata sperimentalmente la presenza di percolato***.



Pozza d'acqua al piede della discarica

Segue un ultimo paragrafo dedicato alla “Ricostruzione storica e analisi degli utilizzi del sito”, nel quale si rileva come in origine il sito fosse destinato ad allevamento di bestiame nell’ambito di un’azienda agricola e che la coltivazione della discarica abbia avuto inizio nel 1981 e fine nel 1991, anno in cui è documentata l’entrata in esercizio della nuova discarica controllata, con l’autorizzazione provvisoria regionale del 31 maggio 1991.

2.1.4 Capitolo 4 “Caratteristiche geologiche, idrogeologiche e inquadramento climatologico

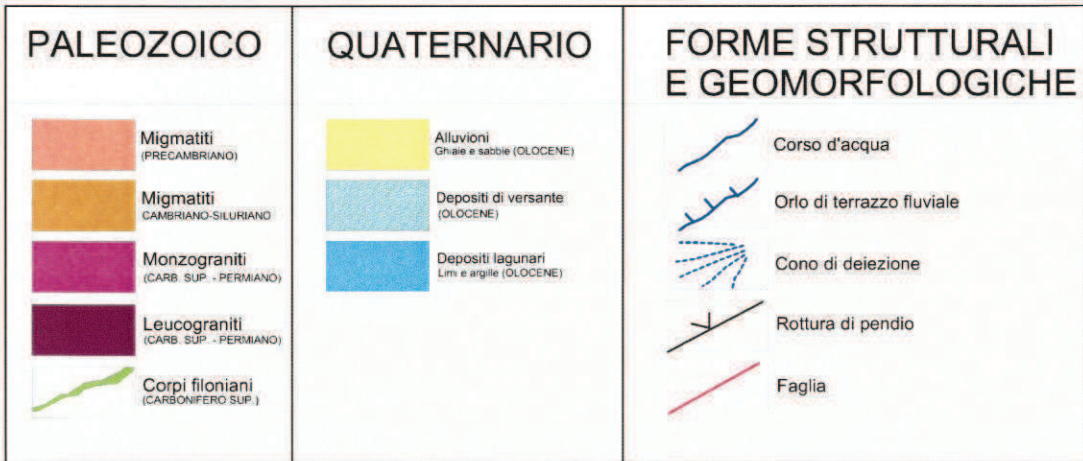
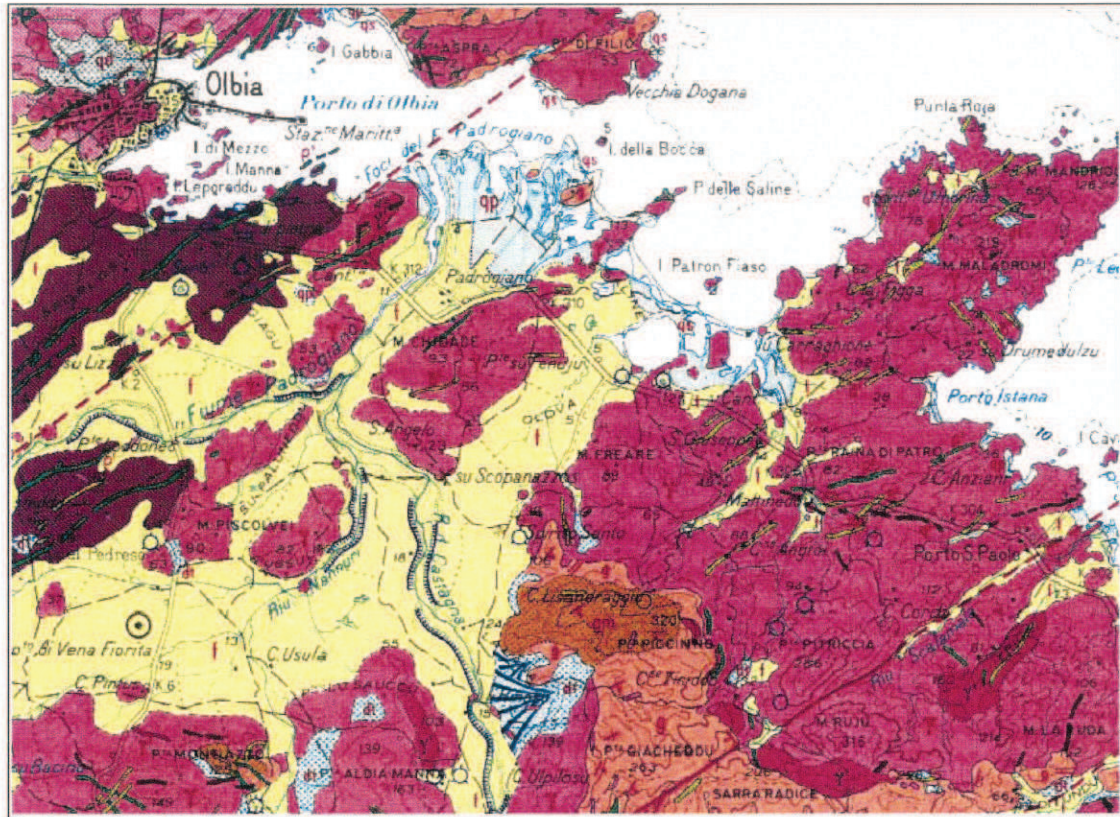
2.1.4.1 Inquadramento geologico

Le caratteristiche geologiche ivi illustrate si rifanno correttamente a quelle contemplate nella letteratura scientifica dell'epoca.

Nel ristretto ambito dell'area degli impianti affiorano esclusivamente monzograniti equigranulari, datati Carbonifero-Permiano, su cui poggiano in discordanza, soprattutto lungo le linee di impluvio, deboli coltri oloceniche di sedimenti sciolti colluviali e alluvionali; altrove ed in linea generale si osserva la presenza in affioramento di una coltre sabbioso-limosa a luoghi argillosa, generata dall'alterazione e dalla degradazione dei graniti.

All'esterno dell'area degli impianti, verso W e N-W si rilevano le alluvioni oloceniche ciottolose e limo-sabbiose di origine torrentizia e fluviale, mentre sul versante posto immediatamente a S dell'area impianti affiorano le migmatiti pre-cambriane e cambriano-siluriane.

Tanto si rileva dall'allegato stralcio cartografico.



Si espongono, infine, i principali caratteri tettonico-strutturali come noti in letteratura, assumendo il basamento sardo come derivato dall'orogenesi ercinica con le sue deformazioni, metamorfismo e magmatismo effusivo ed intrusivo, con una evoluzione protrattasi per tutto il paleozoico.

Tra il Carbonifero superiore ed il Permiano si ha una lunga fase tettonica distensiva, a cui fanno capo, nei livelli strutturali più superficiali, zone di taglio distensivo e faglie dirette.

2.1.4.2 Inquadramento idrogeologico

Viene individuata la presenza di un acquifero costituito da una coltre di sabbione granitico e dalla parte superficiale del sottostante complesso granitico, maggiormente fessurato rispetto al substrato più integro.

A detto complesso viene attribuita una porosità efficace molto bassa, compresa tra lo 0.1 e il 2 %, mentre il soprastante sabbione granitico, più permeabile rispetto ai graniti fessurati, è caratterizzato da una permeabilità $k > 10^{-6}$ m/s.

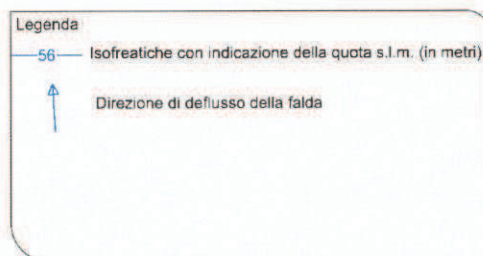
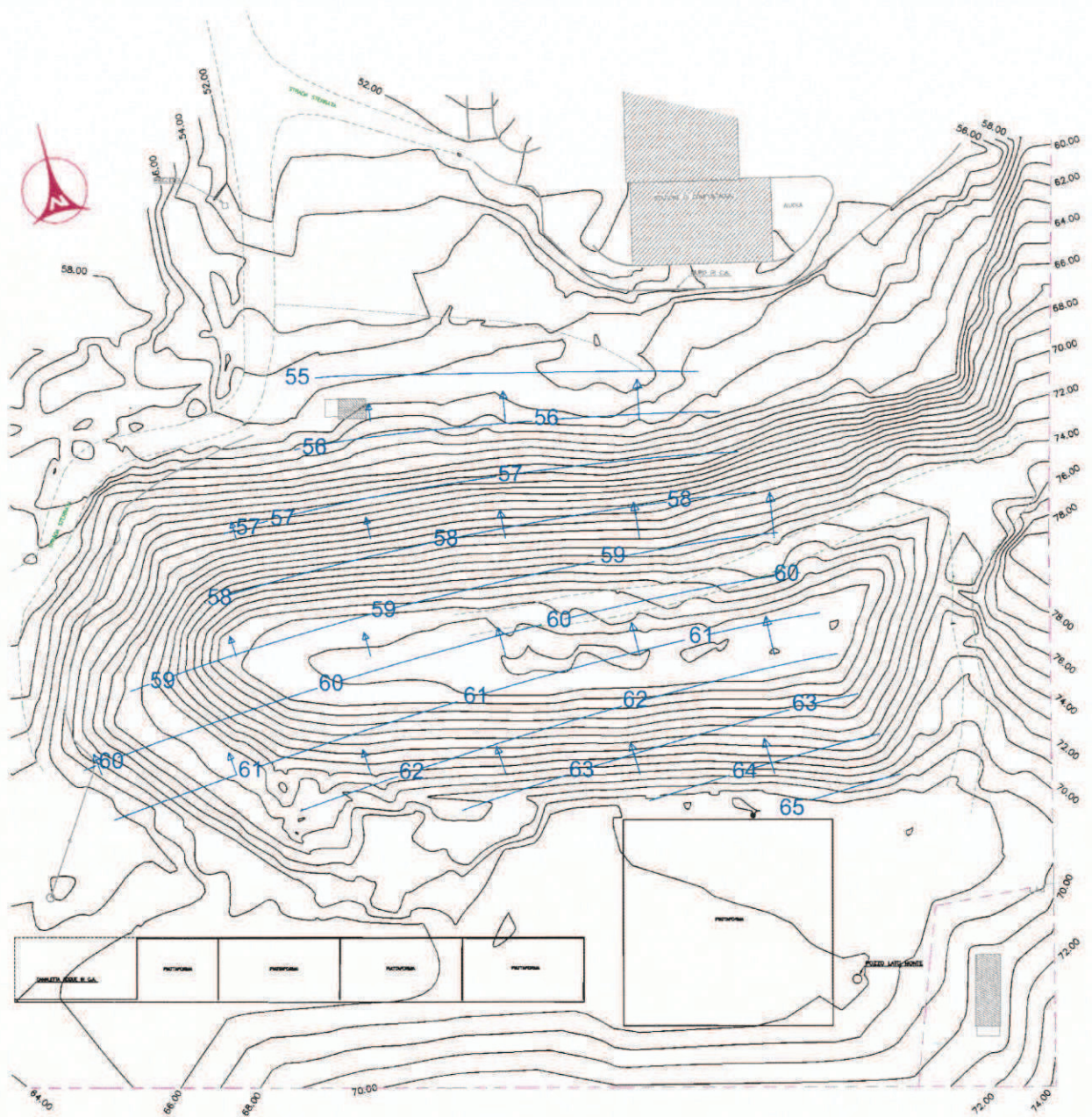
Le fessure, derivanti da fenomeni di decompressione e da sforzi tettonici, risultano più aperte nella parte alta dell'affioramento per minore carico litostatico.

L'affioramento granitico, soprattutto nella zona a monte della discarica, appare sottoposto ad una coltre di alterazione, dovuta a fenomeni termoclastici e caolinizzazione dello stesso ammasso granitico, costituita da un sabbione granitico comprendente anche una frazione argillosa.

Posto che l'acquifero viene identificato nella coltre di sabbione granitico e nella porzione alta e più fratturata del complesso granitico e che, per tale caratteristica, la circolazione idrica è relativamente superficiale, si rileva che *“la piezometrica si adatta alla morfologia esterna”, dando luogo alla “emergenza delle acque in modo diffuso (vedi il caso del percolato a valle in discarica e in altre zone nei pressi della discarica)”*.

Si procede, infine, alla ricostruzione della superficie piezometrica mediante restituzione cartografica dell'andamento delle isofreatiche nel territorio posto a N dell'area di interesse, basata sulla misurazione dei livelli piezometrici in nove pozzi, ubicati sino a 4.00 km a N della discarica, dei quali però non sono riportati dati significativi ai fini dell'attendibilità dell'andamento delle isofreatiche, quali stato di attività, condizionamento, profondità.

Compatibile con le caratteristiche geologiche, morfologiche e idrogeologiche del sito appare, invece, l'andamento delle isofreatiche nel più ristretto ambito della discarica comunale, di cui si riporta lo stralcio cartografico.



Carta delle isofreatiche

2.1.4.3 Climatologia

Nell'arco di tempo compreso tra il 1922 ed il 2005, quindi per 83 anni, è stata registrata una precipitazione media annuale di 570 mm.

In detto arco temporale è possibile distinguere due periodi caratterizzati da una diversa precipitazione media annuale.

Il primo periodo, compreso tra il 1922 ed il 1970, risulta essere più umido rispetto a quello successivo, compreso tra il 1970 ed il 2005, in quanto rispettivamente caratterizzati da precipitazioni medie annuali pari a 650 mm ed a 480 mm.

I dati termometrici sono invece disponibili dal 1927 al 2005, per complessivi 78 anni, e danno luogo ad una temperatura media annuale pari a 16.6°C.

Negli ultimi 35 anni (1970-2005) si è avuto un incremento della temperatura media annuale, che ha raggiunto un valore di 17°C.

Si evidenzia la correlazione esistente tra pioggia e temperature e quanto l'incremento della temperatura abbia influito sulla diminuzione delle precipitazioni nel periodo considerato.

2.1.5 Capitolo 5: “Indagini preliminari svolte in situ”

2.1.5.1 Articolazione delle indagini

Si sottolinea l'importanza di detto capitolo ai fini dello studio in corso in quanto espone con estremo dettaglio finalità, tecniche e specifiche di esecuzione dei sondaggi a carotaggio continuo e dei piezometri e loro condizionamento, tecniche e specifiche di campionamento, conservazione ed analisi (affidate a laboratori accreditati) di terreni, delle acque superficiali e di falda, del percolato, dei rifiuti presenti in discarica, dei gas interstiziali, prove di permeabilità mediante

edometro e prove dirette Lugeon, indagini geoelettriche: tutto secondo tecniche standard e nel rispetto delle norme vigenti, in particolare del D.M. 471/1999.

Si tratta, in definitiva, di un complesso di indagini in sito ed in laboratorio qualitativamente buono, non completamente esaustivo solo per taluni dettagli di tipo quantitativo, quali profondità dei sondaggi a carotaggio continuo e dei SEV, numero delle prove di Lugeon o delle permeabilità edometriche.

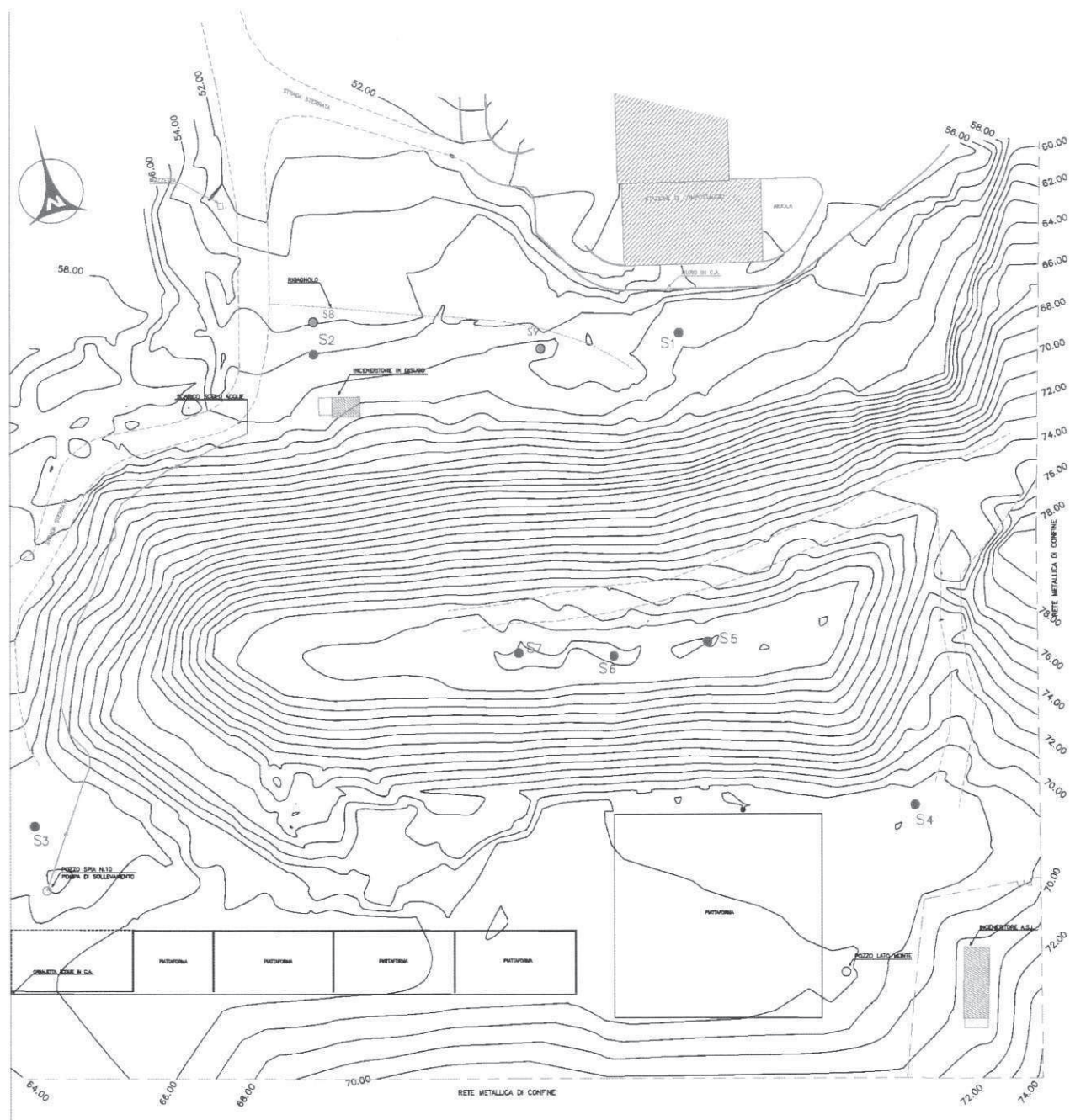
In sintesi, le indagini svolte sono le seguenti:

- Indagine geoelettrica mediante n.4 SEV;
- Esecuzione di n.9 sondaggi a carotaggio continuo, di cui i primi 4 (S1, S2, S3, S4) spinti sino a 10.00 m dal p.c. nel complesso granitico, i successivi n.3 (S5, S6, S7) spinti sino a 21.00 m, dal p.c. nel corpo della discarica, i restanti n.2 (S8, S9) spinti ad 8.00 m dal p.c. nel complesso granitico.
- Installazione di n.7 piezometri a tubo aperto nei fori di sondaggio come sopra individuati.
- Prelievo di n.9 campioni di terreno così distinti:
 - N.2 campioni indisturbati estratti nei terreni di fondo della discarica dai sondaggi S6 e S7 per determinare il coefficiente di permeabilità edometrica;
 - N.5 campioni rimaneggiati dai sondaggi S3 e S4 per determinare la presenza di eventuali inquinanti nei terreni circostanti la discarica;
 - N.2 campioni rimaneggiati dei terreni sottostanti la discarica, prelevati dai sondaggi S6 e S7, per valutarne l'eventuale contaminazione.
- Prelievo ed analisi di n.4 campioni di acqua della falda freatica dai piezometri P1, P2, P3, P4;

- Prelievo ed analisi di n.6 campioni di acqua superficiale (rete di scolo, ristagni in superficie, ecc.);
- Prelievo di n.3 campioni di percolato dai piezometri P5, P6, P7, installati nel corpo della discarica;
- Prelievo di n.9 campioni di rifiuti dai sondaggi S5, S6, S7 per definirne il grado di mineralizzazione;
- Prelievo di n.6 campioni di aria interstiziale lungo le verticali dei sondaggi S6 e S7 ubicati sul corpo discarica;
- Esecuzioni di n.3 prove Lugeon lungo le verticali dei sondaggi S8 ed S9 (ubicati nei pressi dei sondaggi S1 ed S2) per definire il coefficiente di permeabilità K dell'ammasso granitico fratturato.

2.1.5.2 Esiti dei sondaggi geognostici

L'ubicazione dei n.9 sondaggi geognostici a carotaggio continuo è rilevabile dalla allegata planimetria; di questi, n.3 (S5, S6, S7) sono stati eseguiti sul corpo discarica ed i restanti n.6 (S1, S2, S3, S4, S8, S9) nell'affiorante complesso granitico.



Legenda

- Ubicazione Sondaggi
- Ubicazione Sondaggi Prove Lugeon

I sondaggi S5, S6, S7 hanno evidenziato la pila di rifiuti, per uno spessore di circa 20.00 metri, coperta da terreni di riporto per spessori compresi tra 0.50 e 0.20 m e sigillata alla base da uno strato di “argilla limoso-sabbiosa” per spessori compresi tra 0.50 e 0.60 m.

I sondaggi in esame risultano attrezzati con piezometri a tubo aperto.

Di seguito si allegano le colonne stratigrafiche.

Comittente: Comune di Olbia		Profondità raggiunta 21 m	Quota Ass. P.C.: 82,02 m.s.l.m.		Certificato n°	Pagina			
Operatore: dott. Calciolari		Indagine: Ambientale	Note:			Inizio/Fine Esecuzione: 13-14/06/05			
Responsabile: dott. Corina		Sondaggio SS	Tipo Carotaggio: Continuo a rotazione		Tipo Sonda		Coordinate X-Y		

Scala (m)	Litologia	Descrizione	Quota	% Carotaggio R.Q.D.					S. P. T. (n° Colpi)	Prodotto Test kgf/cm²	Vane Test kgf/cm²	Campioni	Metodo Perforazione	Metodo Stabilizzazione	Cost. Carotaggio	Falda	Altre prove	Altre prove	Piezometro (P) o Inclinatorio (I)	
				1	20	40	60	80												100
		Terreno di riporto	-0.50																	P-(1)
-1		Rifiuti	-1.50																	
-2		Rifiuti	-3.00																	
-3		Rifiuti	-2.80																	
-4		Rifiuti	-3.00																	
-5			-5.70																	
-6		Rifiuti	-5.90																	
-7			-7.50																	
-8		Rifiuti	-7.90																	
-9			-10.40																	
-10		Rifiuti	-10.50																	
-11			-13.50																	
-12		Rifiuti	-13.50																	
-13			-13.50																	
-14		Rifiuti	-14.00																	
-15			-15.80																	
-16		Rifiuti	-17.30																	
-17			-17.30																	
-18		Rifiuti	-19.70																	
-19			-19.70																	
-20		Rifiuti	-20.50																	
-21		argilla limoso sabbiosa	-21.00																	
-22		granito alterato	-22.00																	

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, R-Rimaneggiato da SPT
Piezometro: ATA-Tubo Aperto, CSG-Casagrande
Perforazione: CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Elica Continua
Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, RB-Franghi Betonici
Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa
Carotaggio: Continuo a rotazione.

Firma 1

Firma 2

Committente Comune di Olbia		Profondità raggiunta 21 m	Quota Ass. P.C. 82,21 m.s.l.m.		Certificato n°	Pagina	
Operatore dott. Calderaro		Indagine Ambientale	Note		Inizio/Fine Esecuzione 14-15/06/05		
Responsabile dott. Corona		Sonaggio S6	Tipo Carotaggio Continuo a rotazione		Tipo Sonda	Coordinate X.Y.	

Scala (cm)	Utilizzo	Descrizione	Quota	N°Carotaggio K.Q.D.	S.P.T. (N° Cavi)	Prodotto Test kg/cm²	Vase Test kg/cm²	Campioni	Metodo perforazione	Metodo Stabilizzaz.	Cavi, Cattolici	Falda	Altre prove	Altre prove	Piezometro (P) o inclinometro (I)	
		Terreno di riporto	-0.30													P-(1)
-1		Rifiuto	-1.40													
-2		Rifiuti	-2.30													
-3		Rifiuti	-3.30													
-4		Rifiuti	-4.40													
-5		Rifiuti	-5.50													
-6		Rifiuti	-6.50													
-7		Rifiuti	-7.50													
-8		Rifiuti	-8.50													
-9		Rifiuti	-9.50													
-10		Rifiuti	-10.40													
-11		Rifiuti	-11.60													
-12		Rifiuti	-12.70													
-13		Rifiuti	-12.90													
-14		Rifiuti	-14.40													
-15		Rifiuti	-15.00													
-16		Rifiuti	-16.00													
-17		Rifiuti	-17.70													
-18		Rifiuti	-18.80													
-19		Rifiuti	-19.00													
-20		argilla limoso sabbiosa	-20.40													
-21			-21.00													A -21.00

Campioni: S-Pareti: Setili, O-Osterberg, M-Mahler, R-Rimaneggiato, RS-Rimaneggiato da SPT
Piezometro: A1A-Tubo Aperto, CSO-Casagrande
Perforazione: CS-Carotere Semplice, CD-Carotere Doppio, EC-Elica Continua
Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, FB-Fanghi Betonici
Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa
Carotaggio: Continuo a rotazione

Firma 1

Firma 2

Committente Comune di Olbia		Profondità raggiunta 21 m	Quota Ass. P.C. 82,11 m.s.l.m.		Certificato n°		Pagina	
Operatore dott. Calderaro		Indagine Ambientale	Note:		Indirizzo Esecuzione 16-17/06/05			
Responsabile dott. Corona		Sondaggio S7	Tipo Carotaggio Continuo a rotazione		Tipo Sonda		Coordinate X Y	

Scala (cm)	Litostr.	Descrizione	Quota	%Carotaggio R.Q.D.	S.P.T (n° Colpi)	Probet Test kg/cm²	Vase Test kg/cm²	Campioni	Metodo Perforazione	Metodo Stabilizzaz.	Cavo Carotaggio	Faida	Altre prove	Piezometro (P) o Inclisurmetro (I)	P(1)
		Terreno di riporto	-0.20												
		Rifiuto	-1.00												
-1		Rifiuti	-2.30												
-2		Rifiuti	-3.30												
-3		Rifiuti	-4.20												
-4		Rifiuti	-4.20												
-5		Rifiuti	-7.00												
-6		Rifiuti	-8.00												
-7		Rifiuti	-8.00												
-8		Rifiuti	-8.00												
-9		Rifiuti	-8.00												
-10		Rifiuti	-13.00												
-11		Rifiuti	-13.00												
-12		Rifiuti	-13.00												
-13		Rifiuti	-14.00												
-14		Rifiuti	-14.00												
-15		Rifiuti	-16.30												
-16		Rifiuti	-17.80												
-17		Rifiuti	-18.00												
-18		Rifiuti	-19.70												
-19		Rifiuti	-19.70												
-20		Rifiuti	-20.50												
-21		argilla limosa sabbiosa	-21.00												
-22															

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, RS-Rimaneggiato da SPT.
Piezometri: ATA-Tubo Aperto, CSC-Cavogrande
Perforazione: CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Elica Continua
Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, FB-Fanghi Betonici
Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa
Carotaggio: Continuo a rotazione

Firma 1

Firma 2

I sondaggi S1, S2, S3, S4, S8, S9 evidenziano la presenza in affioramento dei graniti alterati e maggiormente fratturati in superficie per uno spessore di circa 2.00 m, con fratturazione significativa fino a profondità media di circa 6.00 m, a cui succedono livelli con fratturazione in genere lieve e *indici di qualità RQD* da discreto a buono ed eccellente.

Si precisa che nei sondaggi S3 ed S4 i graniti affioranti risultano coperti da terreni di riporto per spessori di 6.00 e 3.00 m.

Della roccia granitica è stato valutato l'RQD, indice di qualità della roccia secondo AGI-1977, che esprime il grado di continuità, e quindi di fratturazione, di una roccia.

In generale si rileva che la qualità del granito migliora con la profondità (oltre i 6.00 m) e che l'angolo dei piani di fratturazione rispetto alla verticale si mantiene costante attorno ai 45°.

Dei sondaggi S8 ed S9, spinti ad 8.00 m dal p.c. e dedicati alle prove Lugeon, non sono riportate le stratigrafie, ma dalle allegate fotografie dei carotaggi continui si deduce agevolmente, per l'intera verticale, la presenza dei graniti, la loro buona qualità (eccezion fatta per i primi 2.40 m del sondaggio S8) e la costante angolazione delle superfici di frattura pari a circa 45°.

Committente Comune di Olbia		Profondità raggiunta 10 m	Quota Ass. P.C. +56,73 m.s.l.m.		Certificato n°		Pagina	
Operatore dott. Calderaro		Indagine Ambientale	Note					Inizio/Fine Escavazione 30/05-03/06
Responsabile dott. Corona		Sondaggio SI (PI)	Tipo Carotaggio Continuo a rotazione			Tipo Sonda		Coordinate X Y

Cassa (m)	Litologia	Descrizione	Quota	N° Carotaggio R.Q.D.	S n-1 (n° Campi)	Prova Test Vibrom.	Vibri Test Vibrom.	Campi	Metodo Perforazione	Metodo Stabilizzaz.	Cali. Cataling	Falso	Altra prova	Altra prova	Piezometro (P) o Incisometro (I)
0															P-(1)
1		Granito alterato e mediamente fratturato (qualità della roccia scadente)	-1.50												
2		Granito con lieve fratturazione; Indice di qualità buono.										-2.78			
3															
4															
5															
6															
7		granito con livelli fratturati. Indice di qualità scadente	-7.00												
8															
9		granito. Indice di qualità eccellente	-9.00												
10			-10.00												
11															

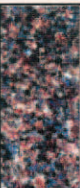



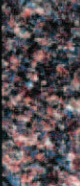

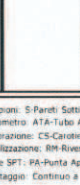
Campi: S-Pareti Sottili, D-Osterberg, H-Mazur, R-Rimaneggiato, R-Rimaneggiato da SPT
Piezometro: ATA-Tubo Aperto, CSG-Casagrande
Perforazione: CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Ekca Continua
Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, FB-Fanghi Betonici
Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa
Carotaggio: Continuo a rotazione

Firma 1

Firma 2

A
-10.00

Comitente Comune di Obbia		Profondità raggiunta 10 m		Quota Ass. P.C. 55,01 m.s.l.m.		Certificato n°		Pagina	
Operatore dott. Cadenaro		Incagine Ambientale		Note				Inizio/Fine Esecuzione 03-06/06/05	
Responsabile dott. Corani		Sondaggio S2 (PZ)		Tipo Carotaggio Continuo a rotazione		Tipo Sonda		Coordinate X Y	

Scala (m)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio R Q D	S.P.T. (1° Colpo)	Pocket Test N(g/cm²)	Slurry Test N(g/cm²)	Campolo	Presso Riduzione	Metodo Stabilizzaz.	Cost. Casting	Falda	Altre prove	Piezometro (P) o Inclino metro (I)
				0 20 40 60 80 100										P-(1)
-1		Granito alterato e mediamente fratturato (qualità della roccia scadente)			R							-0.36 n.d.		
-2		Granito con lieve fratturazione. Indice di qualità discreto	-2.00											
-3					F									
-4			-4.00											
-5		granito con livelli fratturati. Indice di qualità eccellente												
-6														
-7					R									
-8														
-9														
-10			-10.00											
-11														

A

-10.00

Campari: S-Parati Sottili, O-Osterberg, M-Macier, B-Rimaneggiato, R-Rimaneggiato da SPT
Piezometro: ATA-Tubo Aperto, CSC-Cava grande
Perforazione: CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Elica Continua
Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, FB-Fanghi Betonici
Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa
Carotaggio: Continuo a rotazione

Firma 1

Firma 2

Committente Comune di Olbia		Profondità raggiunta 10 m		Quota Ass. P.C. 63,60 m.s.l.m.		Certificato n°		Pagina	
Operatore dott. Calderaro		Indagine Ambientale		Note				Inizio/Fine Esecuzione 08-09/06/05	
Responsabile dott. Corona		Sondaggio S3 (P4)		Tipo Carotaggio Continuo a rotazione			Tipo Sonda		Coordinate X Y

Scala (m)	Litologie	Descrizione	Quota	%Carotaggio R.Q.D.	S. P. T. (n° Colpi)	Probet Test Aggiung.	Vane Test Aggiung.	Campioni	Metodo Perforazione	Metodo Stabilizzaz.	Cavi Cauling	Falda	Altre prove	Altre prove	Piezometro (P) o Inclinatorio (I)
				0											
															P-(1)
-1		Terreno di riporto costituito da sabbie con ciottoli e trovanì (granito). Presenza di rifiuti (gomma)													
-2															
-3															
-4															
-5															
-6			-6.00												
-7		granito con livelli fratturati. Indice di qualità buono													
-8															
-9															
-10			-10.00												
-11															

Campioni: S-Pareti Settini, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, R-Rimaneggiato da SPT
Piezometro: ATA-Tubo Aperto, CSG-Casagrande
Perforazione: CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Elica Continua
Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, FB-Farghi Betonici
Prove SPT: PA-Punta Aperta, FC-Punta Chiusa
Carotaggio: Continuo a rotazione

Firma 1

Firma 2

Comitamento Comune di Ofelia		Profondità raggiunta 10 m	Quota Ass. P.C. 67,10 m.s.l.m.		Certificato n°		Pagina	
Operatore dott. Caldararo		Indagine Ambientale	Note:				Inizio/Fine Esecuzione 10/06/05	
Responsabile dott. Corona		Sondaggio 54 (P3)	Tipo Carotaggio Continuo a rotazione			Tipo Sonda		Coordinate X Y

Quota (m)	Litologia	Descrizione	Quota	N° Carotaggio R.Q.D.	S.P.T. (n° Colpi)	Resist. Test kg/cm²	N° Test Mettling	Campioni	Metodo Percussione	Metodo Sondaggio	Cavo Cavo	Falso	Altre prove	Altre prove	Pezometro (P) o Indicimetro (I)
-1		Terreno di riporto costituito da sabbie con ciottoli e trovanti (granito).						R							
-1.50															
-3.00															
-4.00		granito. Indice di qualità eccellente													
-5.00		granito. indice di qualità scadente													
-6.00		granito. Indice di qualità buono													
-10.00															
-11															

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, N-Mazzer, R-Rimaneggiato, R-Rimaneggiato da SPT

Pezometro: ATA-Iubo Aperto, CSG-Casagrande

Portellazioni: CS-Candere Semplice, CD-Candere Doppio, EC-Elica Continua

Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, H-Fanghi (Bentonite)

Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa

Carotaggio: Continuo a rotazione

Firma 1

Firma 2



Carotaggio del sondaggio S9 (0-5m)



Carotaggio del sondaggio S9 (5-8m)



Carotaggio del sondaggio S8 (0-6m)

Livelli freatici sono stati rinvenuti nei sondaggi S1, S2, S3, S4 alle quote di seguito trascritte:

- S1, falda a -2.78 m
- S2, falda a -0.36 m
- S3, falda a -2.92 m
- S4, falda a -1.18 m.

Si rileva che la soggiacenza della superficie freatica è molto contenuta, risultando compresa tra un minimo di 0.36 m ed un massimo di 2.92 m.

2.1.5.3 Esiti indagini idrogeologiche

Vengono riportati gli esiti delle misurazioni eseguite su tutti i piezometri per il rilevamento della superficie freatica; l'operazione è stata

effettuata con un rilevamento plano-altimetrico dei boccafori dei piezometri e successivamente allo spurgo degli stessi e ad una fase di riposo per il riequilibrio idrodinamico della falda.

Le misurazioni, eseguite in data 21/06/2005, vengono di seguito riportate.

Piezometro	Data misura	Livello statico da b.p.	*Quota pozzo	Livello falda
<i>n°</i>		<i>metri da bocca pozzo</i>	<i>m.s.l.m.</i>	<i>m.s.l.m.</i>
P1	21/06/05	- 2,80	+ 56,75	+ 53,95
P2	21/06/05	- 0,47	+ 55,12	+ 54,65
P3	21/06/05	- 1,23	+ 67,10	+ 65,87
P4	21/06/05	- 2,90	+ 63,58	+ 60,68
Pozzo a monte	21/06/05	- 2,82	+ 66,70	+ 63,88

* Quota riferita al livello del mare

A seguito di tali operazioni viene rilevata la presenza di una circolazione idrica superficiale con *“piezometrica che si adatta alla morfologia esterna”*, risultando la soggiacenza della superficie freatica compresa tra un minimo di 0.47 m ed un massimo di 2.90 m.

Si evidenzia, inoltre, che *“la superficie freatica risulta di tipo divergente con asse prevalente N-S ed immergente verso N, come da allegata tavola delle isofreatiche”*.

Risulta, pertanto, una perfetta convergenza tra le sopra citate caratteristiche litostratigrafiche e litotecniche delle rocce affioranti e relative caratteristiche idrogeologiche, in quanto la falda idrica è ospitata nella parte superficiale dell'ammasso roccioso, che, all'esame, risulta essere quella maggiormente alterata e fratturata, e, laddove presenti, nei deboli depositi di copertura.

Si ricorda, infatti, che l'RQD (indice di qualità della roccia) e la documentazione fotografica delle carote di cui ai sondaggi geognostici sopra citati, hanno consentito di valutare la roccia sotto il profilo litotecnico, classificandola *“scadente/discreta”* fino ad una profondità di 6.00 m dal p.c. e *“buona”* oltre tale profondità.

Le prove Lugeon, eseguite nei sondaggi S8 ed S9, confermano questi dati, potendosi evincere quanto segue.

Nella prima prova effettuata nel sondaggio S9, ad una profondità compresa tra 5.00 e 6.00 m, è stata rilevata una perdita di carico in tempi brevi, a causa dell'elevato stato di fratturazione della roccia in quella zona.

Nella seconda prova, effettuata ad una profondità compresa tra 7.00 e 8.00 m, è stato ottenuto un valore di $K = 7.7 \cdot 10^{-4}$ cm/s, indice di una maggiore integrità della roccia.

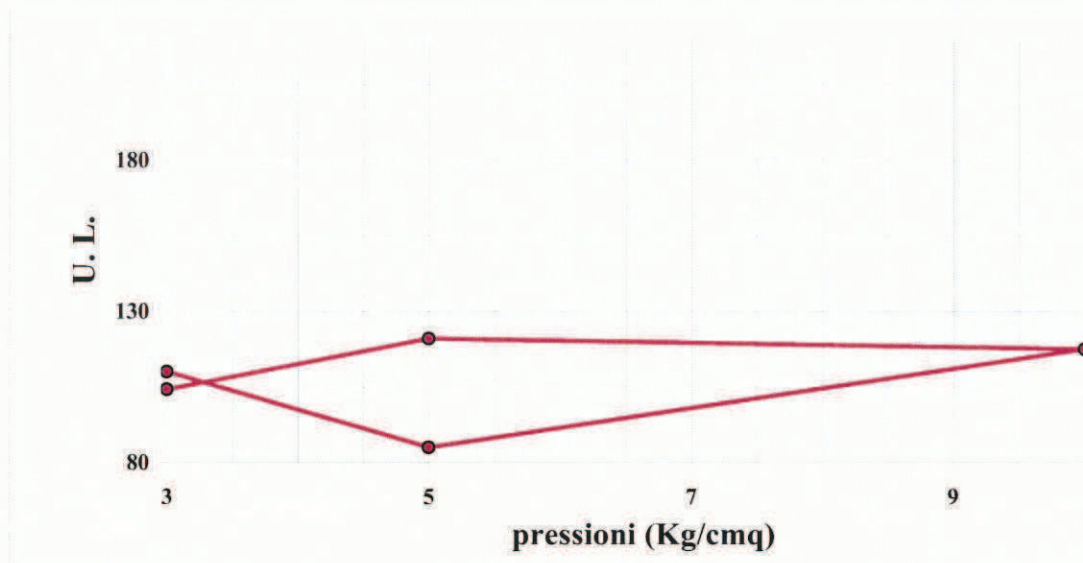
Nel sondaggio S8, l'unica prova effettuata tra 4.00 e 6.00 m di profondità ha dato luogo ad un $K = 1.18 \cdot 10^{-3}$ cm/s, indice di un più elevato grado di fratturazione del granito.

COMMITTENTE COMUNE DI OLBIA
LOCALITA' OLBIA
CANTIERE Discarica Comunale Spirito Santu

Data 07/07/05
Sondaggio n. S8
Prova n. 1
Profondità (m) 4,00 - 6,00

Note: prova eseguita in avanzamento

PROVA DI IMMISSIONE LUGEON								
P	P.U.	S			Δt	Δl	U.L.	K
Pressioni	Portata unitaria	Assorbimenti (litri)			Durata	lunghezza	Unità Lugeon	Coeff. Perm
bar	l/min/m	S1	S2	S3	minuti	metri	l/min/m	cm/s
3,00	33,00	660,0	660,0	660,0	10	2,00	110,00	1,10E-03
5,00	42,50	850,0	850,0	850,0	10	2,00	85,00	8,50E-04
10,00	117,50	2.350,0	2.350,0	2.350,0	10	2,00	117,50	1,18E-03
5,00	60,50	1.210,0	1.210,0	1.210,0	10	2,00	121,00	1,21E-03
3,00	31,00	625,0	625,0	625,0	10	2,00	104,17	1,04E-03

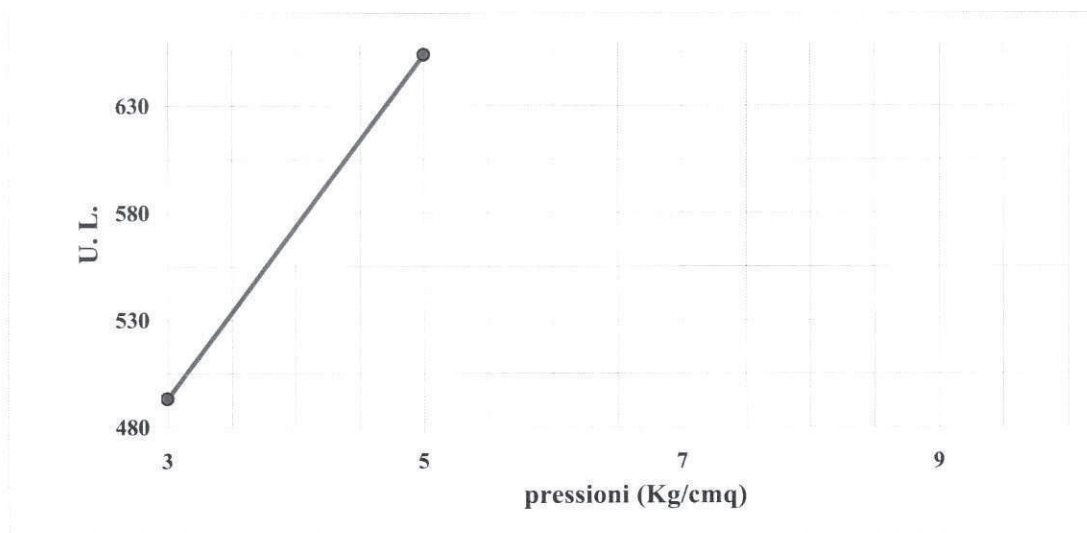


COMMITTENTE COMUNE DI OLBIA
LOCALITA' OLBIA
CANTIERE Discarica Comunale Spirito Santu

Data 07/07/05
Sondaggio n. S9
Prova n. 1
Profondità (m) 5,00 - 6,00

Note: prova eseguita in avanzamento

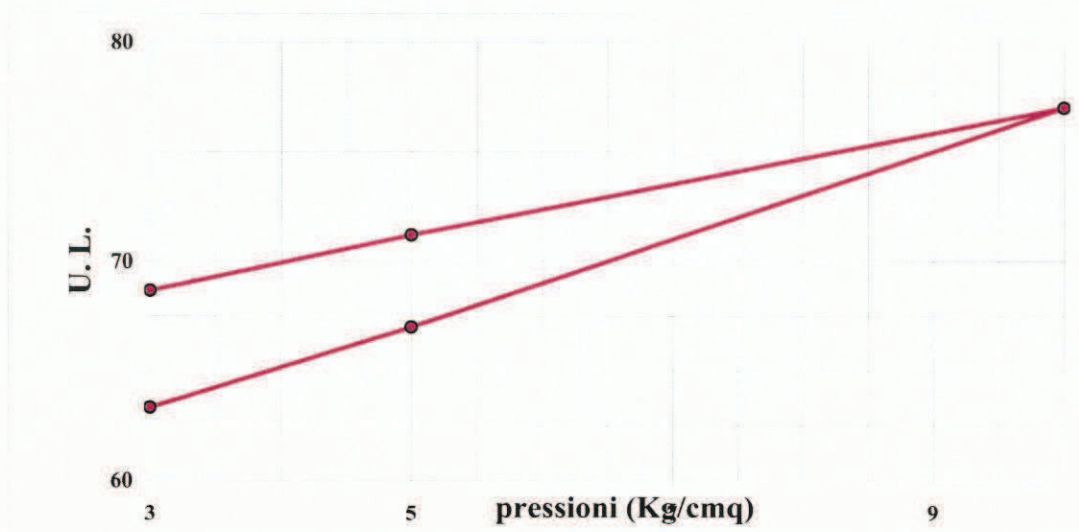
PROVA DI IMMISSIONE LUGEON							
P	P.U.	S			Δt	Δl	U.L.
Pressioni	Portata unitaria	Assorbimenti (litri)			Durata	lunghezza	ITA' LUGEON
bar	l/min/m	S1	S2	S3	minuti	metri	min/m (10 bar)
3,00	74,00	1.480,0	1.480,0	1.480,0	10	1,00	493,33
5,00	163,50	3.270,0	3.270,0	3.270,0	10	1,00	654,00
10,00							0,00E+00
5,00							0,00E+00
3,00							0,00E+00



COMMITTENTE	COMUNE DI OLBIA	Data	07/07/05
LOCALITA'	OLBIA	Sondaggio n.	S9
CANTIERE	Discarica Comunale Spirito Santu	Prova n.	1
		Profondità (m)	7,00-8,00

Note: prova eseguita in avanzamento

PROVA DI IMMISSIONE LUGEON								
P	P.U.	S			Δt	Δl	U.L.	K
Pressioni	Portata unitaria	Assorbimenti (litri)			Durata	lunghezza	UNITA' LUGEON	Coeff. Perm
bar	l/min/m	S1	S2	S3	minuti	metri	lin/m (10 bar)	cm/s
3,00	19,00	190,0	190,0	190,0	10	1,00	63,33	6,33E-04
5,00	33,50	335,0	335,0	335,0	10	1,00	67,00	6,70E-04
10,00	77,00	770,0	770,0	770,0	10	1,00	77,00	7,70E-04
5,00	35,60	356,0	356,0	356,0	10	1,00	71,20	7,12E-04
3,00	20,60	206,0	206,0	206,0	10	1,00	68,67	6,87E-04



Tutte le prove risulterebbero condizionate, secondo l'Autore, "dalla vicinanza di vie preferenziali di sfogo dell'acqua", poiché "nel caso della prova su S8 è stata rilevata la fuoriuscita di acqua dal vicino piezometro P2 e nel caso della prova su S9 è stata rilevata la fuoriuscita di acqua da un ristagno di percolato posto a circa 10.00 m."

Ciò proverebbe che "il movimento delle acque nel granito avviene per lo più lateralmente", anche per effetto delle inclinazioni a 45° delle fratture rilevate nell'ammasso roccioso.

Tanto risulta *“in linea con quanto indicato dagli indici di qualità del granito soprariportati”*.

Sempre allo scopo di definire al meglio il quadro idrogeologico locale, nell'ambito della discarica comunale sono state eseguite n.4 prospezioni geoelettriche con metodologia SEV-Schlumberger, con distanza elettrodica massima di 140.00 m e conseguimento di una profondità di indagine compresa tra 30.00 e 40.00 m.

L'ubicazione degli allineamenti elettrodici sono rilevabili dalla planimetria allegata.

Il SEV-1, quota 76.59 m/lm, superati i primi metri, da 0.00 m a - 7.40 m dal p.c., occupati dai rifiuti e relative coperture a diversa resistività, evidenzia, tra - 7.40 m (quota 69.19 m/lm) e - 10.50 m dal p.c. (quota 66.09 m/lm), *“un elettrostrato sede del rifiuto umido e dell'acquifero con conducibilità elevata (resistività 4.4 Ω m), che poggia sul substrato litoide della formazione granitica”*.

Detto substrato, che sostiene quindi - oltre ai rifiuti - anche una falda idrica, è caratterizzato da una resistività elevata (8'105 Ω m), tipica di roccia granitica compatta e *“priva di particolare percolazione nel sistema di fratture”*.

Il SEV-2, quota 72,97 m/lm, denuncia analoga distribuzione degli elettrostrati: coperture e rifiuti a diversa resistività fino a - 6.10 m dal p.c.; il successivo elettrostrato, per uno spessore di 9.90 m, perciò fino a quota 56.97 m/lm, assume una conducibilità elevata (4.1 Ω m), perciò sede probabile di rifiuti umidi ed altro nonché dell'acquifero.

Al di sotto dei 16.00 m dal p.c. si passa ad una elettrostrato caratterizzato da resistività elevata (91'232 Ω m), tipica di roccia integra e, perciò, sostanzialmente impermeabile.

Il SEV-3, quota 69.00 m/lm, evidenzia analoga distribuzione degli elettrostrati: coperture e rifiuti a diversa resistività fino a circa – 3.00 m dal p.c.; il successivo elettostrato, per uno spessore di circa 20.00 m, perciò da quota 66.00 m/lm fino a quota 46.00 m/lm, assume una conducibilità elevata ($4.5 \Omega\text{m}$), possibile sede di acquifero, a cui segue il basamento granitico integro con resistività elevata (circa $5'000 \Omega\text{m}$).

In merito a questo profilo viene osservato come lo spessore (20.00 m) dell'elettostrato conduttivo (resistività $4.5 \Omega\text{m}$) possa risultare inficiato dalle particolari condizioni al contorno, quali il livellamento dell'impluvio naturale sottostante la discarica ottenuto con scavi e riporti, la possibile realizzazione di un fondo irregolare e di concavità sedi di ristagni idrici, la prossimità del centro del SEV all'asse del tubo (sottostante il fondo della discarica) che convoglia le acque dell'impluvio da monte verso valle, la bonifica di alcune aree palustri a monte del corpo della discarica, ecc..

Queste circostanze, concretamente rappresentabili come variazioni laterali di facies, possono aver dato luogo a problemi di interpretazione del modello geologico, senza peraltro escludere la possibile esistenza di un ***“sistema di fratturazione dei graniti in cui si è impostato un acquifero alimentato dal percolato”***.

Il SEV-4, quota 67.47 m/lm, dà luogo ad una distribuzione degli elettrostrati analoga al SEV-3: copertura e rifiuti a diversa resistività fino a circa - 3.00 m dal p.c.; segue un elettostrato con spessore di 19.00 m, all'incirca da quota 64.50 m/lm fino a quota 45.50 m/lm, caratterizzato da conducibilità elevata ($4.4 \Omega\text{m}$) interpretabile *“come sede di acquifero molto fratturato”*.

Alle predette quote (64.50 m/lm circa) è impostato un elettostrato con spessore indefinito caratterizzato da una resistività elevata ($4'539 \Omega\text{m}$).

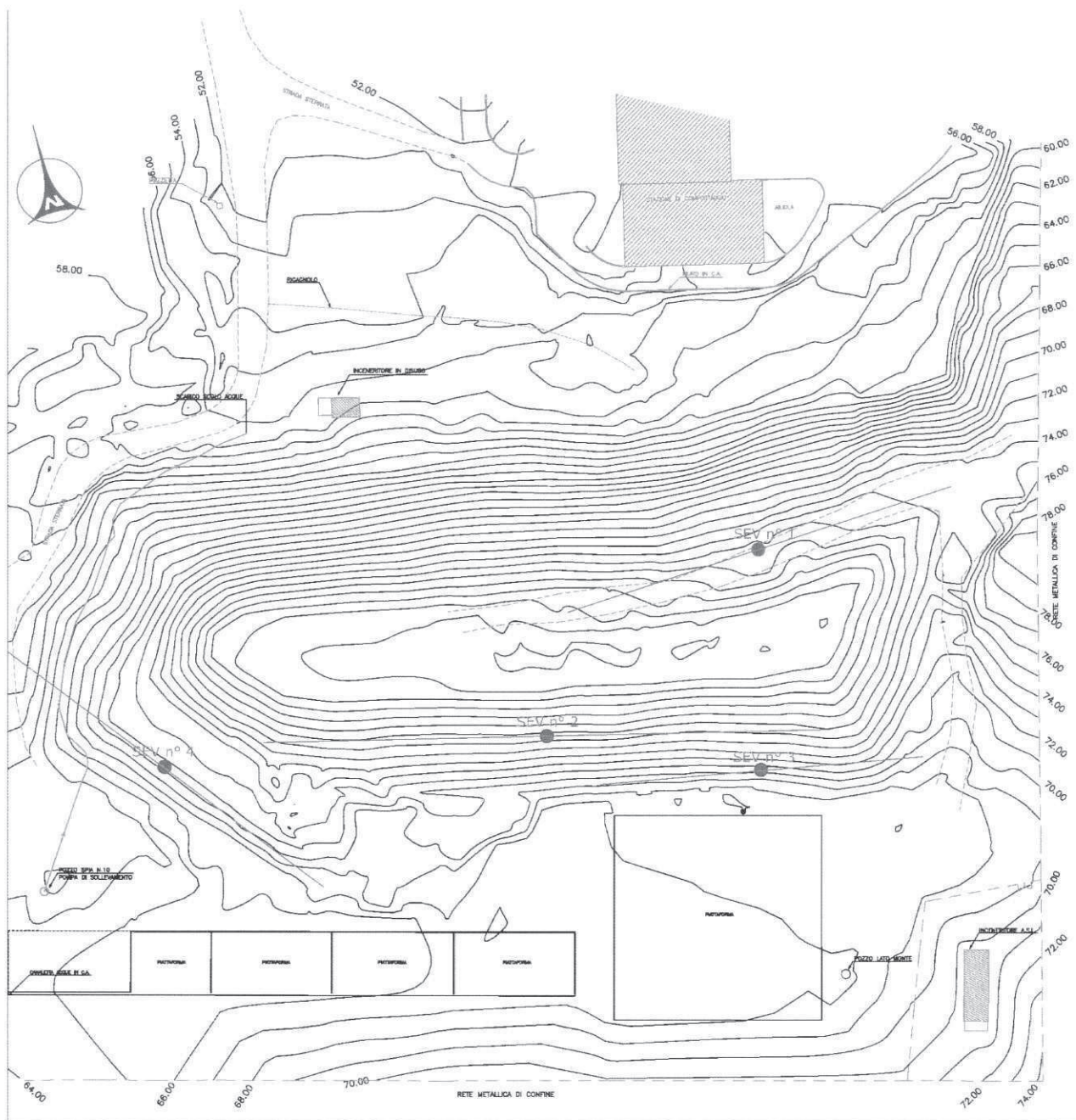
Si osserva, infine, che la regolarizzazione del fondo possa essere stata conseguita con l'uso di esplosivi ovvero che il sito possa essere stato oggetto di coltivazione di cava, con conseguente ampliamento delle fratture singenetiche di raffreddamento dei graniti, sede perciò *“di un acquifero alimentato dal percolato, in quanto i valori di resistività sono bassi, sintomatici che le acque sono arricchite da sali o metalli”*.

Nella conclusione si evidenzia, però, molto opportunamente, che *“le prove effettuate non permettono, comunque, l'individuazione dell'esatta profondità del substrato roccioso, in quanto la presenza di acqua di falda e/o percolato nei primi metri del granito fratturato rende lo strato conduttivo più potente”*.

Appare utile a questo punto **annotare la maggiore ed oggettiva attendibilità delle prove RQD**, eseguite sulle carote granitiche estratte con i sondaggi geognostici, che danno luogo ad un “indice di qualità della roccia” definito “buono” già ad una profondità mediamente individuata attorno ai 6.00 m di profondità dal p.c., che ben difficilmente consente la percolazione e circolazione di acqua e quindi l'insediamento a profondità maggiore di una falda idrica, che rimarrebbe perciò localizzata al di sopra di tale quota.

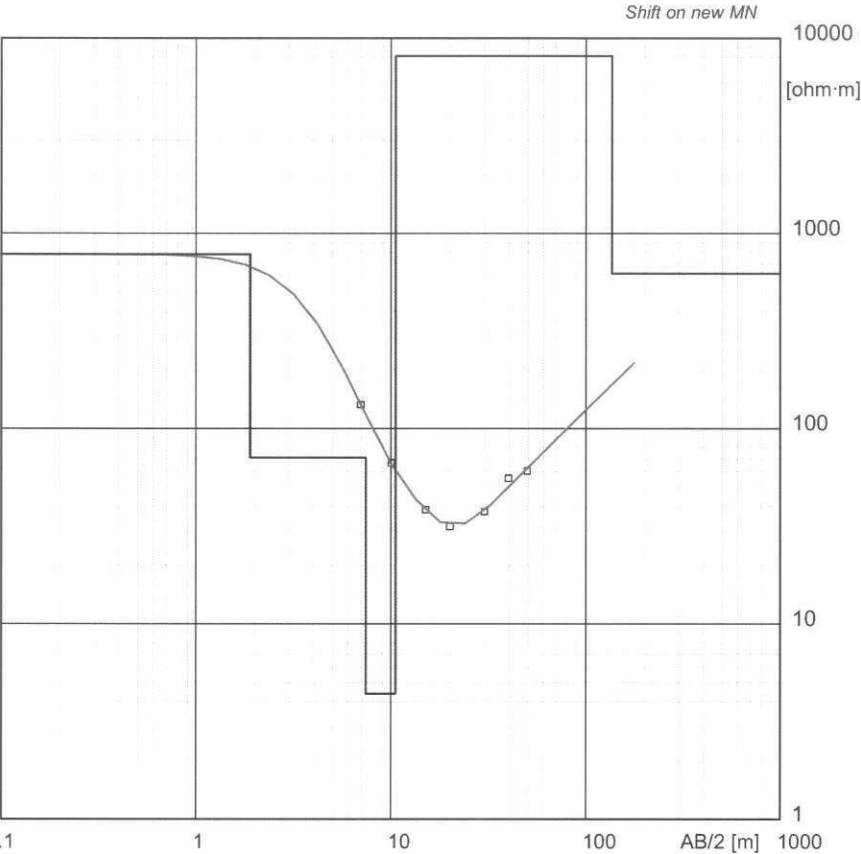
Tale osservazione sarà nel seguito ulteriormente confermata dall'analisi e correlazione con i risultati delle indagini geoelettriche eseguite nel 2013 ed acquisite nella Relazione De Paola.

Seguono ubicazione SEV e relativi diagrammi di resistività.



Planimetria ubicazione SEV

Electrical sounding Schlumberger - sev 1.WS3



Model		
Resistivity	Thickness	Depth
[ohm·m]	[m]	[m]
783	1.9	
71	5.5	1.9
4.4	3.1	7.4
8105	126	10
622		136

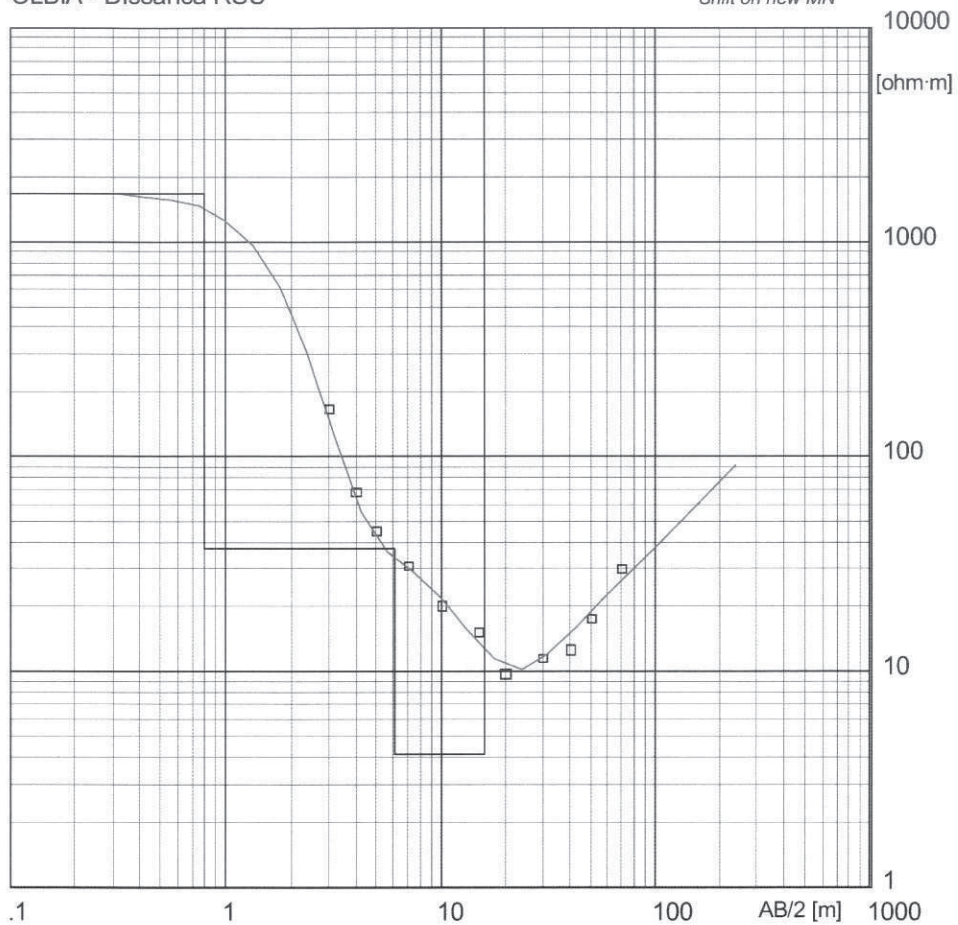
W-GeoSoft / WinSev 6.1

- SEV 1 -

Electrical sounding Schlumberger - sev 2.WS3

OLBIA - Discarica RSU

Shift on new MN



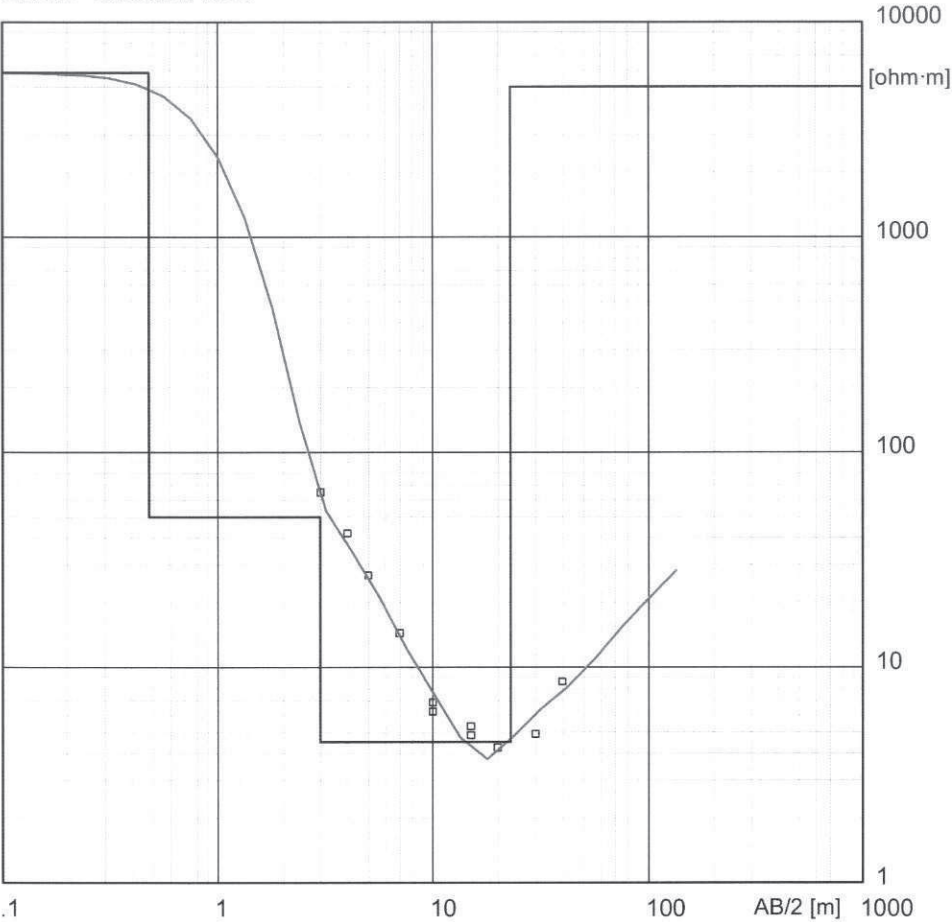
Model Resistivity	Thickness	Depth
[ohm·m]	[m]	[m]
1687	.79	.79
37	5.3	6.1
4.1	9.9	16
91232		

W-GeoSoft / WinSev 6.1

- SEV 2 -

Electrical sounding Schlumberger - sev 3.WS3

OLBIA - Discarica RSU



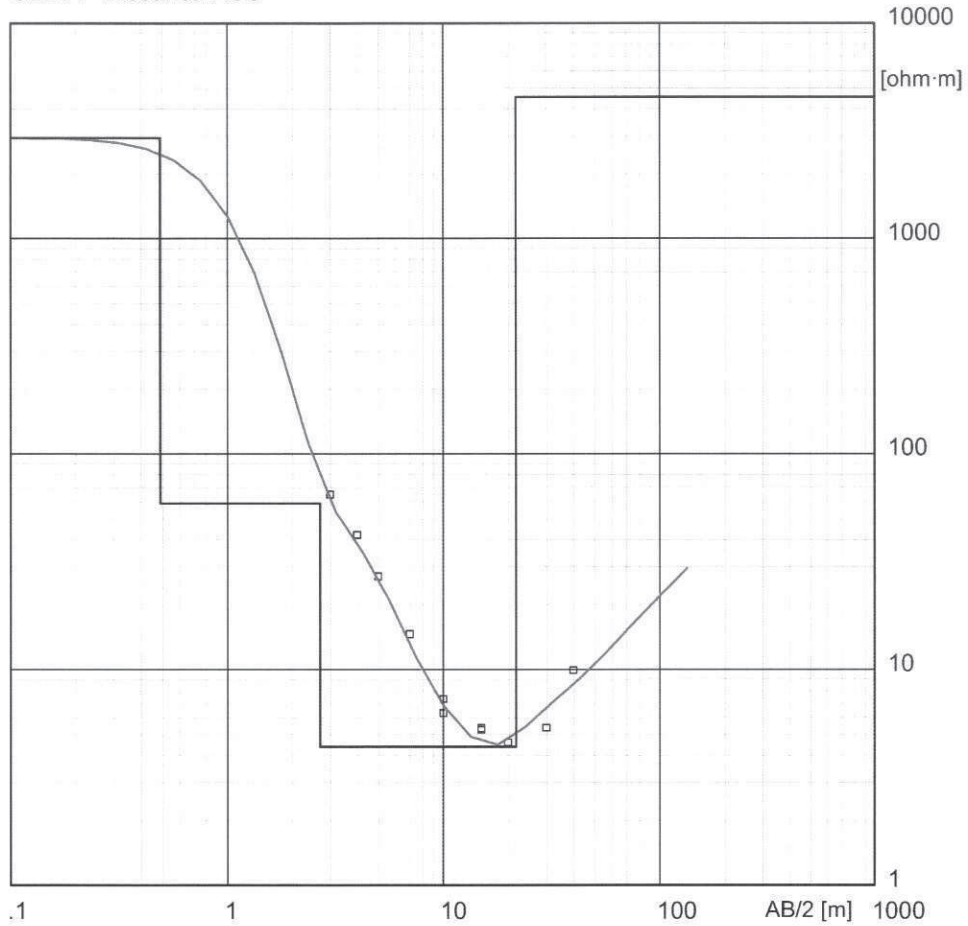
Model			
Resistivity	Thickness	Depth	
[ohm·m]	[m]	[m]	
5809	.48	.48	
50	2.5	.48	
4.5	20	3	
5000		23	

W-GeoSoft / WinSev 6.1

- SEV 3 -

Electrical sounding Schlumberger - sev 4.WS3

OLBIA - Discarica RSU



Model Resistivity	Thickness	Depth
[ohm·m]	[m]	[m]
2933	.49	.49
59	2.2	2.7
4.4	19	22
4539		

W-GeoSoft / WinSev 6.1

- SEV 4 -

2.1.5.4 Esiti analisi dei terreni

Lo stato ambientale dei terreni di fondo della discarica è stato rilevato sui due campioni estratti dai sondaggi S6-fondo ed S7-fondo eseguiti sul corpo della discarica e, per quanto concerne i terreni all'intorno della discarica, lo stato ambientale è stato rilevato dai campioni S3-C1, *C2, *C3 ed S4-C1, *C2.

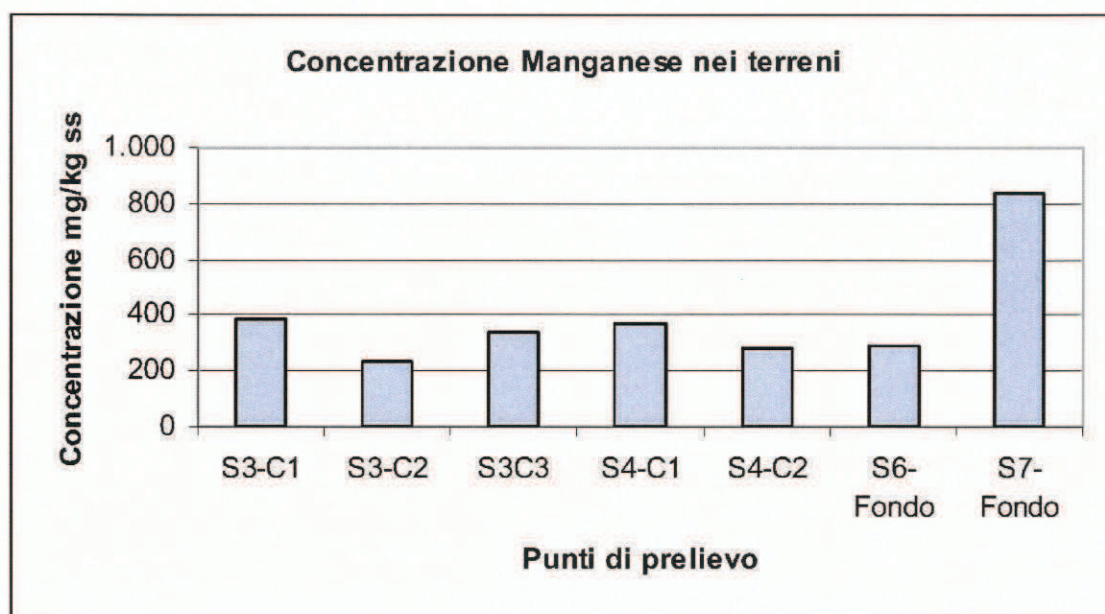
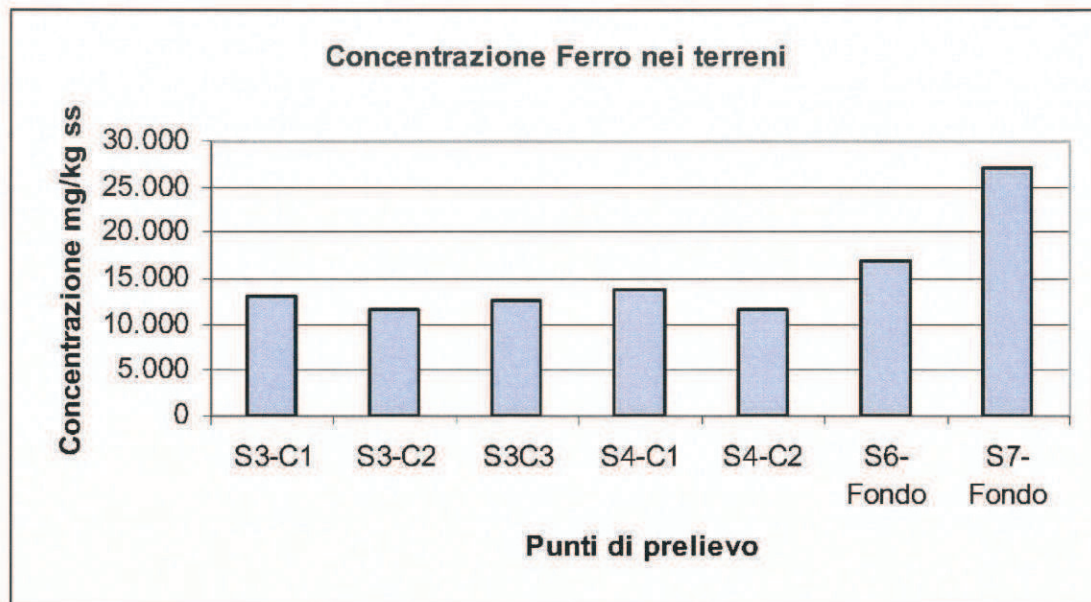
I parametri ricercati sono stati prescelti con riferimento al D.M. 471/1999 e risultano dall'elenco che segue.

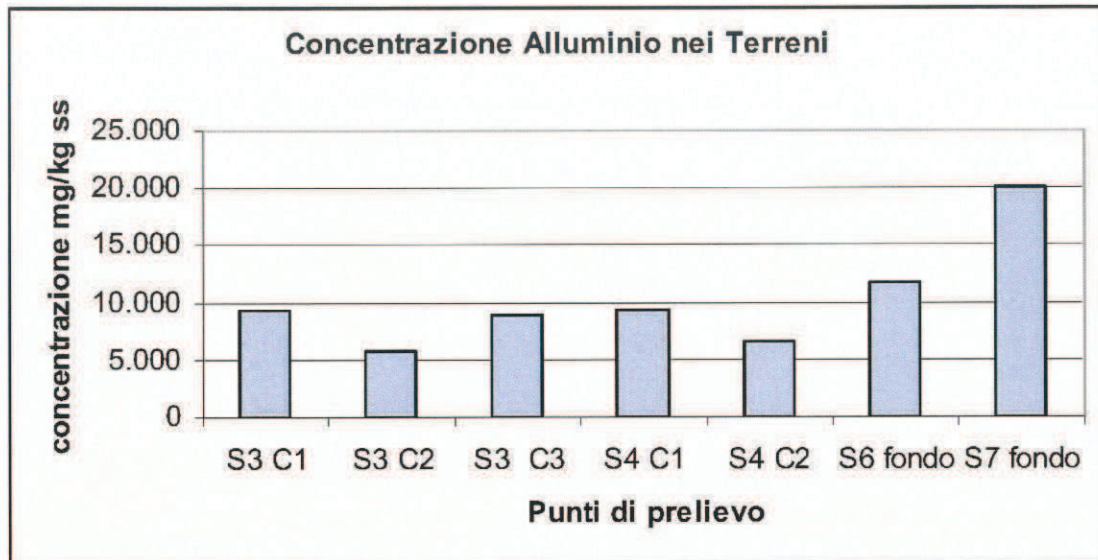
PARAMETRO	METODO DI PROVA
ALLUMINIO/ BORO/ CADMIO/ CROMO TOTALE/ FERRO/ MANGANESE/ NICHEL/ PIOMBO/ RAME/ ZINCO	EPA-6010-C/00
ARSENICO	EPA 7062/94
MERCURIO	EPA-7471-B/98
COMPOSTI ALIFATICI CLORURATI CANCEROGENI, NON CANCEROGENI, ALIFATICI ALOGENATI CANCEROGENI	EPA-8260B/96
CLOROBENZENE/ 1,2-DICLOROBENZENE/ 1,4-DICLOROBENZENE/1,2,4-TRICLOROBENZENE/ ESACLOROETANO/ PENTACLOROETANO/ TETRACLORURO DI CARBONIO/ COMPOSTI ORGANOALOGENATI TOTALI 1,1,1,2-TETRACLOROETANO/1,2,3-TRICLOROBENZENE/1,3,5-TRICLOROBENZENE/1,3-DICLOROBENZENE	EPA-8260B/96
1,2,4,5-TETRACLOROBENZENE	EPA-8270-D/98
PENTACLOROBENZENE	EPA-8270-D/98
ESACLOROBENZENE (HCB)	EPA-8270-D/98

I risultati possono essere così sintetizzati:

- in nessuno dei campioni prelevati nei sondaggi S3, S4 (esterni alla discarica) ed S6, S7 (sul corpo discarica) sono stati rilevati superamenti delle concentrazioni limite (All.1. Tab.1, col. B, D.M. 471/1999) relativamente ai seguenti parametri:
 - Metalli

- Composti alifatici clorurati cancerogeni;
 - Composti alifatici clorurati non cancerogeni;
 - Composti alifatici alogenati cancerogeni;
 - Clorobenzeni;
- dal confronto dei limiti di legge per i siti ad uso industriale e commerciale (sopra citato D.M. 471/1999) si rileva quanto segue:
- non sono stati osservati superamenti delle concentrazioni limite (D.M. 471/1999) sia nei terreni all'intorno della discarica , prelevati dai sondaggi S3 ed S4, sia nei terreni di fondo della discarica prelevati dai sondaggi S6 e S7.
 - I parametri Ferro, Manganese, Alluminio presentano concentrazioni elevate in tutti i campioni analizzati, per cui *“si ritiene che tali valori non siano collegabili alla presenza della discarica ma siano caratteristici del fondo naturale del sito”*.





La tabella seguente riassume i risultati di tutte le determinazioni analitiche eseguite sui terreni circostanti la discarica (S3-C1, C2, C3 ed S4-C1, C2) e sui terreni di fondo della stessa (S6-fondo ed S7-fondo).

N°	Parametri	Limiti nazionali Tab 1 Col. B D.M. 471/99 (mg/kg ss)	R. di prova	R. di prova	R. di prova	R. di prova	R. di prova	R. di prova	R. di prova
			05/131444	05/131445	05/131446	05/131447	05/131448	05/131449	05/141710
			Sondaggio	Sondaggio	Sondaggio	Sondaggio	Sondaggio	Sondaggio	Sondaggio
			S3	S3	S3	S4	S4	S6	S7
			Campione	Campione	Campione	Campione	Campione	Campione	Campione
C1	C2	C3	C1	C2	Fondo	Fondo			
Profondità	Profondità	Profondità	Profondità	Profondità	Profondità	Profondità			
0-1,5 mt	1,5-3,0 mt	3,0-4,5 mt	0-1,5 mt	1,5-3,0 mt	20,6-20,9 mt	20,5 mt			
COMPOSTI INORGANICI									
	ALLUMINIO		9.300	5.700	8.900	9.300	6.500	11.800	20000
2	ARSENICO	50	1,20	0,30	2,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
	BORO		0,7	1,3	2,1	2,6	0,7	1,9	4,4
4	CADMI	15	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
6	CROMO TOTALE	800	3,6	3,6	3,4	4,0	3,8	23	9,2
	FERRO		13.100	11.600	12.600	13.700	11.600	17.000	27000
	MANGANESE		390	230	340	370	280	290	840
8	MERCURIO	5	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
9	NICHEL	500	5,6	1,1	0,6	0,7	0,8	11,0	2,3
10	PIOMBO	1000	4,9	9,5	6,0	6,0	6,2	12,3	17
11	RAME	600	12,1	16,4	11,4	12,1	12,3	24	10
16	ZINCO	1500	7,5	7,6	9,1	7,9	9,8	20	68
COMPOSTI ALIFATICI CLORURATI CANCEROGENI									
36	CLOROMETANO	5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
37	DICLOROMETANO	5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
38	CLOROFORMIO	5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
39	CLORURO DI VINILE	0,1	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
40	1,2-DICLOROETANO	5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
41	1,1-DICLOROETILENE	1	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
42	1,2-DICLOROPROPANO	5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
43	1,1,2-TRICLOROETANO	15	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
44	TRICLOROETILENE	10	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
45	1,2,3-TRICLOROPROPANO	1	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
46	1,1,2,2-TETRACLOROETANO	10	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
47	TETRACLOROETILENE	20	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	ESACLOROBUTADIENE		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
COMPOSTI ALIFATICI CLORURATI NON CANCEROGENI									
48	1,1-DICLOROETANO	30	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
49	1,2-DICLOROETILENE	15	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
50	1,1,1-TRICLOROETANO	50	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
COMPOSTI ALIFATICI ALOGENATI CANCEROGENI									
51	BROMOFORMIO	10	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
52	1,2-DIBROMOETANO	0,1	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
53	DIBROMOCLOROMETANO	10	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
54	BROMODICLOROMETANO	10	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
CLOROBENZENI									
59	CLOROBENZENE	50	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
60	1,2-DICLOROBENZENE	50	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
61	1,4-DICLOROBENZENE	10	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
62	1,2,4-TRICLOROBENZENE	50	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
63	1,2,4,5-TETRACLOROBENZENE	25	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
64	PENTACLOROBENZENE	50	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
65	ESACLOROBENZENE (HCB)	5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	ESACLOROETANO		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	PENTACLOROETANO		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	TETRACLORURO DI CARBONIO		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	COMPOSTI ORGANOALOGENATI TOTALI		< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
	1,1,1,2-TETRACLOROETANO		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	1,2,3-TRICLOROBENZENE		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	1,3,5-TRICLOROBENZENE		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	1,3-DICLOROBENZENE		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

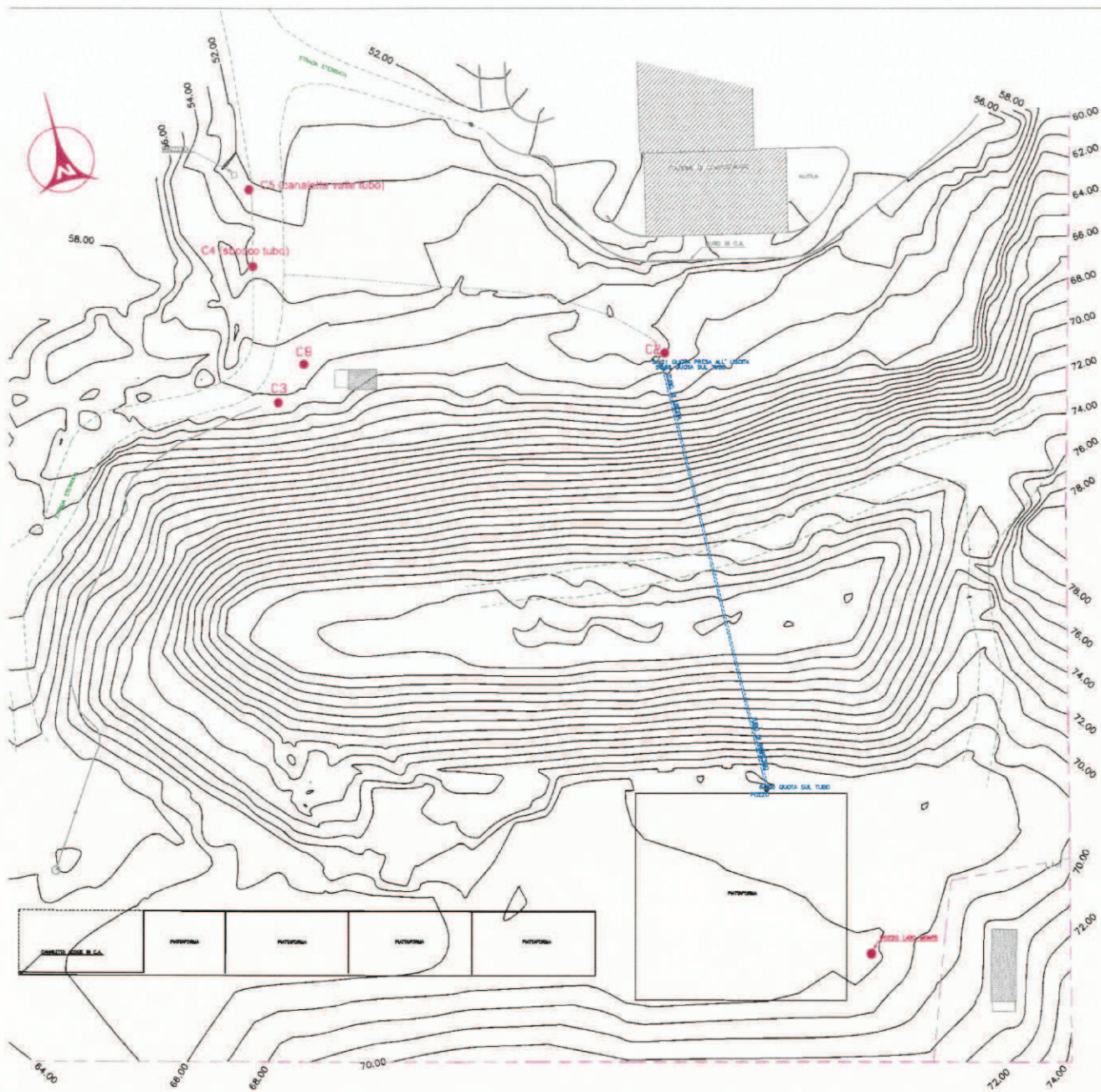
2.1.5.5 Esiti analisi delle acque superficiali, di falda, del percolato

2.1.5.5. a) Ubicazione punti di prelievo

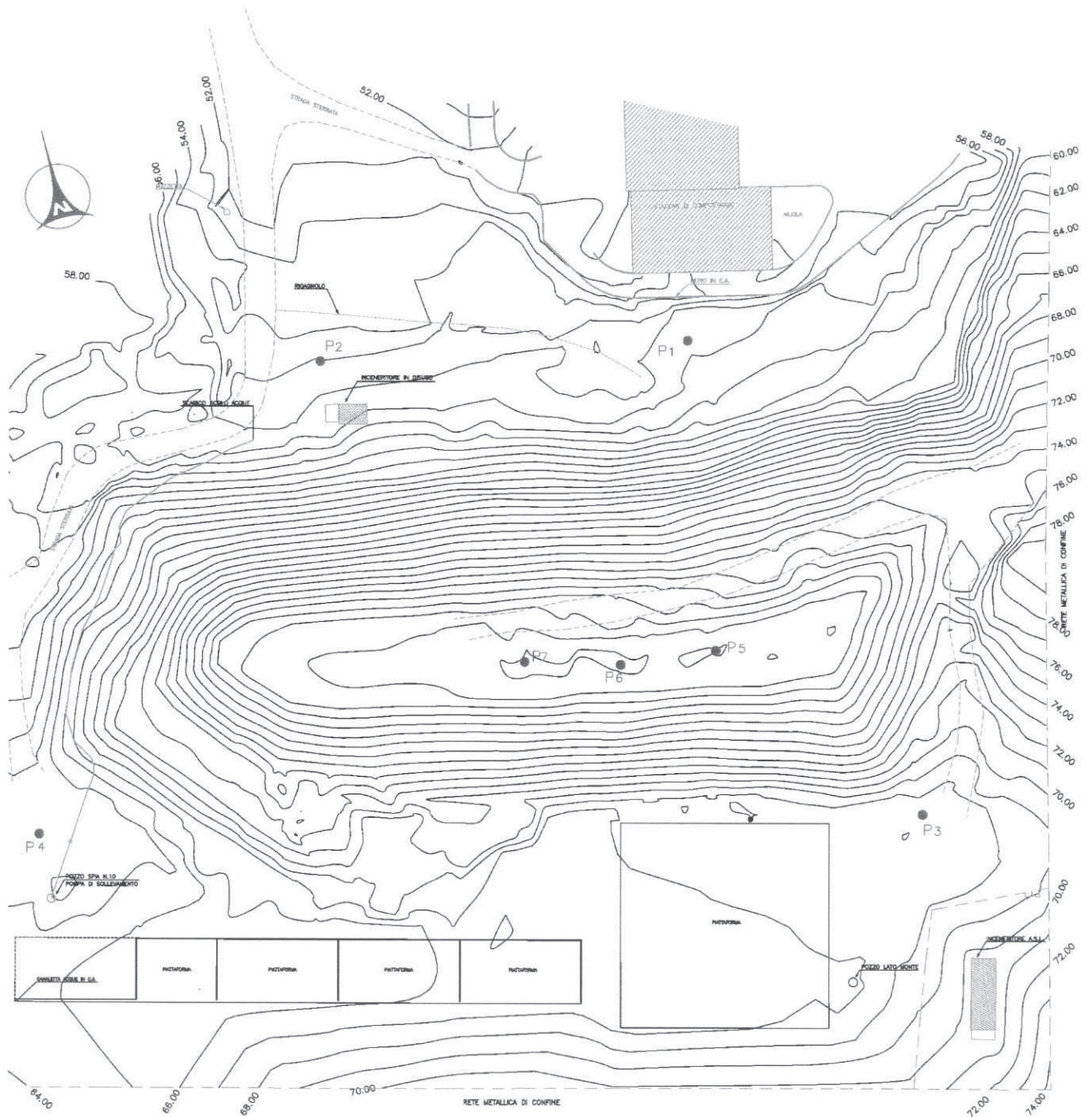
Sono state eseguite determinazioni analitiche su campioni di acqua superficiale, di acqua di falda e di percolato.

Le acque superficiali sono state prelevate nei seguenti siti, secondo allegata planimetria:

- pozzo a monte discarica;
- C3, tubo in uscita circostante discarica;
- C4, sbocco tubo nella canaletta principale;
- C5, canaletta principale a valle dello sbocco;
- C2, uscita tubo passante sotto la discarica;
- C8, ristagno d'acqua (affioramento percolato).



Le acque di falda sono state prelevate dai sondaggi-piezometri P1, P2, P3, P4, ed il percolato è stato prelevato dai sondaggi-piezometri ubicati sul corpo discarica P5, P6, P7, il tutto secondo allegata planimetria.



2.1.5.5. b) Analisi acque superficiali

Risultano analizzati n.6 campioni (C2, C3, C4, C5, C8, pozzo lato monte) allo scopo di verificare l'esistenza di eventuali contaminazioni, come desumibile dal confronto di valori ottenuti dalle analisi con i valori delle concentrazioni limite per le acque sotterranee (All.1. Tab.2, D.M. 471/1999).

I parametri ricercati risultano dalla seguente tabella.

PARAMETRO	METODO DI PROVA
CONDUCIBILITA' ELETTRICA 20 °C	APAT IRSA 29/03 2030
MATERIALI IN SOSPENSIONE	APAT 29/03 2090 B
pH	APAT IRSA 29/03 2060
AZOTO AMMONIACALE	APAT IRSA 29/03 4030
AZOTO TOTALE (KJELDAHL)	APAT IRSA 29/03 5030
ALCALINITA' TOTALE	APAT IRSA 29/03 2010
AZOTO ORGANICO	APAT IRSA 29/03 5030
BOD 5	APAT IRSA 29/03 5120
CIANURI LIBERI	EPA 9014/96
COD	APAT IRSA 29/03 5130
DUREZZA TOTALE	APAT IRSA 29/03 2040
CLORURI/ FLORURI/ NITRATI	EPA 300.1/97
NITRITI	APAT IRSA 29/03 4050
SOLFURI	APAT IRSA 29/03 4160
FOSFORO TOTALE	APAT IRSA 29/03 4110
OLI E GRASSI ANIMALI E VEGETALI	APAT 29/2003 5160 A
SOLIDI DISCIOLTI	APHA 2540C/98
ALLUMINIO/ BARIO/ BORO/ CALCIO/ FERRO/ MAGNESIO/ SODIO/ POTASSIO	EPA-6010-C/00
ARGENTO/ ARSENICO/ CADMIO/ CROMO/ MANGANESE/ MERCURIO/ NICHEL/ PIOMBO/ RAME/ SELENIO/ ZINCO	EPA 200.8/94
COMPOSTI AROMATICI/ BENZENE/ ETILBENZENE/ STIRENE/ TOLUENE/ XILENI/ p-XILENE/ COMPOSTI ORGANOALOGENATI/ COMPOSTI ALIFATICI CANCEROGENI/ CLOROMETANO/ CLOROFORMIO/ CLORURO DI VINILE/ 1,2-DICLOROETANO/ 1,1- DICLOROETILENE/ 1,2-DICLOROPROPANO/ 1,1,2- TRICLOROETANO/ TRICLOROETILENE/ 1,2,3- TRICLOROPROPANO/ 1,1,2,2-TETRACLOROETANO/ TETRACLOROETILENE/ ESACLOROBUTADIENE/ COMPOSTI ALIFATICI CLORURATI CANCEROGENI TOTALI/ COMPOSTI ALIFATICI CLORURATI NON CANCEROGENI/ 1,1- DICLOROETANO/ 1,2-DICLOROETILENE/ COMPOSTI ALIFATICI ALOGENATI CANCEROGENI/ BROMOFORMIO/ 1,2- DIBROMOETANO/ DIBROMOCLOROMETANO/ BROMODICLOROMETANO/ CLOROBENZENI/ CLOROBENZENE/ 1,2-DICLOROBENZENE/ 1,4-DICLOROBENZENE/ 1,2,4- TRICLOROBENZENE/ DICLOROMETANO/ ESACLOROETANO/ PENTACLOROETANO/ TETRACLORURO DI CARBONIO/ COMPOSTI ORGANOALOGENATI TOTALI/ 1,1,1,2- TETRACLOROETANO/ 1,1,1-TRICLOROETANO/ 1,2,3- TRICLOROBENZENE/ 1,3,5-TRICLOROBENZENE/ 1,3- DICLOROBENZENE	EPA-8260B/96
FENOLI TOTALI	APAT IRSA 29/03 5070
IDROCARBURI TOTALI (come n-esano)	EPA 8015 D/03
1,2,4,5-TETRACLOROBENZENE/ PENTACLOROBENZENE/ ESACLOROBENZENE (HCB)	EPA-8270-D/98
COLIFORMI TOTALI	APAT 7010 C 29/03
COLIFORMI FECALI	APAT 7020 B 29/03
STREPTOCOCCI FECALI	APAT 7040 C 29/03

Segue una sintesi dei risultati:

- Non sono stati riscontrati superamenti delle concentrazioni limite per i sotto indicati parametri:
 - Composti aromatici
 - Composti alifatici clorurati cancerogeni e non cancerogeni;
 - Composti alifatici alogenati cancerogeni;
 - Clorobenzeni.
- Superano le concentrazioni limite in tutti i campioni, *pozzo a monte compreso*, i seguenti parametri:
 - Ferro;
 - Manganese.
- Superano le concentrazioni limite in tutti i campioni, *pozzo a monte escluso*, i seguenti parametri:
 - Alluminio;
 - Nichel.
- Superano le concentrazioni limite nella maggior parte dei campioni, *pozzo a monte escluso*, i seguenti parametri:
 - Boro (C2, C3, C4, C8)
 - Nitriti (C3, C4, C5);
 - Arsenico (C2, C3, C4, C5);
 - Piombo (C2, C3, C4, C8).
- Presenti in tutti i campioni, *pozzo a monte incluso*, con valori diversificati:
 - Azoto ammoniacale, azoto totale, azoto organico;
 - Nitriti, nitrati.

- Presenti in tutti i campioni, *escluso il pozzo a monte*:
 - Coliformi totali e fecali;
 - Streptococchi fecali.

In conclusione, si osserva che:

- il ferro ed il manganese presentano concentrazioni elevate in tutti i campioni, compreso il pozzo lato monte, il cui campione, perciò, può essere considerato come *“bianco di riferimento”*, in quanto rappresentativo delle acque superficiali provenienti dal versante a sud, esterno alla discarica; si osserva che anche nei campioni dei terreni il ferro ed il manganese presentano concentrazioni elevate, per cui si ritiene che tali valori *“non siano collegabili alla presenza della discarica ma siano caratteristici del fondo naturale del sito”*.
- i campioni prelevati nei punti più distanti dalla discarica (C4 e C5) presentano valori più bassi dei contaminanti caratteristici riscontrati nei campioni prelevati nei punti più vicini alla discarica (C2, C3, C8);
- le caratteristiche chimiche dei campioni delle acque superficiali (C2, C3, C4, C5, C8) sono correlabili, come si vedrà nel successivo paragrafo, con quelle delle acque di falda del piezometro P2 e con quelle del percolato dei piezometri P5, P6, P7; la correlazione tra le caratteristiche chimiche del percolato (P5, P6, P7) e le caratteristiche chimiche delle acque superficiali (C2, C3, C4, C5, C8) e di falda (P2), tutte ubicate a valle della discarica, testimoniano che ***la fonte delle contaminazioni è, per l'appunto, il percolato presente in discarica.***

2.1.5.5. c) Analisi acque di falda

Sono stati analizzati n.4 campioni d'acqua prelevati dai piezometri P1, P2, P3, P4, di cui i primi due (P1 e P2) posizionati a valle della discarica e gli ultimi due (P3 e P4) ubicati a monte della discarica, per verificare eventuali contaminazioni dovute alla presenza della contigua discarica.

I valori dei parametri ricercati sono stati confrontati con i valori delle concentrazioni limite per le acque sotterranee, all'All.1, Tab.2 del D.M. 471/1999.

In sintesi i risultati ottenuti sono i seguenti:

- Non sono stati riscontrati superamenti delle concentrazioni limite per i sotto indicati parametri:
 - composti alifatici clorurati non cancerogeni;
 - composti alifatici alogenati cancerogeni;
 - clorobenzeni.
- Superano le concentrazioni limite i seguenti parametri:
 - Composti organici aromatici:
Benzene (P2)
 - Composti alifatici clorurati cancerogeni:
Cloroformio (P1)
- Superano le concentrazioni limite in tutti i campioni i seguenti parametri:
 - Ferro
 - Manganese
 - Alluminio
 - Piombo

- Superano le concentrazioni limite in pochi casi i seguenti parametri:
 - Nitriti (P4)
 - Arsenico (P2)
 - Mercurio (P1)
 - Nichel (P2 e P4)
- Presenti in tutti i campioni con valori diversificati:
 - Azoto ammoniacale, azoto totale, azoto organico
 - Nitriti e nitrati (max P2)
 - Cloruri (max P2)
- Presenti in tutti i campioni i coliformi totali
- Assenti in tutti i campioni i coliformi fecali
- Presenti gli streptococchi fecali solo in P2 e P4.

Concludendo sul punto si osserva che:

- ferro e manganese anche in questo caso risultano essere ubiquitari, per cui restano maggiormente avvalorate le osservazioni espresse in precedenza, circa **la possibilità che essi rientrino tra i valori caratteristici del fondo naturale del sito**;
- esiste una evidente correlazione (**con riferimento alle linee di flusso della falda con direttrici SE-NW**) tra le acque di falda del piezometro P2, ubicato a valle della discarica sul lato NW, le acque superficiali (C2, C3, C4, C5, C8), tutte ubicate a valle della discarica sul lato NW, ed il percolato proveniente da monte (P5, P6, P7, sul corpo della discarica);
- l'acqua di falda del piezometro P1, *ubicato a valle della discarica, lato NE*, è sostanzialmente confrontabile con l'acqua

di falda superficiale dei piezometri P3 e P4, ubicati a monte della discarica (anche in questo caso ***è utile richiamare le direttrici delle linee di flusso della falda con orientamento SE-NW, che escluderebbero, nel loro percorso verso valle e dopo aver sottopassato la discarica, proprio il piezometro P1***);

- in ogni caso le tracce di contaminazione da percolato presenti in questi piezometri risultano sempre notevolmente inferiori ai valori riscontrati nelle acque del margine a NW, soprattutto con riferimento ai parametri coliformi totali e piombo.

2.1.5.5. d) Analisi percolato

Sono stati analizzati n.3 campioni di percolato, rispettivamente prelevati dai piezometri P5, P6, P7, ubicati sul corpo della discarica.

I parametri ricercati risultano dalla seguente tabella.

PARAMETRO	METODO DI PROVA
CONDUCIBILITA' ELETTRICA 20 °C	APAT IRSA 29/03 2030
pH	APAT IRSA 29/03 2060
AZOTO AMMONIACALE	APAT IRSA 29/03 4030
AZOTO TOTALE (KJELDAHL)	APAT IRSA 29/03 5030
BOD 5	APAT IRSA 29/03 5120
COD	APAT IRSA 29/03 5130
CLORURI	EPA 300.1/97
SOLFURI	APAT IRSA 29/03 4160
FOSFORO TOTALE	APAT IRSA 29/03 4110
ALLUMINIO/ BORO/ FERRO/ ARSENICO	EPA-6010-C/00
MERCURIO	APAT-IRSA 3200°2 29/03
CADMIO/ CROMO/ MANGANESE	EPA-6010-C/00
NICHEL/ PIOMBO/ RAME/ ZINCO	EPA 200.8/94
COMPOSTI AROMATICI/ BENZENE/ ETILBENZENE/ STIRENE/ TOLUENE/ XILENI/ COMPOSTI ORGANOALOGENATI/ COMPOSTI ALIFATICI CANCEROGENI/ CLOROMETANO/ CLOROFORMIO/ CLORURO DI VINILE/ 1,2-DICLOROETANO/ 1,1- DICLOROETILENE/ 1,2-DICLOROPROPANO/ 1,1,2- TRICLOROETANO/ TRICLOROETILENE/ 1,2,3- TRICLOROPROPANO/ 1,1,2,2-TETRACLOROETANO/ TETRACLOROETILENE/ ESACLOROBUTADIENE/ COMPOSTI ALIFATICI CLORURATI NON CANCEROGENI/ 1,1- DICLOROETANO/ 1,2-DICLOROETILENE/ COMPOSTI ALIFATICI ALOGENATI CANCEROGENI/ BROMOFORMIO/ 1,2- DIBROMOETANO/ DIBROMOCLOROMETANO/ BROMODICLOROMETANO/ CLOROBENZENI/ CLOROBENZENE/ 1,2-DICLOROBENZENE/ 1,4-DICLOROBENZENE/ 1,2,4- TRICLOROBENZENE/ DICLOROMETANO/ ESACLOROETANO/ PENTACLOROETANO/ TETRACLORURO DI CARBONIO/ COMPOSTI ORGANOALOGENATI TOTALI/ 1,1,1,2- TETRACLOROETANO/ 1,1,1-TRICLOROETANO/ 1,2,3- TRICLOROBENZENE/ 1,3,5-TRICLOROBENZENE/ 1,3- DICLOROBENZENE/ ESACLOROBENZENE (HCB)	EPA-8260B/96
FENOLI TOTALI	APAT IRSA 29/03 5070
IDROCARBURI TOTALI (come n-esano)	EPA 8015 D/03
1,2,4,5-TETRACLOROBENZENE/ PENTACLOROBENZENE/ ESACLOROBENZENE (HCB)	EPA-8270-D/98
COLIFORMI TOTALI	APAT 7010 C 29/03
ESCHERICHIA COLI	APAT 70300 C 29/03
STREPTOCOCCI FECALI	APAT 7040 C 29/03

Si è ritenuto utile operare un confronto tra i valori dei parametri riscontrati nel percolato e quelli delle acque di falda, al fine di verificare eventuali correlazioni tra acque e percolato.

La tabella seguente riepiloga tutti i risultati ottenuti dalle analisi delle acque di falda, delle acque superficiali e del percolato e ne consente la verifica delle reciproche correlazioni nonché il confronto con i valori delle concentrazioni limite per le acque sotterranee (All.1, Tab.2 del D.M. 471/1999), evidenziandone con colore verde i casi di superamento.

Riepilogo analisi acque

N°	Parametri	Limiti nazionali DM 471/99	R. Prova															
			05/135591	R. Prova 05/135592	R. Prova 05/135593	R. Prova 05/135594	R. Prova 05/151622	R. Prova 05/151623	R. Prova 05/151624	R. Prova 05/135595	R. Prova 05/135596	R. Prova 05/135597	R. Prova 05/135598	R. Prova 05/135599	R. Prova 05/135600			
			Unità misura	Campione	Campione	Campione	Campione	Campione	Campione	Campione	Campione	Campione	Campione	Campione	Campione	Campione		
			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	C3	C4	C5	C2	C8		
	Valori limite		Prelievo 20/06/05	Prelievo 20/06/05	Prelievo 20/06/05	Prelievo 20/06/05	Prelievo 13/07/05	Prelievo 13/07/05	Prelievo 13/07/05	Prelievo 20/06/05	Prelievo 20/06/05	Prelievo 20/06/05	Prelievo 20/06/05	Prelievo 20/06/05	Prelievo 20/06/05	Prelievo 20/06/05		
CONDUCIBILITÀ ELETTRICA 20 °C			µS/cm	1.090	11.570	755	1.005	19.760	19.880	15.360	770	11.910	9.730	9.650	14.100	13.900		
MATERIALI IN SOSPENSIONE			mg/l	310	750	770	2.300				15	380	580	70	190	3.600		
pH				7,26	7,68	6,36	6,95	8,00	7,80	7,90	7,79	8,13	7,99	8,24	8,07	7,41		
AZOTO AMMONIACALE			mg/l	1,10	195	1,6	1,30	150	1.280	1.000	0,90	260	138	130	320	199		
AZOTO TOTALE (KJELDAHL)			mg/l (come N)	1,60	231	2,50	4,50	1.430	1.360	1.030	1,20	302	145	153	339	273		
ALCALINITÀ TOTALE			mg/l (come CaCO3)	220	1.870	510	210				135	1.910	1.400	1.300	2.600	1.310		
AZOTO ORGANICO			mg/l	0,50	35	1,9	3,2				0,20	40	7,2	23	23	74		
BOD 5			µg/l (come O2)	15.000	980.000	50.000	50.000	800.000	1.780.000	2.500.000	20.000	890.000	780.000	750.000	800.000	900.000		
COD			mg/l (come O2)	60	1.600	110	120	2.000	4.500	6.200	60	1.500	1.300	1.300	1.300	1.800		
DUREZZA TOTALE			°F	26,5	194	16,8	26,9				15,2	38,9	153	110	93,5	301		
CLORURI			mg/l (come Cl)	65	3.500	78	62	4.300	3.700	3.200	22	2.800	2.600	2.600	3.400	3.700		
NITRATI			mg/l (come NO3)	16,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,5	232,3	172,5	26,2	0,7	0,1		
SOLFURI			mg/l (come H2S)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1		
FOSFORO TOTALE			mg/l (come P)	0,30	0,60	0,60	2,2	4,2	10,0	13,0	0,10	4,2	0,70	0,20	0,70	3,8		
OLI E GRASSI ANIMALI E VEGETALI			mg/l	5,0	4,7	2,0	3,4				< 0,5	6,7	1,4	2,7	< 0,5	< 0,5		
SOLIDI DISCIOLTI			mg/l	730	7.800	510	670				520	8.000	6.900	6.500	9.400	9.300		
INQUINANTI INORGANICI																		
20	CIANURI LIBERI	50	µg/l (come CN)	< 10	< 10	< 10	< 10				< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10		
21	FLUORURI	1500	µg/l	1.100	440	100	400				700	900	800	600	1.100	1.000		
22	NITRITI	500	µg/l (come NO2)	340	< 10	< 10	1.930				80	43.000	7.800	24.000	< 10	< 10		
19	BORO	1000	µg/l	64	< 5	250	300	2.000	1.230	1.200	50	3.000	1.100	950	1.600	1.600		
METALLI																		
1	ALLUMINIO	200	µg/l (come Al)	4.100	1.700	12.000	15.000	500	870	320	30	1.400	11.000	600	2.400	23.000		
3	ARGENTO	10	µg/l (come Ag)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1				< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1		
4	ARSENICO	10	µg/l (come As)	2,2	11,0	< 0,1	< 0,1	49	28	25	4,0	16,0	37	17,0	21	2,8		
5	BARIO	10	µg/l (come Ba)	65	700	100	160				12	150	800	330	370	3.100		
6	CADMIO	5	µg/l (come Cd)	< 0,1	0,40	< 0,1	< 0,1	< 5	< 5	< 5	< 0,1	2,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	4,3		
8	CALCIO	100	mg/l (come Ca)	55	250	26	42				28	65	250	96	78	630		
8	CROMO	50	µg/l (come Cr)	5,2	12,0	6,5	20	70	260	44	2,8	26	15,0	9,0	15,0	31		
10	FERRO	200	µg/l (come Fe)	7.800	30.000	26.000	54.000	8.600	9.000	8.100	780	4.200	43.000	2.600	15.000	330.000		
11	MAGNESIO	100	mg/l (come Mg)	31	320	25	40				20	55	220	210	180	350		
16	MANGANESE	50	µg/l (come Mn)	320	10.000	3.400	2.400	110	250	150	360	620	14.000	1.600	2.100	60.000		
11	MERCURIO	1	µg/l (come Hg)	2,0	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 2	< 2	< 2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1		
12	NICHEL	20	µg/l (come Ni)	11,0	65	10,0	22	240	100	210	< 0,1	140	55	52	93	58		
13	PIOMBO	10	µg/l (come Pb)	450	50	45	200	14	13	11	1,00	21	38	2,4	140	124		
13	POTASSIO	10	mg/l (come K)	10	120	10	5,7	12			5,2	310	140	130	290	130		
14	RAME	1000	µg/l (come Cu)	320	23	52	100	9	10	12	1,6	40	23	12,0	35	37		
15	SELENIO	10	µg/l (come Se)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1				< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1		
15	SCODIO	10	mg/l (come Na)	83	1.200	67	99				80	1.200	950	930	1.400	1.200		
18	ZINCO	3000	µg/l (come Zn)	150	70	120	300	70	59	49	14,0	350	120	30	54	400		
COMPOSTI ORGANICI AROMATICI																		
24	BENZENE	10	µg/l	< 0,03	1,21	< 0,03	< 0,03	6	3	2	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,12	0,60	0,39		
25	ETILBENZENE	50	µg/l	0,63	1,43	< 0,03	< 0,03	19	11	9	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,48	0,39	0,33		
26	STIRENE	25	µg/l	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 1	< 1	< 1	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2		
27	TOLUENE	15	µg/l	< 0,08	0,68	< 0,08	< 0,08	50	12	3	< 0,08	< 0,08	< 0,08	< 0,08	0,57	< 0,08		
28	p-XILENE	10	µg/l	< 0,10	1,00	< 0,06	< 0,06				< 0,06	0,25	0,30	0,18	0,80	0,11		
IDROCARBURI TOTALI (come n-esano)			µg/l	< 5	320	< 5	< 5	430	120	530	< 5	115	85	110	120	260		
COMPOSTI ALIFATICI CLORURATI CANCEROGENI																		
39	CLOROMETANO	1.5	µg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05		
40	CLOROFORMIO	0.15	µg/l	0,26	< 0,04	< 0,04	0,11	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04		
41	CLORURO DI VINILE	0.5	µg/l	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,1	11,6	< 0,1	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04		
42	1,2-DICLOROETANO	3	µg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02		
43	1,1-DICLOROETILENE	0.05	µg/l	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03		
44	1,2-DICLOROPROPANO	0.15	µg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02		
45	1,1,2-TRICLOROETANO	0.2	µg/l	< 0,08	< 0,08	< 0,08	< 0,08	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,08	< 0,08	< 0,08	< 0,08	< 0,08	< 0,08		
46	TRICLOROETILENE	1.5	µg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02		
47	1,2,3-TRICLOROPROPANO	0.001	µg/l	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001		
48	1,1,2,2-TETRACLOROETANO	0.05	µg/l	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03		
49	TETRACLOROETILENE	1.1	µg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05		
50	ESACLOROBUTADIENE	0.15	µg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1		
COMPOSTI ALIFATICI CLORURATI CANCEROGENI TOTALI			µg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1		
51	CANCEROGENI TOTALI	10	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1				< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1		
COMPOSTI ALIFATICI CLORURATI NON CANCEROGENI																		
52	1,1-DICLOROETANO	810	µg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05		
53	1,2-DICLOROETILENE	60	µg/l	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06		
COMPOSTI ALIFATICI ALOGENATI CANCEROGENI																		
54	BROMOFORMIO	0.3	µg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05		
55	1,2-DIBROMOMETANO	0.001	µg/l	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001		
56	DIBROMOCLOROMETANO	0.13	µg/l	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,07		
57	BROMODICLOROMETANO	0.17	µg/l	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03		
CLOROBENZENI																		
62	CLOROBENZENE	40	µg/l	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04		
63	1,2-DICLOROBENZENE	270	µg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05		
64	1,4-DICLOROBENZENE	0.5	µg/l	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04		
65	1,2,4-TRICLOROBENZENE	190	µg/l	< 0,09	< 0,09	< 0,09	< 0,09	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,09	< 0,09	< 0,09	< 0,09	< 0,09	< 0,09		
66	1,2,4,5-TETRACLOROBENZENE	1.8	µg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01		
67	PENTACLOROBENZENE	5	µg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01		
68	ESACLOROBENZENE (HCB)	0.01	µg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,1	< 0,									

In sintesi i risultati ottenuti sono i seguenti:

- non sono stati riscontrati superamenti dalle concentrazioni limite per i sotto indicati parametri:
 - composti alifatici clorurati non cancerogeni;
 - composti alifatici alogenati cancerogeni;
 - clorobenzeni;
- superano le concentrazioni limite i seguenti parametri:
 - composti organici aromatici: benzene (P5, P6, P7), toluene (P5);
 - composti alifatici clorurati cancerogeni: cloruro di vinile (P6);
- superano i valori limite in tutti i campioni i seguenti parametri:
 - boro
 - alluminio
 - arsenico
 - cromo (escluso P7)
 - ferro
 - manganese
 - nichel (escluso P4)
 - piombo;
- presenti in tutti i campioni con valori diversificati:
 - azoto ammoniacale
 - azoto totale
 - cloruri
 - fosforo totale;
- presenti in tutti i campioni con valori diversificati:

- coliformi totali
 - coliformi fecali
 - streptococchi fecali;
- Altri parametri di interesse sono:
 - ph, tra 7.8 e 8.0
 - COD, tra 2000 e 6200 µg/l
 - BOD5, tra 800 e 2500 µg/l.

Concludendo, si osserva che:

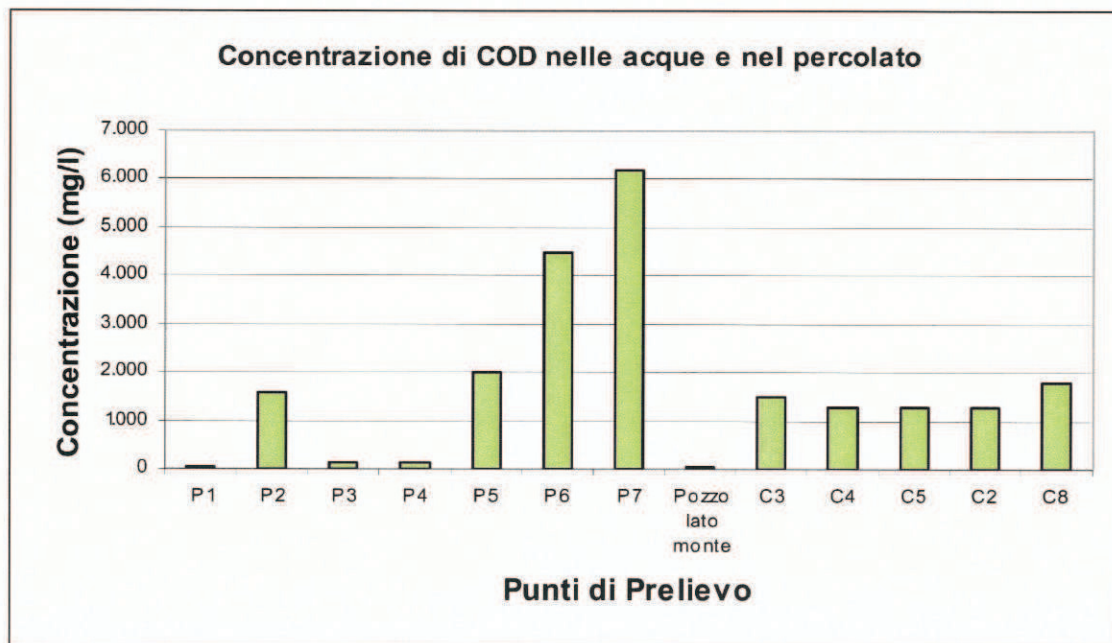
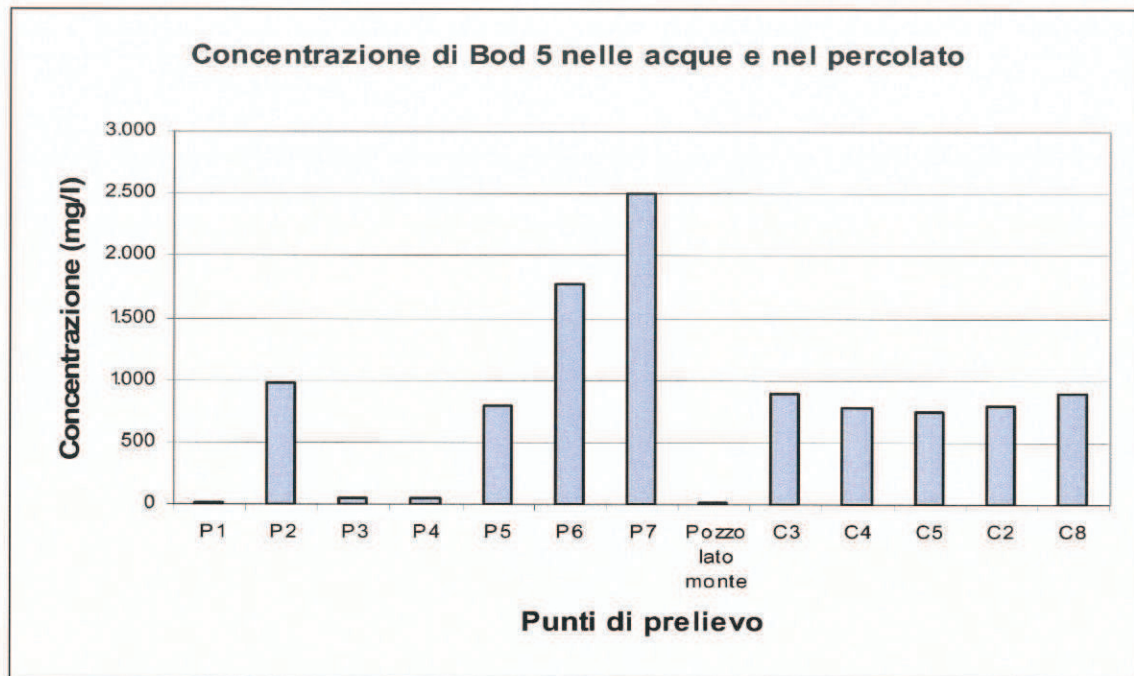
- ***esiste una evidente contaminazione da percolato***, di cui ai campioni prelevati dai piezometri P5, P6, P7 ubicati a monte sul corpo discarica ed ***i campioni delle acque superficiali C2, C3, C4, C5, C8 e di falda del piezometro P2, tutti ubicati a valle ed a NW della discarica;***
- l'acqua di falda di cui al piezometro P1, ubicato a valle ed a NE della discarica, è sostanzialmente correlabile con l'acqua di falda prelevata dai piezometri P3 e P4 ubicati a monte della discarica; ciò, tra l'altro, ***conferma l'orientamento SE-NW dei flussi di falda, come rappresentati nella carta delle isopieze;***
- i principali parametri inquinanti presenti nel percolato, come prelevato dai piezometri P5, P6, P7 interni alla discarica sono: BOD5, COD, azoto ammoniacale, coliformi totali e streptococchi fecali, nichel, piombo arsenico, boro, cromo, alluminio, cloruri, contaminanti organici, BTEX, tra cui benzene e toluene (P5), idrocarburi totali e in un solo caso (P6) il cloruro di vinile;
- le concentrazioni dei principali parametri tipici del percolato, soprattutto per COD, BOD5, azoto ammoniacale, coliformi

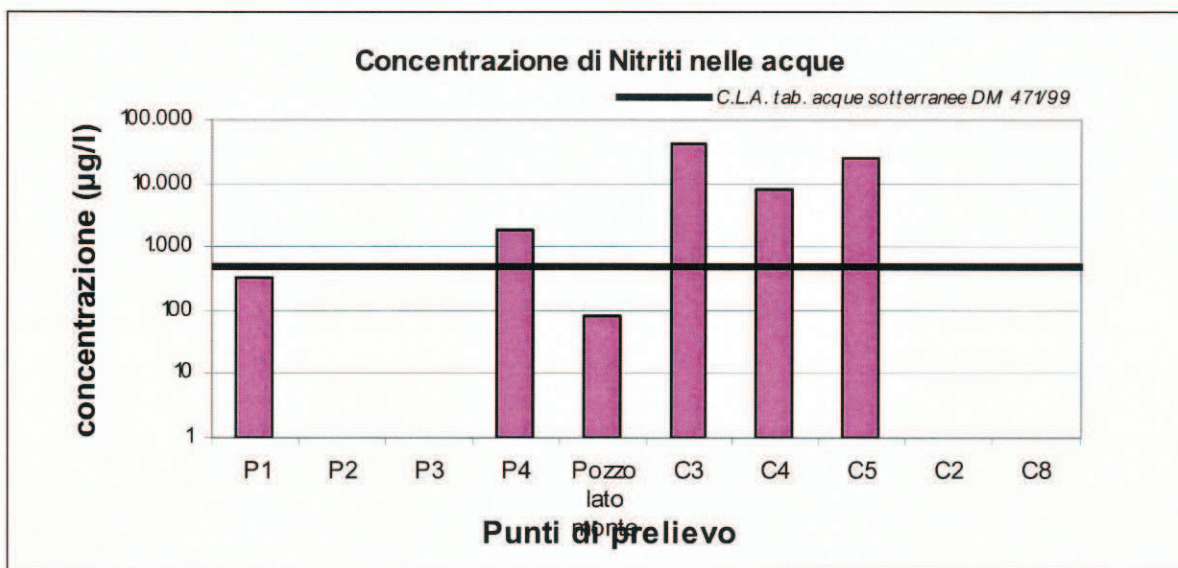
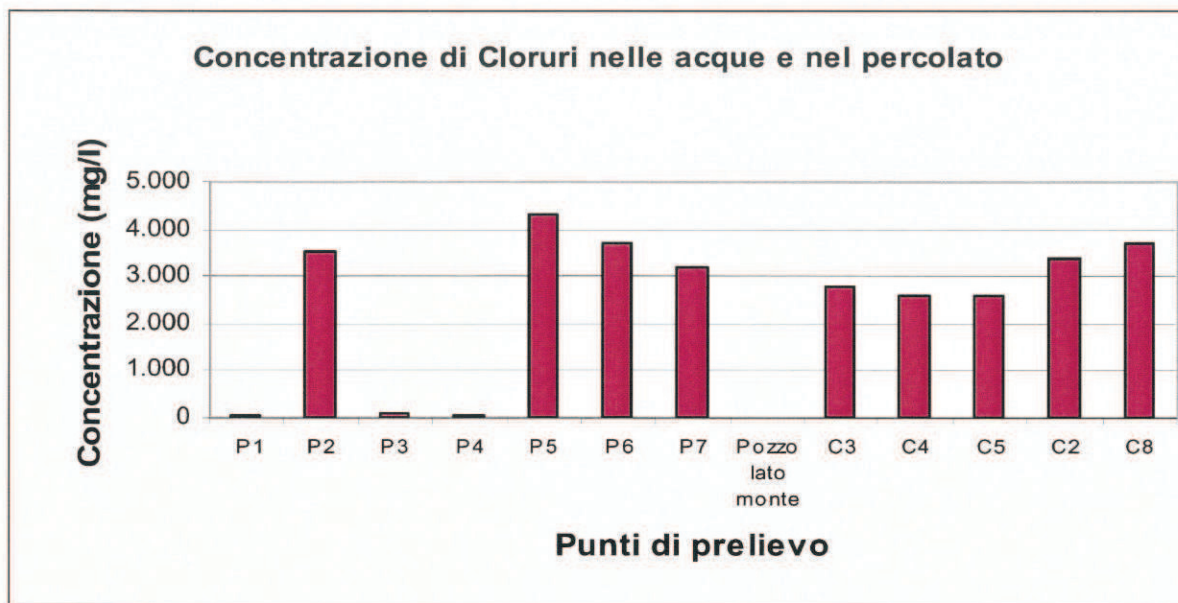
totali, sono più elevate nei campioni prelevati nel corpo discarica (P5, P6, P7) rispetto ai campioni delle acque contaminate prelevate all'esterno della discarica;

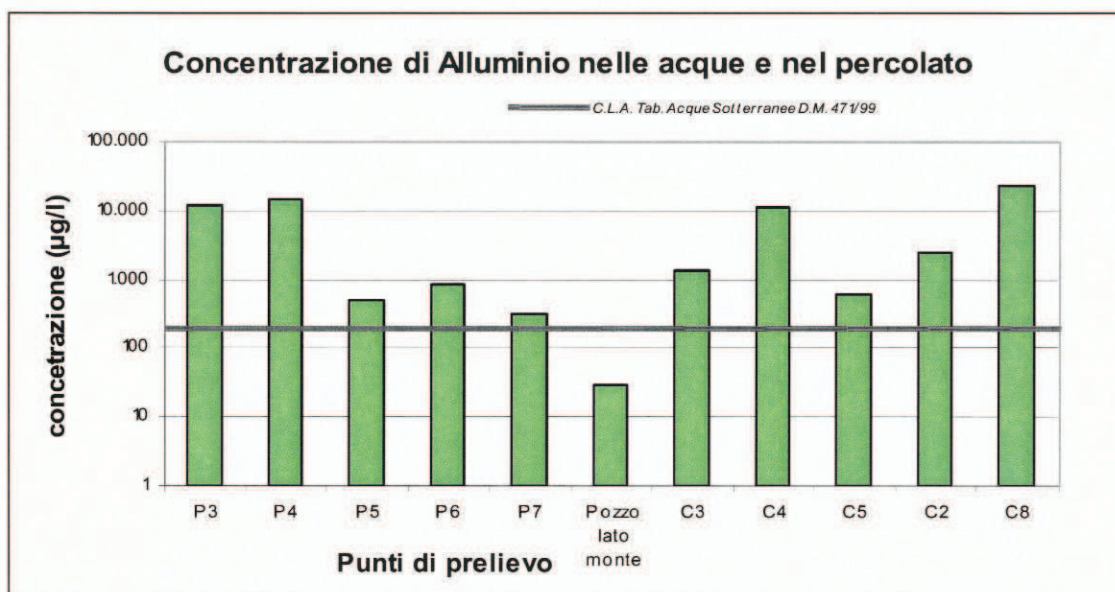
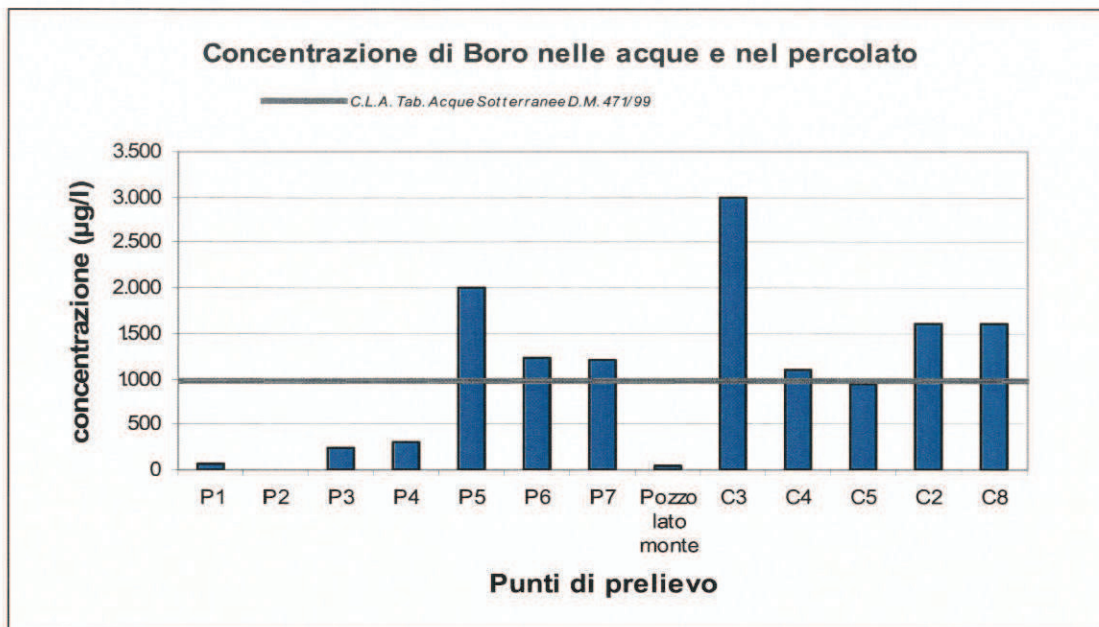
- il rapporto BOD5/COD, indice della frazione della sostanza organica biodegradabile su quella totale, si attesta attorno al valore di 0.4, tipico di una ancora significativa presenza di materiale organico biodegradabile, nonostante i 24 (max) - 14 (min) anni di attività della discarica; tale indice, infatti, dopo 20 anni di vita raggiunge un valore tipico pari a circa $0.07 \div 0.08$; ***il processo di mineralizzazione appare perciò lento, come attesta anche la ridotta quantità di biogas presente all'interno della discarica.***

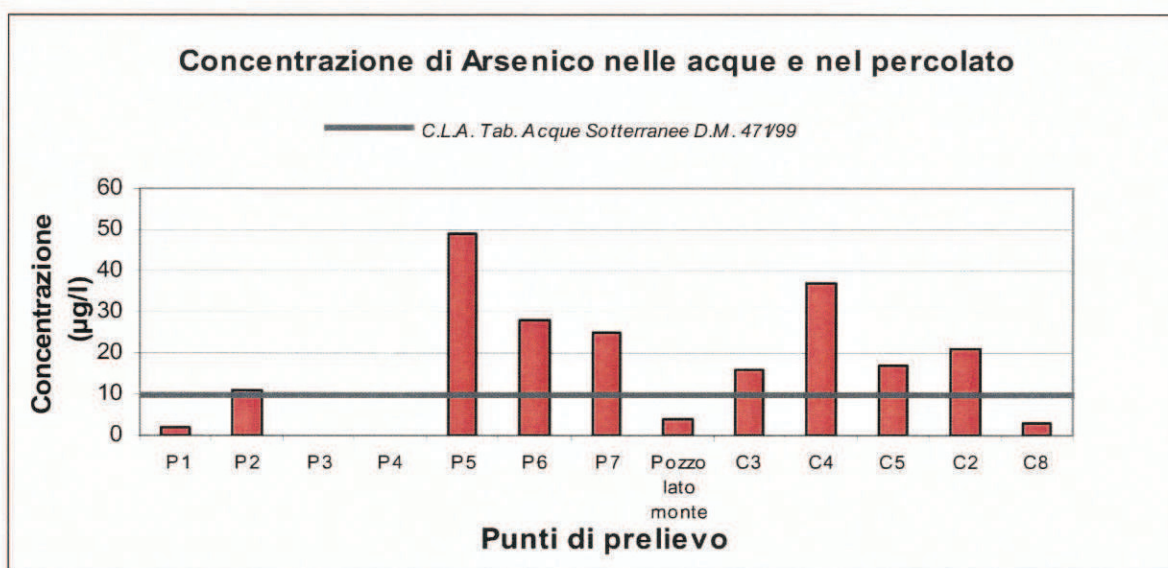
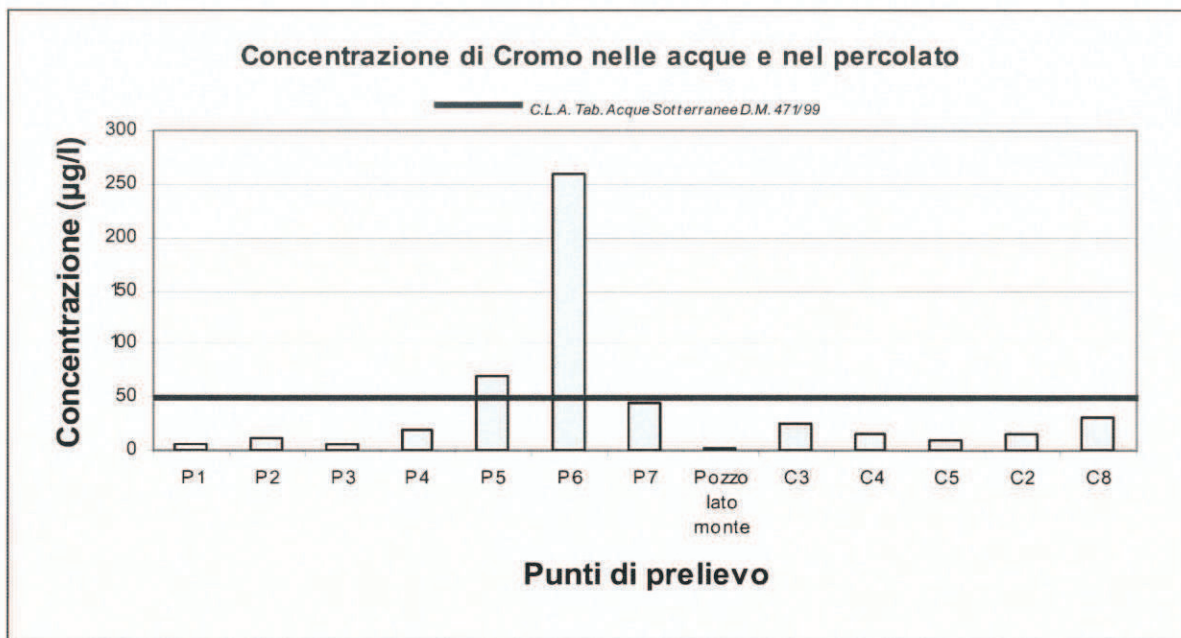
I seguenti diagrammi rappresentano in modo ancora più evidente la distribuzione spaziale dei contaminanti regolata dalla direzione di flusso della falda con orientamento SE-NW.

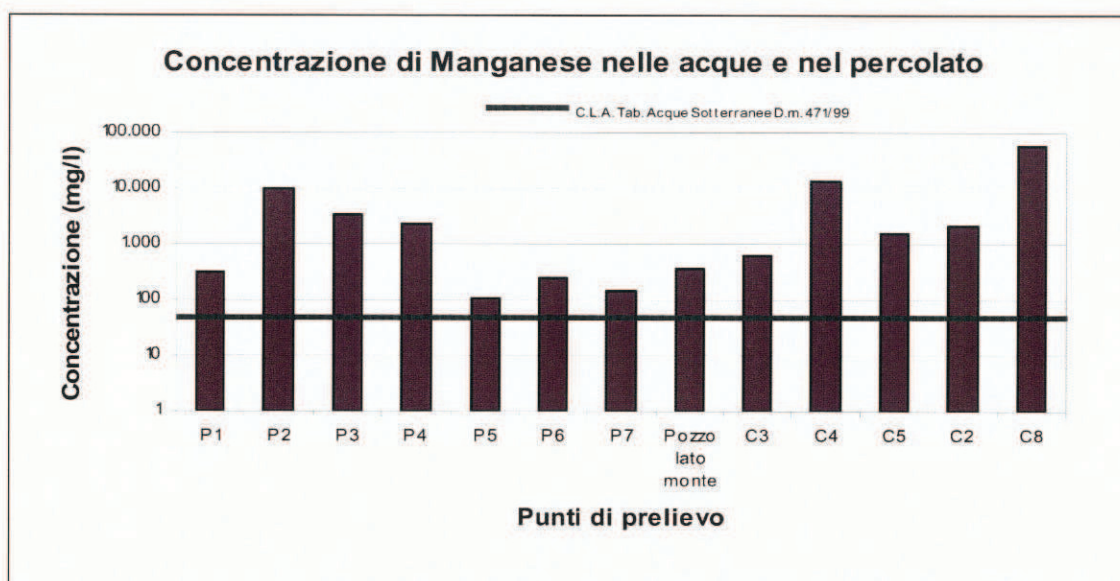
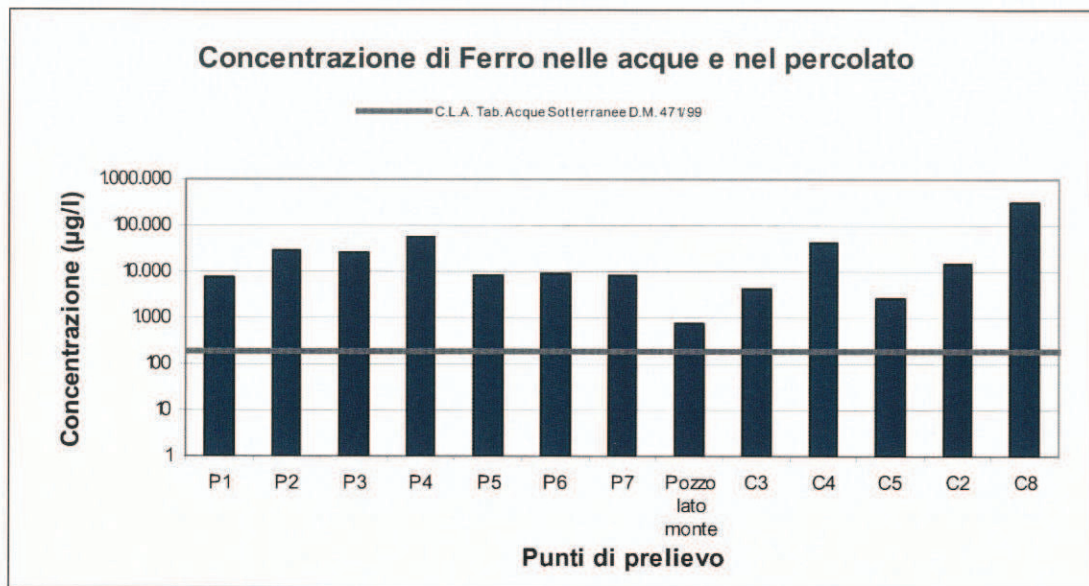
Ciò premesso, si osserva che ***i contaminanti presenti nel percolato con concentrazioni elevate (P5, P6, P7), si ritrovano con concentrazioni via via decrescenti*** prima nelle acque superficiali a valle della discarica, di cui ai campioni C2, C3, C4, C5, C8, poi nelle acque di falda, di cui ai piezometri P1, P2, P3, P4; tra questi, ***le concentrazioni maggiori si riscontrano nel piezometro P2 (a valle e a NW della discarica) e minori nel piezometro P1 (a valle e a NE della discarica); le acque del pozzo a monte della discarica risultano essere quelle con il minor tasso assoluto di inquinamento.***

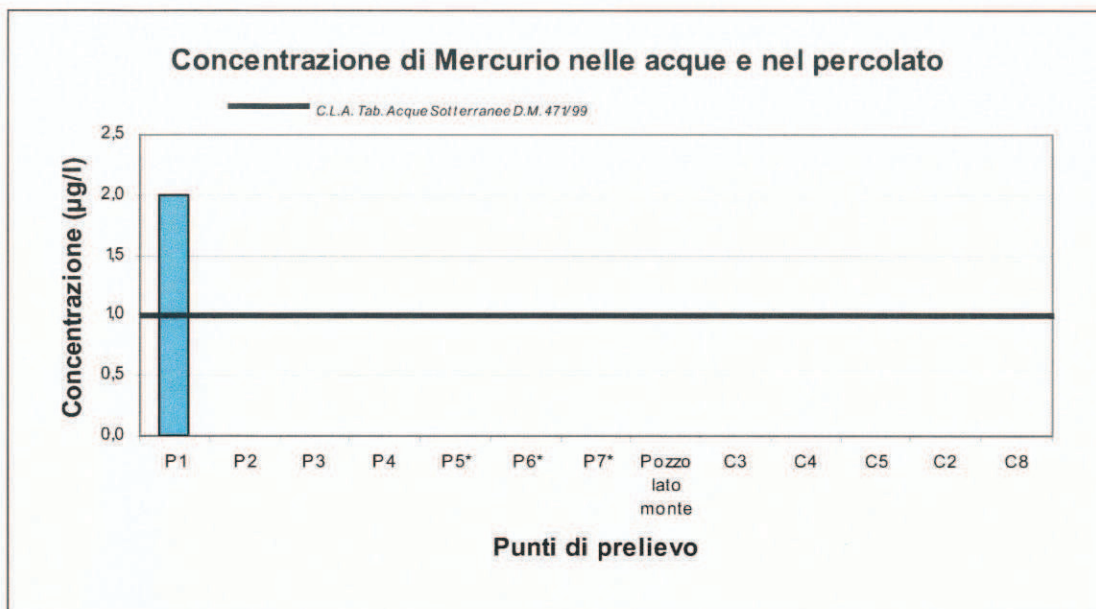




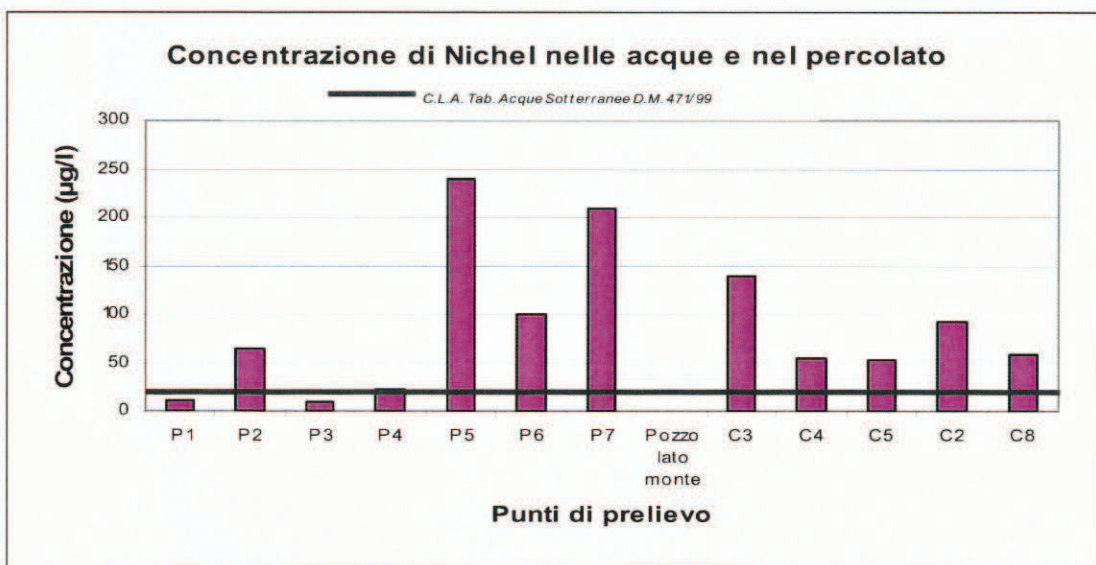


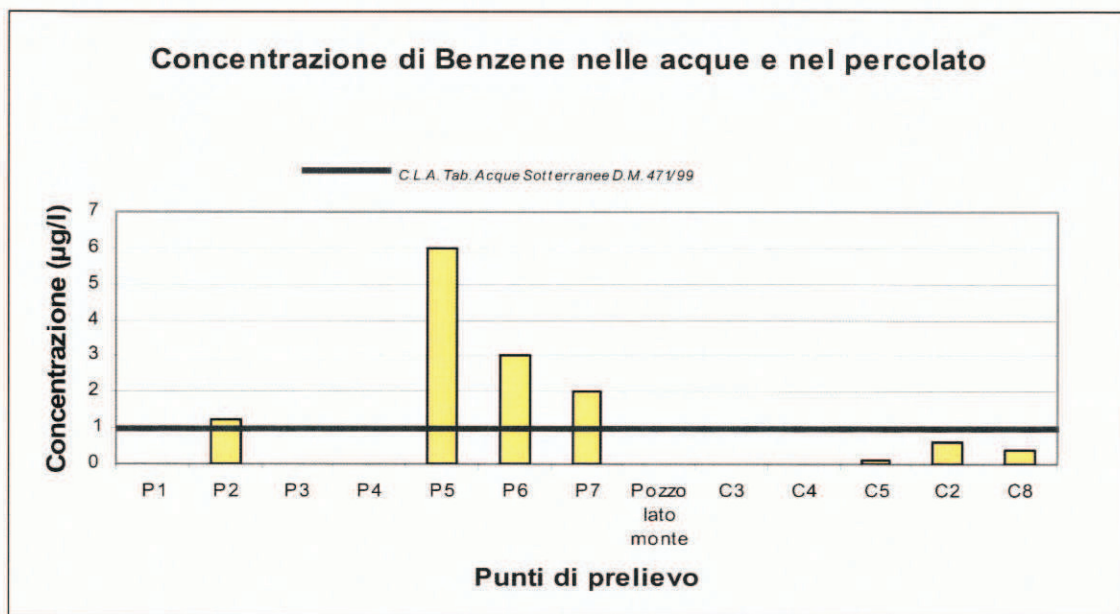
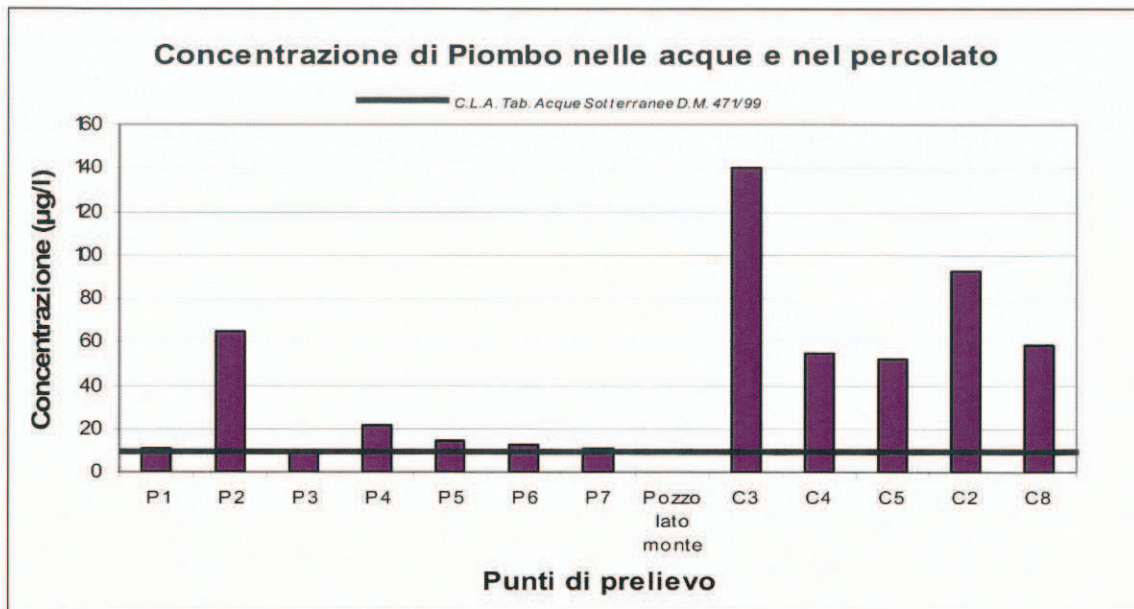


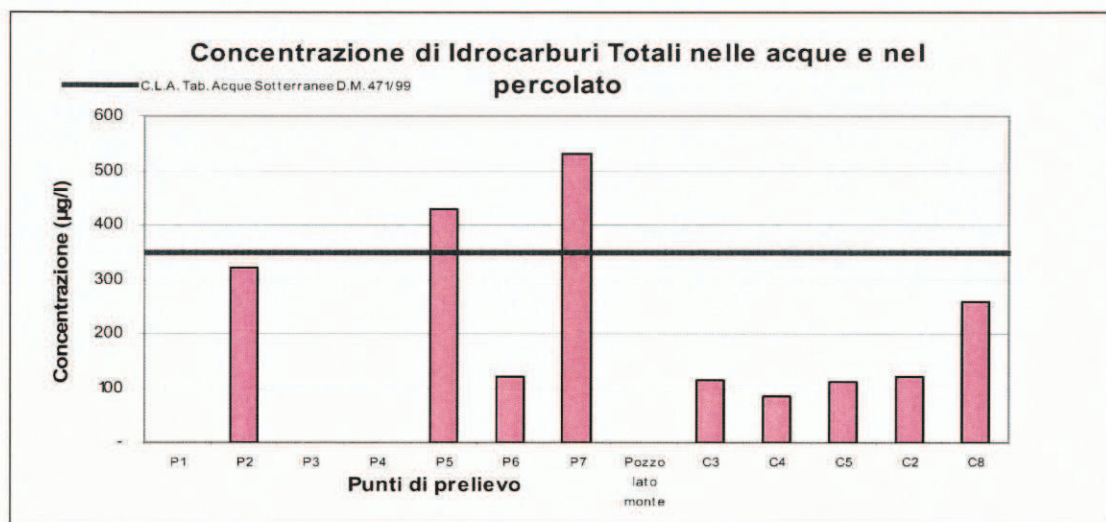
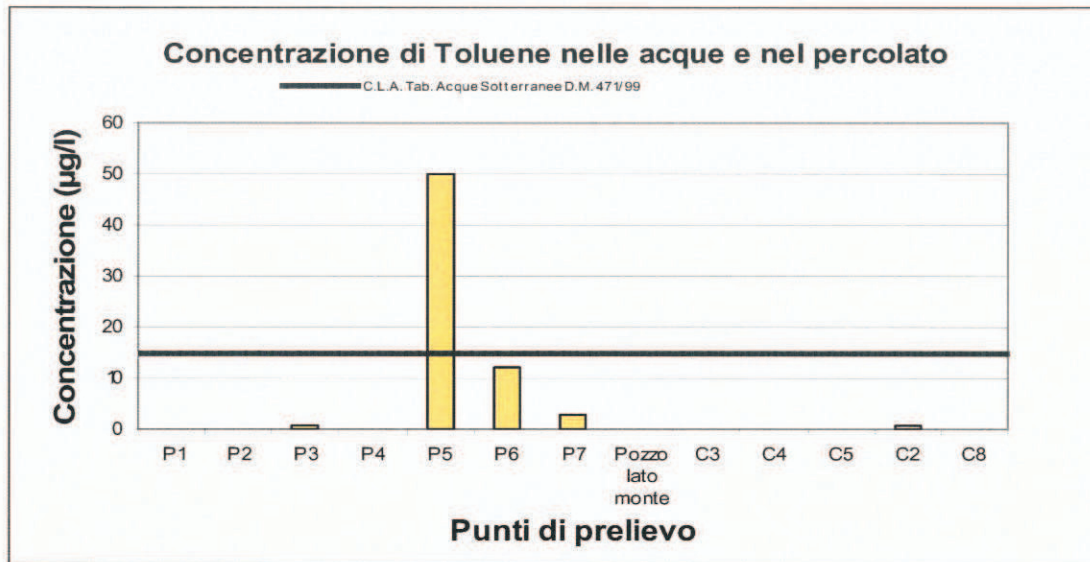


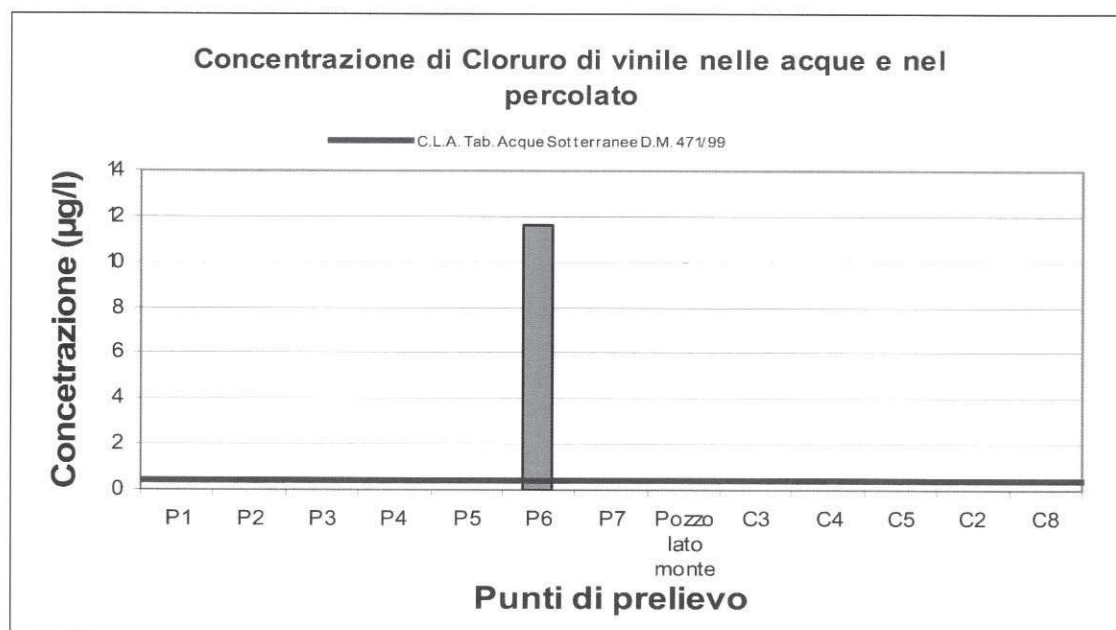
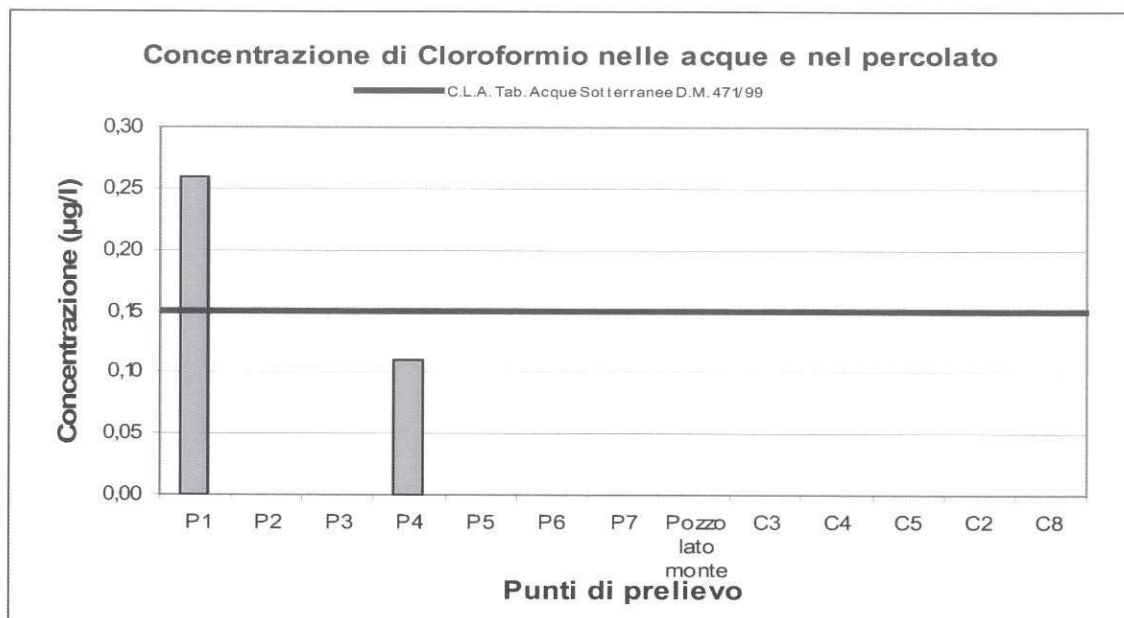


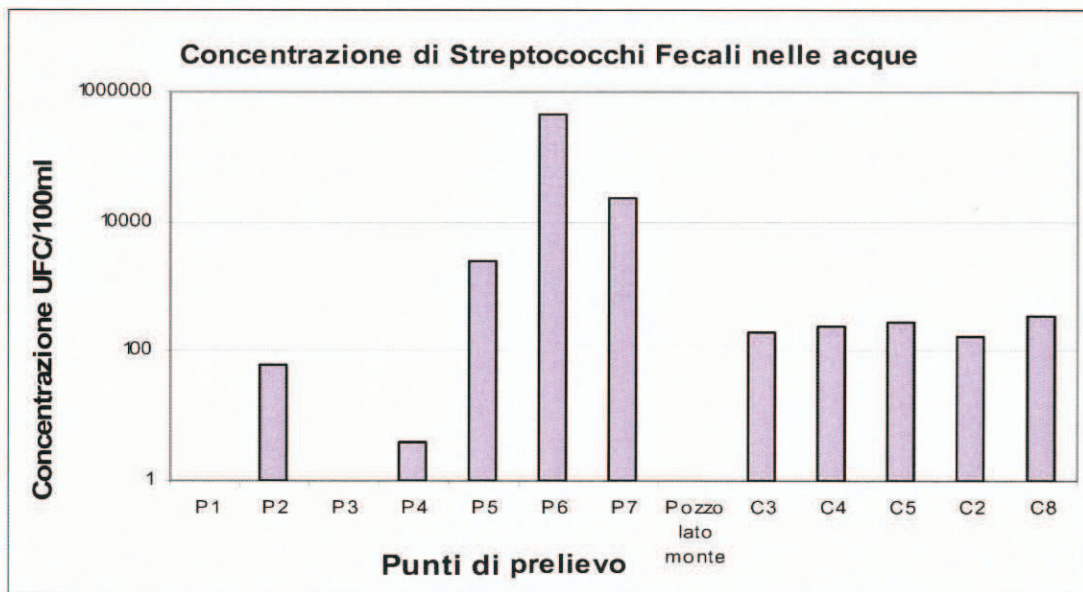
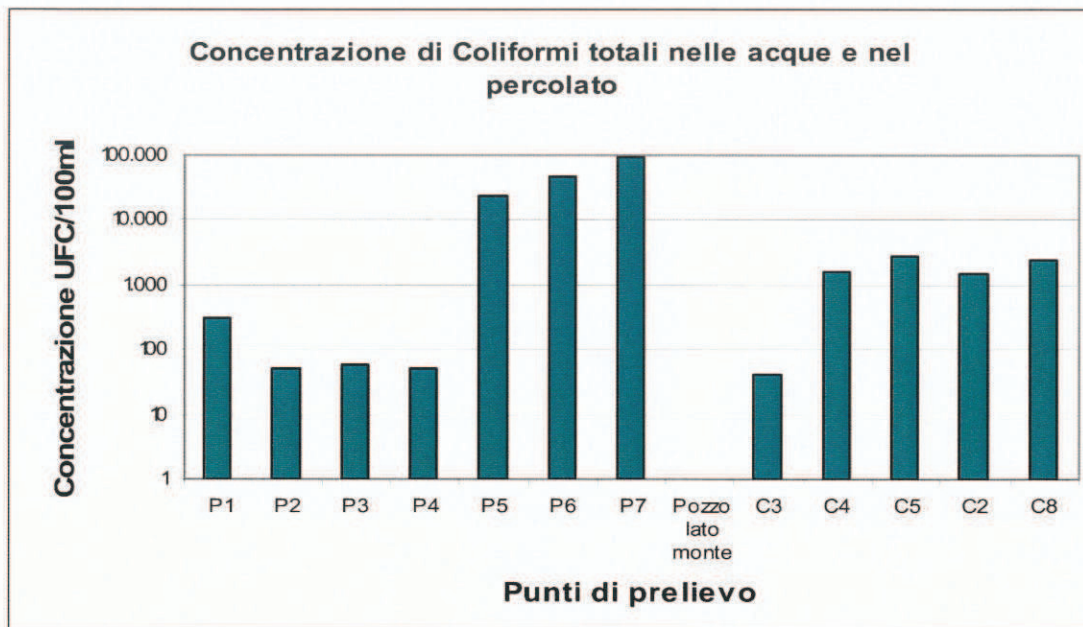
* nelle analisi sul percolato si è giunti al limite di rilevabilità strumentale di 2 µg/l











N.B. Tutti i valori inferiori alla sensibilità strumentale non sono visualizzati nei grafici.

Rispetto alle cause che danno luogo all'inquinamento delle aree a valle della discarica, viene evidenziato che, ***oltre alle fuoriuscite superficiali di percolato provenienti dal corpo della discarica, il principale contributo è fornito dal tubo in cemento sottopassante la discarica*** (degradato dall'aggressività del percolato e deteriorato dal peso dei 20.00 m di rifiuti sovrastanti), al cui interno avviene la miscelazione delle acque non contaminate provenienti da monte con il percolato prodotto all'interno della discarica.

Le acque superficiali non contaminate provenienti da monte sono quelle raccolte dai due impluvi naturali ubicati a S e ad E della discarica

La miscela acqua-percolato, scaricata a valle della discarica dalla tubazione in sottopasso, si raccoglie in pozzanghere e in fossi di scolo, dai quali sono stati prelevati i campioni oggetto delle determinazioni analitiche come sopra riportate e commentate.

La diffusione degli inquinanti è anche dovuta alla infiltrazione del percolato nelle sottostanti acque di falda e al moto di queste nei primi metri di granito fratturato con direzione SE-NW, cioè da monte verso valle.

2.1.5.6 Analisi dei rifiuti

Test di putrescibilità e valutazione dell'umidità relativa sono stati condotti su n.9 campioni estratti dei sondaggi P5, P6, P7 eseguiti sul corpo discarica.

Il grado di putrescibilità riscontrato risulta abbastanza elevato, in genere pari all'80%, mentre l'umidità relativa si posiziona mediamente attorno al 50%.

I rifiuti risultano depositati in discarica dal 1981 al 1991; al 2005, perciò, avevano un'età compresa tra 24 e 14 anni.

Questi parametri, **attestanti la lenta mineralizzazione del rifiuto**, possono essere giustificati: dalla scarsa piovosità dell'area, soprattutto nel periodo estivo quando, invece, è alta la produzione di rifiuto connessa con la vocazione turistica del territorio; dalla scarsa infiltrazione delle acque di pioggia nel corpo discarica, favorita dal rapido sgrondo a valle data la notevole pendenza delle superfici di copertura; dalla coltivazione della discarica a strati di spessore abbastanza contenuto – in media 1.70 m – e isolati da coperture di terreno spesse in media 10.00 ÷ 20.00 cm.

A rafforzare la tesi della lenta mineralizzazione dei rifiuti nel corpo discarica concorre anche il valore, ottenuto per il percolato, del rapporto BOD5/COD, *indice della frazione di sostanza organica biodegradabile su quella totale*, che risulta essere pari a 0.4: valore indicante *“una forte presenza di materiale organico biodegradabile, caratteristico dei primi anni di vita della discarica, in quanto dopo 20 anni di vita tale rapporto diminuisce fino a raggiungere il valore tipico di 0.07 – 0.08”*.

2.1.5.7. Analisi di gas interstiziale

Nei fori di sondaggio S6 e S7, eseguiti sul corpo discarica, sono stati prelevati complessivamente n.6 campioni (n.3 campioni per ciascun sondaggio) di gas interstiziale, a profondità all'incirca pari a 10.00. 15.00 e 18.00 m dal piano di campagna.

I parametri ricercati sono il diossido di carbonio, l'ossigeno ed il metano.

L'anidride carbonica è stata rilevata in ridotte percentuali in volume: in due casi è inferiore all'1%; in due casi è compresa tra l'1.2% ed il 2.2%; in due casi è compresa tra il 12.5% ed il 15.65%.

L'ossigeno è stato rilevato in quantità discrete, mediamente comprese tra il 13% ed il 20%.

Il metano appare in percentuali ridotte: in quattro casi è presente con percentuali comprese all'incirca tra il 2.0% e l'8.7%, mentre in altri due casi la percentuale è compresa tra il 17.6% ed il 24%.

Si osserva, in conclusione, che la produzione di gas all'interno della discarica appare piuttosto ridotta.

2.1.6 Capitolo 6 “Formulazione del modello concettuale”

Il Capitolo in esame, previa esposizione della “*Storia del sito*” e dei “*Recenti fenomeni di inquinamento riscontrati*”, organizza i dati e le osservazioni esposti nei precedenti capitoli finalizzandoli alla “*formulazione del modello concettuale*”, richiesto per la redazione, ai sensi del D.M. 471/1999, del Piano di caratterizzazione, primo dei tre passi progettuali (i successivi due passi sono rappresentati dal Progetto preliminare e dal Progetto esecutivo) in cui è articolato il Progetto di bonifica dei siti inquinati.

In questo capitolo 6, perciò, non si rinvencono nuovi elementi o indicazioni utili rispetto a quanto già esposto nelle sintesi dei precedenti capitoli formulate dallo scrivente.

2.1.7 Capitolo 7 “Sintesi conclusiva”

Questo Capitolo raccoglie e descrive sinteticamente i principali argomenti già esposti nei capitoli precedenti, quali le caratteristiche della discarica, l'inquadramento idrogeologico dell'area e del sistema idrografico locale, i fenomeni di inquinamento riscontrati; indica, poi, i principi cui devono essere ispirati gli interventi di messa in sicurezza, che

sinteticamente vengono individuati nella regimazione delle acque meteoriche a monte della discarica, nella realizzazione del *top capping*, nell'isolamento dell'imboccatura del tubo che sottopassa il corpo discarica, nell'intercettazione delle perdite di percolato e delle acque contaminate mediante *“interventi barriera (fisica o idraulica) in particolare nel settore nord-ovest della discarica”*.

Chiudono la trattazione poche righe destinate alla individuazione di indagini integrative a fini progettuali: 1 – 2 sondaggi con valutazione RQD e prova Lugeon a valle della discarica, lungo la direttrice dei piezometri P3 – P4 (E – W); un sondaggio in cima alla discarica, a circa 20.00 m dal piezometro P7, profondo circa 30.00 m, per verificare la presenza o meno di percolato nei graniti sottostanti la discarica e valutazione dell'indice RQD.

2.1.8 Allegati alla Relazione

Tra gli allegati principali si segnalano:

- la documentazione fotografica del carotaggio continuo ed immagini della discarica ed opere connesse;
- le colonne stratigrafiche dei n.7 sondaggi a carotaggio continuo;
- la relazione ed i grafici delle prospezioni geoelettriche;
- i grafici e le tabelle delle prove Lugeon;
- i rapporti analisi terreni;
- i rapporti analisi acqua e percolato;
- i rapporti analisi gas interstiziali;
- i rapporti analisi rifiuti.

Tra le tavole principali si segnalano:

- planimetria del sito, sc. 1/2000 e dell'area, sc. 1/5000;
- sezione topografica discarica, sc. 1/2000;

- andamento stratigrafico, sc. 1/1000;
- ubicazione pozzi e isofreatiche area vasta, sc. 1/20'000;
- ubicazione sondaggi, piezometri, punti di prelievo superficiali e allineamento geoelettriche, sc. 1/1000;
- carta isofreatiche area discarica, sc. 2/1000.

3. – SINTESI DELLA RELAZIONE DE PAOLA

3.1 Partizione della Relazione

La Relazione De Paola, con titolo *“Indagini geoelettriche 2013 nel quadro degli studi precedenti e reinterpretazione del modello idrogeologico”*, redatta nell’ottobre del 2013, è articolata in tre parti.

La prima parte prende in considerazione i risultati delle indagini e studi eseguiti tra il 2010 ed il 2012 e ne formula una sintesi critica finalizzata alla definizione del modello idrogeologico.

La seconda parte analizza ed interpreta i risultati delle indagini geoelettriche (tomografie e SEV) eseguite in tutta l’area asservita ai diversi impianti ed anche all’esterno, *ottenendo un quadro significativo dell’assetto idrogeologico del sito.*

La terza parte mette a confronto i risultati delle ricerche pregresse ed i contributi del nuovo studio, *tracciando le linee di un modello idrogeologico più prossimo all’assetto geologico e strutturale locale e redigendo un bilancio idrogeologico per indicizzare la potenzialità idrica della falda di superficie.*

3.2 Parte prima – Analisi delle risultanze pregresse

Vengono esaminate le criticità e conseguente inattendibilità delle stratigrafie della campagna di sondaggi dell’agosto 2010, in quanto i sondaggi risultano eseguiti a distruzione di nucleo, escludendo la possibilità di ottenere valutazioni oggettive (come per esempio l’RQD) sul grado, orientamento e tipologia della fratturazione del granito e sulle principali caratteristiche idrogeologiche.

Analoghe criticità sono evidenziate nell'esecuzione dei sondaggi destinati ai piezometri sia superficiali che profondi; per questi ultimi si segnala anche la ridotta profondità della cementazione del tratto cieco (come da quadro seguente), che non dà certezza circa il completo isolamento della falda superficiale.

PIEZOMETRO	PROFONDITA' DELLA SUPERFICIE DI FALDA E DEL TETTO DEL "GRANITO POCO FRATTURATO GRIGIO" (m dal p.c.)	PROFONDITA' DELLA CEMENTAZIONE (m dal p.c.)
R1	81.00	0.00 – 21.00
R2	73.00	0.00 – 15.00
R3	69.00	0.00 – 21.00
R4	70.00	0.00 – 19.00
R5	76.00	0.00 – 23.00
R6	64.54	0.00 – 4.00

Sottoposti a critiche anche i sondaggi-piezometri ubicati sul corpo discarica (S5, S6, S7) poiché dalle allegate stratigrafie appare evidente che le perforazioni hanno superato la barriera impermeabile di fondo, dando luogo ad una connessione idraulica tra il corpo rifiuti ed il sottostante basamento granitico.

Si chiarisce in questa sede che i citati sondaggi-piezometri sono stati tratti dalla Relazione Vorlicek del 2008, nella quale non viene indicata la fonte di estrazione, cioè proprio la relazione Vivarelli del 2005 (oggetto della presente lettura ed analisi), la quale riferisce dell'avvenuta sigillatura basale a perforazione compiuta.

Non apportano chiarimenti di sorta, circa i rapporti tra piezometri superficiali e profondi, neanche le prove di portata eseguite sugli stessi, in quanto mancanti delle curve di risalita, insufficienti nei tempi di prova e carenti di indicazioni sulle portate e sul mantenimento della loro costanza nel tempo, data la presenza di rapidi e consistenti abbassamenti del livello idrico (in 40' ÷ 50' si registrano depressioni di 70.00 ÷ 80.00 m e più).

L'esame delle analisi effettuate sulle acque dei piezometri superficiali e profondi consente di formulare in sintesi le seguenti indicazioni.

L'assoluta casualità nel tempo e nello spazio delle variazioni dei parametri fisico-chimici appare tipica di contaminazioni di origine antropica legata alla gestione e smaltimento dei rifiuti; l'assenza di una sostanziale differenziazione tra la contaminazione delle acque dei piezometri superficiali e dei piezometri profondi può essere indice dell'esistenza di una connessione idraulica tra gli stessi, per problematiche connesse ad un non perfetto isolamento in corso d'opera.

L'esito delle osservazioni relative alle misure piezometriche deriva dal seguente quadro, aggiornato con i dati acquisiti nel corso della stesura della presente Relazione datata giugno 2014; esito ulteriormente evidenziato dai relativi istogrammi di seguito riportati.

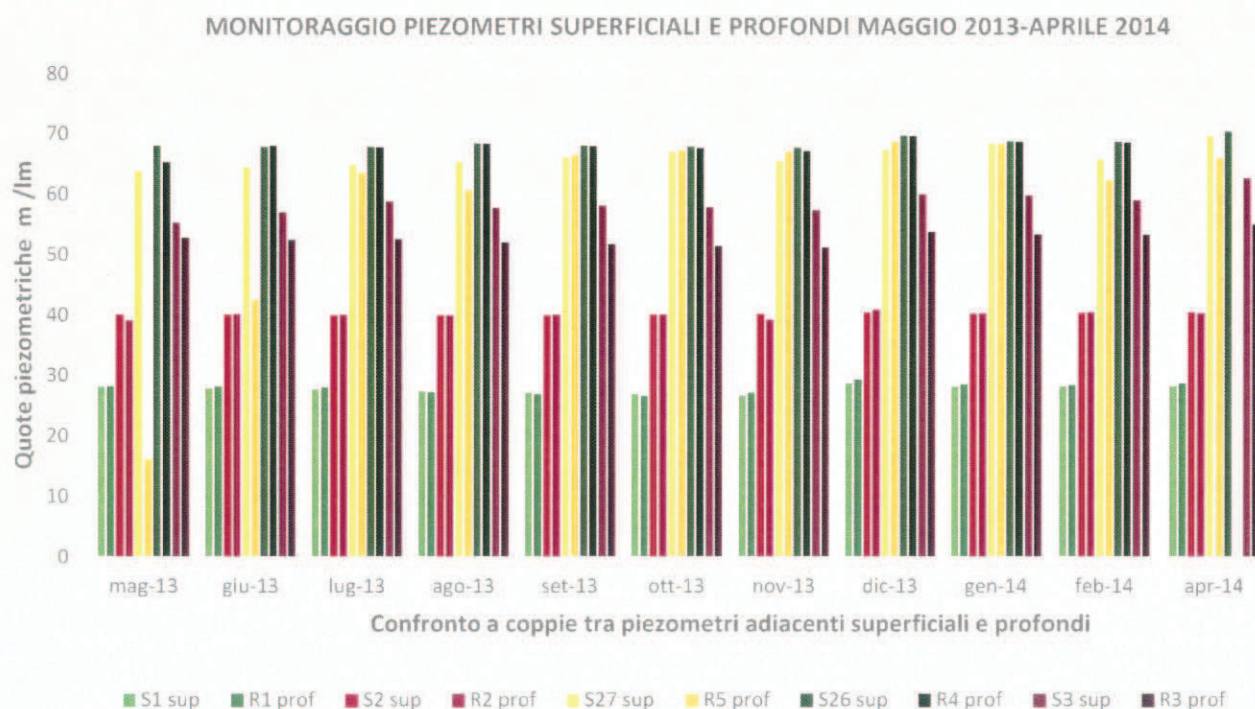
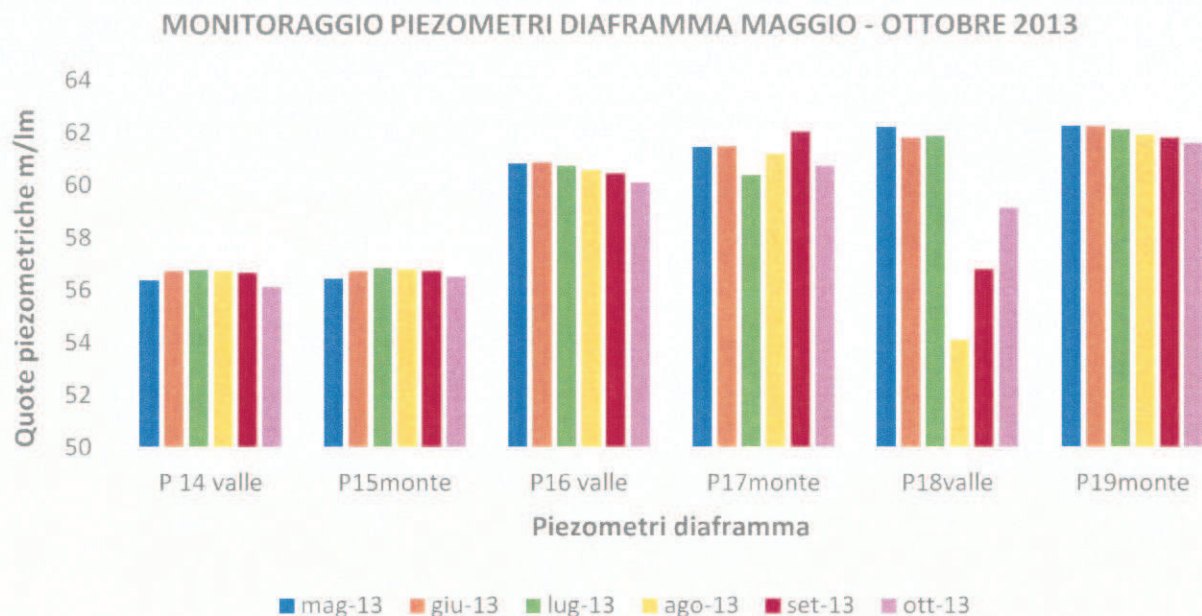


Rete monitoraggio piezometrico

PIEZOMETRI	POSIZIONE	PROFONDITA' (m)	SOGGIACENZA FALDA (m)					
			13.2.2012	01/2013	02/2013	03/2013	04/2013	05/2013
S1 – R1	N	5 – 90	1.08 – 0.8	1.6 – 2.5	1.3 – 1.8	0.9 – 1.4	1.0 – 1.4	1.45 – 1.40
S2 – R2	NE	7 – 80	-	1.3 – 1.3	1.2 – 0.4	0.45 – 0.7	0.75 – 0.7	0.64 – 1.85
S27 – R5	SE	10 – 100	5.05-8.75	3.8 – 2.9	3.1 – 2.7	3.25 – 2.6	5.95 - ?	6.62 – 54.3
S26 – R4	SW	7 – 100	3.94-2.57	5.0 – 5.8	5.2 – 5.4	5.0 – 4.6	5.0 – 4.7	5.30 – 8.08
S21	W	10	6.10	7.6	8.2	6.15	6.20	6.70
S4	W	10	5.78	8.5	7.9	6.2	6.6	7.13
S3 – R3	NW	10 – 80	3.13 – 9.8	4.9 – 10.6	4.2 – 11.1	3.6 – 9.7	7.95-10.4	8.10 – 11.12
DIAFRAMMA								
S18 – S19	Valle-Monte	14 – 14	-	-	-	-	-	3.03 – 2.44
S16 – S17	Valle-Monte	14 – 14	-	-	-	-	-	3.83 – 2.89
S14 – S15	Valle-Monte	14 – 14	-	-	-	-	-	5.25 – 4.82

PIEZOMETRI	POSIZIONE	PROFON DITA' (m)	SOGGIACENZA FALDA (m)					
			06/2013	07/2013	08/2013	09/2013	10/2013	11/2013
S1 – R1	N	5 – 90	1.68 – 1.42	1.90-1.58	2.20-2.35	2.42-2.72	2.71-2.95	2.88-2.45
S2 – R2	NE	7 – 80	0.67-0.82	0.78-0.94	0.82-1.00	0.78-0.95	0.65-0.85	0.60-1.75
S27 – R5	SE	10 – 100	5.93-27.92	5.47-6.88	5.14-9.80	4.21-3.93	3.42-3.17	4.95-3.38
S26 – R4	SW	7 – 100	5.47-5.29	5.50-5.53	4.91-5.00	5.29-5.42	5.50-5.72	5.70-6.20
S21	W	10	6.96	7.43	8.40	8.61	-	9.10
S4	W	10	7.29	7.49	7.88	8.04	8.17	8.30
S3 – R3	NW	10 – 80	6.34-11.50	4.56-11.41	5.66-11.97	5.25-12.23	5.50-12.54	6.00-12.80
DIAFRAMMA								
S18 – S19	Valle-Monte	14 – 14	3.43-2.44	3.38-2.57	11.13-2.77	8.45-2.90	6.10-3.10	
S16 – S17	Valle-Monte	14 – 14	3.79-2.86	3.92-3.95	4.09-3.14	4.20-2.30	4.55-3.61	
S14 – S15	Valle-Monte	14 – 14	4.90-4.54	4.85-4.41	4.89-4.44	4.96-4.52	5.50-4.75	

PIEZOMETRI	POSIZIONE	PROFON DITA' (m)	SOGGIACENZA FALDA (m)					
			12/2013	01/2014	02/2014	03/2014	04/2013	
S1 – R1	N	5 – 90	0.85-0.30	1.45-1.07	1.45-1.20		1.35-0.88	
S2 – R2	NE	7 – 80	0.30-0.10	0.55-0.67	0.40-0.50		0.30-0.65	
S27 – R5	SE	10 – 100	3.10-1.80	2.10-2.10	4.70-8.05		0.80-4.46	
S26 – R4	SW	7 – 100	3.64-3.70	4.60-4.65	4.70-4.80		3.05	
S21	W	10	6.30	6.45	6.30		-	
S4	W	10	5.20	7.00	7.10		6.50	
S3 – R3	NW	10 – 80	3.45-10.20	3.53-10.65	4.40-10.70		0.70-9.00	
DIAFRAMMA								
S18 – S19	Valle-Monte	14 – 14						
S16 – S17	Valle-Monte	14 – 14						
S14 – S15	Valle-Monte	14 – 14						



Dall'esame dei dati di cui alle tabelle sopra riportate e dei relativi istogrammi emerge innanzitutto la sostanziale omogeneità tra le quote

piezometriche degli adiacenti piezometri superficiali e profondi, salvo che per la coppia di piezometri S3 ed R3, ed occasionali e temporanee variazioni piezometriche per la coppia di piezometri S27 e R5 che *sembrano essere legate a fattori casuali invece che, per esempio, ad attese e più marcate fluttuazioni stagionali.*

Tra i fattori casuali possono essere annoverati i dati relativi al regime degli emungimenti dei pozzi esistenti nell'area, sia di quelli relativi alla MISE e alla MISP, sia di quelli posti a servizio dei vari impianti realizzati nel sito.

A questi fattori va ulteriormente aggiunta anche la significativa *movimentazione di materiale roccioso* effettuata a più riprese nel tempo per la realizzazione dei vari impianti e per l'ampliamento delle aree pertinenziali; operazione *effettuata, tra l'altro, con l'uso di esplosivi*, che certamente hanno allentato in maniera differenziata (a seconda della resistenza propria dei volumi rocciosi investiti dall'onda d'urto e della loro distanza dai siti delle volate) i vari orizzonti del substrato.

Nonostante questa *imponderabile serie di fattori che possono avere influenzato e tuttora influenzano in misura diversa e con pulsioni temporali casuali l'idrodinamica sotterranea, sembra comunque potersi rilevare una **sostanziale omogeneità nella piezometria generale del sito che si adatta, in maniera prevalente, alla superficie topografica, senza significative distinzioni tra piezometri profondi e superficiali*** (tranne che nel caso della coppia di piezometri S3-R3 del settore NW, di cui si dirà tra breve).

Concludendo sul punto, si evidenzia che:

- l'unica differenziazione tra piezometri profondi e superficiali viene rilevata a valle dell'area che accoglie gli impianti nei piezometri S3

- R3, nel settore di NW (soggiacenza media falda superficiale 4.00 ÷ 5.00 m, soggiacenza media falda profonda 10.00 ÷ 11.00 m);
- gli assi di drenaggio preferenziali della falda superficiale assumono provenienze da SW (soggiacenze medie attorno ai 3.00 ÷ 5.00 m), da SE (soggiacenze medie di 4.00 ÷ 5.00 m) e da NE (soggiacenza media da 0.50 ÷ 1.00 m), per proseguire rispettivamente verso NW, verso N e verso W, dove la soggiacenza della falda superficiale si attesta attorno ai 6.00 m; ciò significa che la falda superficiale muove seguendo in linea generale l'orografia della zona (confermando, quindi, le pregresse osservazioni), in ciò localmente ostacolata dai volumi interrati delle discariche e dalle altre opere idrauliche e strutturali realizzate, che costringono i flussi idrici a seguire traiettorie diverse da quelle proprie naturali, ferme restando le aree di origine, ubicate nei quadranti meridionali, e quelle del recapito finale, ubicate nei quadranti nord-occidentali.

Concludendo su questa prima parte si osserva come gli studi e le indagini eseguiti a più riprese negli anni precedenti non abbiano dato luogo ad una univoca definizione dell'assetto idrogeologico del sito a causa soprattutto della lacunosità e carenze esecutive di talune indagini, che, ove compiutamente condotte (orientamento, distribuzione e qualità delle fratture del granito, parametri idrogeologici della falda, ecc.), avrebbero potuto fornire risposte esaurienti ed univoche sull'argomento.

Nonostante le perplessità sollevate, **si è sempre però ritenuto, da più parti, di dover considerare, ai fini della sua tutela, l'unica falda sperimentalmente accertata, quella freatica di superficie, perciò molto vulnerabile**, insediata nella coltre arenizzata dei graniti affioranti ovvero nella coltre sedimentaria eluvio-colluviale ed alluvionale presente

nelle porzioni basali dei versanti o negli impluvi nonché nella sottostante banda alterata e fratturata dei graniti.

Tanto è dimostrato *dal modello idrogeologico esposto nella relazione Vorlicek - 2008 ed adottato ai fini della redazione del modello di flusso, trasporto e diffusione degli inquinanti, assumendo uno spessore complessivo dell'acquifero pari a circa 6.00 m a partire dal p.c., comprendente un acquifero freatico superficiale, dato dal sabbione granitico spesso qualche metro, con permeabilità $k = 1^{-04}$ m/sec e porosità pari a 0.20, ed un sottostante acquifero roccioso, per pochi metri permeabile per fratturazione con permeabilità $k = 1^{-06}$ m/sec e porosità pari a 0.10;* *dal modello idrogeologico esposto nella relazione idrogeologica integrativa Calderaro del novembre 2012 a proposito della progettazione di una trincea drenante, la cui profondità non va oltre 3.00 m dal p.c., da posizionare a valle della discarica, al fine di mettere "in sicurezza la falda stessa a valle della discarica consortile"; dal modello adottato nella progettazione ed esecuzione della barriera in jet-grouting, profonda circa 10.00 m ed ammorsata nei graniti impermeabili di base, ubicata a monte della discarica comunale per evitare l'infiltrazione delle acque di falda nel corpo rifiuti.*

3.3 Parte seconda – Risultanze e deduzioni della campagna indagini geofisiche 2013

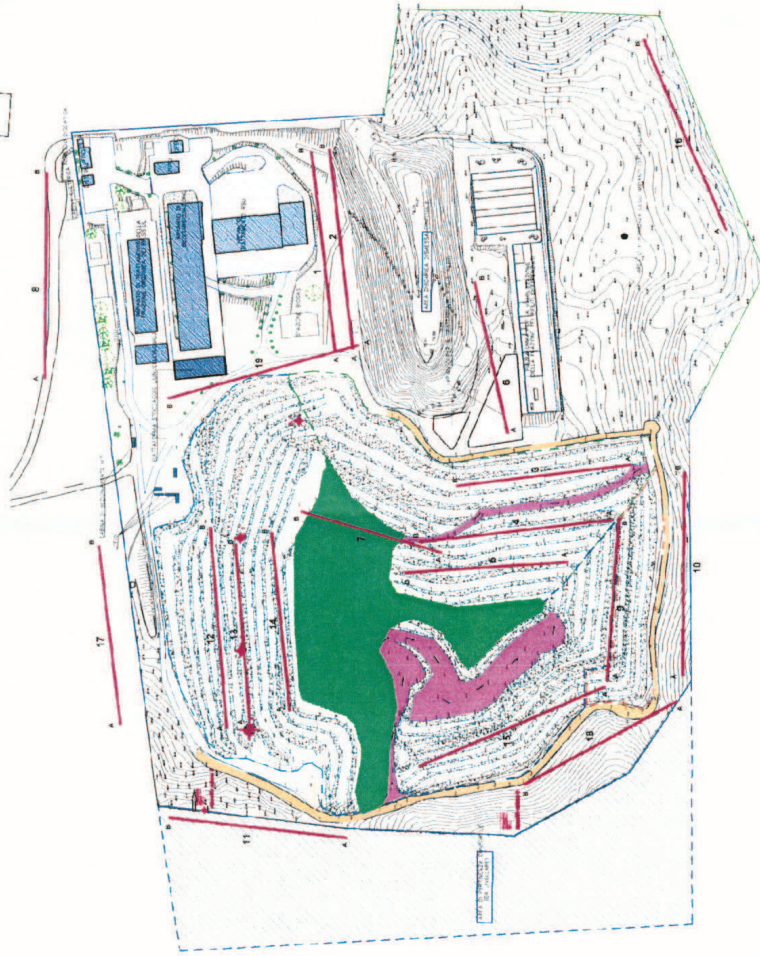
Il Capitolo è interamente dedicato all'illustrazione delle deduzioni delle indagini geoelettriche eseguite tra giugno e luglio del 2013, comprendenti n.19 tomografie elettriche e n.10 sondaggi elettrici verticali (SEV).

Le prime ricadono tutte all'interno o immediatamente all'intorno dell'area comprensiva degli impianti; i SEV, invece, sono distribuiti sul terreno secondo una diversa configurazione, in quanto alcuni, per un

totale di n.4 SEV, sono ubicati lungo il perimetro dell'area di interesse ed in prossimità di alcune tomografie, mentre i restanti n.10 SEV sono dislocati in aree esterne, allo scopo di saggiare un territorio più ampio a fini idrogeologici.

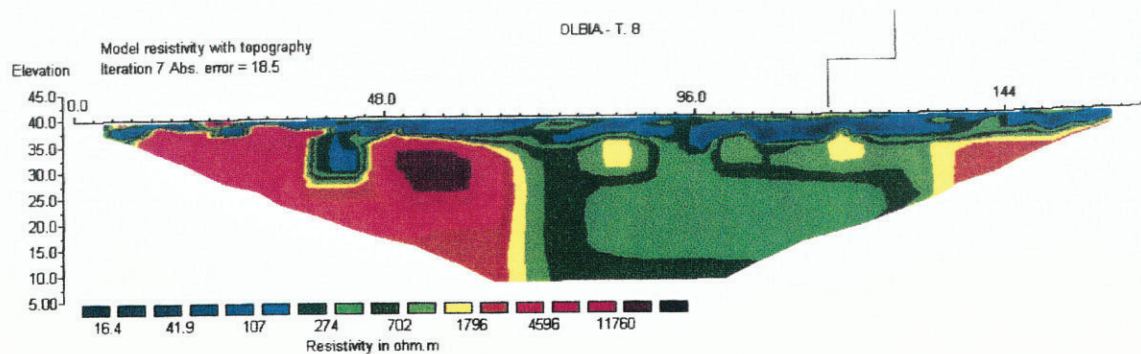
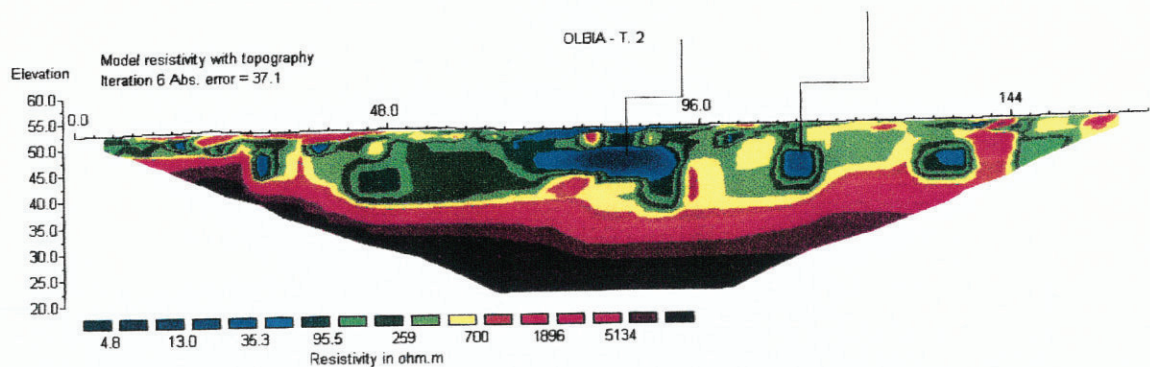
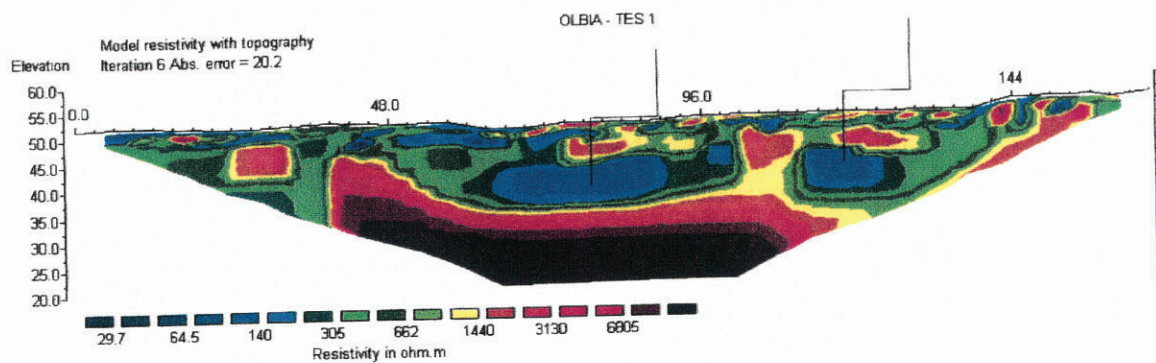
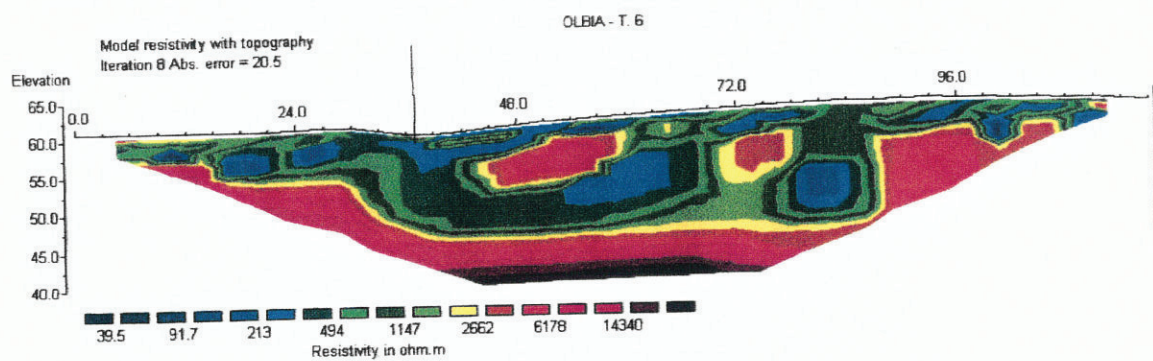
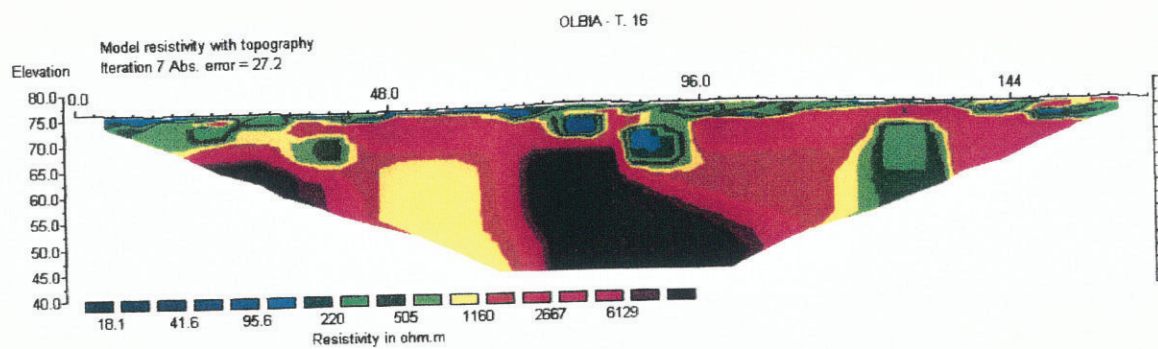
Le cartografie con l'ubicazione dei SEV e delle tomografie sono di seguito allegate.

UBICAZIONE TOMOGRAFIE ELETTRICHE



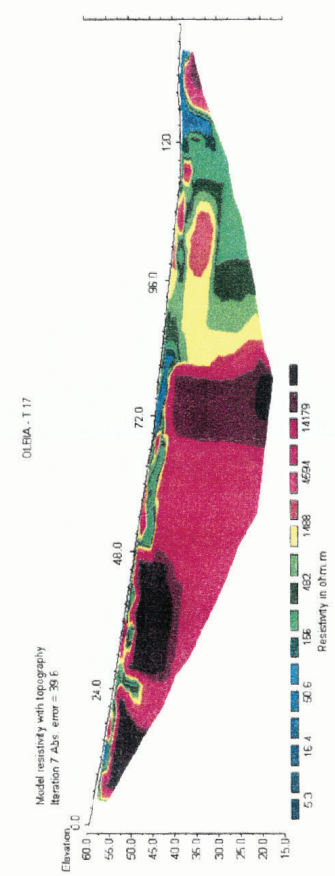
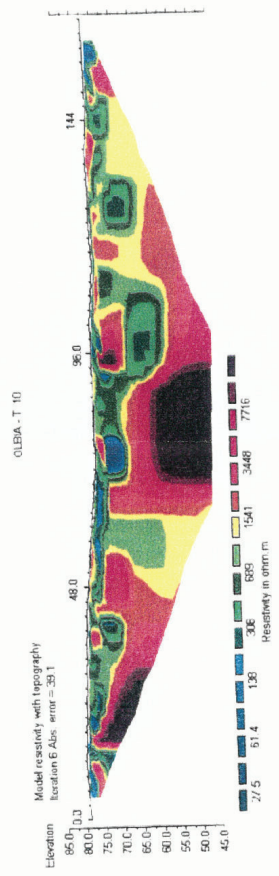
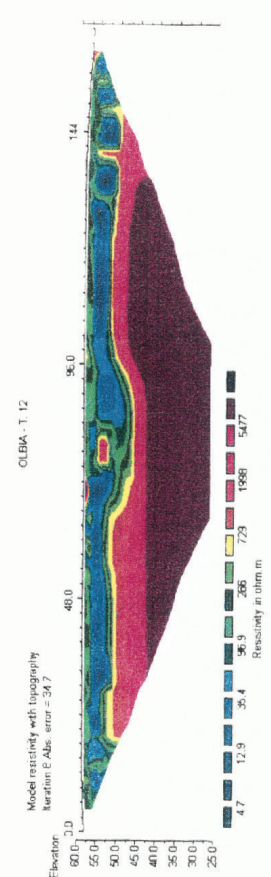
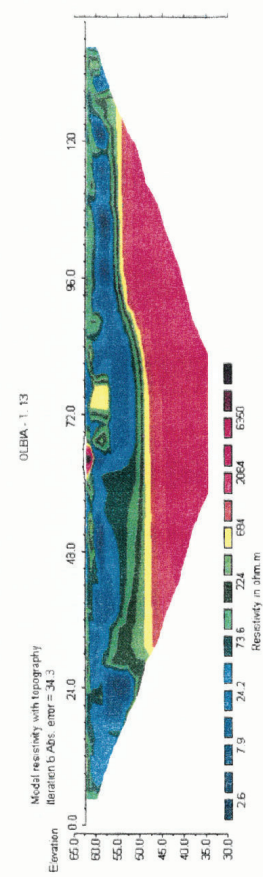
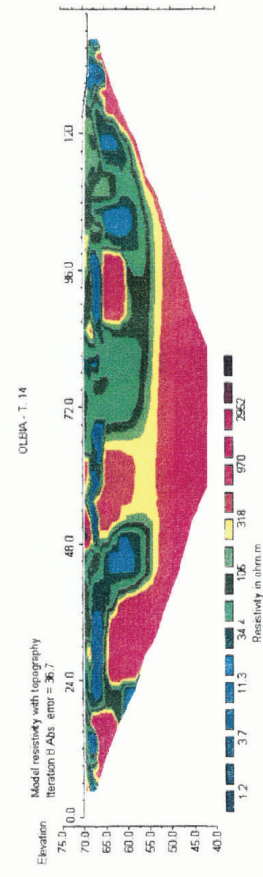
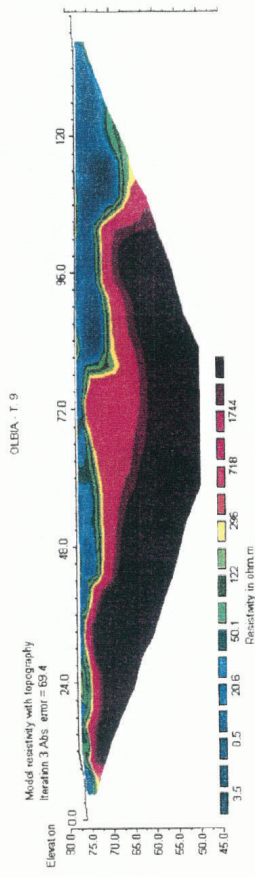
UBICAZIONE TOMOGRAFIE ELETTRICHE GRUPPO 1 (LATO EST)





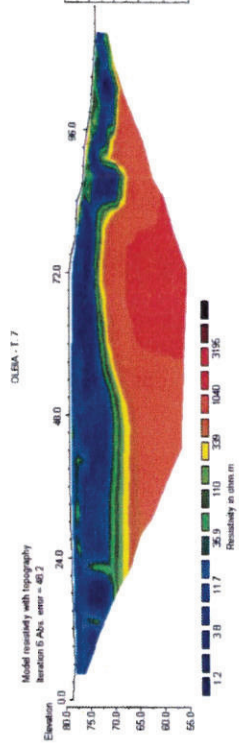
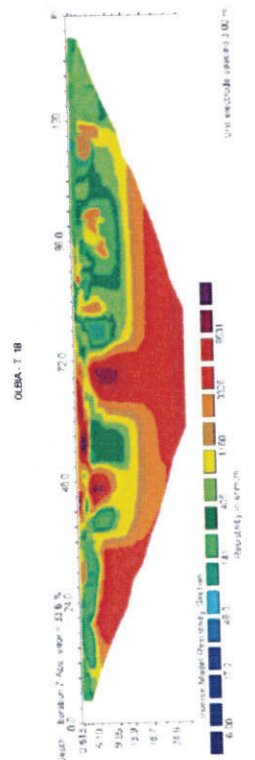
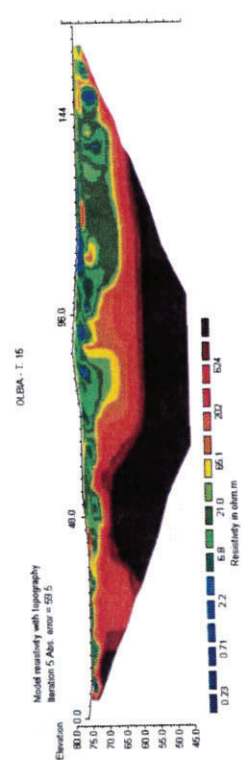
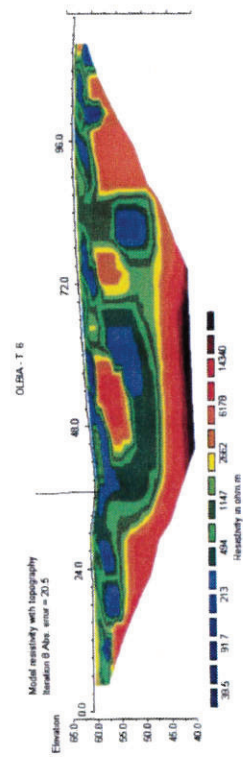
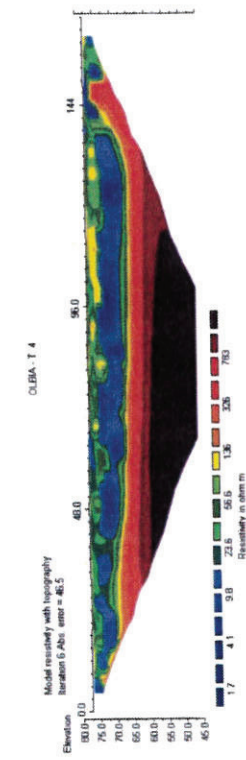
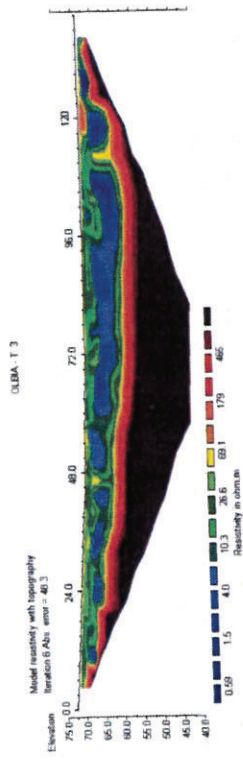
UBICAZIONE TOMOGRAFIE ELETTRICHE GRUPPO 2 (LATO OVEST)





UBICAZIONE TOMOGRAFIE ELETTRICHE GRUPPO 3 (LATO SUD, DA EST AD OVEST)

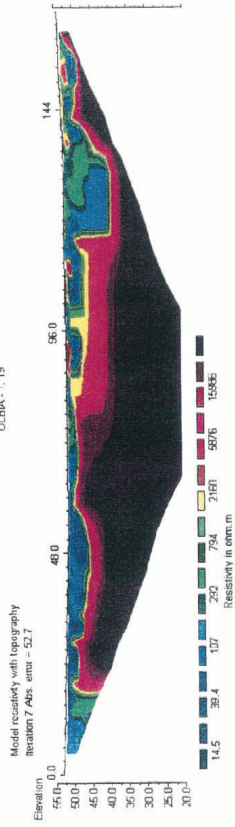




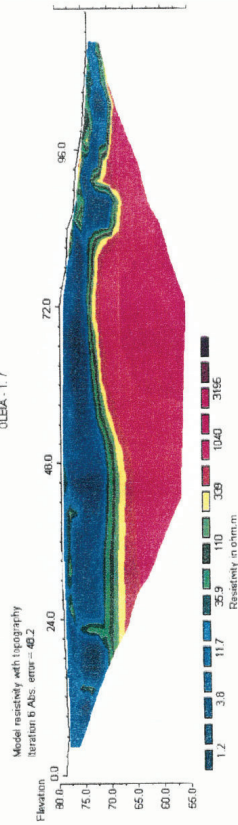
UBICAZIONE TOMOGRAFIE ELETTRICHE GRUPPO 4 (LATO NORD, DA EST AD OVEST)



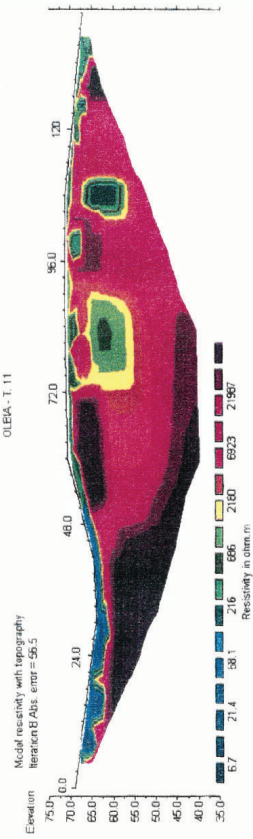
OLEBA - T. 19



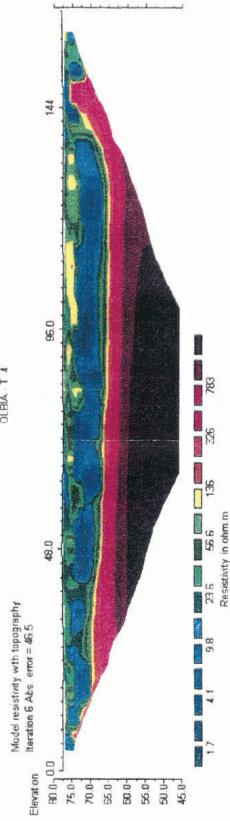
OLEBA - T. 17



OLEBA - T. 11



OLEBA - T. 4



In sintesi, ***si osserva che le tomografie elettriche denunciano la presenza in superficie di terreni con resistività da media a bassa, per spessori di pochi metri, in genere compresi tra 4.00 e 6.00 m,*** associabili alla residua coltre eluvio-colluviale o al sabbione granitico ed alla sottostante banda granitica alterata e fratturata, costituenti aree od assi preferenziali di drenaggio; ***ivi è insediata la falda freatica superficiale, che, peraltro, denuncia marcati caratteri di discontinuità spaziale.***

In questo strato sono anche presenti zone a bassa e a luoghi bassissima resistività connesse con i corpi delle discariche, fino a profondità massime di una ventina di metri dal p.c.

Il sottostante complesso granitico assume caratteri di resistività variabile da alta ad altissima, in relazione al diverso grado di fratturazione della roccia, connesso a stress tettonici, a processi di decompressione litostatica anche per effetto degli esplosivi impiegati a vario titolo nel corso dei lavori.

Dall'esame delle sezioni elettro-tomografiche non emergono, per detto complesso granitico, segnali di discontinuità tettoniche, tali da consentire circolazione idrica, fino alla profondità massima esplorata (33.00 – 35.00 m dal p.c.).

Si può, pertanto, asserire che ***la circolazione idrica nell'area è esclusivamente costituita dalla falda freatica di superficie,*** con ***spessore dell'ordine di pochi metri,*** in genere compreso tra 4.00 e 6.00 m a partire dal p.c., certamente inferiore ai 10.00 m, e che ***detta falda è sostenuta alla base dalle masse granitiche sostanzialmente impermeabili, in quanto prive di fratture o discontinuità tettoniche significative sotto l'aspetto idrogeologico.***

A detto complesso granitico, che assume il ***ruolo di vero e proprio acquiclude*** in quanto costituisce limite di permeabilità basale, ***può essere assegnato uno spessore minimo dell'ordine di alcune decine di metri, certamente compreso tra i 50.00 ed i 60.00 m dal p.c., secondo le indicazioni deducibili dalle tomografie e dai SEV.***

Nell'area degli impianti, la superficie della falda, che prima degli insediamenti si adattava e seguiva la morfologia originaria del bacino idrografico, oggi è costretta ad aderire alla nuova morfologia conseguente alla presenza delle discariche e degli altri manufatti, ricomponendosi, in un assetto molto prossimo a quello naturale, nell'impluvio a valle dell'area impianti.

Nelle aree esterne ed anche per quelle prossime agli impianti, l'esplorazione elettrotomografica ha fatto registrare, in accordo con quanto sopra detto, una maggiore continuità dello strato superficiale a bassa e bassissima resistività, sempre per spessori di pochi metri e sempre costituito dalla coltre sciolta detritico-regolitica e dalla banda granitica alterata e fratturata, ospitante la falda freatica, con più limitate variazioni laterali di aree a media resistività.

Anche per dette aree esterne il sottostante complesso granitico dà luogo a resistività da alta ad altissima, escludenti ogni forma di discontinuità tale da consentire la percolazione delle acque della falda di superficie verso il basso, almeno fino a circa 34.00 ÷ 35.00 m dal p.c., per quanto accertato dalle tomografie, ed oltre i 50.00 m dal p.c. per quanto dedotto dai SEV.

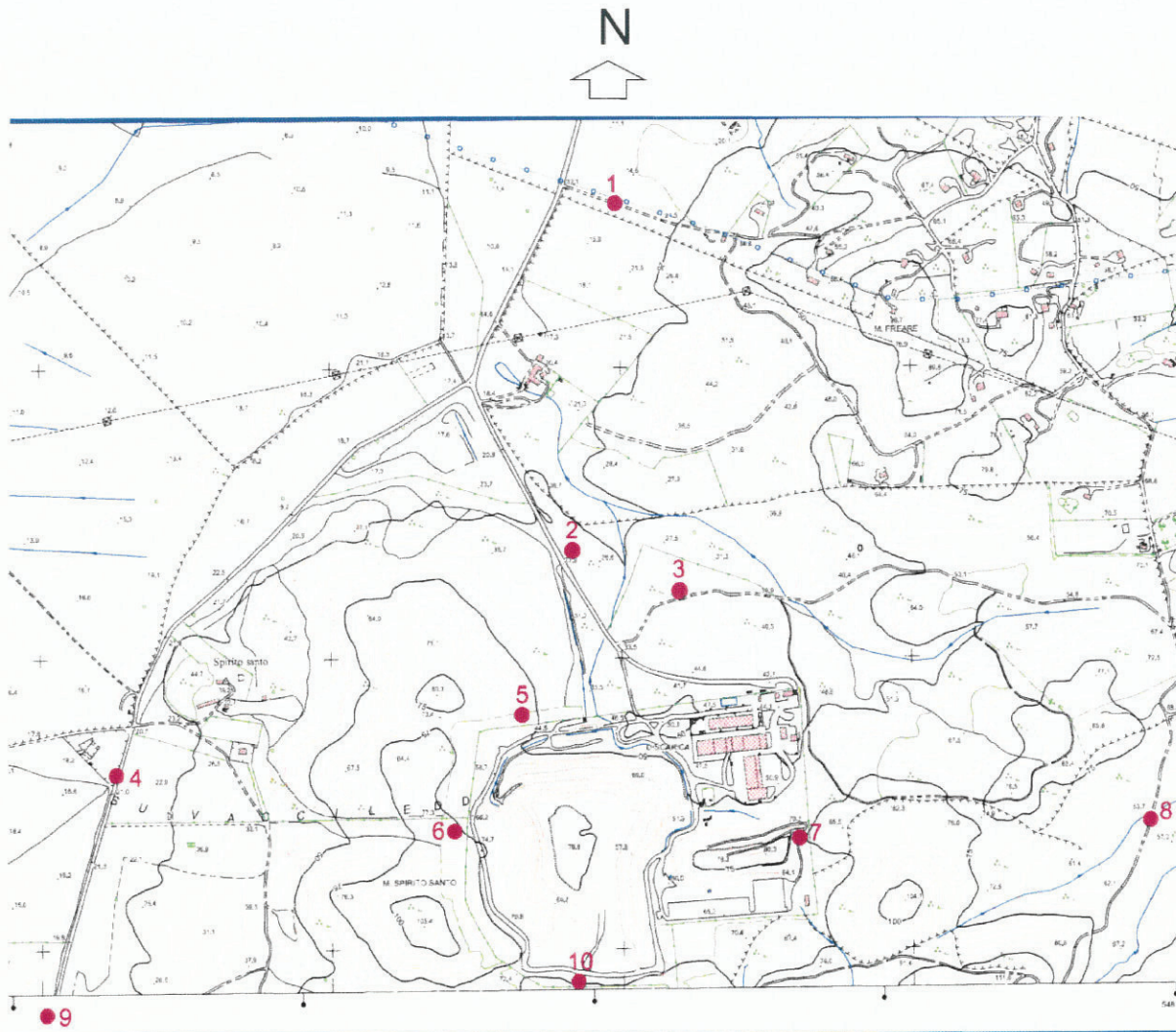
E' lecito presumere, infine, anche in assenza di investigazione, che nelle aree costituenti il pendio posto a S e ricadenti nel bacino idrografico dell'area impianti, non interessate da lavori di alcun genere, la circolazione idrica sotterranea conservi intatte le sue caratteristiche originarie, costituite dalla presenza di una falda libera, spesso pochi metri, insediata

nella coltre granitica arenizzata e nella porzione alta, fratturata ed alterata, del sottostante complesso granitico, con superficie piezometrica che si adatta alla morfologia del pendio.

In definitiva, l'assetto idrogeologico del substrato granitico fino a circa 35.00 m dal p.c., è caratterizzato da alta ed altissima resistività senza alcuna soluzione di continuità, comunque tale da costituire un invalicabile limite impermeabile basale.

Il dato fornito dalle tomografie è ulteriormente confermato anche dall'esito dei n.10 SEV eseguiti nell'area ed ubicati come da allegata planimetria.

UBICAZIONE SONDAGGI ELETTRICI VERTICALI



I SEV hanno raggiunto profondità ancora più significative, comprese tra 70.00 m e 135.00 m dal p.c.

Le indicazioni ottenute *possono ritenersi di grande significato*, in quanto risultano non solo tra loro omogenee ma correlabili anche con il quadro tracciato dalle elettrotomografie.

Semplificandone al massimo l'interpretazione, si osserva che le curve di resistività presentano in genere un tratto iniziale sub-orizzontale

caratterizzato da resistività medio-bassa, a cui segue un tratto con pendenza molto sostenuta tipica di resistività molto alta.

Il primo tratto della curva di resistività, con spessori compresi in genere tra 1.00 m e 4.00 m – 6.00 m e valori di resistività contenuti, compresi tra 120 e 750 ohm.m, è proprio della coltre superficiale costituita da sedimenti detritico-eluvio-colluviali e dai sabbioni granitici nonché dalla banda granitica alterata e fratturata ed è correlabile con gli analoghi strati rilevati con le tomografie elettriche; in detto strato è localizzata la debole e discontinua falda idrica superficiale.

Il secondo tratto della curva di resistività, fino a profondità accertate di 70.00 – 135.00 m dal p.c., presenta, in generale, valori di resistività elevati, anche oltre 2000 ohm.m, tipici del substrato granitico meglio caratterizzato sotto il profilo meccanico e privo di circolazione idrica sotterranea.

Nei SEV n.5 e n.8 si rilevano ***leggeri*** flessi delle curve, alle rispettive profondità di circa 55.00 m e 88.00 m dal p.c., che potrebbero essere interpretati come flussi idrici all'interno di locali discontinuità della roccia; ancora meno evidenti e meno interpretabili gli appena accennati flessi nei SEV 1 e 3, ai quali appare molto difficile attribuire un positivo significato idrogeologico.

I SEV confermano, quindi, quanto già accertato con le elettrotomografie circa la presenza di una falda freatica superficiale, debole e discontinua, insediata nei primi 4.00 ÷ 6.00 m dal p.c., a luoghi poco più, sostenuta alla base da un orizzonte granitico esplicante il ruolo di acquicludo, in quanto sostanzialmente impermeabile, e con uno spessore accertato di alcuni decametri, fino ad una profondità di almeno 55.00 m dal p.c..

Quest'ultimo dato è desumibile dalla **costanza dei risultati ottenuti, oltre che dai n.10 SEV, anche dalle n.19 elettrotomografie complessivamente condotte nell'area, circa l'assenza di fratture o disgiunzioni tettoniche idonee a consentire la percolazione delle acque della falda di superficie verso gli orizzonti granitici più profondi**; ulteriormente precisando che agli stendimenti elettrodi sono state assegnate **direzioni diversificate**, da quelle all'incirca tra loro parallele a quelle ortogonali ivi comprese quelle con angolazioni intermedie, **atte in ogni caso ad intercettare tutte le famiglie di fratture e le linee tettoniche caratterizzanti il locale ammasso granitico**.

Si osserva, infine, che le n.9 elettrotomografie eseguite sul corpo della discarica consortile registrano la presenza, alla base della discarica, di un fondo continuo ed omogeneo, dovuto al **comportamento dielettrico del telo impermeabile che, perciò, dimostra di conservare intatta la propria integrità**.

3.4 Parte terza – Definizione del quadro conoscitivo idrogeologico, bilancio idrogeologico, osservazioni conclusive

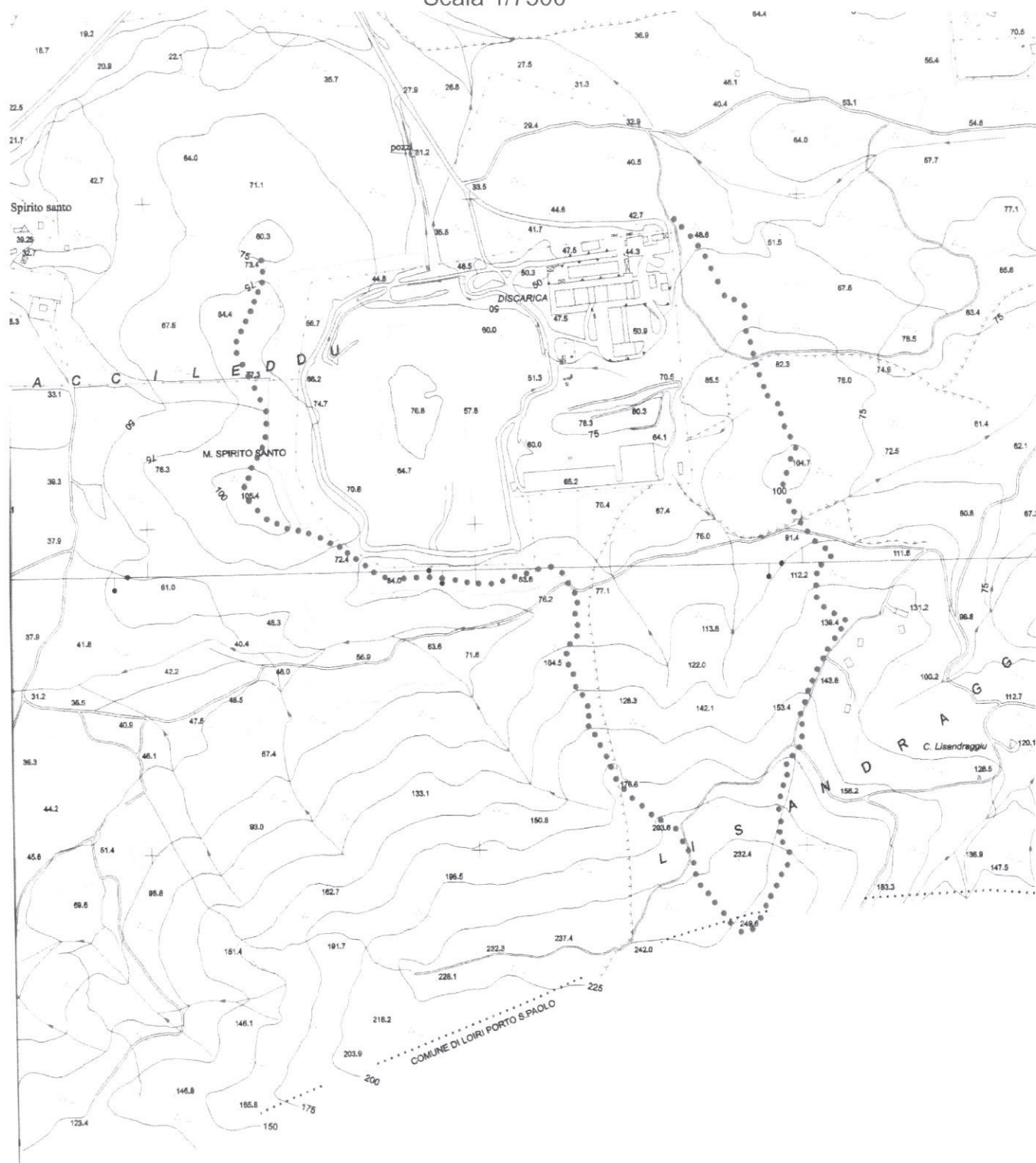
Nella terza parte della Relazione si riepilogano i dati acquisiti, pregressi ed attuali, e sulla base prevalente dell'ultima campagna di indagini geoelettriche si ribadiscono le linee del modello idrogeologico dianzi espresso, cioè acquifero superficiale con falda libera spesso pochi metri, acquicludo basale granitico fino ad oltre 50.00 m dal p.c., ipotetica presenza a maggior profondità di modesta e circoscritta circolazione idrica in fratture, spazialmente discontinua e con capacità di stoccaggio, intesa come capacità dell'acquifero di immagazzinare e rilasciare l'acqua, estremamente contenuta: la deduzione di tipo qualitativo è tratta dalla

tipologia, quasi puntuale e solo debolmente resiliente, dei flessi riscontrati limitatamente ad un paio di curve di resistività.

Assume, perciò, rilevanza, ai fini del controllo della diffusione degli inquinanti e della tutela della risorsa idrica nelle aree circostanti gli impianti, soprattutto a valle degli stessi, ***la valutazione della potenzialità, sotto il profilo quantitativo, della falda freatica di superficie.***

Si è proceduto, perciò, a formulare un calcolo speditivo del ***bilancio idrogeologico***, relativo a quella parte del bacino idrografico comprendente interamente l'area degli impianti in oggetto, secondo l'allegata cartografia delimitante il bacino idrografico d'interesse.

BACINO IDROGRAFICO
Scala 1/7500



Dagli studi precedenti si estraggono i parametri necessari per l'impostazione del calcolo:

- Superficie totale del bacino idrografico alla sezione di chiusura immediatamente a valle dell'area impianti: $A_T = \sim 475.000 \text{ m}^2$;
- Superficie compresa nell'area impianti: $A_1 = \sim 300.000 \text{ m}^2$ (63 % di A_T)
- Superficie a monte degli impianti: $A_2 = \sim 175.000 \text{ m}^2$ (37 % di A_T)
- Pendenza media del bacino a monte dell'area impianti: $S_2 = 29.8 \%$;
- Pendenza media del bacino nell'area impianti: $S_1 = 7.45 \%$;
- Precipitazione media annuale (anni dal 1922 al 2005): $P_m = 570 \text{ mm}$
- Temperatura media annuale (anni dal 1927 al 2010): $T_m = 16.6^\circ \text{ C}$.

Il bilancio idrogeologico è dato da:

$$P = \text{ETR} + R + I$$

ove

P = precipitazioni media meteorica (mm/anno)

ETR = evapotraspirazione reale (mm)

R = ruscellamento (mm)

I = infiltrazione efficace (mm)

CALCOLO DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE REALE

Risultando il bacino idrografico non molto esteso può essere adottata con profitto la formula di Turc che, oltretutto, si adatta a diverse condizioni climatiche:

$$\text{ETR} = P / \sqrt{0.9 + (P^2/L^2)}$$

ove

P = altezza pioggia (mm/anno)

$L = 300 + 25 T_m + 0.05 T_m^3$ = potere evaporante dell'atmosfera

T_m = temperatura media annua dell'aria (°C).

CALCOLO DI L

$$L = 300 + 25 \times 16.6^\circ + 0.05 \times 16.6^3 = 300 + 415 + 228.71 = 943.71$$

CALCOLO DI ETR

$$ETR = 570 / \sqrt{0.9 + (570^2/943.71^2)} = 570 / \sqrt{0.9 + 0.365} = 570 / 1.125 = \sim 507 \text{ mm}$$

pari a circa l'89 % di $P = 570 \text{ mm}$

Si calcola ETR anche con l'equazione di Coutagne, secondo cui:

$$ETR = P - \lambda P^2$$

ove

$$\lambda = 1 / (0.8 + 0.14T)$$

quindi

$$\lambda = 0.32$$

per cui

$$ETR = 466 \text{ mm/a}$$

Il risultato si può ritenere valido essendo P compreso tra $1/8\lambda$ e $1/\lambda$, condizione posta dall'Autore.

Ai fini del calcolo del bilancio idrogeologico si riepilogano di seguito i valori di ETR ottenuti:

- $ETR = 466 \text{ mm/a}$, secondo Coutagne

- ETR = 507 mm/a, secondo Turc.

CALCOLO DEL DEFLUSSO IDRICO GLOBALE D

$$D = P - ETR$$

$$D = 570 - 466 = 104 \text{ mm/a (secondo Coutagne)}$$

$$D = 570 - 507 = 63 \text{ mm/a (secondo Turc).}$$

CALCOLO DELL'INFILTRAZIONE EFFICACE

Essendo il deflusso idrico globale D la somma dei deflussi superficiali e sotterranei, cioè del ruscellamento e della infiltrazione, cioè:

$$D = R + I$$

si ha:

$$I = D - R$$

e facendo riferimento al coefficiente di infiltrazione potenziale (c.i.p.), si ha:

$$I = D \times \text{c.i.p.}$$

Si pone, per la coltre arenizzata del granito laddove presente e per le coperture artificiali altrove, il c.i.p. = 0.25D, che si ritiene possa meglio rispecchiare le complesse caratteristiche proprie del bacino idrografico, di seguito sinteticamente individuate:

- pendenza accentuata e presenza della copertura vegetale del versante a monte dell'area degli impianti, che copre il 37 % dell'area del bacino;
- minore pendenza, presenza di camminamenti, di spiazzi pavimentati e di edifici, regimazione e smaltimento delle acque a mezzo canalizzazioni e captazioni di vario tipo (acque di prima pioggia, percolato, ecc.), nell'area che accoglie gli impianti, che copre il 63 % dell'area del bacino.

Si ha, in definitiva, per l'infiltrazione efficace:

$$I = 104 \times 0.25 = 26 \text{ mm/a (secondo Coutagne)}$$

$$I = 63 \times 0.25 = 15.75 \text{ mm/a (secondo Turc)}$$

Non essendovi alimentazioni o afflussi di altro genere, l'infiltrazione efficace I si identifica con la potenzialità idrica U della falda freatica superficiale presente nel dominio idrogeologico in esame.

Tale potenzialità U è, pertanto, pari a:

$$U \text{ (m}^3\text{/a)} = I \text{ (m/a)} \times A \text{ (m}^2\text{)} = 0.026 \times 475.000 = 12.350 \text{ m}^3\text{/a} = 0.00039 \text{ m}^3\text{/s} = 0.39 \text{ l/s}$$

(secondo Coutagne)

$$U \text{ (m}^3\text{/a)} = I \text{ (m/a)} \times A \text{ (m}^2\text{)} = 0.01575 \times 475.000 = 7481 \text{ m}^3\text{/a} = 0.24 \text{ l/s}$$

(secondo Turc)

da cui si ottiene l'alimentazione unitaria specifica I_s , espressa in $\text{l/s}\cdot\text{km}^2$:

$$I_s = 0.39/0.475 = 0.82 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2 \text{ (secondo Coutagne)}$$

$$I_s = 0.24/0.475 = 0.51 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2 \text{ (secondo Turc)}$$

Concludendo sul punto, si osserva che, comunque calcolata, l'alimentazione unitaria specifica I_s , riflettendo le caratteristiche meteorologiche e le condizioni litologiche e morfologiche del sito, nonché le profonde modificazioni dei parametri idrogeologici apportate dalle pervasive attività antropiche gravanti sul 63 % della superficie totale del minuscolo bacino idrografico, è tipica di una potenzialità idrica complessiva molto ridotta; la risorsa idrica che ne deriva e che si concretizza nella falda libera oggetto di studio si qualifica come molto

povera, sia sotto il profilo qualitativo, in quanto superficiale, idrogeologicamente priva di copertura protettiva e quindi estremamente vulnerabile, sia sotto il profilo quantitativo, considerati i ridotti apporti delle ricariche e dell'unica fonte di alimentazione, quella meteorica.

Tanto è ulteriormente comprovato dall'andamento delle prove di pompaggio, eseguite in tempi precedenti su alcuni pozzi e piezometri, attestati nella falda libera superficiale, che hanno dato luogo all'azzeramento dei livelli idrici in tempi brevissimi, dell'ordine di pochi minuti primi, nonostante le modeste portate impegnate.

4. – ULTERIORI CONTRIBUTI PER LA DEFINIZIONE DEL MODELLO CONCETTUALE DEL SITO (MCS)

Si espongono in questo capitolo alcuni importanti aspetti, tratti da più fonti, utili per la definizione del Modello Concettuale del Sito (MCS), che, ai sensi dell'Allegato 2 al Titolo V della Parte IV del D. L.vo 152/2006, rappresenta il documento preliminare per la redazione del Piano di Caratterizzazione Ambientale.

4.1 Diffusione degli inquinanti nell'area

I mezzi di diffusione degli inquinanti presenti nell'area sono rappresentati:

- dai moti dell'acqua **nel sottosuolo**, sia sub-orizzontali che sub-verticali;
- dai moti dell'atmosfera: i venti;
- dai moti dell'acqua **sul suolo**.

4.1.1 Moti dell'acqua nel sottosuolo

Nel sito in esame l'acqua si muove secondo due possibili direzioni, quella sub-orizzontale e quella sub-verticale.

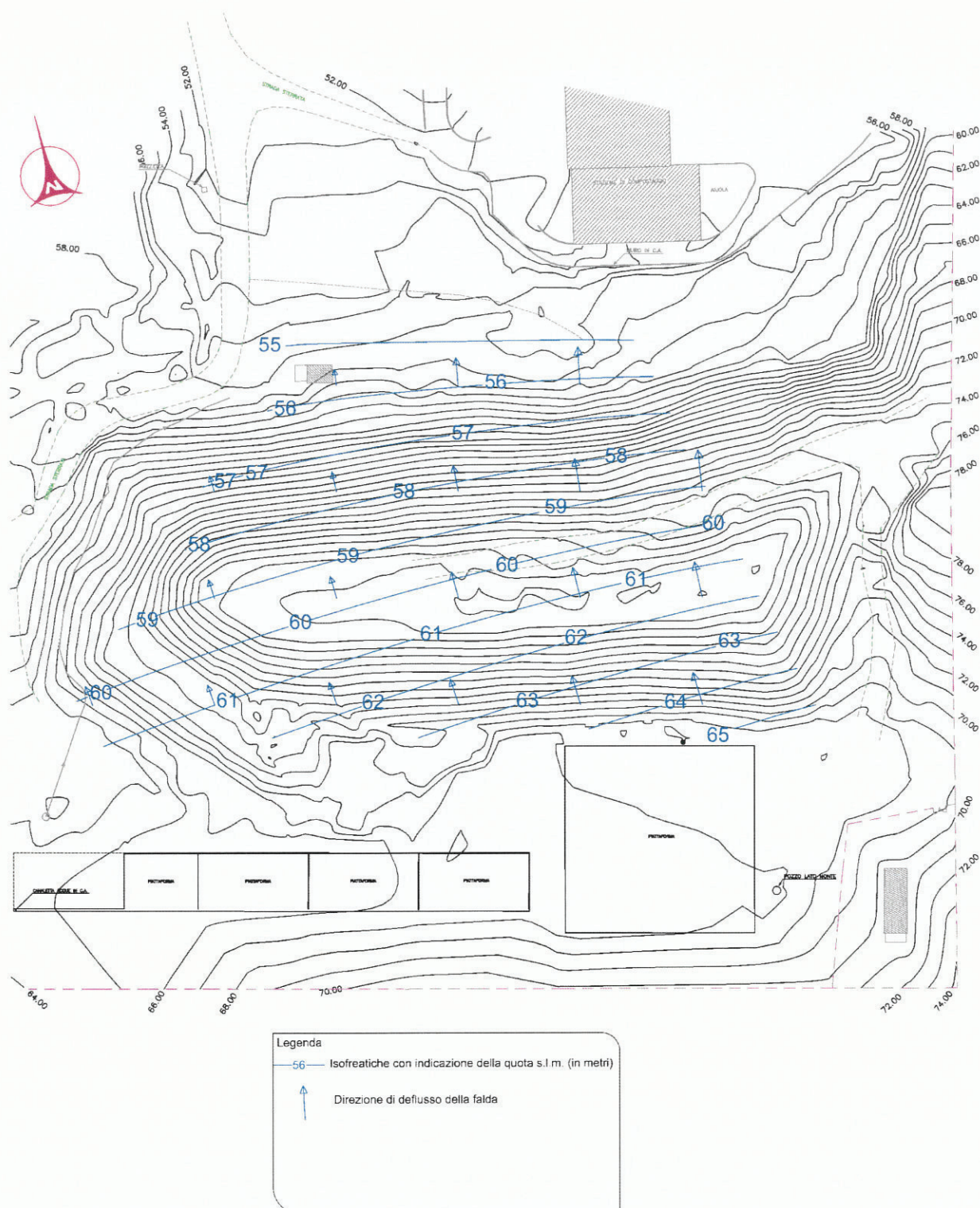
Il **moto sub-orizzontale** è stato descritto in precedenza e si riferisce al moto, nella zona di saturazione, della falda freatica superficiale; le linee di flusso di questa falda procedono da monte verso valle, secondo direttrici da SE verso NW e da SW verso N, in pratica adattandosi alla morfologia del sito.

Nella Relazione Vivarelli, limitatamente all'area della discarica comunale, il moto, dato dalle direzioni di flusso della falda, risulta rappresentato nelle carte delle isopieze; per quanto concerne l'intero bacino idrografico, detto moto viene rappresentato nella carta delle isopieze redatta dallo scrivente.

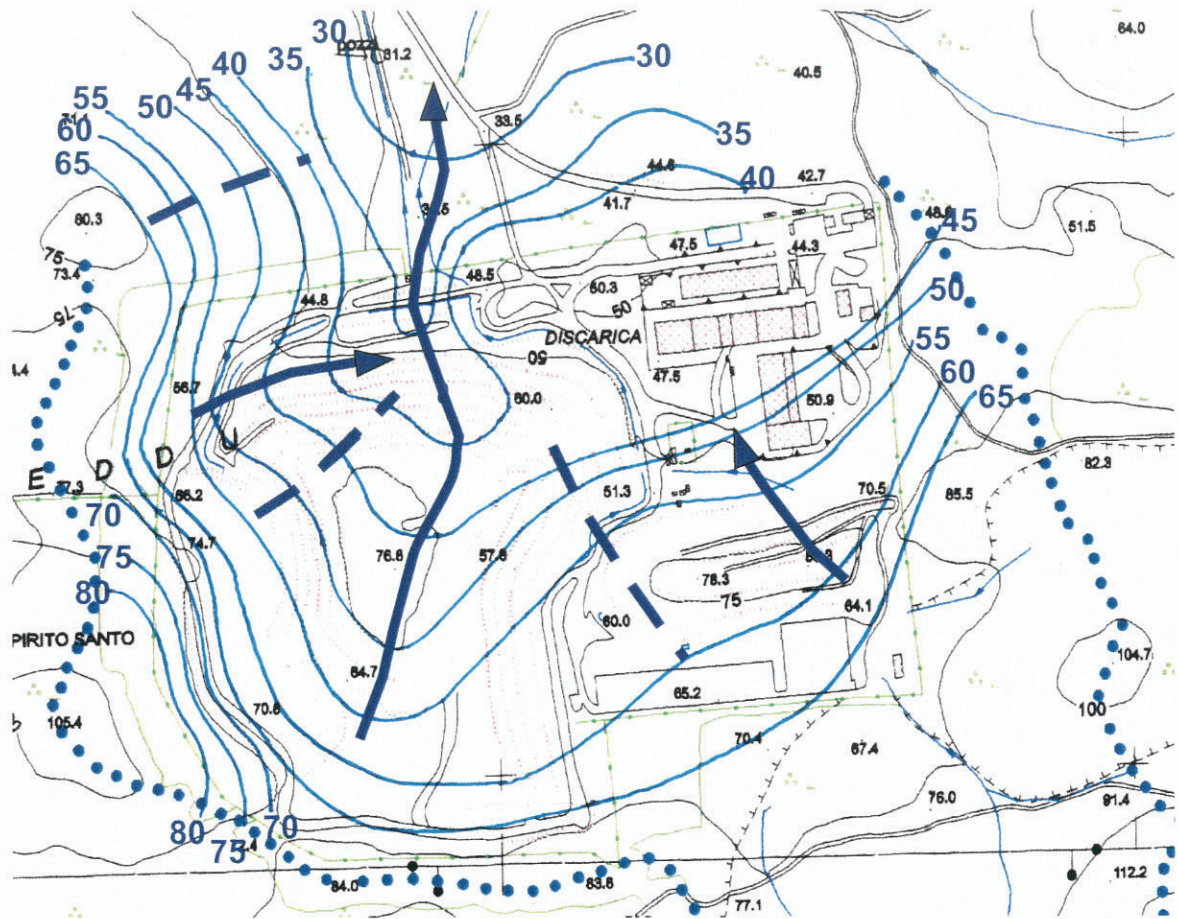
Si evidenzia, infine, che la potenzialità idrica U di detta falda superficiale, quale risulta dal *bilancio idrogeologico* riportato in precedenza, appare abbastanza modesta, essendo compresa in un *range* di circa 7500 – 12'350 m³/a, pari a circa 0.24 – 0.40 l/s.

Questo parametro consente di classificare la risorsa idrica in esame come molto povera, oltretutto molto vulnerabile sotto il profilo della esposizione all'inquinamento, in sintesi di scarsissimo valore economico.

Le due carte vengono di seguito proposte.



Carta delle isofreatiche (Vivarelli 2005)



- 45 — isofreatica e quota
- asse di drenaggio
- - - spartiacque sotterraneo
- limite bacino idrografico e bacino idrogeologico

Carta delle isofreatiche (De Paola 2014)

Il ***moto sub-verticale***, con verso discendente, è dato dalla percolazione delle acque di pioggia dalla superficie del terreno alla superficie freatica, attraverso la banda di sottosuolo insatura.

Il movimento sub-verticale delle acque nel sito in esame si esaurisce nel momento in cui esse raggiungono la falda freatica di superficie, essendo quest'ultima sostenuta alla base da un ammasso granitico impermeabile; detto ammasso roccioso è privo di fratture o discontinuità tettoniche tali da consentire l'ulteriore discesa delle acque della falda superficiale verso gli orizzonti più profondi.

Si sottolinea qui il rischio che le acque di detta falda superficiale, al momento inquinate da reflui di discarica, possano essere trasferite in profondità dai cosiddetti piezometri profondi, realizzati anni addietro con l'intento di monitorare una sola ipotizzata falda profonda, sul cui isolamento idraulico sorge qualche dubbio, visto l'esito delle prove di emungimento di cui in prosieguo e lo stato di inquinamento dell'acqua campionata in detti piezometri profondi.

Detta falda profonda, peraltro, laddove esistente, risulterebbe comunque naturalmente isolata da quella di superficie, data l'interposta presenza dell'ammasso granitico, che, sotto il profilo della conducibilità idraulica, risulta comportarsi da acquicludo se non proprio da acquifugo, come risulta dalle prove sperimentali condotte in sito.

La pericolosità di detti piezometri connessa alla possibilità di trasferire in profondità le acque inquinate della falda superficiale è dimostrata dall'analisi, di seguito esposta, di alcune prove di portata eseguite sugli stessi nell'agosto 2012.

I piezometri profondi sottoposti alla prova di portata sono i seguenti:

- R1, profondità 90.00 m, diametro pari a 200.00 mm;

- R3, profondità 80.00 m, diametro pari a 200.00 mm;
- R5, profondità 100.00 m, diametro pari a 200.00 mm.

Le prove risultano eseguite a portata costante, con $Q = 1.00$ l/s.

POZZO R1

Il volume del pozzo R1, alla profondità di 83.17 m, risulta pari a

$$V = 0.100^2 \cdot \pi \cdot 83.17 \text{ m} = 2,613 \text{ m}^3 = 2613 \text{ litri}$$

La prova di pompaggio a portata costante con $Q = 1.00$ l/s ha dato luogo, in circa 50', ad un abbassamento del livello idrico pari a 83.17 m; il volume di acqua estratto risulta pari a $V = 50' \times 60 \text{ l/m}' = 3000$ litri.

Si rileva immediatamente ***come gli ordini di grandezza del volume del pozzo ed il volume dell'acqua estratta con la prova di emungimento siano assolutamente comparabili.***

Con la prova, in definitiva, ***è stata estratta solo l'acqua contenuta nel cavo del pozzo*** (è stata cioè, sollecitata la sola capacità del pozzo) senza alcun contributo da parte della falda.

Le procedure per questo tipo di prova a portata costante dettano regole tecniche per superare proprio il cosiddetto ***effetto di capacità del pozzo***, il cui tempo critico t_c è dato da:

$$t_c \text{ (in secondi)} = 25 \frac{r^2}{T}$$

con

r = raggio del pozzo in m

T = trasmissività in m^2/s

Per avere almeno l'ordine di grandezza del *tempo critico*, per il caso in esame, si pone $T = 1.0 \text{ m}^2/\text{g}$ (valore che secondo Krasny si pone al limite tra le classi V, bassa, e VI, molto bassa, della classifica degli acquiferi in base alla trasmissività), così ottenendo:

$$t_c = 25 \cdot 0.1^2/1 = 0.25\text{g} = 6 \text{ ore}$$

Più aderente al caso in esame appare la relazione di Berkaloﬀ, secondo cui il volume di acqua da estrarre per superare l'effetto capacitivo del pozzo è dato da

$$V = 10 \cdot r^2 \cdot h$$

ove h è l'abbassamento indotto nel pozzo di pompaggio a portata costante.

Risulta, pertanto, $V = 10 \cdot 0.1^2 \cdot 80 = 8.00 \text{ m}^3 = 8000$ litri da estrarre contro i 3000 litri effettivamente estratti.

Secondo Castany, invece, per superare ***l'effetto capacità del pozzo***, espresso, come si è visto, in secondi, è necessario che il tempo della prova di emungimento a portata costante, t_e , sia uguale o superiore a 20 volte il tempo capacità del pozzo, t_c , cioè:

$$t_e \geq 20 t_c$$

Nel nostro caso, ponendo $t_c = 50'$ (valore concettualmente ammissibile), si avrebbe addirittura $t_e \geq 20 \cdot 50' = 1000' = \text{circa } 16 \text{ ore}$, valore, ovviamente, puramente orientativo, ma che appare comunque eccessivo nel caso in oggetto.

In definitiva, l'abbassamento repentino del livello di falda (83.00 m in 50 minuti primi) e il volume di acqua estratto, dello stesso ordine

di grandezza dell'effetto capacità del pozzo, evidenziano due aspetti importanti:

- 1) la povertà quantitativa della falda profonda se non la sua inesistenza;**
- 2) il rischio reale che le acque inquinate della falda superficiale vengano immesse in profondità proprio dai piezometri cosiddetti profondi, risultando le acque di detti piezometri già inquinate.**

POZZO R3

Il risultato della prova è identico a quello del precedente pozzo e identiche le considerazioni conseguenti.

Volume pozzo = $0.100^2 \cdot \pi \cdot 72.60 \text{ m} = 2281 \text{ litri}$

Volume acqua estratta in 40' con abbassamento a 72.60 m = $40 \times 60 = 2400 \text{ litri}$.

POZZO R5

Anche in questo caso risultato e considerazioni risultano identici a quelli precedenti.

Volume pozzo = $0.100^2 \cdot \pi \cdot 94.56 \text{ m} = 2971 \text{ litri}$

Volume acqua estratta in 60' con abbassamento a 94.56 m = 3600 litri.

Da qui l'opportunità di procedere, a titolo esclusivamente precauzionale, alla definitiva sigillatura dei piezometri profondi, proprio per evitare inutili e pericolosi travasi delle acque di superficie

in profondità; pericolosità davvero consistente visto l'attuale stato di inquinamento anche delle acque presenti nei piezometri profondi.

4.1.2 I moti dell'atmosfera: i venti

I venti hanno notevole influenza sulla diffusione di alcune categorie di inquinanti per via aerea, quali polveri, particolati, fumi, aerosol, quest'ultimo anche marino data la vicinanza del mare, esalazioni gassose provenienti dal corpo delle discariche, emissioni generate dai mezzi di trasporto e di cantiere e polveri provenienti dalla movimentazione di terra e di altri materiali, ecc.

Si evidenzia, sul punto, che l'area di interesse è investita da venti di diversa provenienza ed intensità per quasi l'intero arco annuale.

Dall'analisi della rosa dei venti si rileva, in particolare, che la zona di Olbia (rilevamenti alla stazione ENEL-SNAM di Olbia-Costa Smeralda, periodo 1970-1991) è caratterizzata principalmente da venti medio-moderati provenienti da SW, a cui seguono, con significativa presenza, anche venti in prevalenza moderati provenienti da NE; ***i venti forti, con velocità superiori ai 13 nodi, sono presenti con una percentuale elevata, che si aggira intorno al 20%.***

Appare, perciò, del tutto evidente che, nel sito in esame, data la vicinanza del mare per gli aerosol marini, la presenza delle discariche, la necessaria movimentazione dei rifiuti, di automezzi e macchine operatrici e, in passato, l'esistenza di un inceneritore oggi dismesso, ***l'influenza dei venti nel trasporto e diffusione di taluni inquinanti appare un fattore davvero importante e non trascurabile.***

4.1.3 I moti dell'acqua sul suolo

Risulta da più documenti agli atti che lungo scoline o canali a cielo aperto transitano reflui provenienti dalla discarica comunale.

Dalla Relazione Vivarelli (2005), in particolare, si evince che detti reflui sono costituiti o da percolato ovvero da acque superficiali di origine meteorica miste a percolato, come da foto allegate.

Ancora oggi i reflui di cui sopra sono presenti in scoline o canali a cielo aperto.



Figura 5.3: tubo in uscita (campione C2)



Figura 5.4: affioramento percolato (campione C8)



Foto 22 - Pozza d'acqua al piede della discarica



Foto 23 - Rigagnolo lato nord

E' del tutto evidente che gli inquinanti presenti nel percolato tendono a diffondersi sul suolo, oltre che nel sottosuolo come in precedenza illustrato, a causa del ruscellamento delle acque di pioggia.

Ma altre superfici che alimentano l'inquinamento di dette acque sono identificabili nella rete viabile interna, sulla quale possono essere depositati inquinanti di varia natura dagli automezzi e dalle macchine operatrici in transito.

Si tenga presente che ***la quantità di acque meteoriche ruscellante liberamente sulla superficie dell'area destinata agli impianti rappresenta un'aliquota importante del deflusso idrico globale***, secondo quanto calcolato nel *bilancio idrogeologico* sopra riportato, ***essendo compresa tra circa 22'000 e 37'000 m³/anno***.

4.2 Immissioni secondarie di inquinanti nell'ambiente

4.2.1 Attività inceneritore (in disuso al 2005)

La relazione Vivarelli riferisce dell'esistenza di un inceneritore nell'ambito dell'area di interesse in disuso già al 2005.

Se ne fornisce una fotografia, di seguito riportata, dalla quale è rilevabile anche un rigagnolo che scorre nei pressi del manufatto.



Foto inceneritore in disuso e rigagnolo lato nord

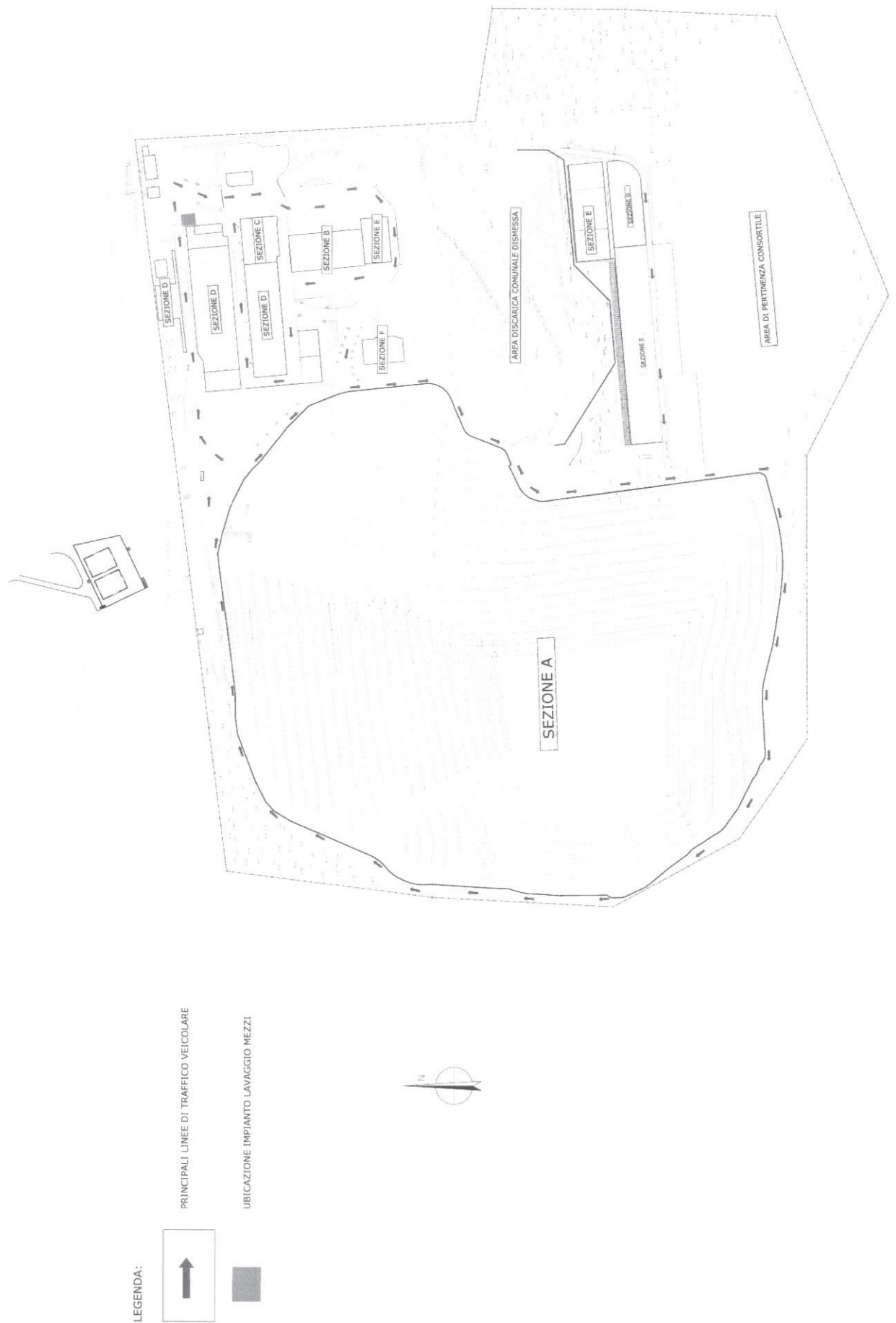
Trattandosi di un modesto e, all'apparenza, rudimentale manufatto, se ne segnala la presenza, con l'intento di appurarne funzione, quantità e qualità merceologica del materiale incenerito, periodo di funzionamento, emissioni in atmosfera, **residui della combustione e loro smaltimento**.

4.2.2 Movimentazione degli autocompattatori da e per i siti di stoccaggio e di lavaggio e delle altre macchine operatrici

Fonti saltuarie di inquinamento possono individuarsi anche nella movimentazione, all'interno dell'area, dei compattatori, sia per **perdite accidentali di liquidi provenienti dai rifiuti trasportati dagli autocompattatori lungo la rete viabile da e per i siti di stoccaggio, sia per residui di rifiuti aderenti agli pneumatici prima del processo di lavaggio**.

Si evidenzia che il percorso compiuto dai compattatori e da altri mezzi di lavorazione dei rifiuti all'interno dell'area è notevole, come si

rileva dalla seguente planimetria, relativa agli assi principali di traffico veicolare all'interno dell'area impianti.



Planimetria assi principali di traffico veicolare

Altra potenziale fonte di **inquinamento atmosferico** deriva dall'attività delle macchine operatrici dedicate alla movimentazione, compattazione e copertura dei rifiuti nella discarica nonché alla movimentazione e trasporto dei terreni di copertura, ecc.

Ci si riferisce a macchine escavatrici, autocarri, apripista e pale, le cui emissioni in atmosfera, come rilevabili da dati di letteratura, sono le seguenti:

	INQUINANTI in Kg/h			
	CO	HC	NOX	PTS
Scavatrici	2.10	0.91	10.08	0.77
Autocarri	3.15	1.37	15.12	1.16
Trattori	1.50	0.65	7.20	0.55
Apripista	0.60	0.26	2.88	0.22

La valutazione delle emissioni per motori diesel può essere effettuata anche in funzione della potenza del motore (EMEP – CORINAIR, 1999), come da seguente tabella:

	INTERVALLO DI POTENZA					
	0-20	20-37	37-75	75-130	130-300	300-560
CO	8.38	6.43	5.06	3.76	3.00	3.00
HC	3.82	2.91	2.28	1.67	1.30	1.30
NOX	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40
PTS	2.22	1.81	1.51	1.23	1.10	1.10

4.3 Prove sperimentali relative alla tenuta idraulica del fondo della discarica CIPNES

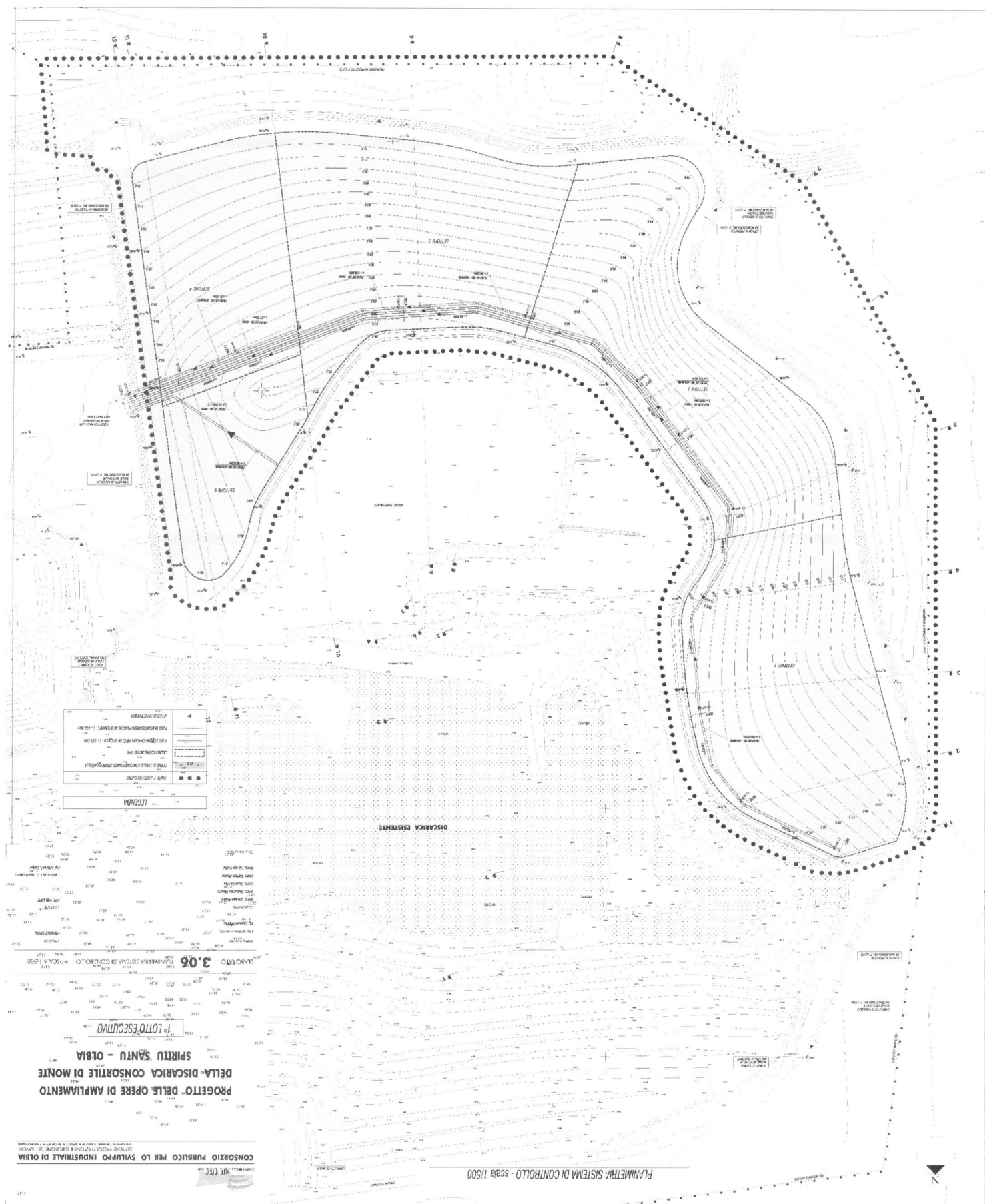
La tenuta del sistema impermeabile della discarica CIPNES risulta ad oggi verificata da due diversificate tipologie di monitoraggio.

La discarica CIPNES è stata sottoposta a verifiche di tenuta idraulica nel corso della campagna di misure geoelettriche esperite nel giugno-luglio 2013 ed oggetto della relazione De Paola del successivo novembre 2013.

In quell'occasione, sul corpo della discarica sono state eseguite n.9 elettrotomografie, orientate in modo da esplorare ogni lato del corpo discarica, che hanno evidenziato, alla base dei rifiuti abbancati, la presenza di un elettrostrato continuo ed omogeneo caratterizzato da alta resistività, evidentemente connessa al comportamento dielettrico del sistema impermeabile di fondo che si oppone al passaggio degli impulsi elettrici e che ***dimostra, in definitiva, la perfetta integrità e, quindi, la tenuta idraulica della barriera impermeabile.***

La discarica è anche ***munita di un proprio sistema di monitoraggio continuo sottotelo***, messo in opera nel corso dei lavori di costruzione, in particolare nella fase di realizzazione della impermeabilizzazione di fondo.

Si tratta di tubi di monitoraggio posizionati al di sotto del telo impermeabile, confluenti in pozzetti di raccolta, in ogni tempo ispezionabili dall'esterno per la rilevazione di eventuali perdite di percolato (vedi allegata planimetria).



Ad oggi, giugno 2014, i riscontri operati dai tecnici del CIPNES hanno dato conferma dell'assenza di percolato al di sotto del telo impermeabile, accertandone, perciò, la ***perfetta tenuta sotto il profilo idraulico.***

5.- DEFINIZIONE DEL MODELLO IDROGEOLOGICO

5.1 Le fonti

La definizione del modello idrogeologico qui proposta deriva dalla somma di concordanti rilevamenti, osservazioni ed indagini provenienti da fonti diverse.

In primo luogo esse scaturiscono dalla relazione Vivarelli (2005) e dalla Relazione De Paola (2013), a cui si aggiungono ulteriori tasselli traibili da indagini e studi diversi, che, in forma per lo più indiretta, supportano il percorso cognitivo che conduce oggi lo scrivente a formulare il più accreditabile modello idrogeologico del sito.

Tali ulteriori tasselli sono stati individuati in alcuni passi delle Relazioni Vorlicek (2008), Calderaro (2012) e nei principi ispiratori della progettazione della barriera in jet-grouting realizzata a monte della discarica comunale.

Nei tre casi citati emerge, con tutta chiarezza, che il modello concettuale assunto per la tutela ambientale fonda esclusivamente su un modello di base idrogeologico, costituito da un solo acquifero, quello superficiale, sostenuto alla base da un ammasso granitico sostanzialmente impermeabile.

Da qui sorge l'esigenza di tutelare quella che è già ritenuta l'unica risorsa idrica capace di veicolare gli inquinanti presenti nell'area: la falda freatica superficiale, peraltro di scarsa entità (come dimostrato con il bilancio idrogeologico nella relazione De Paola) e vulnerabile (come dimostra il suo diffuso stato di inquinamento).

5.2 Relazione Vorlicek (2008)

Nella Relazione Vorlicek (2008) si implementa un modello matematico, **sull'assunzione della sola falda di superficie**, destinato a definire flusso, trasporto e diffusione degli inquinanti, con il fine ultimo di individuare il percorso di taluni inquinanti ed i tempi di propagazione, a partire dal momento in cui le particelle inquinanti sfuggono al confinamento in discarica.

Nessun accenno, quindi, ad una falda profonda e a sue eventuali misure protettive; forse perché ritenuta inesistente ovvero perché ritenuta protetta a tetto da un acquicludo e quindi, per sua natura, non vulnerabile rispetto all'accertato e diffuso inquinamento della falda idrica di superficie?

L'interrogativo non trova risposta nella citata Relazione.

5.3 Relazione idrogeologica integrativa Calderaro (2012)

Analoga osservazione va fatta per quanto concerne la *“progettazione di un'opera idraulica a valle della discarica, con la funzione di captare le acque di falda nel caso di una comprovata contaminazione delle stesse”*, aspetto trattato nella relazione idrogeologica integrativa Calderaro (novembre 2012).

Anche nella citata Relazione si rileva la massima attenzione per la tutela dall'inquinamento della sola falda freatica di superficie, **sulla base del modello geologico monofalda superficiale**, senza alcun riferimento ad altre acque sotterranee che, ove esistenti, avrebbero dovuto richiedere anche gli interventi protettivi; in ogni caso, gli interrogativi posti come nel precedente caso rimangono privi di risposte.

L'opera di cui si parla nel citato paragrafo è costituita da una trincea drenante ubicata a valle della discarica CIPNES, trasversalmente alla

direzione di massima pendenza, avente una lunghezza di 40.00 m ed un'altezza di appena 3.00 m, evidentemente assegnando tale spessore anche alla falda libera di superficie.

Nella stessa Relazione vengono altresì riportati gli esiti delle prove di portata sui piezometri profondi, già analizzati nel precedente paragrafo 4.1.1 (Moti dell'acqua nel sottosuolo), ove si è dimostrato che i quantitativi emunti nel corso delle prove sono esclusivamente quelli propri della capacità di ciascuno dei tre piezometri, ponendo seri interrogativi sull'origine dell'acqua ivi presente (se da circolazione profonda o da travasi della falda superficiale), ***consideratone anche lo stato di inquinamento, in particolare da piombo, nichel, zinco, fluoruri, come per le acque superficiali.***

5.4 La progettazione della barriera idraulica a monte della discarica comunale

L'ultima ed identica osservazione viene sollevata in questa sede dalla progettata ed eseguita barriera idraulica in jet-grouting a monte della discarica comunale, con l'obiettivo di impedire alle acque della falda superficiale provenienti da monte di infiltrarsi nel corpo e al di sotto della discarica comunale.

La profondità di quest'opera, per quanto reperito nei vari documenti, è di circa 10.00 m dal p.c., sufficienti per superare l'acquifero di superficie ed ***attestarsi significativamente nel complesso granitico di base, ritenuto perciò impermeabile.***

Anche in questo caso ***emerge chiara l'impostazione concettuale della progettazione***, che, ai fini della tutela ambientale, ***considera la sola risorsa idrica superficiale***, ritenendo, perciò, inesistente la risorsa idrica profonda ovvero inaccessibile alle infiltrazioni inquinanti di superficie

perché naturalmente protetta dalla sottostante banda granitica impermeabile.

5.5 Relazione Vivarelli-2005 e De Paola-2013: le convergenze a fini idrogeologici

Le convergenze che emergono sotto l'aspetto idrogeologico tra le due Relazioni ***fondano essenzialmente su dati sperimentali.***

La Relazione Vivarelli espone i risultati delle indagini geognostiche, consistenti principalmente in sondaggi a carotaggio continuo, ben documentati fotograficamente e con classificazione dei campioni granitici estratti secondo l'indice RQD.

I quattro sondaggi hanno attinto profondità fino a 10.00 m dal p.c., interessando interamente quella banda granitica fratturata fino a 4.00 – 6.00 m dal p.c., che ospita la falda freatica superficiale.

La soggiacenza della falda riscontrata nei sondaggi in oggetto è compresa tra un minimo di – 0.36 m dal p.c. (S2) ed un massimo di – 2.92 m dal p.c. (S3), con valori di soggiacenza intermedi pari a – 1.18 m dal p.c. (S4) e – 2.78 m dal p.c. (S1).

Questi dati trovano ulteriore conferma nei quattro sondaggi elettrici verticali (SEV) eseguiti nella stessa area.

Nonostante esplorino profondità limitate a 30.00 ÷ 40.00 m dal p.c. e siano stati eseguiti sul corpo discarica, i quattro SEV sono più che sufficienti a delineare il quadro idrogeologico locale.

In linea generale, oltre alle coperture, viene individuato un elettrostrato superficiale a bassa resistività, costituito dall'ammasso granitico fratturato e sede di falda idrica per uno spessore di pochi metri (3.00 ÷ 4.00 m), a cui segue un elettrostrato caratterizzato, fino alla

massima profondità esplorata, da resistività elevata, costituito dal granito “compatto e privo di percolazione”.

Sulla base di queste indicazioni e tenuto conto che l'accertato stato di inquinamento dell'area è attribuibile alle perdite di percolato provenienti dal corpo della discarica comunale, la relazione conclude delineando gli interventi per la messa in sicurezza del sito.

Questi ultimi riguardano solo le coltri granitiche arenizzate ed il granito fratturato superficiale nonché la falda freatica ivi insediata, posto che si ritiene impermeabile l'ammasso granitico a profondità superiore ai 6.00 m.

Non viene esplicitamente trattato l'argomento relativo alla eventuale presenza di circolazione idrica profonda per l'evidente motivo della ininfluenza delle problematiche affliggenti i terreni e la eventuale circolazione idrica superficiale sul sistema idrico profondo, ***in quanto, esistente o inesistente che sia, quest'ultimo risulta protetto dalla sovrastante banda granitica impermeabile, per spessori di alcuni decametri.***

Ove, invece, si fosse ritenuta inquinabile anche l'eventuale acqua profonda, nella delineazione dei sistemi di messa in sicurezza del sito si sarebbero dovuti includere anche gli interventi per la tutela della ben più pregiata risorsa idrica profonda.

La Relazione conclude, pertanto, sull'argomento affermando che gli interventi di messa in sicurezza “dovranno principalmente focalizzarsi sulla minimizzazione della produzione di percolato all'interno della discarica (fonte di contaminazione)”, configurandoli nella regimazione delle acque meteoriche a monte della discarica, nella realizzazione di un top capping sul corpo discarica, nella “riduzione della migrazione di acque contaminate da percolato verso valle con interventi di barriera (fisica o idraulica)”.

Ogni attenzione, in sintesi, è esclusivamente rivolta alla protezione dall'inquinamento dell'unica risorsa idrica vulnerabile, quella relativa alla falda superficiale.

La Relazione De Paola-2013, con la corposa campagna di indagini geoelettriche costituita da ben n.19 elettrotomografie, attingenti profondità di circa 35.00 m dal p.c., e da n.10 sondaggi elettrici verticali, spinti sino a profondità comprese tra 90.00 e 135.00 m rispetto al p.c., pone un punto fermo sulla modellazione idrogeologica dell'intero bacino idrografico ricadente all'interno dell'area di interesse.

La distribuzione delle elettrotomografie e dei SEV è tale da ***investigare completamente l'area*** e saggiare anche alcuni punti ad essa esterni con taluni SEV, mentre ***le diverse direzioni prescelte per gli allineamenti elettrodi delle tomografie sono tali da comprendere tutte le principali linee tettoniche di interesse e le associazioni di fratture riscontrate lungo i versanti.***

I risultati ottenuti, oltre che essere collimanti con quelli raccolti nella Relazione Vivarelli-2005, ne ampliano la portata e codificano in maniera univoca i caratteri idrogeologici caratterizzanti il sistema acquifero locale.

In sintesi, i risultati ottenuti sono i seguenti.

Le elettrotomografie concordemente denunciano l'esistenza di un elettrostrato superficiale a bassa resistività e spesso pochi metri, in generale 4.00 – 6.00 m o poco più localmente, costituente l'acquifero locale, arealmente discontinuo e con morfologia che si adatta a quella topografica; segue un elettrostrato ad alta resistività fino alla massima profondità esplorata, pari a circa 35.00 m, caratterizzante la sostanziale impermeabilità del sottostante omogeneo complesso granitico.

In nessun caso sono state intercettate, all'interno di detto ammasso granitico, discontinuità tali da costituire connessioni idriche tra quest'ultimo e la falda idrica di superficie.

Le elettrotomografie in oggetto, delle quali ben nove risultano eseguite sul corpo della discarica CIPNES secondo allineamenti all'incirca tra loro ortogonali e con angolazioni anche diverse, attestano ***la tenuta idraulica del sistema impermeabile della discarica***, dando luogo ad un fondo continuo ed omogeneo dovuto al comportamento dielettrico proprio di tale sistema che impedisce il passaggio degli impulsi elettrici verso il basso.

I n. 10 SEV, spinti sino ad una profondità minima di 90.00 m dal p.c. e massima di 135.00 m dal p.c., completano il quadro precedentemente esposto, confermando l'esistenza di un acquifero superficiale profondo pochi metri, sede di debole e discontinua circolazione idrica, allocato nella coltre granitica arenacea e nella porzione alta alterata e fratturata del sottostante complesso granitico, a cui segue l'ammasso granitico meglio caratterizzato sotto il profilo della discontinuità e perciò sostanzialmente impermeabile fino alla massima profondità esplorata di 135.00 m dal p.c.

Deboli flessi nelle curve di resistività, appena avvertiti nei SEV n.5 e n.8, alle rispettive profondità di circa 55.00 e 88.00 m dal p.c., potrebbero indicare la presenza, invero molto debole ove esistente, di locale circolazione idrica in frattura.

La lettura combinata delle elettrotomografie e dei SEV (questi ultimi confrontabili con quelli compresi nella relazione Vivarelli-2005, anche se limitati ad una quarantina di metri di profondità) conferma quanto complessivamente emerge dalle indagini esperite, cioè la presenza di una debole falda idrica superficiale sostenuta alla base

da un complesso impermeabile almeno fino ad una cinquantina di metri di profondità.

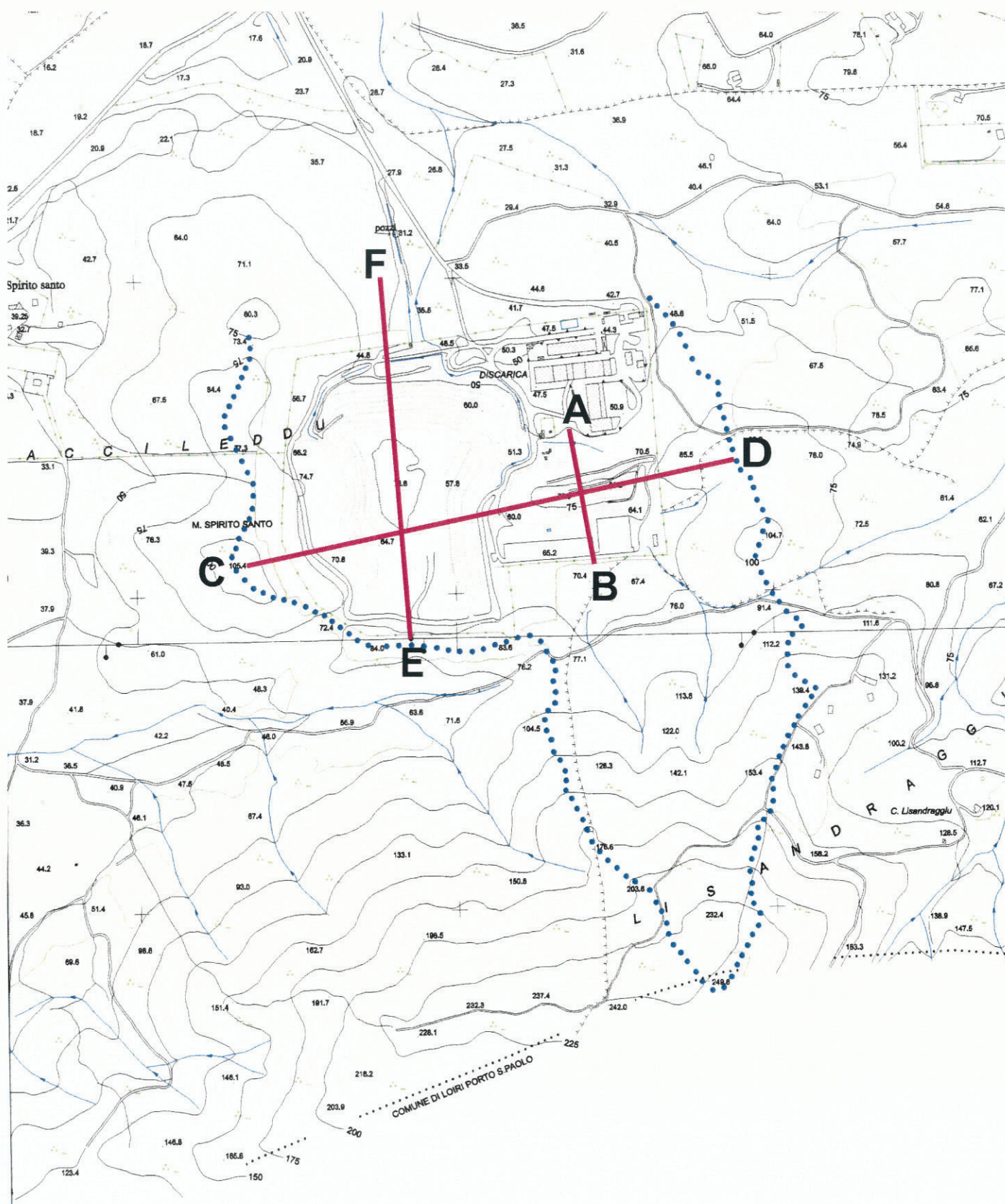
Tale assunto ***esclude ogni possibilità di trasferimento degli inquinanti dalla falda di superficie ad una eventuale risorsa idrica circolante in profondità.***

Si evidenzia, infine, che la falda idrica superficiale è caratterizzata, oltre che da elevatissima *vulnerabilità*, da una *potenzialità idrica* molto ridotta, connessa al ridotto apporto delle ricariche, costituite, nel caso in esame, dalle sole precipitazioni meteoriche; tale *potenzialità idrica*, per la falda in oggetto, è compresa in un *range* di $7500 \div 12'350 \text{ m}^3/\text{a}$.

6. – IL MODELLO IDROGEOLOGICO

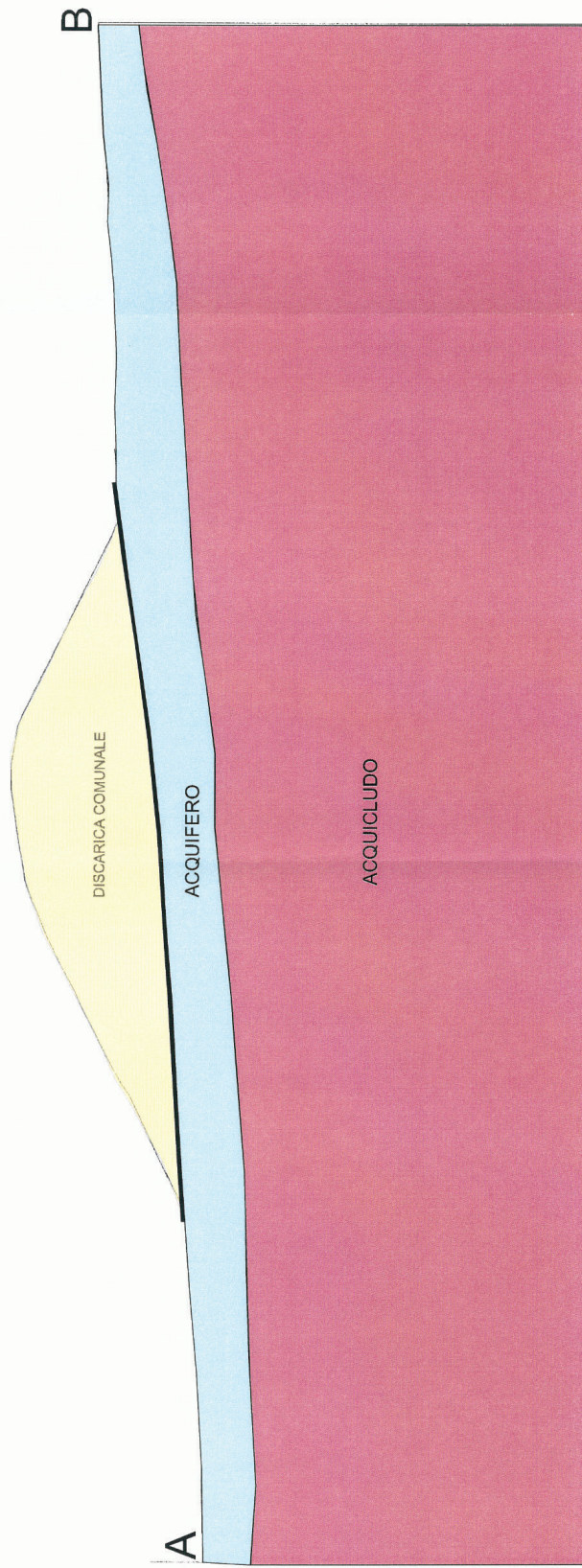
Sintetizzando quanto in precedenza esposto ed estratto dalle varie campagne di indagini e connessi studi, si propone di seguito il modello idrogeologico che meglio interpreta la realtà fisica dei luoghi di interesse.

Esso deriva dalle caratteristiche litostratigrafiche e di permeabilità dei complessi idrogeologici presenti nel sito, come è possibile rilevare dalle allegate sezioni idrogeologiche schematiche.



Traccia sezioni idrogeologiche
(Scala 1/7500)

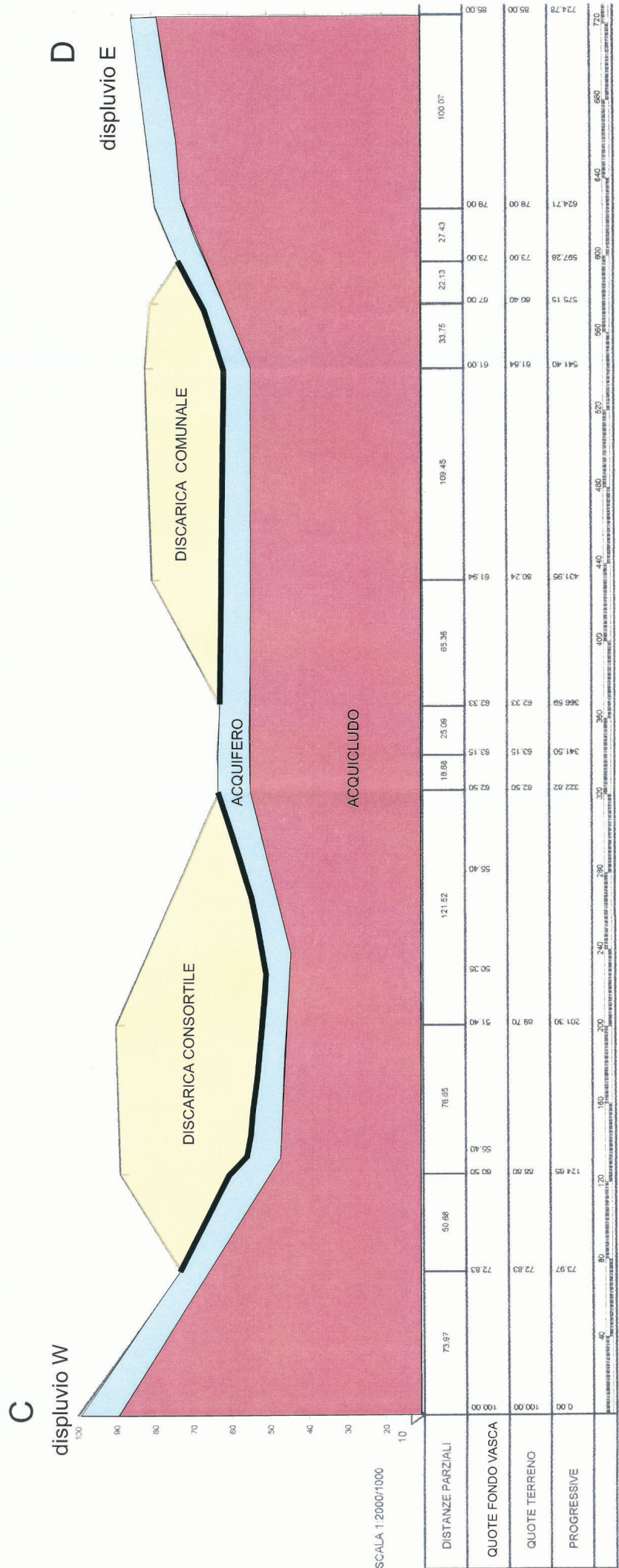
SEZIONE IDROGEOLOGICA SCHEMATICA A - B



Scala 17700
QT.RIF. 0.000

[illegible]

SEZIONE IDROGEOLOGICA SCHEMATICA C - D



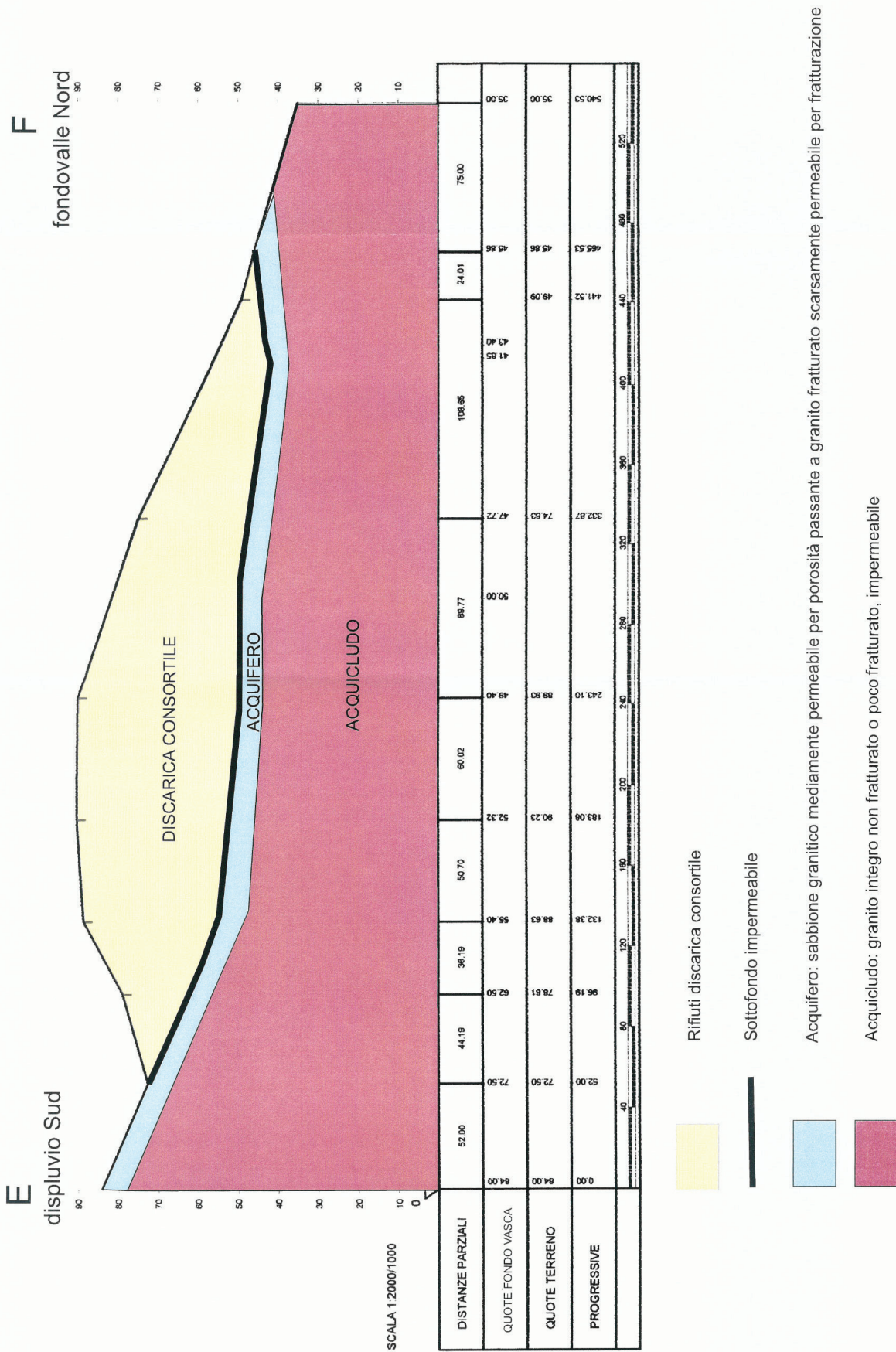
Rifiuti discariche

Sottofondo impermeabile

Acquifero: sabbione granitico mediamente permeabile per porosità passante a granito fratturato scarsamente permeabile per fratturazione

Acquicludo: granito integro non fratturato o poco fratturato, impermeabile

SEZIONE IDROGEOLOGICA SCHEMATICA E - F



I complessi rilevati nel sito, come si rileva dalle cartografie sopra riportate, sono essenzialmente due e sono così identificabili, a partire dall'alto stratigrafico:

- Complesso dei depositi sciolti colluviali/alluvionali e dei sabbioni granitici, con permeabilità da media a bassa per porosità e con spessore di qualche metro;
- Complesso litoide dei monzograniti, al top e per alcuni metri con permeabilità bassa per fratturazione passante verso il basso e per alcuni decimetri a permeabilità nulla.

Il Complesso dei depositi colluviali-alluvionali, costituito da sabbie ciottolose con limo ed argilla, è ubicato nei compluvi, mentre i sabbioni limoso-argillosi generati dall'alterazione e degradazione dei graniti coprono con maggior continuità il complesso granitico di base.

In entrambi i casi, data la presenza della frazione fina la permeabilità per porosità varia da media a bassa, ma consente in ogni caso l'infiltrazione e la circolazione delle acque; lo spessore dell'acquifero è di qualche metro.

Il sottostante Complesso granitico presenta una scarsa permeabilità per fratturazione limitata ai primi 3.00 ÷ 5.00 m di profondità, solo localmente spinta a maggior profondità, sempre però inferiore ai 10.00 m.

La banda granitica così individuata consente una debole circolazione idrica, che si attenua procedendo verso il basso giacché le fratture tendono a serrarsi per effetto della pressione litostatica.

A profondità superiori il granito si presenta integro e privo di discontinuità atte a consentire la circolazione delle acque almeno fino ad una profondità di oltre 50.00 m dal p.c.

A profondità ancora superiori è possibile riscontrare la presenza di acqua circolante in fratture isolate, non anastomizzate e perciò non costituenti acquifero continuo in rete, con portate, funzione di stoccaggio, coefficiente di immagazzinamento e trasmissività modeste (v. i debolissimi flessi appena percettibili riscontrati a 55.00 e 88.00 m di profondità sulle curve di resistività dei SEV n.5 e n.8).

Riepilogando e concludendo, ***il modello idrogeologico locale è rappresentato da un acquifero superficiale, in genere avente uno spessore medio complessivo di 4.00 ÷ 6.00 m, in parte costituito dai depositi sciolti di copertura con permeabilità per porosità da media a bassa ($k = 10^{-3} \div 10^{-5}$ m/s) esplicante la funzione di acquifero s.s. ed in parte costituito dalla banda granitica alterata e fratturata debolmente permeabile per fratturazione ($k = 1.18^{-5} \div 7.7^{-6}$ m/s) esplicante funzione di acquitardo.***

L'acquifero ospita una falda freatica debole e discontinua arealmente, caratterizzata da una ***potenzialità idrica molto bassa, compresa tra 7500 e 12'350 m³/a.***

Le direzioni di flusso della falda libera come sopra definita seguono le direttrici fondamentali, una da SE verso NW, la seconda da SW verso N.

Detta falda freatica superficiale assume come ***limite basale impermeabile il sottostante complesso granitico che, per uno spessore di oltre 50.00 m svolge, pertanto, il ruolo di acquicludo.***

La descritta barriera impermeabile, il cui spessore minimo accertato è compreso tra i 40.00 ed i 50.00 m, garantisce assoluta protezione da ogni forma possibile di inquinamento l'ipotizzata risorsa idrica profonda.

Pertanto, ***le attività dirette a mettere il sito in sicurezza sotto il profilo della tutela ambientale potranno essere utilmente limitate a gestire l'inquinamento di superficie***, derivante dal mescolamento delle acque di falda con il percolato e con gli altri inquinanti generati – come sopra specificato – da altre fonti, con l'obiettivo unico di ***impedire la diffusione all'esterno dell'area comprendente gli impianti*** seguendo due linee sinergiche di interventi:

- ***controllando il ruscellamento in superficie delle acque meteoriche, riducendone al minimo l'ingresso in falda, mediante canalizzazioni, fossi di guardia, barriere fisiche o idrauliche verticali;***
- ***captando*** (per poi sottoporle a trattamenti opportuni prima del definitivo rilascio nell'ambiente), ***immediatamente a valle dell'area impianti, le acque inquinate della falda libera di superficie mediante sistema integrato di Pump and Treat, costituito da una trincea drenante connessa ad un pozzo di pompaggio.***

Si suggerisce, infine, di tutelare gli orizzonti granitici profondi:

- ***procedendo***, a titolo precauzionale, ***alla sigillatura di tutti i piezometri profondi presenti nell'area, considerato l'attuale stato di inquinamento delle relative acque.***

Benevento, 7 luglio 2014

Prof. geol. Pietro Antonio De Paola



STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA & AMBIENTALE

Prof. geol. Pietro Antonio De Paola

Benevento, Via dei Cappuccini n.18

Tel. 3473638338

Mail: pietrodepaola@teletu.it

COMUNE DI OLBIA (OT)

CIPNES GALLURA – OLBIA (OT)

PIANO DI CARATTERIZZAZIONE

SITO IMPIANTISTICO LOC. SPIRITU SANTU OLBIA (OT)

RELAZIONE MODELLO IDROGEOLOGICO

Redatto :

Geologo PIETRO ANTONIO DE PAOLA

Albo Geologi Regione Campania n.134

Data:

Luglio 2018

INDICE

SEZIONE PRIMA

L'INCARICO – LE FONTI NORMATIVE – ARTICOLAZIONE DELLO STUDIO

1. PREMESSA – Oggetto dell'incarico	pag. 1
2. ARTICOLAZIONE DELL'INCARICO	pag. 2
3. FONTI NORMATIVE	pag. 3
4. IL SITO	pag. 4
5. LE INDAGINI: DAL PIANO I CARATTERIZZAZIONE PRELIMINARE AL PIANO OPERATIVO DEFINITIVO	pag. 6
6. ARTICOLAZIONE DELLO STUDIO	pag. 8
6.1 Definizione del modello geologico	pag. 8
6.2 Definizione del modello idrogeologico	pag. 8

SEZIONE SECONDA

PARTE A

DAI LINEAMENTI DI GEOLOGIA REGIONALE ALLA GEOLOGIA LOCALE

7. LINEAMENTI GEOLOGICI REGIONALI	pag. 10
7.1 Il quadro geologico	pag. 10
7.2 Il Quaternario continentale olocenico	pag. 12
7.3 Il basamento cristallino, dal Precambriano al Paleozoico superiore	pag. 12
7.3.1 Il Plutone granitico paleozoico di Gallura e relativo corteo filoniano	pag. 13
7.3.2 Il Complesso metamorfico-migmatitico del pre-Cambriano	pag. 13
7.4 Lineamenti tettonico-strutturali	pag. 14
7.4.1 Caratteristiche tettoniche generali della Gallura	pag. 14
7.4.2 I due sistemi di faglie trascorrenti aquitaniane	pag. 14
7.4.3 Il sistema di faglie N-S Plio-Pleistocenico	pag. 14
7.4.4 I graben burdigaliani	pag. 16
7.4.5 Entità delle dislocazioni delle faglie trascorrenti aquitaniane	pag. 17
7.5 I processi alterativi e disgregativi dei granitoidi e rapporti con i sistemi di discontinuità minori	pag. 19
7.6 Lineamenti geomorfologici	pag. 21
7.7 Lineamenti idrogeologici	pag. 22
7.8 Lineamenti climatici	pag. 23
7.9 Pericolosità sismica	pag. 24

SEZIONE SECONDA

PARTE B

LE INDAGINI QUALITATIVE E QUANTITATIVE – IL MODELLO GEOLOGICO LOCALE

7.10 Il modello geologico	pag. 28
7.10.1 Introduzione	pag. 28
7.10.2 Esiti delle indagini geognostiche	pag. 29
7.10.2.1 Indagini del Piano Operativo (maggio-giugno 2017)	pag. 29
7.10.2.2 Indagini CIPNES per realizzazione area deposito materiali (Dicembre 2015-Genn./Febb.2016)	pag. 34
7.10.2.3 Indagini geofisiche CIPNES finalizzate alla caratterizzazione del modello idrogeologico (Ott.2013)	pag. 41
7.10.3 Definizione del modello geologico locale	pag. 42

SEZIONE TERZA

IL MODELLO IDROGEOLOGICO

8. L'APPROCCIO METODOLOGICO PER LA DEFINIZIONE DEL MODELLO IDROGEOLOGICO	pag. 47
8.1 Il bacino idrografico ed il bacino idrogeologico	pag. 48
8.1.1 Il bacino idrografico	pag. 48
8.1.2 Il bacino idrogeologico	pag. 50
8.2 I parametri idrogeologici caratterizzanti l'acquifero dalle sperimentazioni di campo e di laboratorio	pag. 55
8.2.1 Le prove di emungimento – I principali parametri idrogeologici	pag. 58
8.2.1.1 Le prove condotte sul cluster R1-S1	pag. 60
8.2.1.2 Le prove condotte sul cluster R2-S2	pag. 66
8.2.1.3 Le prove condotte sul cluster R3-S3	pag. 70
8.2.1.4 Le prove condotte sul cluster R4-S26	pag. 75
8.2.1.5 Le prove condotte sul cluster R5-S27	pag. 76
8.2.1.6 Le prove condotte sul cluster R6-S28	pag. 78

8.2.1.7 Osservazioni conclusive sulle prove di emungimento del Piano Operativo	pag. 82
8.2.1.8 Le prove di emungimento CIPNES per la realizzazione area deposito materiali (dicembre 2015-febbraio 2016)	pag. 89
8.2.2 Caratterizzazione geochimica delle acque circolanti nel sottosuolo dalle analisi chimiche del P.O. (Maggio-Giugno 2017)	pag. 94
8.2.2.1 Conclusioni	pag.117
8.2.3 Le osservazioni piezometriche dei rilievi del P.O.	pag.121
8.3 Definizione del modello idrogeologico	pag.130

SEZIONE PRIMA

L'INCARICO – LE FONTI NORMATIVE – ARTICOLAZIONE DELLO STUDIO

1. - PREMESSA

Oggetto dell'incarico

Il **CIPNES - Gallura**, Consorzio Industriale Provinciale Nord-Est Gallura, Ente Pubblico con sede legale in Olbia (OT), Zona Industriale Località Cala Saccaia, con atto Rep. 345/15 – CIG 6228438D9F, ed il **Comune di Olbia** a mezzo del Dirigente del Settore Ambiente e Manutenzione ing. Antonio Giovanni Zanda, con determinazione del medesimo Dirigente n. 173 del 21/04/2015 – CIG Z7E143A919, hanno inteso affidare allo scrivente, congiuntamente e con i conseguenti oneri finanziari suddivisi al 50% tra i suddetti Enti, *l'incarico professionale volto “ all'aggiornamento del Modello Idrogeologico del sito di Spiritu Santu (Olbia), sulla base dei risultati delle indagini in situ previste dal Piano Operativo contenuto nel Piano di Caratterizzazione (ex D. Lgs. 152/2006 e ss.mm.ii., approvato con Determinazione del Settore AM n.34 del 03/02/2015 del Comune di Olbia”*.

2. – ARTICOLAZIONE DELL'INCARICO

L'**oggetto dell'incarico** professionale definito come sopra comprende le fasi prestazionali dettagliatamente descritte negli atti di conferimento di cui al precedente paragrafo e di seguito integralmente riportate:

“Aggiornare e definire il Modello Idrogeologico del sito Spiritu Santu (Olbia), sulla base dei risultati delle seguenti indagini, svolte nell'ambito del Piano di

Caratterizzazione e della comparazione degli stessi con le risultanze delle indagini pregresse:

- 1. Stratigrafie relative ai sondaggi per la realizzazione di nuovi piezometri integranti la rete di monitoraggio delle acque sotterranee;***
- 2. Prove di emungimento relative a diverse coppie di piezometri (superficiali e profondi), finalizzate a fornire esaustive risposte ai quesiti ed alle problematiche emersi nella definizione del Piano di caratterizzazione in oggetto;***
- 3. Stratigrafie relative ai saggi e sondaggi finalizzati al campionamento della matrice suolo (top soil, suolo superficiale e suolo profondo);***
- 4. Test con traccianti finalizzati alla verifica della tenuta idraulica degli impianti di smaltimento comunale e consortile ed alla definizione dei percorsi di migrazione dei contaminanti in falda.***

L'aggiornamento del Modello Idrogeologico dovrà comprendere (ove possibile) un modello interpretativo dell'eventuale andamento della circolazione idrica sotterranea al di sotto delle discariche comunale e consortile (franco falda)".

Ulteriori attività poste a carico dello scrivente riguardano:

- a) ***"...l'interfaccia, finalizzata al coordinamento e condivisione critica*** degli aspetti tecnici, ***con la Ditta incaricata*** dell'esecuzione dell'aggiornamento del Piano Operativo contenuto nel PdC....";
- b) ***"...l'assistenza e partecipazione agli incontri tecnici e conferenze di servizi...***, chiarimenti ed integrazioni eventualmente ***richiesti dagli Enti competenti...***";
- c) ***"...i chiarimenti e le integrazioni richiesti dal Comune,*** qualora gli stessi si riferiscano alle attività sviluppate nell'ambito della convenzione..., la richiesta di eventuali integrazioni a seguito di eventuali modifiche normative, o a seguito di giustificate richieste da parte degli Enti di Controllo competenti".

3. - FONTI NORMATIVE

La complessità della materia cui si fa riferimento nel presente studio è di entità tale da imporre plurimi riferimenti, nel vigente ordinamento giuridico, a norme distinte per titoli e per ordine gerarchico.

Ciò premesso, si citano di seguito solo le norme principali, da cui non si può prescindere ovvero a cui si fa più di frequente capo nel corso della successiva esposizione.

Il complesso normativo più importante è senza dubbio rappresentato dal c.d. testo Unico Ambientale, di cui al D. L.vo 3 aprile 2006, n.152, recante “***Norme in materia ambientale***”.

Di quest’ultimo, i titoli e gli articoli cui è d’obbligo far riferimento, sono i seguenti:

- Difesa del suolo
Parte III, artt. 53 – 56 e agli ulteriori riferimenti da detti articoli discendenti;
- Tutela delle acque
Parte III, artt. 73 e 74 e agli ulteriori riferimenti da detti articoli discendenti;
- Gestione rifiuti e bonifica siti contaminati
Parte IV, artt. 183 e 184 e gli artt. 239 – 253 e agli ulteriori riferimenti da detti articoli discendenti.

Fanno da corollario a questo fondamentale corpo normativo altri istituti normativi, di cui si citano di seguito quelli più importanti e che attengono a diverse materie tra loro correlate, quali la tutela delle acque, la disciplina delle discariche per rifiuti, le terre e rocce da scavo.

Per la tutela delle acque di evidenziano:

- D. L.vo 2 febbraio 2001, n.31, relativo alla qualità delle acque destinate al consumo umano;
- Legge 27 febbraio 2009, n.13, concernente le misure straordinarie in materia di risorse idriche e protezione dell’ambiente;

- D. L.vo 16 marzo 2009, n.30, relativo alla protezione della acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento.

Per la disciplina delle discariche per rifiuti si evidenziano:

- D. L.vo 13 gennaio 2003, n.36, disciplinante le discariche da adibire a deposito sotterraneo dei rifiuti, in quanto attività interferente con le matrici ambientali suolo, acque superficiali e sotterranee, atmosfera.

Per il settore terre e rocce da scavo si evidenziano:

- DPR 13 giugno 2017, n.120, relativo alla gestione delle terre e rocce da scavo.

4. – IL SITO

L'area oggetto di intervento è ubicata in località Spiritu Santu, a SE del Comune di Olbia, da cui dista circa 8.00 km.

Il centro abitato più vicino alla piattaforma IPPC è denominato Murta Maria ed è ubicato a circa 3.00 km da detta piattaforma in direzione NE.

L'impianto occupa una ristretta area valliva di un modesto bacino idrografico delimitato a S, E, W da pendici collinari, degradante verso N con deboli pendenze in un'ampia piana fino al mare.

Le superfici del bacino idrografico e dell'area che ospita la piattaforma IPPC sono rispettivamente pari a circa 475'000 m² il primo e circa 300'000 m² la seconda.

Le quote di riferimento dell'impianto sono comprese tra 80 m/lm e 40 m/lm circa, mentre quelle del bacino idrografico di riferimento sono comprese tra 248 m/lm e 40 m/lm circa.

La strada d'accesso all'impianto è costituita dalla SS125, da cui si diparte la strada secondaria che conduce all'impianto (Fig.1).

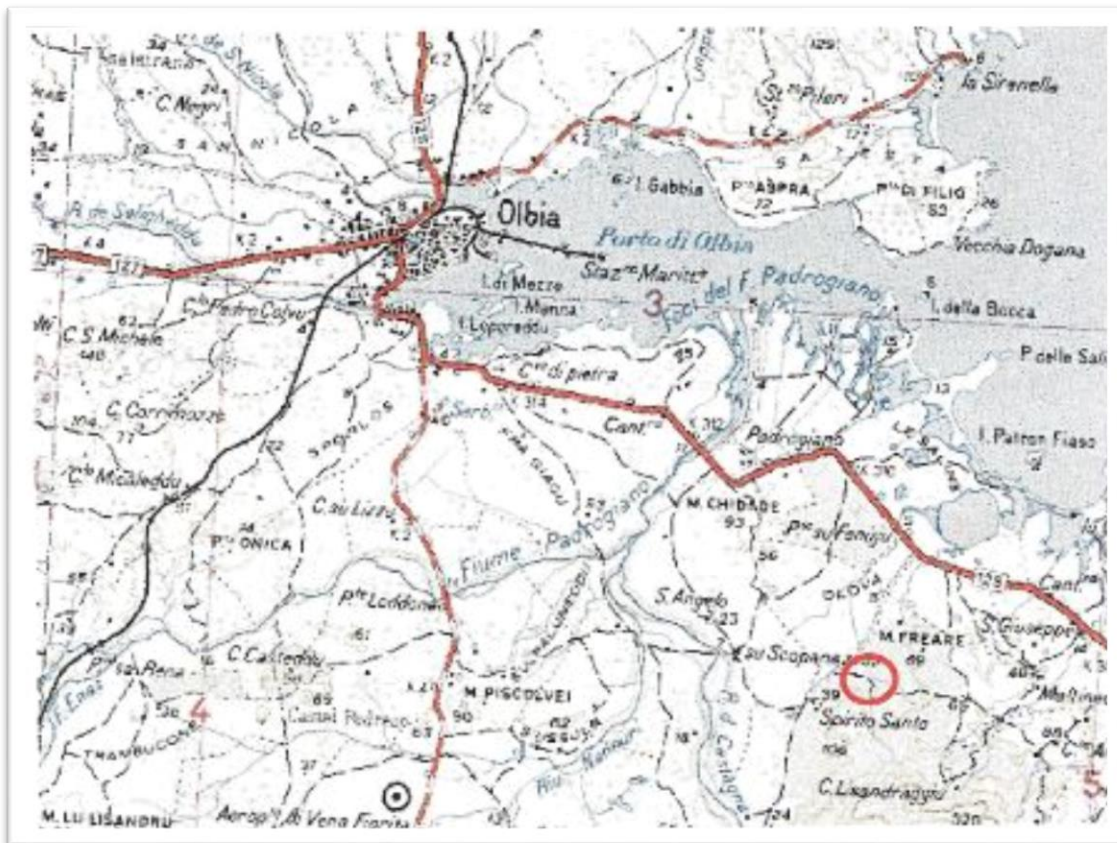


Fig. n.1- Inquadramento topografico dell'impianto IPPC

5. – LE INDAGINI: DAL PIANO DI CARATTERIZZAZIONE PRELIMINARE AL PIANO OPERATIVO DEFINITIVO

Le indagini programmate per la redazione in corso del Piano di Caratterizzazione definitivo discendono, per un verso, dalle vigenti normative, per l'altro, dalle peculiarità fisiche ed operative dei luoghi cui successivamente sono state adattate.

Dette indagini risultavano già individuate nella rev.3 del Piano di Caratterizzazione preliminare, redatto da Montana SpA nel dicembre 2014 ed approvato dal Comune di Olbia con determina n.34 del 3 febbraio 2015, che aveva altresì recepito tutte le osservazioni e richieste emerse nel corso dei vari Incontri Tecnici Istituzionali (Tavoli tecnici, Conferenze dei Servizi, ecc.) succedutesi nel tempo.

A questa fase fanno seguito ulteriori Incontri Tecnici Istituzionali che danno luogo alla formulazione di altre richieste di integrazione al piano delle indagini, recepite e formalizzate da Arcadis Italia srl nella prima stesura del Piano Operativo delle indagini del giugno 2015 e, a seguito di altri aggiornamenti, alla definitiva Revisione I del predetto piano operativo, datata Ottobre 2015.

Detto Piano in definitiva prevede:

- Integrazione della rete piezometrica esistente mediante realizzazione di nuovi piezometri per il monitoraggio qualitativo e quantitativo delle acque di falda;
- Prove di emungimento a gradini ed a portata costante su *cluster* di piezometri per la verifica ed aggiornamento del modello idrogeologico;
- Analisi fisico-chimiche dei terreni (top soil, suolo e sottosuolo) di campioni estratti da trincee esplorative e da sondaggi;
- Monitoraggio del pH delle acque di falda su campioni prelevati con cadenza mensile per complessivi tre mesi;

- Prove con traccianti fluorescenti finalizzati alla verifica della tenuta idraulica degli impianti di smaltimento comunale e consortile e alla definizione della velocità reale del flusso idrico e del percorso di migrazione dei contaminanti nelle acque di falda;
- Analisi fisico-chimiche finalizzate al controllo della qualità delle acque di falda;
- Rilievo plano-altimetrico georeferenziato dei sondaggi, delle trincee, dei boccapozzi e relativo piano di campagna.

Le indagini come sopra sinteticamente descritte e facenti capo al Piano Operativo definitivo subiranno, nel corso dei lavori, in accordo con ARPAS e con gli Enti committenti, modifiche non sostanziali, soprattutto legate a difficoltà di ordine ambientale.

6. – ARTICOLAZIONE DELLO STUDIO

Per pervenire alle finalità tese dal presente studio, configurabili come definizione del modello idrogeologico per il Piano di Caratterizzazione del sito di Spiritu Santu in Olbia, occorre definire prioritariamente il modello geologico di base, tenendo conto oltre che dei documenti cartografici ufficiali anche dell'articolato complesso di indagini previsto dal Piano Operativo e sintetizzato nel precedente capitolo nonché delle indagini pregresse eseguite a più riprese nel tempo.

Il metodo attuato per l'approccio e lo sviluppo delle varie tematiche procederà seguendo uno schema logico-razionale caratterizzato dai seguenti passi:

6.1 Definizione del modello geologico

Per pervenire alla definizione del modello geologico dell'area di interesse si dovrà fare prioritario riferimento ai lineamenti geologici di scala regionale.

Saranno, perciò, individuati e sintetizzati, seguendo la più recente letteratura scientifica sull'argomento, i caratteri geologici s.s., tettonici, geomorfologici, idrogeologici, sismici nonché i processi di disfacimento fisico-chimico dei granitoidi e i principali parametri climatici locali.

6.2 Definizione del modello idrogeologico

La chiave per la definizione del modello idrogeologico è, per quanto innanzi chiarito, rappresentata dal modello geologico, opportunamente implementato con i parametri caratterizzanti l'idrogeologia del sito, quali la identificazione delle unità idrogeologiche, tipologia dell'acquifero, tipologia della rete di fratture, permeabilità, trasmissività.

Detti parametri analitici deriveranno dal complesso delle indagini eseguite secondo le previsioni del P.O. opportunamente integrate e correlate con le corpose e diversificate indagini eseguite nei tempi precedenti e comprenderanno quindi:

- le interpretazioni idrogeologiche delle prove di emungimento condotte nella campagna 2017 in attuazione del P.O. e comparazione con analoghe analisi pregresse;
- le interpretazioni degli andamenti piezometrici rilevati nella campagna 2017, in attuazione del P.O. e comparazione con gli analoghi rilevamenti pregressi;
- la caratterizzazione geochimica delle acque circolanti nel sottosuolo finalizzata a definire la genesi delle acque attinte dai piezometri superficiali e dai piezometri profondi;
- gli esiti delle prove eseguite con traccianti fluorescenti.

SEZIONE SECONDA
PARTE A
DAI LINEAMENTI DI GEOLOGIA REGIONALE ALLA GEOLOGIA LOCALE

7. – LINEAMENTI GEOLOGICI REGIONALI

7.1 Il quadro geologico

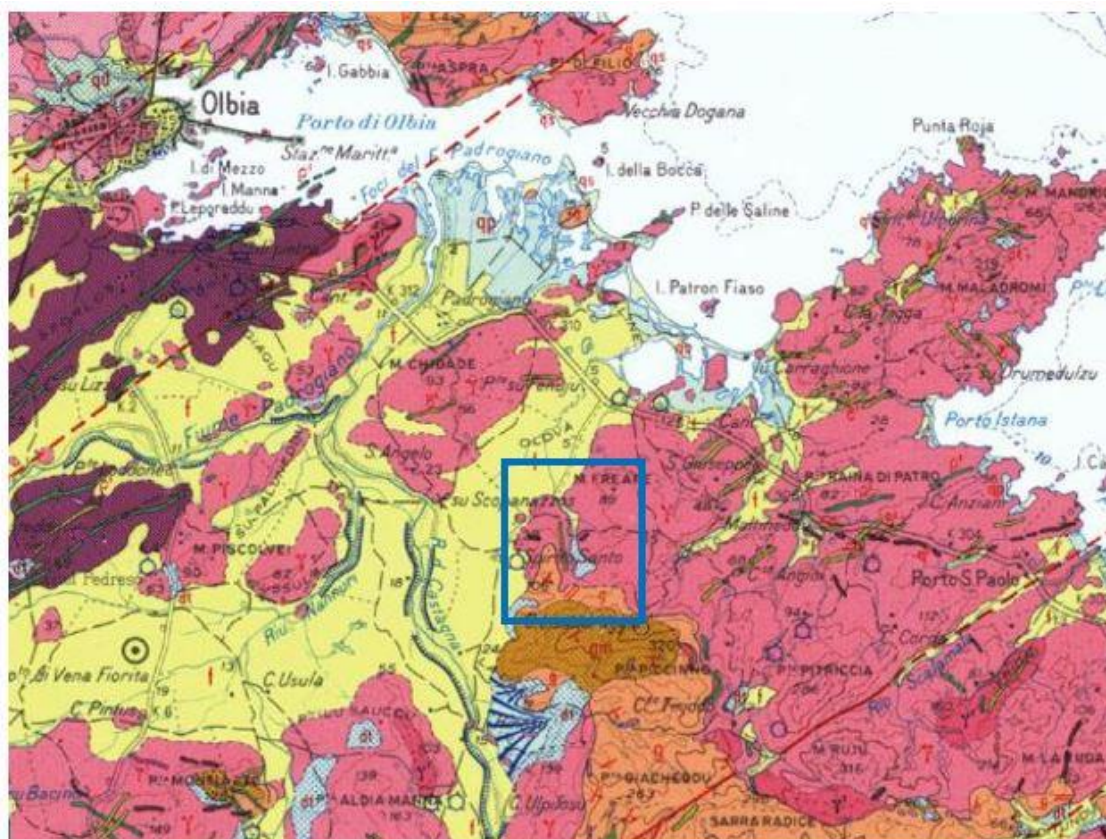
Gli aspetti geologici salienti di seguito descritti vengono desunti dalla letteratura geologica ufficiale, le cui fonti principali sono costituite dalla Carta Geologica d'Italia del 1967, in scala 1/100'000 (in particolare il Foglio 182 e limitrofi con le relative note illustrative), dalla Carta geologica della Sardegna del 1996, in scala 1/200'000, e dalla Carta geologica della Sardegna del 2008, in scala 1/250'000, a cura di Carmignani et Alii, con relative monografie illustrative.

La località Spiritu Santu del Comune di Olbia, nella quale ricade l'opera in progetto, è ubicata al margine di una blanda depressione della bassa Gallura, bordante verso meridione l'alto strutturale proprio dell'alta Gallura.

Detta depressione, all'incirca compresa tra le faglie terziarie trascorrenti sinistre di Olbia a N e del Rio Scalamala a S, rientra nel dominio idrografico del fiume Padrogiano, localmente costituito dalla propria asta fluviale e dal proprio apparato deltizio (sfociante nella rada di Olbia) nonché dai suoi due principali affluenti di destra, il Rio Nannuri ed il Rio Castagna, l'ultimo dei quali ubicato immediatamente ad W della località Spiritu Santu.

Caratterizzano l'area, sotto il profilo geologico, tre estesi affioramenti (Fig.2):

- i depositi quaternari in prevalente facies detritico-alluvionale;
- il complesso plutonico del Carbonifero sup. – Permiano, comprendente le monzoniti equigranulari ed inequigranulari nonché le granodioriti monzogranitiche equigranulari;
- il complesso migmatitico del Precambriano, principalmente rappresentato da migmatiti leucocratiche, diatessiti e metatessiti con ortogneiss granodioritici e monzogranitici.



FORMAZIONI CONTINENTALI		QUATERNARIO RECENTE
qp	Formazione deltizia F. Padrogiano. Sabbie e limi, lenti torbose con fauna palustre e ceramica di età enea enea	Olocene
qs	Sabbie e dune costiere recenti	Olocene
dt	Detrito di falda, con di deiezione, suoli detritici, suoli alluvionali	Olocene
f	Alluvioni attuali e recenti talora terrazzate e parzialmente cementate (ghiaie, sabbie, detriti torrentizi)	Olocene
PLUTONE GRANITICO DI GALLURA E RELATIVO CORTEO FOLONIANO		PALEOZOICO
CORTEO FILONIANO		Carbonifero sup. - Permiano
q¹	Filoni quarziferi di origine idrotermale	
p¹	Filoni giallici giallici	
δ¹	Filoni dacitici , basaltici, spessartici dacitici	
GRANITI DI GALLURA		Carbonifero sup. - Permiano
v	Graniti grigio-rosati biotitici e granodioriti granodioriti a grana eterogenea con prevalenti componenti medio grosse	
v¹	Graniti minuti o a grana media, rosei o raramente grigi, a sola biotite o a due miche	
vp	Graniti porfirici a grana da media a piccola e fenocristalli di feldspato roseo o bianco	
COMPLESSO METAMORFICO – MIGMATITICO		PRECAMBRIANO
g	Gneiss occhiadini occhiadini a composizione granitica, granodioritica e quarzodioritica quarzodioritica , ad una o due miche; migmatiti prevalentemente arteritiche	
gm	Migmatiti arteritiche a prevalente paleosoma paleosoma con lenti pegmatitiche, aplitiche e microgranitiche	

Fig. 2 – Estratto Carta Geologica d'Italia – Scala 1/100'000 – F.182 Olbia

7.2 Il Quaternario continentale olocenico

Il Quaternario, in particolare l'Olocene, affiora in tutta la piana con le alluvioni attuali e recenti del fiume Padrogiano, dei suoi affluenti e della rete scolante minore, con spessori massimi anche superiori ad decametro, rappresentati in prevalenza da corpi lenticolari interdigitati di ghiaie, sabbie e limi, spesso frammisti in proporzioni anche molto varie.

Verso monte, le alluvioni sciolte della piana alluvionale lasciano il campo a depositi conglomeratici più antichi, terrazzati, con spessori superiori, anche dell'ordine di un paio di decimetri.

Sulla costa, invece, a partire da N con l'apparato deltizio del fiume Padrogiano, i sedimenti sciolti granulari includono corpi torbosi con fauna palustre, che, procedendo verso S, lasciano il campo ai cordoni sabbiosi delle dune costiere e lagunari.

A ridosso dei rilievi bordanti la piana, all'uscita delle aste torrentizie prospicienti la piana e nelle aree sub-pianeggianti dei rilievi dove minore è l'azione della gravità e di trasporto da parte delle acque ruscellanti di origine meteorica, il Quaternario è rappresentato rispettivamente da depositi detritici sciolti di falda, dalle conoidi di deiezione, da depositi colluviali ed eluviali, derivanti dal disfacimento fisico e dall'alterazione chimica del substrato granitoide ercinico.

A questi ultimi fenomeni disgregativi ed alterativi fisico-chimici, fanno capo le coltri eluviali derivanti dai processi di arenizzazione degli ammassi granitoidi, che, con spessori variabili da pochi decimetri ad alcuni metri e con una permeabilità secondaria per porosità, caratterizzano, tra l'altro, l'assetto idrogeologico locale e superficiale.

7.3 Il basamento cristallino, dal Precambriano al Paleozoico superiore

Nell'area di interesse ed in quelle contermini affiorano le rocce più antiche, di età compresa tra il Precambriano ed il Paleozoico superiore.

Tra le prime vengono annoverate le rocce metamorfiche del Complesso metamorfico-migmatitico, datato Precambriano; tra le seconde si rinvencono le rocce magmatiche

intrusive del Ciclo magmatico ercinico di età compresa tra il Carbonifero superiore ed il Permiano; a questi ultimi si associa un diversificato corteo di rocce filoniane.

7.3.1 Il Plutone granitico paleozoico di Gallura e relativo corteo filoniano

Assumono particolare rilevanza nell'area in esame gli affioramenti tardo-paleozoici (Carbonifero superiore-Permiano) del Ciclo magmatico ercinico, ivi rappresentati da Complessi granitoidi e dai relativi cortei filoniani.

Si tratta di graniti rappresentati in prevalenza da monzograniti e granodioriti, associati molto frequentemente a sistemi filoniani, diversificati per composizione chimico-mineralogica e prevalentemente iso-orientati secondo direttrici NE-SW e subordinatamente N-S; questi ultimi sono rappresentati principalmente da ammassi quarziferi di origine idrotermale, da rioliti, da vulcaniti a composizione dacitica, basaltica, spessartitica.

La loro distribuzione, con prevalente orientamento SW-NE, è legata a fratture primarie delle masse granitoidi generate dal processo di raffreddamento conseguente alla loro messa in posto.

Detti filoni contribuiscono a rendere ancora più variabile le descritte eterogeneità di granularità e di orientazione tessiturale dei granitoidi tardo-ercinici cui essi appartengono.

Il descritto complesso affiora estesamente nell'area in cui è insediata la piattaforma IPPC (Spiritu Santu).

7.3.2 Il Complesso metamorfico-migmatitico del pre-Cambriano

Nel quadro sopra delineato assumono una minore rilevanza, per la più ridotta estensione areale rilevata nel distretto di interesse, gli ortogneiss, le diatessiti e le metatessiti del Complesso metamorfico-migmatitico pre-Cambriano.

In particolare, immediatamente a sud dell'area di interesse compare in affioramento il substrato migmatitico ed a sud di quest'ultimo il complesso metamorfico.

7.4 Lineamenti tettonico-strutturali

7.4.1 Caratteristiche tettoniche generali della Gallura

L'area nord-orientale della Sardegna, nella quale ricade l'area di interesse (Olbia, Spiritu Santo), è costituita, sotto il profilo tettonico, dall'alto strutturale della Gallura e da importanti famiglie di faglie che lo intersecano secondo direttrici con orientamenti diversificati.

Detto pilastro tettonico è limitato ad E dalle aree costiere e contigua fossa tirrenica e ad W da una serie di bacini estensionali di età burdigaliana con orientamento NNW-SSE, che intercettano i più ricchi bacini transtensivi aquitaniani con orientamento NE-SW.

Una successiva fase tettonica, quella plio-pleistocenica, si sovrappone infine a quelle precedentemente descritte.

L'appena accennata evoluzione tettonica regionale dà luogo ad una serie di dislocazioni tettoniche, che caratterizzano l'attuale assetto tettonico-strutturale dell'alta e bassa Gallura e, conseguentemente, l'area immediatamente a S di Olbia, oggetto del presente studio.

7.4.2 I due sistemi di faglie trascorrenti aquitaniane

Il sistema di faglie più sviluppato, con orientamento NE-SW e con rigetti trascorrenti sinistri, comprende le faglie della Gallura, di Olbia, di Tavolara e, più a sud, di Nuoro.

Il secondo sistema di faglie, con orientamento all'incirca E-W e caratterizzato, invece, da rigetti trascorrenti destri, comprende le faglie del Cedrino, di Posada, di Trinità d'Agultu.

E' importante rilevare che al sistema di faglie a trascorrenza sinistra sopra descritto sono associati sul margine occidentale del basamento ercinico i bacini transtensivi di Castelsardo, dell'Angiona, di Chilivani-Berchidda, di Benetutti e di Ottana

7.4.3 Il sistema di faglie N-S Plio-Pleistocenico

Nel quadro strutturale della Sardegna nord-orientale compare un altro sistema di faglie con orientamento all'incirca N-S, quindi normale ai precedenti, che secondo letteratura corrente fa capo al dedotto basculamento del pilastro gallurese verso NE nel Plio-Pleistocene (Fig.3).

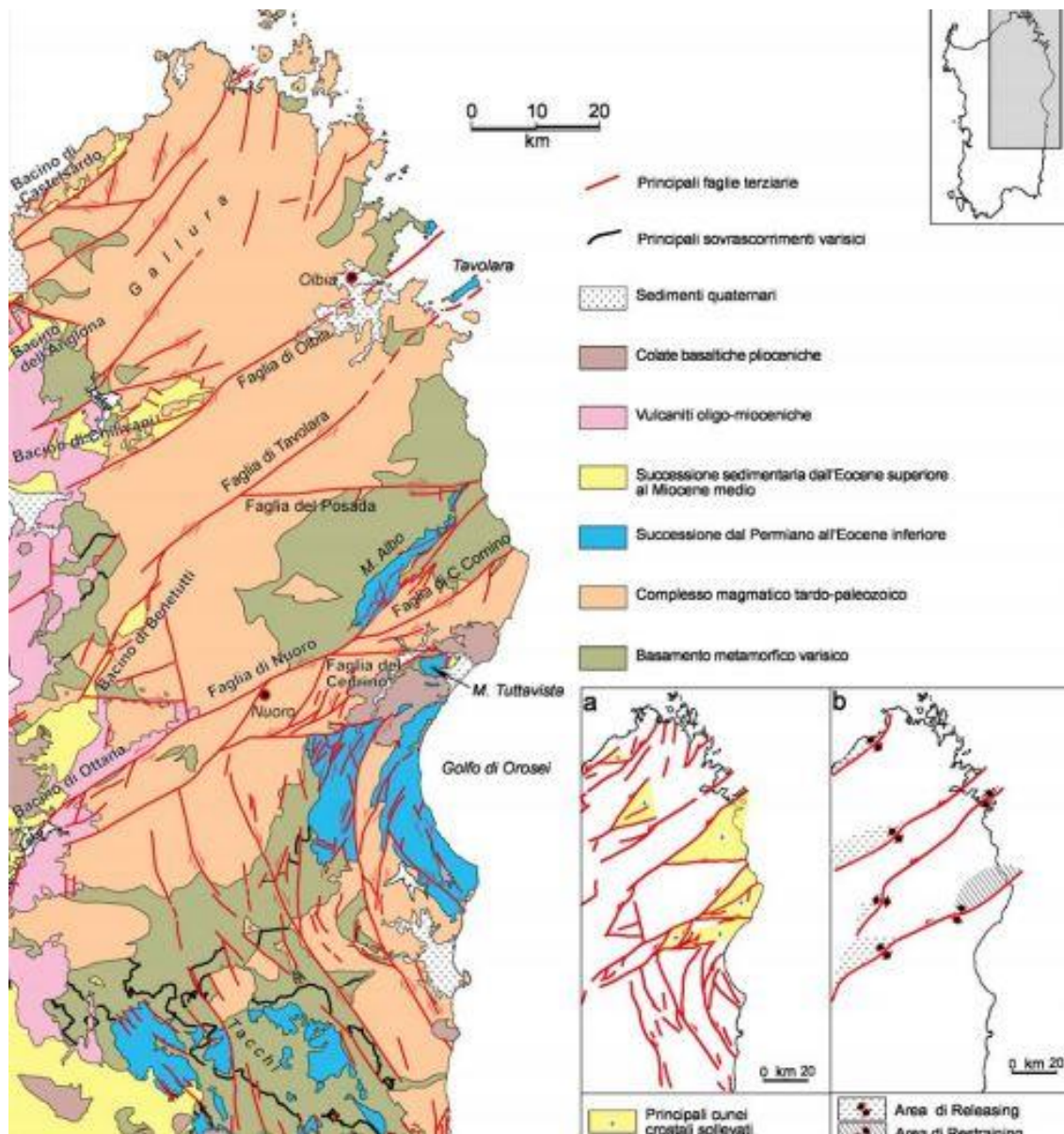


Fig. 3 - Schema tettonico della Sardegna nord-orientale.

Sono indicati i principali sistemi di faglie trascorrenti di età cenozoica.

Il primo sistema, a trascorrenza sinistra e con orientamento NE-SW, comprende le faglie della Gallura, di Olbia, di Tavolara, di Nuoro ed i connessi bacini transtensivi del margine occidentale di Castelsardo, dell'Angiona, di Chilivani-Berchidda, di Benetutti e di Ottana; il secondo sistema, a trascorrenza destra e con orientamento E-W, comprende le faglie di Trinità d'Agultu, di Posada, di Cedrino (da Oggiano et Al., 2009).

7.4.4 I “graben” burdigaliani

Detti bacini a direzione NE-SW vengono definitivamente intercettati, nel Burdigaliano superiore, dalle fosse estensionali a direttrice NNW-SSE, strutturalmente configurabili come “*graben*”; nella Fig. n.4, a chiarimento dei complessi e pervasivi processi tettonici cenozoici, viene rappresentato schematicamente il rapporto tettonico-evolutivo che lega il bacino transtensivo di Chilivani-Berchidda, di età aquitaniana ad orientazione NE-SW e delimitato dalle faglie trascorrenti sinistre di Berchidda e di Olbia, e la fossa estensionale di età burdigaliana ad orientazione NNW-SSE, strutturalmente configurabile come “*graben*” posto sul margine occidentale dell’alto strutturale della Gallura.

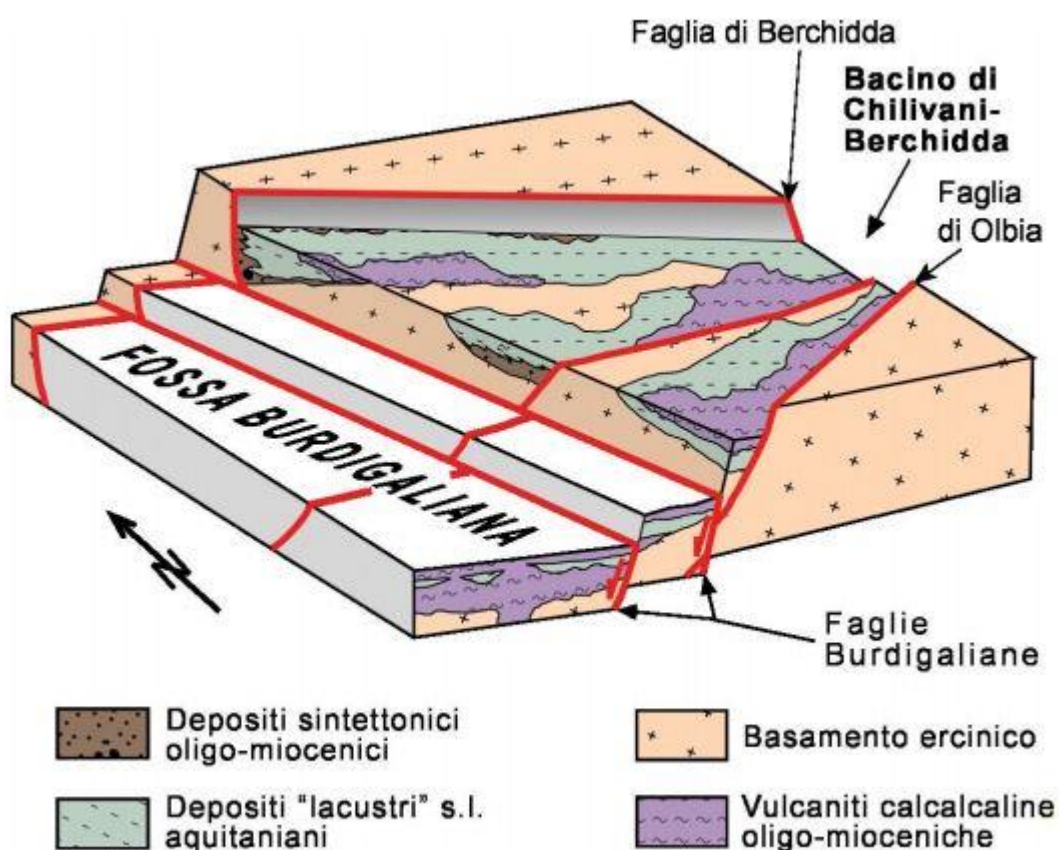


Fig. 4 – Schema delle relazioni tra bacini transtensivi aquitaniani N60 e bacini e estensionali burdigaliani N160 della Sardegna di NE.

Lo schema tettonico-evolutivo illustrato, evidenziando la complessità dei rapporti esistenti tra i bacini transtensivi aquitaniani e i “**graben**” burdigaliani, chiarisce altresì la genesi dell’ “**horst**” della Gallura, di diretto interesse del presente studio.

7.4.5 Entità delle dislocazioni delle faglie trascorrenti aquitaniane

L’entità delle dislocazioni orizzontali conseguente ai delineati processi tettonici è notevole.

Come esempio significativo e conclusivo si riporta il dato relativo al rigetto orizzontale sinistro della faglia trascorrente di Olbia stimato in circa 5.0 km; mentre per i rigetti verticali, subordinati rispetto a quelli trascorrenti, si stimano in genere valori di alcune centinaia di metri, fino al migliaio di metri nell’area del Monte Albo, lungo la faglia trascorrente sinistra di Nuoro (Fig.n.5).

Le stime vengono desunte da ricerche condotte sulle anomalie aeromagnetiche (Cassano et Al, 1979; Galdeano & Rossignol, 1977).

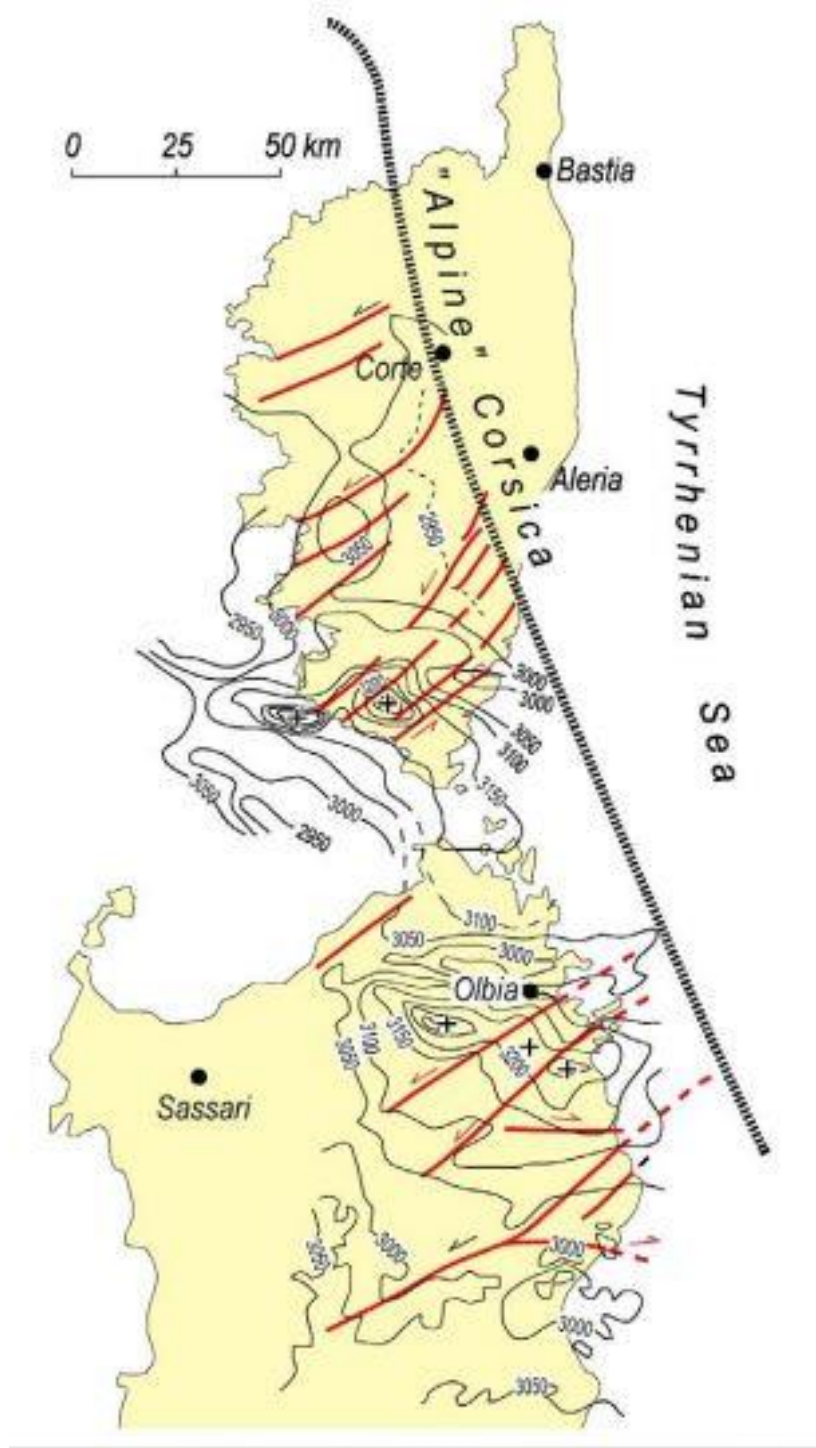


Fig. 5 – Entità delle dislocazioni lungo le faglie trascorrenti terziarie sardo-corse desunte dalle anomalie magnetiche.

Si osservi in particolare l'entità della dislocazione orizzontale della faglia trascorrente di Olbia valutabile attorno ai cinquemila metri (Cassano et Al., 1979; Galdeano e Rossignol, 1977, modificato).

7.5. I processi alterativi e disgregativi dei granitoidi e i rapporti con i sistemi di discontinuità minori

Alle sopra richiamate lineazioni tettoniche a scala regionale si aggiungono sistemi coniugati minori variamente orientati ed un ulteriore reticolo di discontinuità locali, da litoclasti a leptoclasti, che di fatto costituiscono le vie primarie attraverso cui evolvono i processi alterativi e disgregativi a carico delle bande episuperficiali degli ammassi rocciosi.

Le accelerazioni temporali con le quali detti fenomeni si sviluppano dipendono dal grado di addensamento e dalle geometrie proprie dei sistemi locali dei giunti.

E' universalmente accettato come fattore principale dei processi alterativi l'attacco chimico idrolitico, che conduce alla disgregazione dei graniti; il processo ammette, infatti, che l'azione combinata dei diversi agenti alterativi, cioè l'acqua, l'ossigeno e l'anidride carbonica, sulle rocce silicatiche conduca alla loro "caolinizzazione", con contestuale cessione di silice e, a seconda della loro composizione di base, altri ioni quali il sodio, il potassio, il magnesio, ecc., o composti come l'ossido di ferro (Fig. 6).

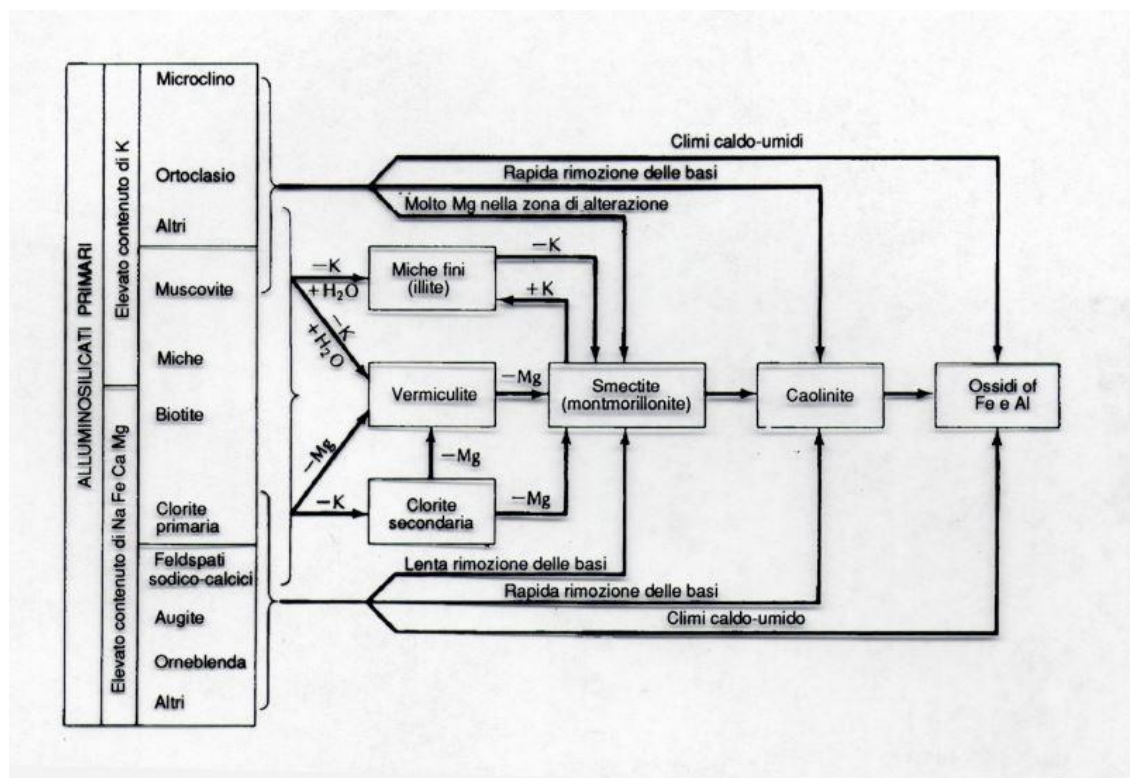


Fig. 6 – Vie di alterazione dei più importanti minerali delle rocce ignee e metamorfiche (fonte.: [www. unirc.it](http://www.unirc.it)).

All'appena accennato principale processo di alterazione chimica, si accompagnano anche i processi di degradazione fisica (crioclastismo, termoclastismo, aloclastismo, idroclastismo, ecc.) e di degradazione biologica.

A lungo termine, la risultante dei processi alterativi e disgregativi sulle masse granitoidi è rappresentata dalla completa perdita delle caratteristiche di compattezza e competenza proprie delle masse litoidi e dalla loro trasformazione in complessi sciolti parzialmente o totalmente arenizzati.

Il processo di arenizzazione si sviluppa, oltre che arealmente, anche e soprattutto verticalmente, iniziando dalle superfici esposte e spingendosi gradualmente in profondità.

Le coltri arenitiche così generate assumono spessori molto variabili, da pochi decimetri ad alcuni metri, in ragione della pendenza dei versanti, nonché della densità, persistenza, spaziatura ed apertura dei sistemi di giunti presenti negli ammassi litoidi.

Detti sistemi di discontinuità e le connesse coltri arenitiche come sopra descritte assumono, come si dirà più avanti, un ruolo fondamentale nell'assetto idrogeologico generale.

7.6 Lineamenti geomorfologici

L'attuale assetto geomorfologico del sito di interesse trae le proprie origini dai processi tettonico-evolutivi in precedenza delineati.

Il complesso collinare costituito dal Colle Piccinno a S e dalle due dorsali protese verso NNW di Spiritu Santu (ad W) e di Freare (ad E), divise da un solco vallivo identicamente orientato, si inserisce nelle complesse dislocazioni tettoniche mioceniche, evidenziate in zona, oltre che dalle grandi trascorrenze di Olbia e di Tavolara, da una serie di dislocazioni minori delimitanti localmente il complesso collinare, degradante con regolarità verso la costa.

Il descritto naturale assetto orografico connesso alla tettonica miocenica, i sistemi delle disgiunzioni conseguenti di cui si è detto nel precedente paragrafo, l'eustatismo del quaternario antico, unitamente alle disgregazioni ed alterazioni fisico-chimiche operanti sulle rocce, rappresentano la chiave di volta genetica delle attuali configurazioni delle pianure alluvionali, della rete idrografica, delle coperture detritiche ed eluvio-colluviali che, di volta in volta, cingono i versanti, colmano i solchi vallivi, coprono le masse litoidi costituenti il bed-rock.

Nell'area ad W di Spiritu Santu, cioè del sito di intervento, il distretto geomorfologico locale è di esclusivo dominio della piana alluvionale drenata dal Fiume Padrogiano e dai suoi affluenti di destra, il Rio Nannuri ed il Rio Castagna; mentre il solco vallivo, oggi ospitante la piattaforma IPPC, indirizza i propri scarsi deflussi idrici verso NE, perdendosi per evapotraspirazione ed infiltrazione nei depositi alluvionali presenti all'uscita della vallecola.

Sulla restante area all'intorno del sito di Spiritu Santu insistono, invece, le masse granitoidi, con le cime più alte a S e profili altimetrici degradanti verso NE con gradienti morfologici significativi.

Questa particolare configurazione morfologica determina effetti importanti di tipo idrologico e idrogeologico.

Gli effetti idrologici si manifestano con ridotti tempi di corrivazione delle acque di pioggia ed elevate velocità dei deflussi superficiali, cui conseguono elevate capacità di erosione e di trasporto solido con contestuale denudazione delle pendici dei rilievi e deposito delle masse detritiche nelle aree pianeggianti fino alla vicina linea costiera.

Gli effetti idrogeologici si rendono manifesti, invece, con la povertà degli acquiferi superficiali; povertà da ricondurre prioritariamente alla ridotta capacità di infiltrazione delle acque ruscellanti, regolata, come sopra evidenziato, dalla elevata velocità di deflusso e dai ridotti tempi di corrivazione, ed anche condizionata dalla intrinseca scarsa permeabilità dei complessi litologici affioranti.

La descritta caratterizzazione geomorfologica e conseguente dinamica geoidrologica si ritrova, nei suoi lineamenti principali e sia pure a scala ridotta, nel complesso collinare di Spirito Santu e connesso piccolo solco vallivo centrale, sul quale, come detto, insiste la piattaforma IPPC.

7.7 Lineamenti idrogeologici

Le caratteristiche dei circuiti idrici sotterranei sono sottese principalmente dalle litologie e relative tipologie di permeabilità oltre che da altri fattori che compongono gli acquiferi.

Nell'area in esame si possono individuare due distinte “*formazioni idrogeologiche*” e due distinti “*acquiferi*”.

La prima “*formazione idrogeologica*” riguarda la piana detritico-alluvionale di dominio del fiume Padrogiano, bordante la collina ad W della piattaforma IPPC e costituente “*acquifero*” autonomo, caratterizzato da permeabilità per porosità primaria ed ospitante una falda libera superficiale con deflussi orientati verso NNE; tale falda assume caratteri di estrema “*vulnerabilità*”; la seconda “*formazione idrogeologica*” e relativo “*acquifero*”, presente nell'area IPPC, assumono, invece, caratteri di maggior complessità, in quanto costituiti dai complessi litoidi granitici fratturati basali e dalle sovrastanti coperture sciolte, quali le coltri arenitiche, originate dalla stessa roccia madre granitica, i depositi detritico-alluvionali presenti nei solchi vallivi e ancora le falde detritiche eluvio-colluviali.

Questa “*formazione idrogeologica*” è caratterizzata da due distinti tipi di permeabilità, quella per fratturazione secondaria delle masse granitoidi basali, con permeabilità K generalmente compresa tra 10^{-7} e 10^{-9} m/s, e quella per porosità primaria delle coperture arenaceo-detritico-alluvionali, con permeabilità K generalmente compresa tra 10^{-4} e 10^{-7} m/s.

Il descritto acquifero è caratterizzato, perciò, da permeabilità di tipo misto, da ridotto spessore, da forte discontinuità areale, da modesti valori della trasmissività, dell'immagazzinamento e delle portate ed, infine, fortemente assoggettato ad elevata vulnerabilità.

7.8 Lineamenti climatici

Ad Olbia, nell'arco di tempo compreso ***tra il 1922 ed il 2005***, quindi per 83 anni, è stata registrata una **precipitazione media annuale di 570 mm**.

In detto arco temporale è possibile distinguere due periodi caratterizzati da una diversa precipitazione media annuale.

Il primo periodo, lungo 48 anni e compreso tra il 1922 ed il 1970, risulta essere più umido rispetto al successivo periodo di 35 anni, compreso tra il 1970 ed il 2005; il primo periodo, infatti, è caratterizzato da una precipitazione media annuale pari a 650 mm, mentre il secondo è caratterizzato da una precipitazione media annuale pari a 480 mm, con una ***diminuzione, rispetto alla media totale di 570 mm, pari al 15.8%***.

I dati termometrici sono invece disponibili ***dal 1927 al 2005***, per complessivi 67 anni (mancano gli anni dal 1942 al 1950 e gli anni 1978 – 1979) nel corso dei quali è stata registrata una **temperatura media annuale pari a 16.6° C**.

Negli ultimi 35 anni (1970-2005) ***la temperatura media annuale è passata dai 16.6 °C a 17°C, con un incremento del 2.5%***.

Si evidenzia la correlazione esistente tra pioggia e temperatura nel medesimo arco di tempo e quanto l'incremento della temperatura abbia influito sulla diminuzione delle precipitazioni nel periodo considerato (fonti varie: *Stazione meteo ENAV, aeroporto di Olbia; sardegna-clima.it; clima.meteoam.it; regione.sardegna.it/j/V, misure termopluviometriche ed idrometriche*).

7.9 Pericolosità sismica

Il territorio della Regione Sardegna risulta inserito nella **Zona 4** della classificazione sismica nazionale, dettata dall'O.P.C.M. 3274/2003 e dalle successive norme, quali l'O.P.C.M. 3519/2006, il D.M. Infrastrutture del 14 gennaio 2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni) ed il recente D.M. Infrastrutture del 17 gennaio 2018 (NTC 2018).

La Regione Sardegna, dal suo canto, si è limitata ad emanare la deliberazione di G.R. n.15/31 del 30 marzo 2004, recependo il dettato della citata OPCM, senza tener conto delle palesi differenziazioni geostrutturali del territorio regionale che postulano, anche se nell'ambito di una contenuta pericolosità sismica regionale, diversificati livelli di pericolosità sismica zonale.

L'accennato problema va, dunque, affrontato e risolto con appropriati studi e tecniche di **microzonazione sismica** da recepirsi nella legislazione regionale.

Il territorio di Olbia, pertanto, è classificato in **Zona 4**, sulla base della precedente normativa nazionale nonostante che alcune aree della Sardegna abbiano a più riprese denunciato risentimenti sismici, sia pure contenuti, derivanti dalle strutture sismogenetiche attive presenti nel Mar Tirreno, nel canale di Sardegna e nel Mar Mediterraneo occidentale.

Di questi eventi si trovano significativi documenti redatti a più riprese nel tempo da Enti di Ricerca istituzionali.

Il primo di tali documenti riguarda la Carta della “**MASSIMA INTENSITÀ MACROSISMICA RISENTITA IN ITALIA**”, edita nel 1995 dall'Istituto Nazionale di Geofisica (ING) del CNR, nella quale una parte della **Gallura settentrionale** (così come la parte centro-settentrionale della Corsica) viene indicata come soggetta ad eventi sismici storici del VI grado della Scala M.C.S.; tale area è colorata in azzurro (Fig. 7).

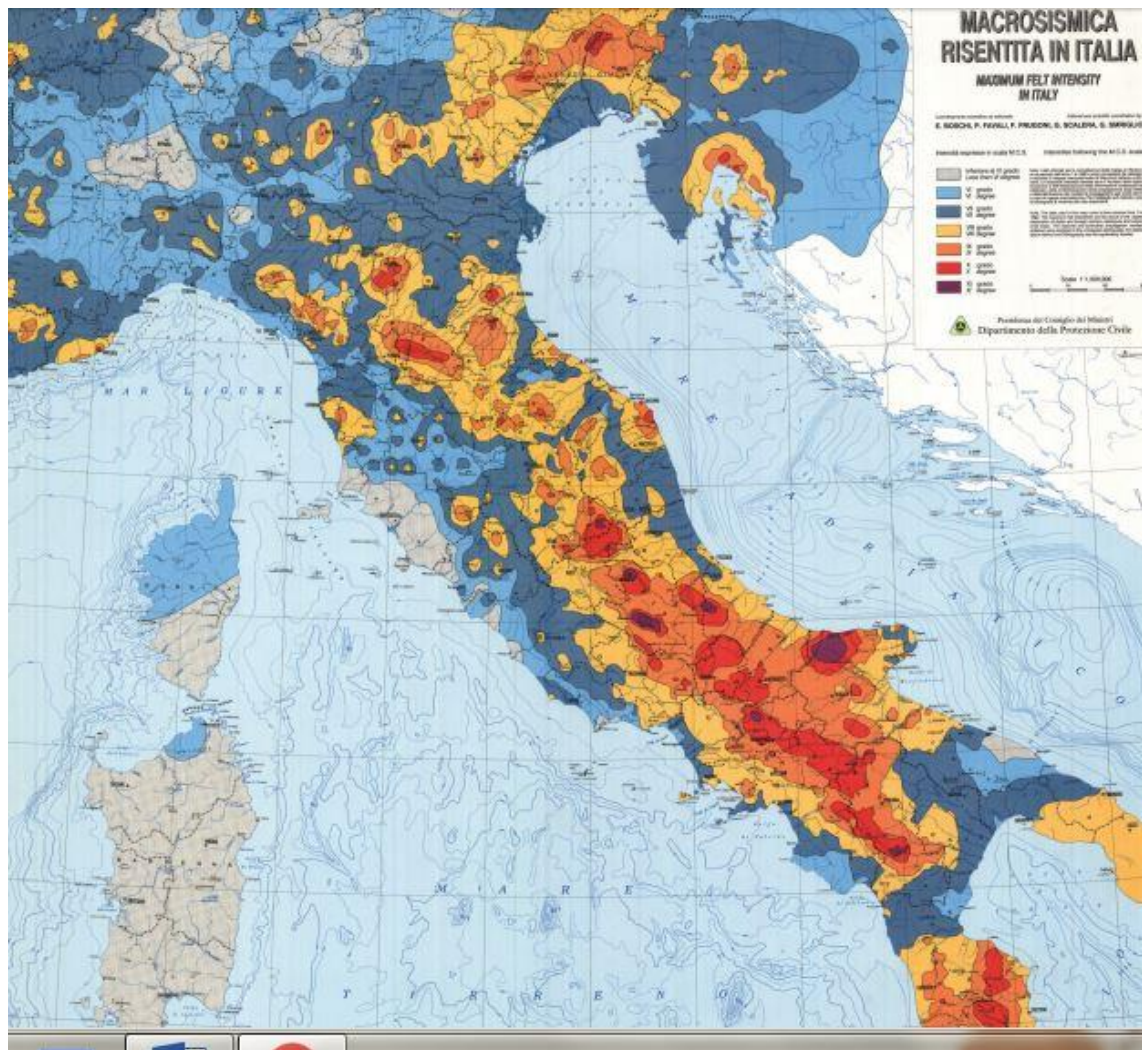
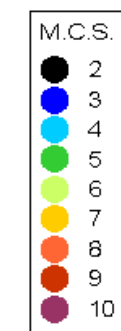


Fig. 7 – Mappa della Massima Intensità Macrosismica Risentita in Italia (dall'anno 1 all'anno 1992). La Gallura di NW è classificata tra le aree con intensità MCS di VI grado (fonte: ING, 1995, researchgate.net)

Altra cartografia sismica riguarda la zonazione macrosismica regionale redatta dall'INGV, sulla base di questionari sismici, a seguito del terremoto di Capo Comino, avvenuto a SE di Olbia, a 25 km dalla costa, il 26 aprile 2000, di $M_d = 4.8$ (Fig. 8).

26 04 2000
Capo Comino



Campo
Macrosismico
(M.C.S.)

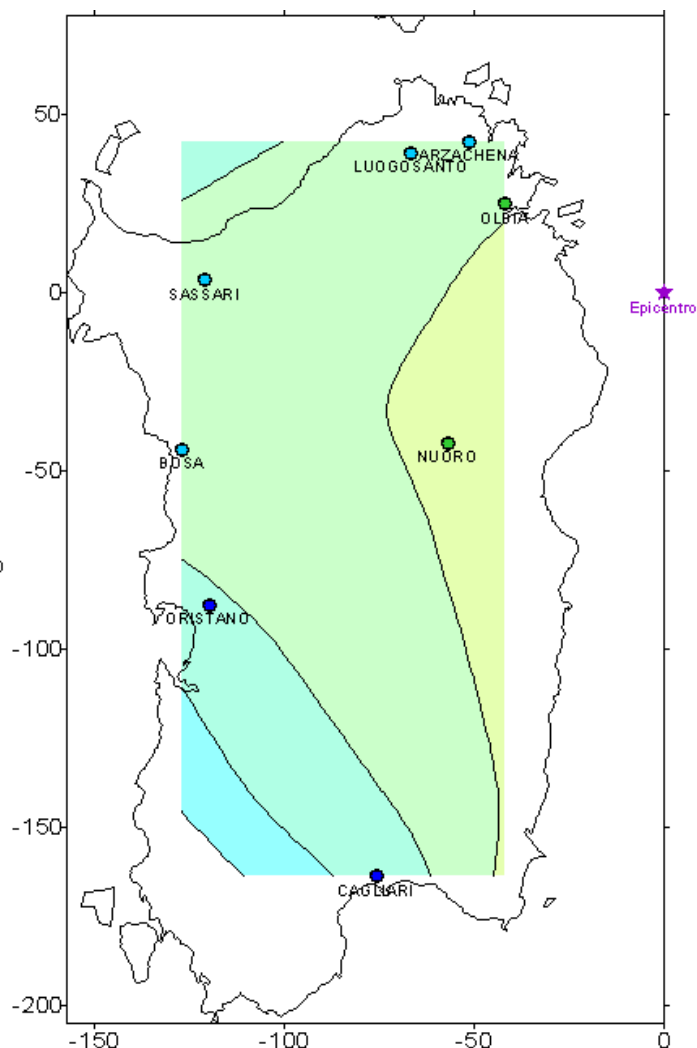
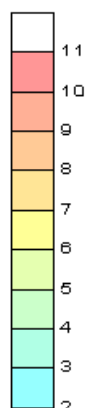


Fig. 8 – Mappa dell'intensità macrosismica regionale conseguente al sisma di Capo Comino del 26 aprile 2000 di MI = 4.8 (fonte: legacy.ingv.it)

La ripetitività dei fenomeni sismici al largo della Sardegna è documentata anche da altra mappa dell'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), di seguito proposta (Fig.9), che riporta gli epicentri dei terremoti verificatisi nel Mar Tirreno e nel Mediterraneo occidentale nel solo periodo 2000 – 2012; nella mappa sono individuabili, in particolare, gli epicentri dei sismi verificatisi al largo della costa nord-orientale della Sardegna ed in particolare di Olbia, oltre che gli altri epicentri ubicati a NW, a SW ed a S dell'isola.

Nonostante risulti che alcuni risentimenti sismici possano aver sfiorato, in talune aree della Sardegna, il limite della soglia del danno, la sopra citata ed ormai superata normativa classifica tutto il territorio della Sardegna in **Zona 4**, alla quale è assegnato un

valore di accelerazione sismica orizzontale $ag/g \leq 0.05$, con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni.

Resta, perciò, in capo alla Regione Sardegna l'obbligo di adeguare la normativa regionale ancora vigente ai nuovi indirizzi dettate dalle NTC 2018 ed alle risultanze di adeguati studi di MZS.

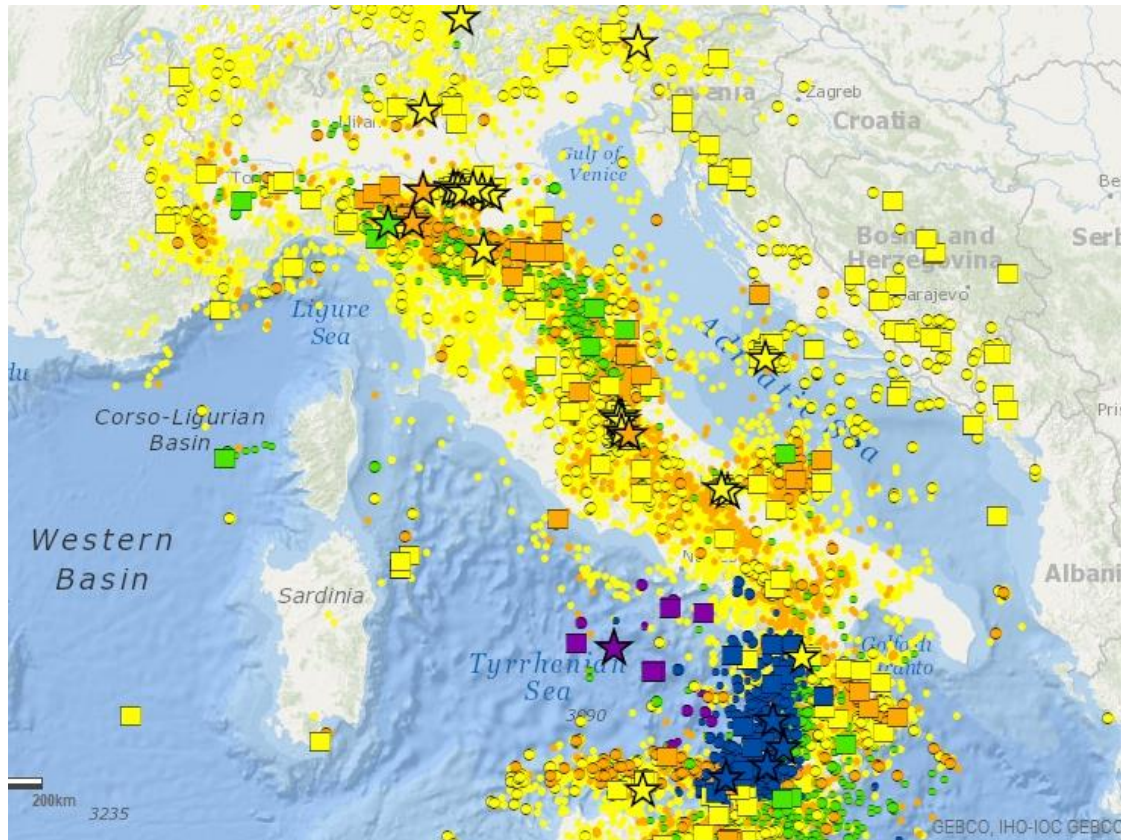


Fig. 9 – Epicentri dei terremoti con magnitudo maggiore di 1.6 avvenuti in Italia dal 2000 al 2012. Si notino gli epicentri dei sismi verificatisi al largo delle coste della Sardegna (fonte: labgis.gm.ingv.it)

SEZIONE SECONDA

PARTE B

Le indagini qualitative e quantitative – Il modello geologico locale

7.10 Il modello geologico

7.10.1 Introduzione

Il sito di Spiritu Santu comprende un piccolo bacino imbrifero limitato, verso E e verso W, da due speroni collinari che degradano verso N fino a raccogliersi con la piana alluvionale; a S, invece, è chiuso da una testata collinare, dalla quale lo stesso bacino imbrifero trae origine.

Il bacino è drenato, quasi centralmente, da una concavità che sfocia verso N nella piana del fiume Olova.

Quest'ultima si configura come una tipica depressione strutturale, limitata da NW e a SE da due famiglie di linee tettoniche di estensione regionale, di genesi ercinica e con riattivazione miocenica, di cui la prima è identificabile nella faglia di Olbia posta a NW, la seconda nella faglia di Tavolara, con la consociata di Riu Scala Mala, posta a SE.

I parametri caratterizzanti il modello geologico del sito di interesse a scala locale e limitato, quindi, al bacino imbrifero come sopra individuato, sono quelli derivanti dai lineamenti geologici regionali di cui alla precedente parte A di questa Sezione Seconda, che hanno evidenziato la presenza nel sito dei prodotti plutonici del ciclo magmatico Carbonifero-Permiano e le coltri di copertura quaternarie, conseguenti ai successivi processi geodinamici terziari e quaternari, che ne hanno determinato l'assetto geostrutturale recente fino all'attuale configurazione geomorfologia, idrogeologica, idrografica e di disfacimento dei granitoidi.

Ciò premesso, per la definizione qualitativa e quantitativa del locale modello geologico occorre analizzare gli esiti delle indagini di varia tipologia ed a vario titolo eseguite nel sito, iniziando da quelle previste dal *Piano Operativo*.

7.10.2 Esiti delle indagini geognostiche

Si sintetizzano di seguito gli esiti delle indagini più significative eseguite in tempi diversi da SGM e dal CIPNES.

7.10.2.1 Indagini del Piano Operativo (maggio-giugno 2017)

Sono state eseguiti da SGM srl n.5 sondaggi a carotaggio continuo spinti sino a 10.00 m dal piano di campagna (S28, S29, S30, S32, S33, finalizzati alla costruzione di piezometri) e n.11 trincee spinte sino a profondità comprese tra 2.00 e 3.00 m dal p.c., finalizzate al campionamento dei suoli; sono stati completati anche i sondaggi S31 ed S34 e realizzato con avanzamento a distruzione di nucleo il sondaggio profondo R6 a 80.00 m.

Gli esiti litostratigrafici vengono riproposti di seguito schematizzati e sintetizzati per facilitarne la lettura; l'ubicazione dei sondaggi è riportata nella planimetria di cui alla Fig.10.

LITOSTRATIGRAFIE SONDAGGI	
Sondaggi S28, S29, S30, S32, S33, S34(già S18-3/2016) (profondità 10.00 m)	
COLTRE REGOLITICA da 0.00 m fino a 3.00 ÷ 6.00 m dal p.c.	Sabbie e sabbie limose in superficie, a cui seguono sabbie e trovanti granitoidi, infine trovanti granitoidi
SUBSTRATO GRANITOIDE FRATTURATO da 3.00 ÷ 6.00 m dal p.c. fino a 10.00 m dal p.c.	Granitoidi più o meno fratturati
FALDE IDRICHE E STATI DI UMIDITA'	S28 Non rilevata S30 Falda assente S33 Falda assente S29 Falda a 5.00 m dal p.c. S32 Falda a 8.00 m dal p.c.

LITOSTRATIGRAFIE TRINCEE (esiti correlabili con quelli dei sondaggi)	
Trincee T8, T10, T12, T13, T15, T16, T17, T18, T19, T20, T21 (profondità fino a 2.00 e a 3.00 m dal p.c.)	
COLTRE REGOLITICA (residua e rimaneggiata da lavori pregressi) da 0.00 m fino a 1.00 ÷ 1.50 m dal p.c.	Sabbie e sabbie limose con frammenti di roccia granitoidi
SUBSTRATO GRANITOIDE FRATTURATO da 1.00 ÷ 1.50 m dal p.c. fino a max 2.00 o 3.00 m dal p.c.	Granitoidi fratturati
FALDE IDRICHE E STATI DI UMIDITA'	Non segnalati

L'ubicazione delle trincee è riportata sulla planimetria di cui alla Fig. n.11.

Completano il descritto quadro litostratigrafico il sondaggio S26 a carotaggio continuo, profondo 10.00 m, ed il sondaggio R4, a distruzione di nucleo, spinto sino a 97.00 m di profondità; entrambi risultano allestiti a piezometro e realizzati dal CIPNES nel febbraio 2015.

Si riportano di seguito gli esiti litostratigrafici, rimandando alla Fig.n.11 per la loro ubicazione.

SONDAGGIO S26 (profondità 10.00 m)	
RIPORTO <ul style="list-style-type: none"> - da 0.00 m fino a 0.95 m - da 0.95 m a 1.70 m 	Riporto costituito da sabbie con limo e trovanti granitoidi a spigoli vivi, residui della banda regolitica. Granitoidi alterati e molto fratturati
SUBSTRATO GRANITOIDE <ul style="list-style-type: none"> - da 1.70 a 10.00 m dal p.c. 	Monzograniti rosate da mediamente a poco fratturate, qualità da discreta a buona
FALDE IDRICHE E STATI DI UMIDITA'	Assenti

SONDAGGIO R4 (profondità 100.00 m)	
RIPORTO <ul style="list-style-type: none"> - da 0.00 m fino a 1.80 m 	Riporto, residuo della banda regolitica
SUBSTRATO GRANITOIDE <ul style="list-style-type: none"> - da 1.80 m a 70.00 m - da 70.00 m a 100.00 m 	Granitoidi di colore rosa Granitoidi grigiastri "più consistenti" dei precedenti
FALDE IDRICHE E STATI DI UMIDITA' <i>A 55.00 m presenza di circolazione idrica "di scarsa entità", tanto che "le operazioni di lavaggio del pozzo, condotte per sei ore consecutive, hanno richiesto continua immissione di acqua potabile dal boccaforo, data la scarsa alimentazione idrica sotterranea" (dal rapporto SGM).</i>	

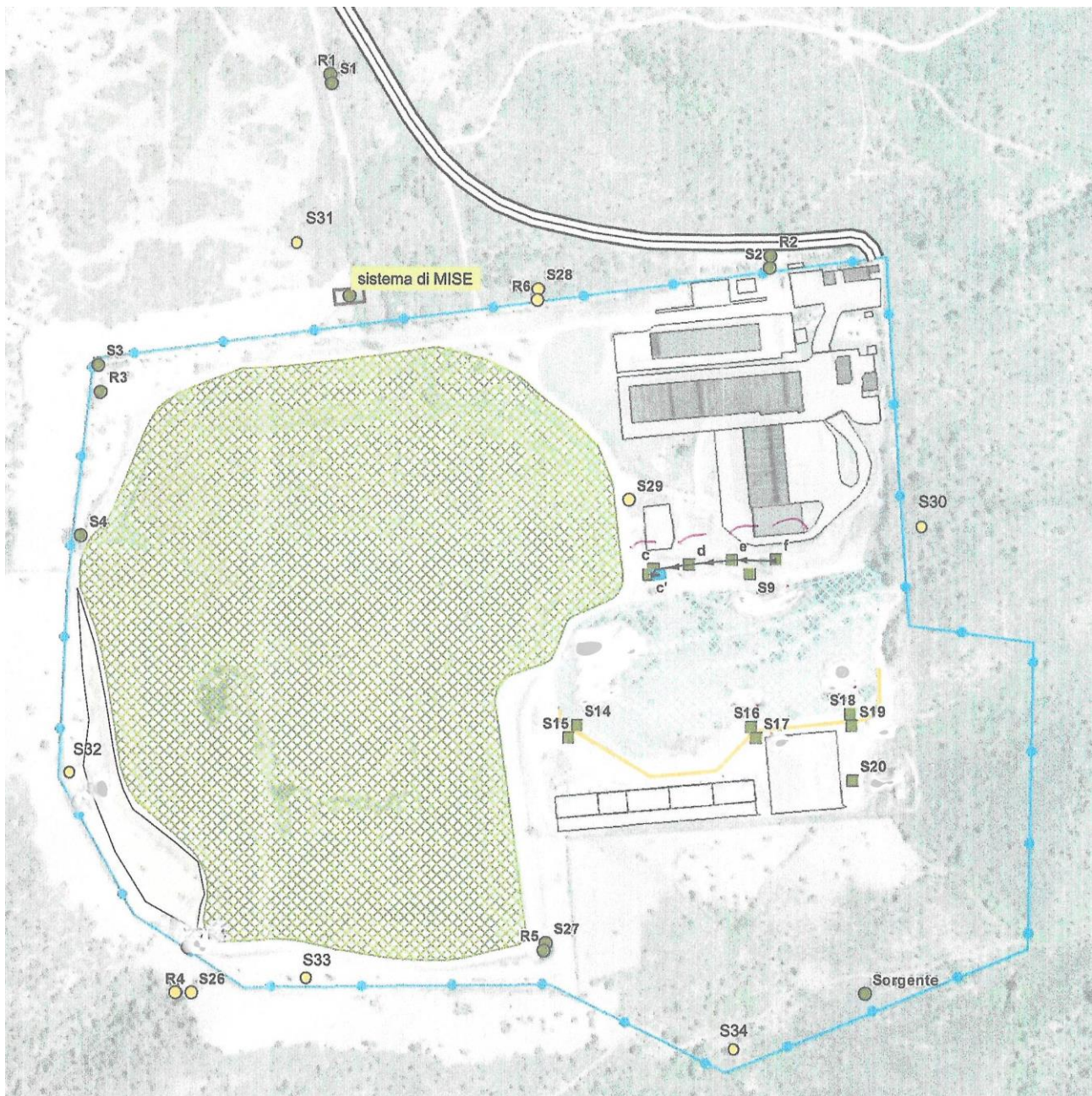


Fig. n.10 – Planimetria ubicazione piezometri superficiali (S) e profondi (R)

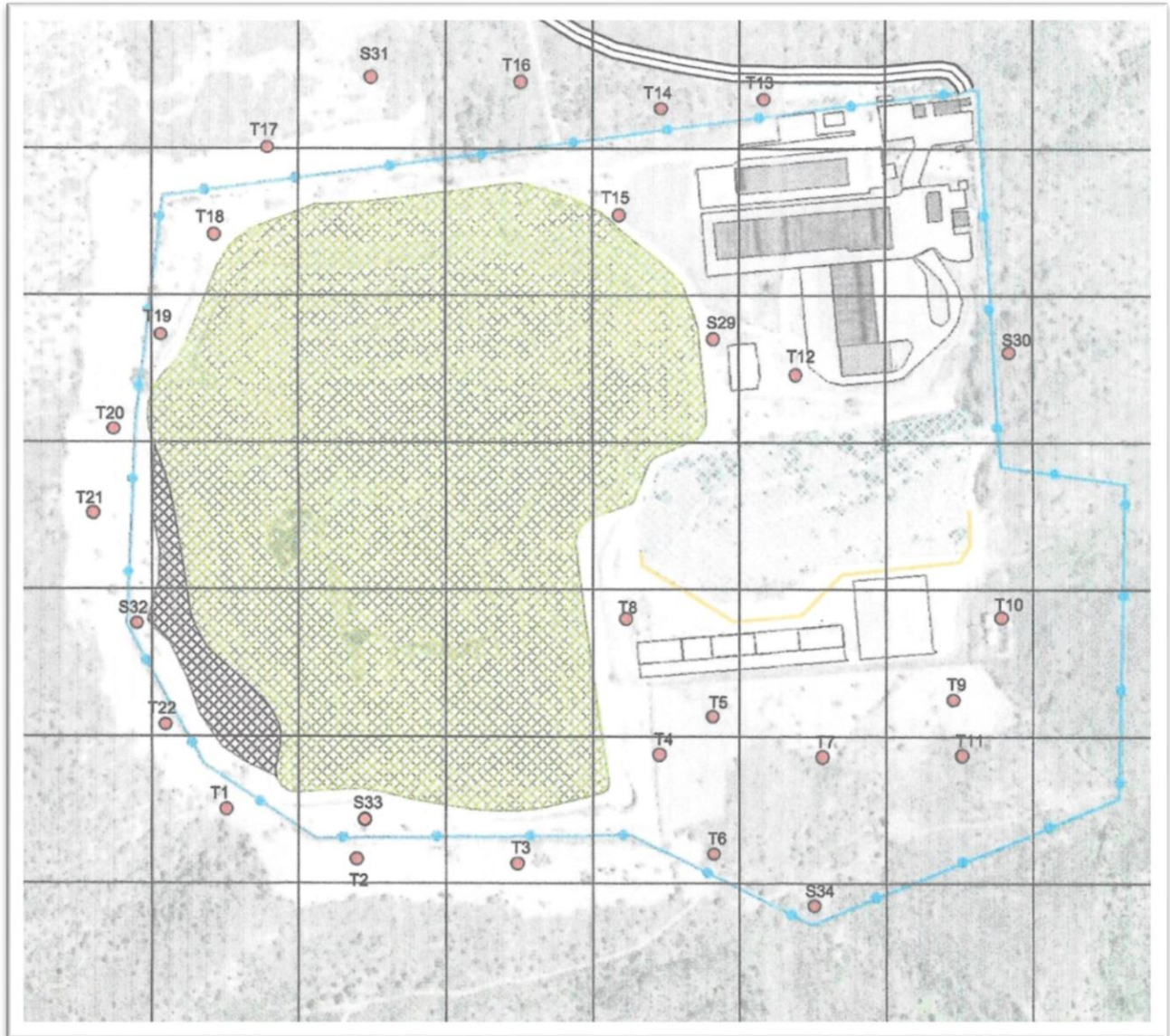


Fig. n.11 – Planimetria ubicazione trincee (T)

7.10.2.2 Indagini CIPNES per realizzazione area deposito materiali (Dic. 2015/Genn./Febb. 2016)

Si sintetizzano, infine, gli esiti dei sondaggi eseguiti da CIPNES in un'area ubicata a SE della piattaforma IPPC (destinata a stoccaggio materiali) in quanto ritenuta utile ai fini del presente inquadramento geologico e idrogeologico.

Nell'area sopra individuata sono state eseguite indagini tra la fine del 2015 ed i primi mesi del 2016, precisamente n.8 sondaggi-piezometri, così individuati: S7-1, S7-2, S7-3, S18-1, S18-2, S18-3 (diventato S34 nel P.O., v. punto 7.10.2.1.) S28-1, S28-2, per profondità comprese tra i 10.00 ed i 16.00 m dal piano di campagna e con rilevamento in continuo dell'Indice RQD; una stazione di rilevamento geo-meccanico completa la qualificazione dell'ammasso roccioso.

Risultano eseguite anche indagini finalizzate alla qualificazione idrogeologica del sottosuolo, precisamente:

- n. 4 prove di permeabilità in foro con metodo Lugeon in discesa;
- prove preliminari di emungimento sui piezometri S7-1, S18-1, S18-3, e conclusive sul solo piezometro S7-1 sia a gradini con portate crescenti sia a portata costante.

I sondaggi eseguiti nell'area hanno consentito la formulazione del modello litostratigrafico locale di seguito riportato.

COLTRE DETRITICA RIMANEGGIATA (per pregressi lavori di spianamento) da 0.00 m fino a 1.00 m circa dal p.c. (solo nel sondaggio S7-2 sfiora i 3.00 m circa)	Coltre rimaneggiata e residuale costituita da limi sabbiosi con lapidei granitoidi
SUBSTRATO GRANITOIDE MOLTO FRATTURATO da 1.00 m circa fino a 9.00 – 10.00 m dal p.c. con intercalazioni di granitoidi poco fratturati	Granitoidi in genere molto fratturati con RQD = 30% - 40%, eccez. 10%, con intercalazioni di livelli poco fratturati e RQD = 60% - 80%
SUBSTRATO GRANITOIDE POCO FRATTURATO da 4.00 – 5.00 m fino a 16.00 m dal p.c. con non frequenti e deboli intercalazioni di granitoidi più fratturati	Granitoidi in genere poco fratturati con RQD = 52% - 96%
FALDA IDRICA	Superficie freatica tra 1.00 e 4.00 m circa dal p.c.

Di seguito si propone la planimetria con l'ubicazione dei sondaggi (Fig. n. 12) e due sezioni geolitologiche che meglio rappresentano la caratterizzazione litostratigrafica locale: la sezione passante per i sondaggi S18-1, S18-2, S18-3 (Fig. n.13) e la sezione passante per i sondaggi S28-1 e S28-2 (Fig. n.14).

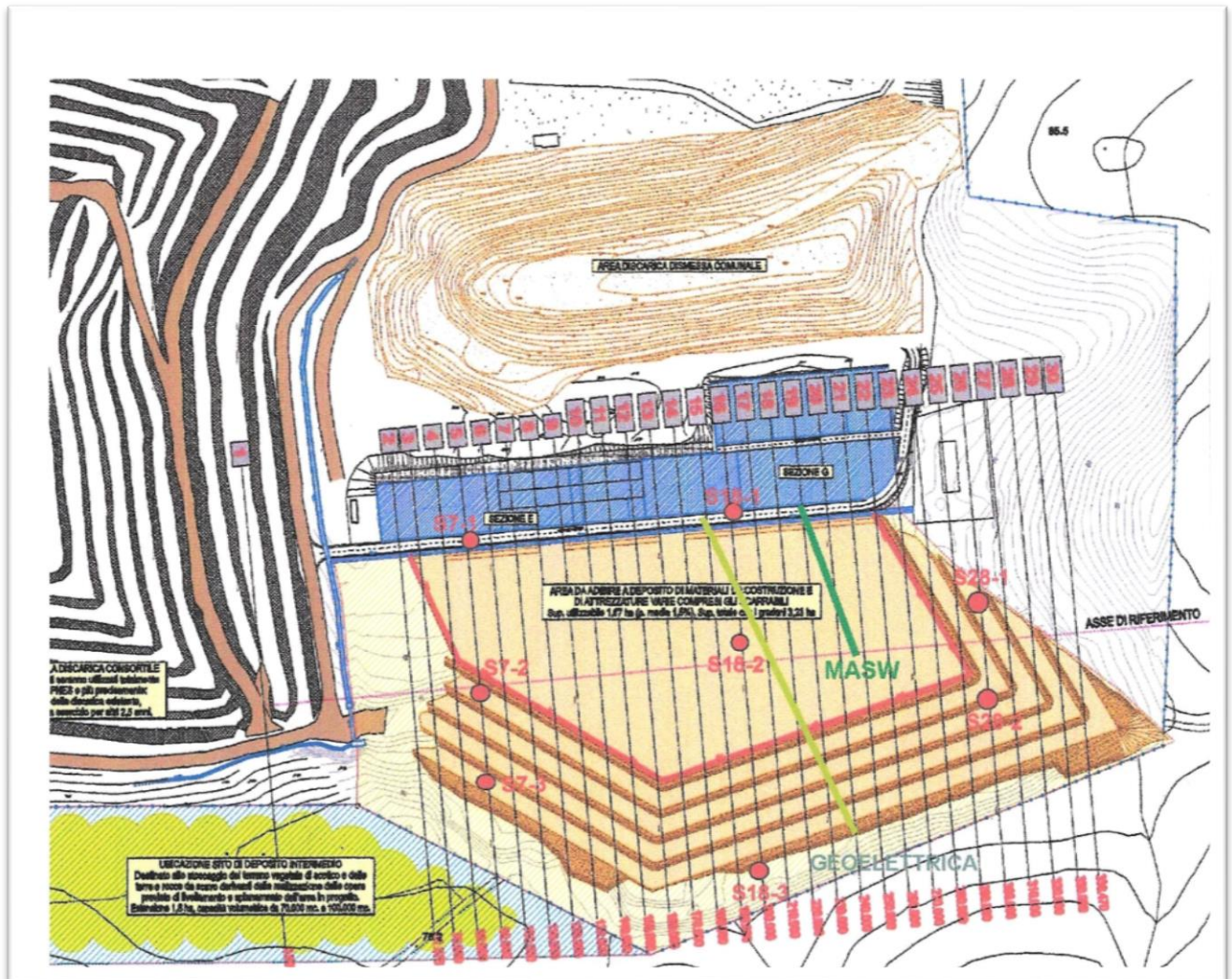


Fig. n.12 – Planimetria ubicazione indagini

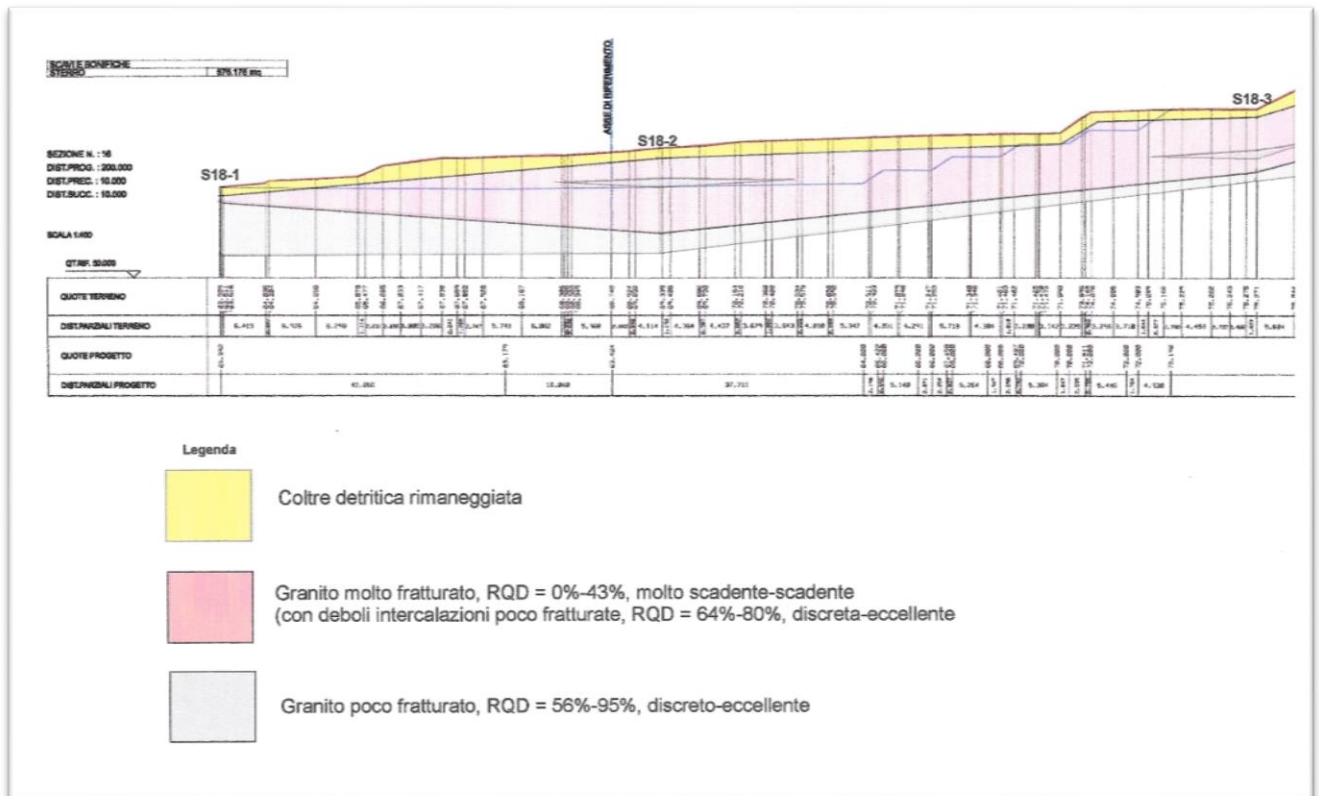


Fig. n.13 – Sezione geolitologica S18-1, S18-2, S18-3

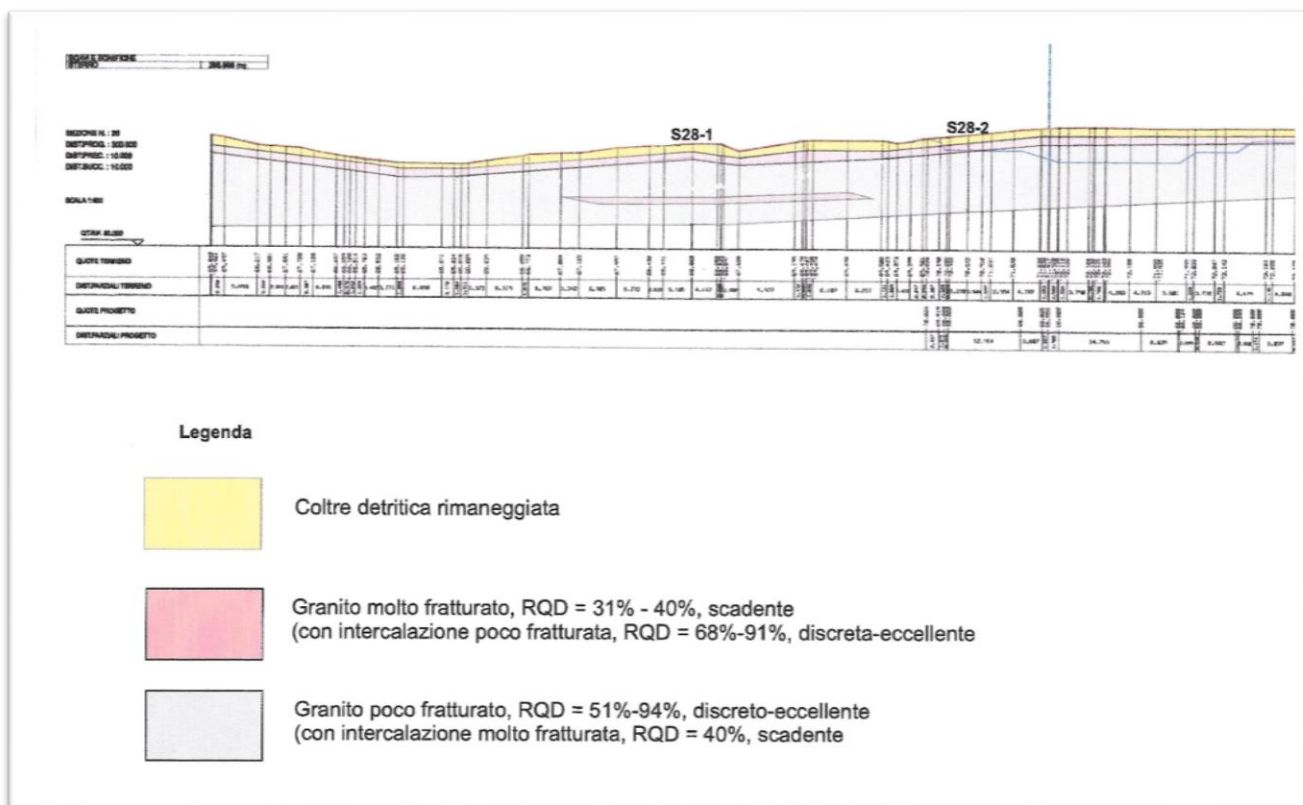


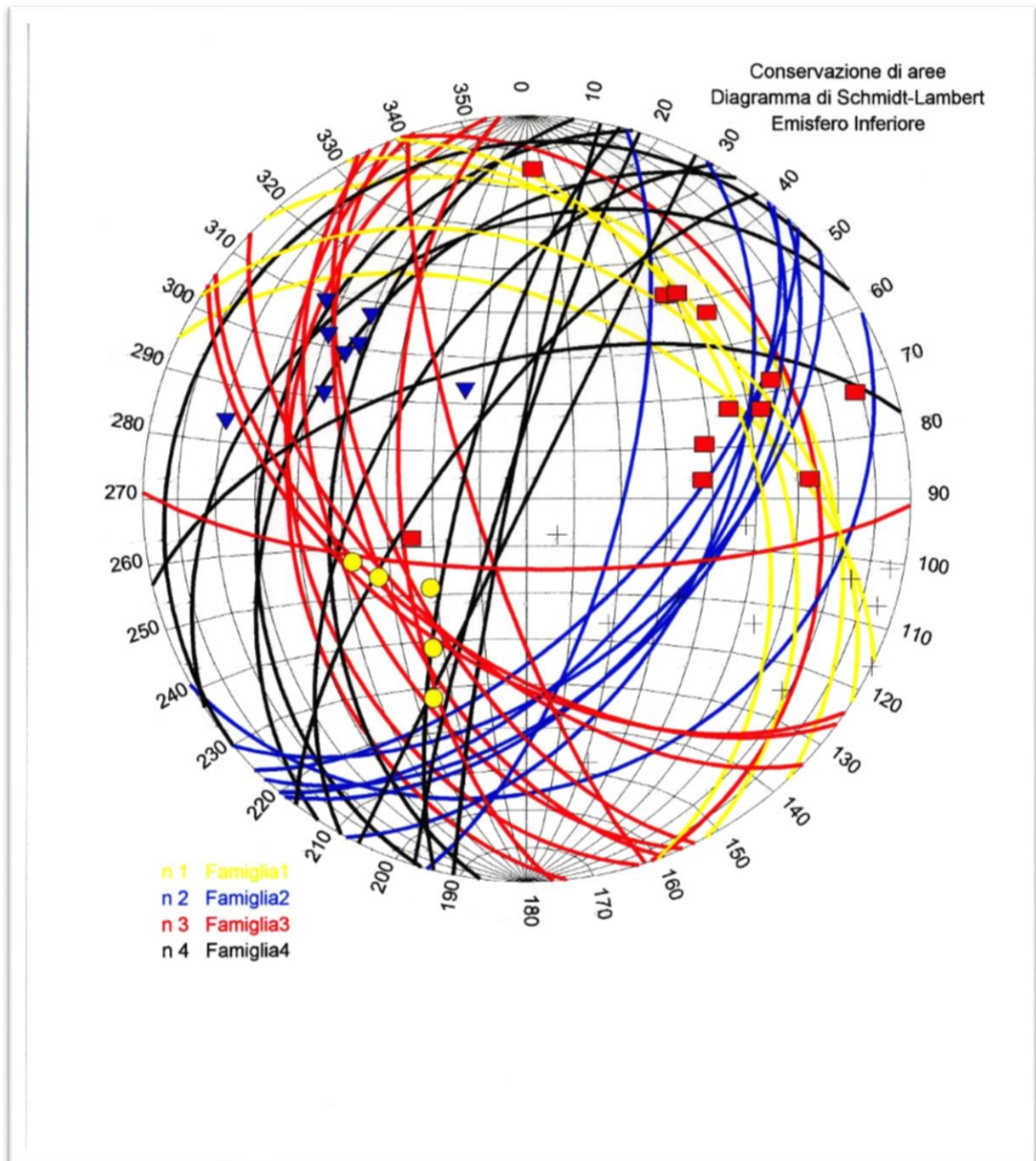
Fig. n.14 – Sezione geologica S28-1, S28-2

L'elevato stato di fratturazione della banda superficiale dell'ammasso granitoide, già documentato dagli esiti dell'indice RQD sopra riportati, è ulteriormente evidenziato dal rilevamento geo-meccanico episuperficiale, operato in stazione a sud dell'area in studio, di cui si riportano di seguito sia una tabella con le famiglie di discontinuità più frequentemente presenti sia una rappresentazione ciclografica dei poli e piani in proiezione equatoriale (Fig. n.16).

E' immediato osservare che l'elevata frammentazione dei volumi rocciosi connessa con le molteplici e variamente orientate intersezioni dei piani di discontinuità dà luogo ad una rete anastomizzata di fratture che ne determinano la propria significativa permeabilità e conseguente caratteristica di acquifero.

RILIEVO DELLE DISCONTINUITA'		
1	286	32
2	303	39
3	25	48
4	47	28
5	71	26
6	151	27
7	327	32
8	264	38
9	253	40
10	249	55
11	277	48
12	62	36
13	320	10
14	246	48
15	347	60
16	135	63
17	105	70
18	140	53
19	130	57
20	133	50
21	299	57
22	118	50
23	129	51
24	296	90
25	252	79
26	281	86
27	287	85
28	244	60
29	70	40
30	307	72
31	284	76
32	224	57
33	214	54
34	216	56
35	181	75
36	266	63
37	32	38

Fig.n.15 – Stazione di rilevamento geomeccanico a sud della piattaforma IPPC:
Rilevamento delle discontinuità



**Fig. n. 16 – Stazione di rilevamento geomeccanico di Colle Lisandruggiu:
Piani e poli di discontinuità in proiezione equatoriale**

7.10.2.3 Indagini geofisiche CIPNES finalizzate alla caratterizzazione del modello idrogeologico (ottobre 2013)

Si sintetizzano di seguito i risultati della campagna di indagini geofisiche eseguite tra giugno e luglio del 2013 dal CIPNES all'interno ed all'esterno dell'area occupata dalla piattaforma IPPC.

La campagna comprende n.19 tomografie elettriche e n.10 sondaggi elettrici verticali (SEV); le prime ricadono tutte all'interno o immediatamente all'intorno dell'area impianti, mentre dei n.10 SEV quattro sono distribuiti lungo il perimetro dell'area impianti e sei dislocati in aree esterne allo scopo di saggiare un territorio più ampio a fini idrogeologici.

L'aspetto idrogeologico dedotto da dette indagini verrà ripreso nella sezione successiva dedicata alla caratterizzazione idrogeologica del sito, mentre in questa sede verrà sintetizzato quanto di interesse ai fini della modellazione geolitologica.

Si osserva preliminarmente che le indagini geofisiche in esame forniscono ottime correlazioni geolitologiche con gli analoghi dati forniti dal complesso di indagini geognostiche illustrate nei punti precedenti.

I risultati possono così sintetizzarsi:

- Primo orizzonte, caratterizzato da bassa resistività, avente uno spessore medio di circa $6.00 \div 8.00$ metri, associabile alla residua coltre detritico-colluviale e/o al sabbione granitico nonché alla sottostante banda granitica fratturata; l'orizzonte ospita una falda libera e arealmente discontinua.
- Secondo orizzonte, caratterizzato da valori di resistività da alta ad altissima, riferibile al substrato granitico, meglio caratterizzato sotto il profilo meccanico rispetto al precedente orizzonte; le profondità massime investigate con i SEV sono comprese nel range $70.00 \div 135.00$ m dal p.c.; raggiungono invece i 35.00 m dal p.c. con le elettrotomografie. Il grado di fratturazione è in genere molto contenuto, come si desume dagli alti valori della resistività, la cui omogeneità e continuità spaziale non evidenzia, peraltro, né discontinuità tettoniche importanti né circolazione idrica significativa. Si segnala, tuttavia, che nei SEV n.5 e n.8 si rilevano appena accennati flessi delle curve di resistività che, peraltro, per tale loro caratteristica non sono chiaramente attribuibili ad una importante o

comunque significativa circolazione idrica sotterranea, ma che potrebbero essere interpretati come zone marcate da umidità diffusa o da debole circolazione idrica limitata a zone di convergenza di fratture collegate in qualche misura alle aree di alimentazione superficiali, cioè alle coltri di copertura sciolte quaternarie e sottostante banda dei graniti fratturati.

L'argomento sarà ripreso nella prossima sezione dedicata alla definizione del modello idrogeologico. Si osserva infine che le n.9 elettrotomografie eseguite sul corpo della discarica CIPNES registrano la presenza, alla base della discarica, di un fondo continuo ed omogeneo, dovuto al comportamento dielettrico del telo impermeabile che, perciò, dimostra di conservare intatta la propria integrità meccanica e la totale tenuta idraulica.

7.10.3 Definizione del modello geologico locale

Sintetizzando i precedenti punti e correlando dati e parametri estratti sia da fonti ufficiali quali le Carte geologiche d'Italia, studi e ricerche geologiche citati nel corso della esposizione, sia da rilevamenti e dalle indagini di campo previste dal Piano Operativo eseguite da SGM srl e da altre eseguite dal CIPNES nelle campagne del 2013, del 2015 e del 2016, si perviene alla presente redazione del modello geologico locale, illustrato in una breve sintesi descrittiva dei principali parametri geologico-stratigrafici, litotecnici e litostrutturali e in una più evidente rappresentazione grafica affidata ad una dettagliata colonna stratigrafica tipo.

Il modello prospettato è riferito alla conca valliva che ospita la piattaforma IPPC, limitata ad E, W e a S dalle propaggini collinari dei granitoidi ercinici, degradanti verso N nella piana alluvionale del fiume Olova, a sua volta ricompresa nell'ampio basso strutturale drenato dal limitrofo fiume Padrogiano.

Il modello geologico locale è, pertanto, quello di seguito descritto e rappresentato, partendo dall'alto.

A) COLTRI DI COPERTURA ALLUVIONALI E COLLUVIALI DETRITICHE DI VERSANTE, OLOCENICO-ATTUALI

Arealmente molto discontinue, allo stato sciolto, costituite da sabbie più o meno limose, a luoghi anche argillose, con clasti eterodimensionali granitici, tutte provenienti dagli orizzonti regolitici eluviali, questi ultimi originati da processi di degradazione fisica ed alterazione chimica del substrato granitoide.

Gli spessori, generalmente modesti, sono prevalentemente compresi tra alcuni decimetri e qualche metro.

Detti depositi hanno origine per traslazione degli originari orizzonti regolitici ad opera della gravità o del trasporto da parte delle acque ruscellanti di origine meteorica fino ai siti di accumulo nelle aree medio-basse dei versanti o nei solchi torrentizi.

Le indagini geognostiche hanno evidenziato la loro quasi totale asportazione a seguito dei lavori di realizzazione delle due discariche e degli impianti IPPC.

B) COLTRE ELUVIALE ARENITICA, PLEISTOCENICA

Costituita in prevalenza da sabbioni granitici derivanti dal disfacimento fisico-chimico del substrato cristallino granitoide, generalmente allo stato sciolto, meno frequentemente allo stato pseudo-coerente per fenomeni di ferrettizzazione; questi ultimi conseguenti al processo di idrolisi e silicati, con una prima fase rappresentata dalla caolinizzazione dei feldspati ed una seconda fase data dalla ulteriore scomposizione dei minerali argillosi di neoformazione e dalla separazione e la precipitazione della silice e degli idrossidi di ferro ed alluminio.

Detta coltre arenitica contiene, a luoghi, litorelitti granitoidi eterodimensionali, in quantità variabili dipendenti dal grado di arenizzazione della matrice rocciosa, a spigoli vivi o arrotondati a seconda del tempo di esposizione agli attacchi chimici (idrolisi, ossido-riduzione).

Questi depositi costituiscono il “regolite” prodotto con gradualità nelle varie fasi del processo di disfacimento fisico-chimico dei granitoidi, i cui fattori principali sono individuabili nel grado, entità, stato della fratturazione, nelle caratteristiche fisico-chimiche e nella quantità delle acque di infiltrazione, nella caratterizzazione meteo-climatica del sito.

Sono questi fattori che determinano l'accelerazione dei processi chimici e, quindi, la progressiva arenizzazione delle masse litoidi (v. par. 7.5).

Il "regolite" viene, infine, rimosso dal sito di origine ad opera della gravità o ad opera del trasporto da parte delle acque di origine meteorica dando luogo ai depositi colluviali ed alluvionali sopra descritti.

Gli spessori del regolite sono variabili, in genere, dal metro fino a $6.00 \div 8.00$ metri; gli spessori più consistenti si hanno quando i volumi litoidi interessati da consistente, pronunciata, estesa ed anastomizzata rete di fratture, atta ad esporre ampie superfici delle masse rocciose agli attacchi di natura chimica.

Si evidenzia, infine, che tali depositi svolgono anche un modesto ruolo di acquifero freatico superficiale con permeabilità in genere media ($10^{-4} < k < 10^{-7}$ m/s), arealmente discontinuo ed a regime temporaneo, in quanto regolato dall'andamento idrometeorico stagionale; è sostenuto alla base dalle bande fratturate dei granitoidi episuperficiali.

C) BASAMENTO GRANITOIDE ERCINICO

Coltri con diverso grado di arenizzazione e con diverso spessore coprono, in maniera discontinua ancorchè significativa, il basamento granitoide paleozoico

A quest'ultimo, peraltro, le coltri arenitiche, prodotte dal disfacimento fisico-chimico delle stesse masse rocciose, prima della loro rimozione, parziale o totale, dalla sede originaria, appaiono intimamente connesse.

Infatti, il grado di alterazione dei granitoidi dal basamento non è mai netto, riducendosi progressivamente dall'alto verso il basso, a partire cioè dalla superficie del suolo fino a raggiungere per gradi la roccia madre.

Nell'area in esame, il basamento cristallino, in più luoghi affiorante, , è costituito dal plutone granitico di Gallura, un complesso intrusivo e filoniano a granitoidi del Carbonifero-Permiano.

Comprende monzograniti inequigranulari e granodioriti monzogranitiche equigranulari, a sola biotite o a due miche, con diversificata orientazione tessiturale.

I filoni inclusi sono in prevalenza quarziferi ovvero riolitici, basaltici e spessoartitici.

A contatto con il descritto complesso affiora anche, con minor rilevanza areale e comunque a monte dell'area in esame, il complesso metamorfico del Precambriano costituito da migmatiti, in prevalenza metatessiti, diatessiti e ortogneiss.

Il complesso granitoide risulta variamente interessato da significativi sistemi di fratture, particolarmente accentuati nella porzione alta dello stesso, per spessori in genere compresi

tra 5.00 m e 10.00 m, anastomizzati in varia misura, tanto però da costituire acquifero, sia pure con permeabilità in genere bassa ($10^{-6} < k < 10^{-9}$ m/s).

Le fratture tendono a diminuire in numero ed ampiezza procedendo verso il basso delle masse litoidi, anche per effetto della crescente pressione litostatica.

Gli orientamenti dei sistemi di fratturazione che accompagnano le linee tettoniche di estensione regionale sono, in linea generale, relazionabili con queste ultime, rilevandosi una maggioranza di insiemi NW-SE e NE-SW; ai predetti sistemi ad orientazione regionale si sovrappongono, però, famiglie di fratturazione a scala locale, come rappresentato nella ciclografica di fig.16, che rendono complessa e poco agevole una schematizzazione del quadro fessurativo che caratterizza le masse rocciose locali.

I dati forniti dalle indagini geognostiche, geo-meccaniche e geofisiche, d'altra parte, confermano la complessità del locale sistema fratturativo, a luoghi addebitabile anche alla rimozione di masse rocciose a mezzo esplosivi, finalizzata alla realizzazione dell'area a deposito materiali, come documentato con le indagini CIPNES del dicembre 2015 – gennaio 2016 di cui al precedente punto 7.10.2.2 ed alle allegate sezioni geolitologiche (Figg. 13 e 14) e ciclografica (Fig.16).

La descritta caratterizzazione litologico-meccanica è chiaramente sintetizzata nelle due sezioni geologiche di Fig. 13 e Fig. 14, nelle quali si rileva che il maggior grado di fratturazione delle masse granitiche è compreso entro una decina di metri dal p.c., ove l'indice RQD assume valori entro il range 0% - 40% proprio di roccia “**molto scadente**”; seguono, poi, masse litoidi con RQD compreso tra il 51% ed il 95%, indice proprio di roccia “**discreta – eccellente**”, comprendente non frequenti intercalazioni di roccia “**scadente**” il cui indice RQD è pari al 40%; a profondità crescenti le caratteristiche meccaniche della roccia migliorano sensibilmente, come qualitativamente dimostrato, ad esempio, dal rapporto di campagna della perforazione del piezometro R4 spinto a 100.00 m di profondità (v. punto 7.10.2.1) e soprattutto, dai risultati della estesa campagna di indagini geofisiche (v. punto 7.10.2.3) che descrivono il substrato profondo (fino a 135.00 m dal p.c.) delle masse granitoidi come privo di discontinuità tettoniche importanti e, conseguentemente di circolazione idrica significativa, ammettendo soltanto deboli flussi idrici, limitati a zone di convergenza di modeste e locali reti di fratture, collegate alla falda libera di superficie, che, come visto in precedenza, è caratterizzata da portate ridottissime.

La sopra riportata descrizione analitica del locale **modello geologico** viene anche di seguito proposta in forma grafica, mediante una **colonna stratigrafica tipo** (Fig.n.17).

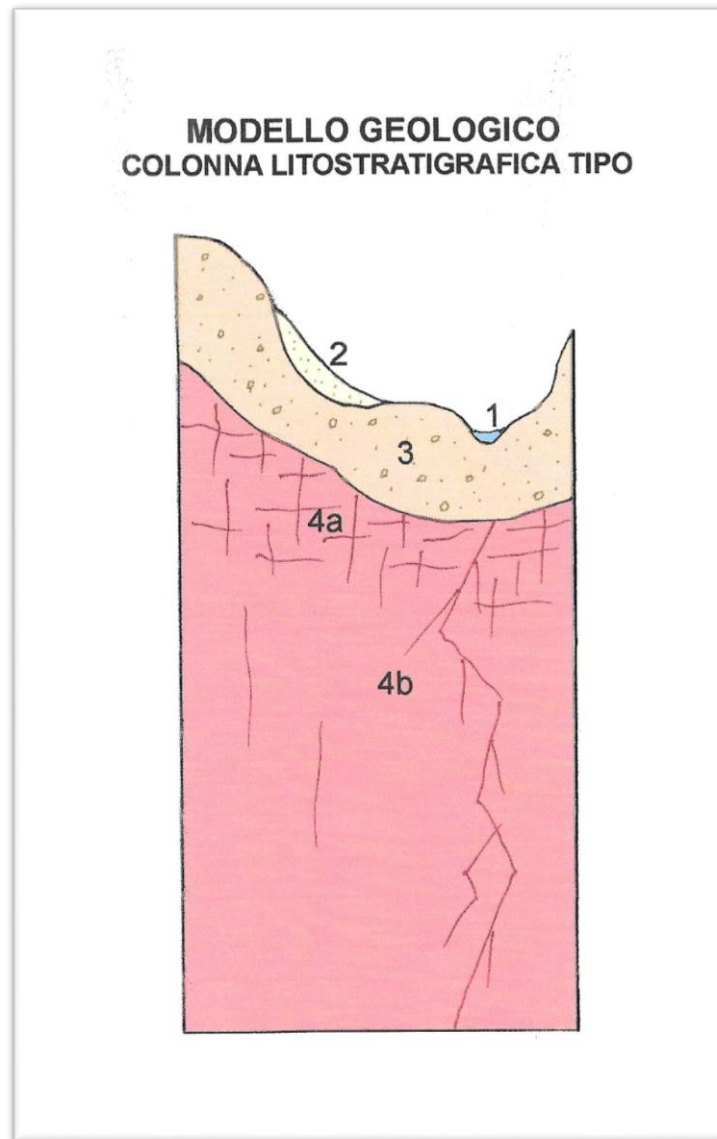


Fig. n. 17 - Colonna litostratigrafica tipo

Legenda

OLOCENE

- 1) Depositi alluvionali, spessore <1.0m;
- 2) Depositi detritico-colluviali di versante, spessore <1.0 m;

PLEISTOCENE

- 3) Coltre arenizzata di disfacimento del basamento granitoide ercinico, spessore medio 0.50 ÷ 3.00 m, spessore max 8.00 ÷ 10.00 m

CARBONIFERO-PERMIANO

- 4a) Complesso granitoide fratturato e, a luoghi, parzialmente o debolmente alterato, spessore medio 5.00 – 8.00 m, spessore max 10.00 – 12.00 m
- 4b) Complesso granitoide integro, a luoghi poco fratturato, con non frequenti microreti di fratture (radicato)

SEZIONE TERZA

IL MODELLO IDROGEOLOGICO

8. L'APPROCCIO METODOLOGICO PER LA DEFINIZIONE DEL MODELLO IDROGEOLOGICO

L'approccio metodologico per la caratterizzazione del modello idrogeologico non può che partire dal modello geologico-geomorfologico come definito nella precedente Sezione Seconda, Parte prima e Parte seconda.

Detto modello idrogeologico si sostanzia, perciò, nella individuazione ed analisi dei seguenti elementi fondamentali:

- A) Il bacino idrografico ed il bacino idrogeologico, per gli aspetti connessi alla delimitazione spaziale della idrostruttura e della tipologia dell'acquifero;
- B) La quantificazione analitica dei parametri idrogeologici per la caratterizzazione e definizione della circolazione idrica nel sottosuolo.

Indagini di varia tipologia supporteranno la modellazione idrogeologica del sito di interesse.

Si specifica, in particolare:

- per il punto A) saranno utilizzate, come sopra detto, le risultanze e le determinazioni del modello geologico di cui alla Sezione seconda;
- per il punto B) saranno utilizzate le prove di pompaggio sui piezometri, le prove di permeabilità, le risultanze delle analisi idrogeochimiche, le misurazioni piezometriche, le indagini geofisiche.

8.1 Il bacino idrografico ed il bacino idrogeologico

8.1.1 Il bacino idrografico

Il bacino idrografico dell'area in esame è costituito da una modesta valle delimitata a nord dalla piana alluvionale drenata dal torrente Olova, a sud dalla pendice collinare di Monte Lisandràggiu, ad est e ad ovest da due propaggini collinari che, con andamento all'incirca meridiano, degradano verso nord, fino al limite della menzionata piana alluvionale.

Gli spartiacque che delimitano il sopra disegnato bacino idrografico si dipartono da sud, dalla cima di Monte Lisandràggiu a quota 249 circa, per correre poi verso nord, lungo i due speroni collinari che delimitano ad est e ad ovest la valle nella quale è ubicata la piattaforma IPPC.

All'interno del bacino idrografico le linee di deflusso delle acque meteoriche sono rappresentate, iniziando da monte, da due fossi all'incirca paralleli, che, dopo aver drenato la pendice di Monte Lisandràggiu, si raccolgono, alla base di quest'ultimo, in un unico impluvio, nell'area mediana della vallecchia, nella quale insiste, come detto, la piattaforma IPPC; il solco vallivo, superata l'area IPPC, continua ancora a drenare per qualche centinaio di metri le pendici dei due speroni collinari delimitanti ad E e ad W il bacino, fino a raggiungere la piana alluvionale del torrente Olova.

Per quanto di interesse ai fini di bilanci idrologici ripresi in prosieguo, si riferisce che la superficie complessiva del bacino idrografico come sopra individuato è all'incirca pari a 475'000 m², assumendo come sezione di chiusura quella posta immediatamente a valle dell'area occupata dalla piattaforma IPPC, nel luogo in cui le due pendici collinari delimitanti ad est e ad ovest il bacino si avvicinano sensibilmente, restringendo di molto l'area dell'impluvio.

Il bacino idrografico è rappresentato sulla allegata cartografia (Fig.n.18).

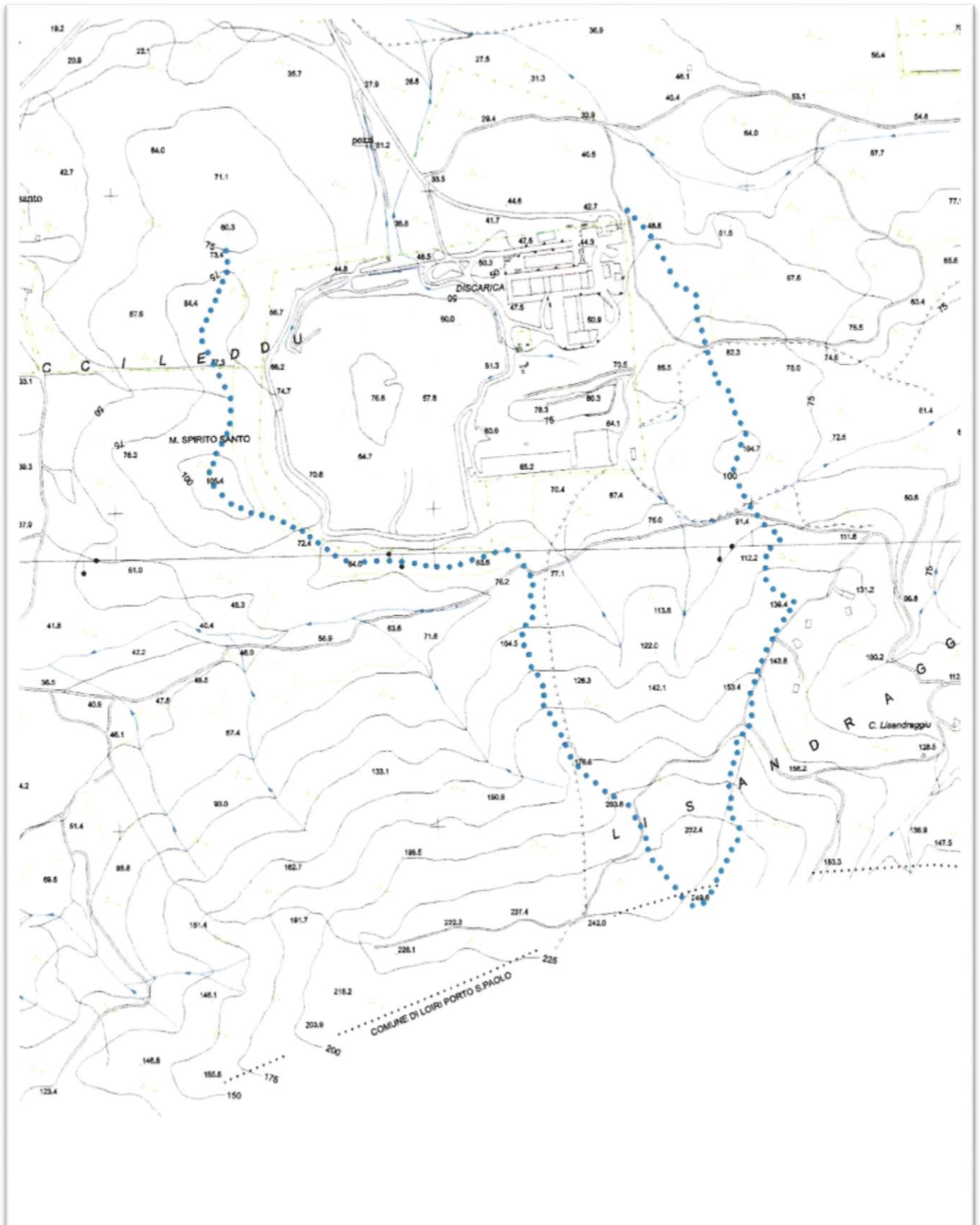


Fig. n.18 – Il bacino idrografico

8.1.2 Il bacino idrogeologico

La individuazione del bacino idrogeologico discende dalla caratterizzazione del modello geologico di cui alle precedenti Parti A e B della Sezione seconda.

Si osserva preliminarmente che il bacino idrografico sopra descritto ricade interamente nel dominio dei granitoidi ercinici, generalmente sottoposti ad una coltre di arenizzazione, la cui genesi è legata ai processi di disfacimento fisico-chimico degli stessi granitoidi.

Lo spessore di detta coltre è generalmente dell'ordine di pochi metri fino a $4.00 \div 5.00$ metri, più frequentemente attorno a $1.00 \div 2.00$ metri, meno frequentemente fino a $7.00 \div 8.00$ metri.

Detta coltre è permeabile per porosità ed è caratterizzata, secondo dati di letteratura, da un coefficiente di permeabilità compreso $10^{-5} < k < 10^{-6}$ m/s, a cui corrisponde una permeabilità "**bassa**"; più realisticamente si può ritenere k compreso entro un campo di valori più ampio, cioè $10^{-4} < k < 10^{-7}$ m/s, dipendente dai quantitativi residuali della frazione argillosa presenti nella coltre di arenizzazione prodotta dai processi di caolinizzazione dei silicati.

La descritta coltre arenizzata ospita, perciò, una debole falda freatica, sostenuta a letto dal complesso granitico ercinico, particolarmente fratturato nella banda episuperficiale.

Poca o nessuna rilevanza assumono, ai fini idrogeologici, le limitate e residuali coltri colluviali e alluvionali, sia a causa della ridotta dimensione del bacino idrografico e conseguente ridotta azione di trasporto da parte delle acque di pioggia e della gravità, sia per le rimozioni conseguenti alle lavorazioni e alla allocazione degli impianti IPPC.

Le indagini geognostiche dirette eseguite nel bacino, cioè sondaggi e trincee, non hanno evidenziato la presenza di tali coltri, che restano, pertanto, per le eventuali parti residue, geneticamente associate alla coltre arenizzata e, allo stesso modo di quest'ultima, idrogeologicamente qualificate.

A letto della descritta coltre arenizzata si rinvencono, come detto, i granitoidi ercinici, caratterizzati, nella banda episuperficiale, da stadi diversificati di disfacimento fisico-chimico e di fratturazione, quest'ultima accentuata per spessori compresi tra qualche metro ed alcuni

metri, mediamente dell'ordine di $4.00 \div 6.00$ metri, fino a massimi aggirantisi attorno alla decina di metri o poco più.

L'insieme dei descritti processi lascia configurare questa porzione alta del basamento cristallino quale acquifero permeabile per fratturazione secondaria.

Il valore del coefficiente di permeabilità è influenzato dalla maggiore o minore presenza delle fratture dei prodotti del processo di caolinizzazione, per cui il campo di variabilità di k è in genere compreso tra $10^{-6} < k < 10^{-8}$ m/s, fino a $k = 10^{-9}$ m/s, quindi tra “**basso**” e “**molto basso**”.

A profondità maggiori le fratture diventano più rade e tendono a chiudersi per effetto della pressione litostatica; questo il motivo per cui in letteratura i complessi granitici vengono classificati come “impermeabili”, con $k > 10^{-9}$ m/s.

Solo nelle zone cataclastiche conseguenti alla presenza di corridoi tettonici di estensione regionale i complessi granitici possono assumere il ruolo di acquiferi significativi, sotto il profilo della continuità spaziale e della produttività e, quindi, della potenzialità di utilizzo per usi civili e/o industriali.

Nel bacino idrogeologico locale oggetto del presente studio non sono state rilevate, come già evidenziato nella *Sezione seconda* dedicata alla definizione del modello geologico e come in seguito meglio specificato, dislocazioni tettoniche atte a dar luogo ad acquiferi con le caratteristiche sopra citate, potendosi, invece ammettere una circolazione idrica in profondità, spazialmente discontinua, legata a circoscritte e locali reti di fratture interconnesse con l'acquifero principale.

L'argomento, qui anticipato per la definizione del bacino idrogeologico, verrà ripreso, documentato e discusso più avanti.

La sintetica rappresentazione dell'acquifero sopra illustrata consente di ritenere coincidenti e perfettamente sovrapposti lo spartiacque superficiale, proprio del bacino idrografico, e lo spartiacque sotterraneo, proprio del bacino idrogeologico.

Ne derivano tre importanti conseguenze.

A) La prima riguarda l'andamento della superficie piezometrica

Poiché la circolazione idrica sotterranea si svolge prevalentemente nella coltre arenizzata superficiale e nella sottostante banda fratturata del complesso granitoide, la piezometrica segue e si adatta alle caratteristiche della superficie topografica. La Fig. n.19 (Celico, 1986) rappresenta proprio questa specifica situazione.

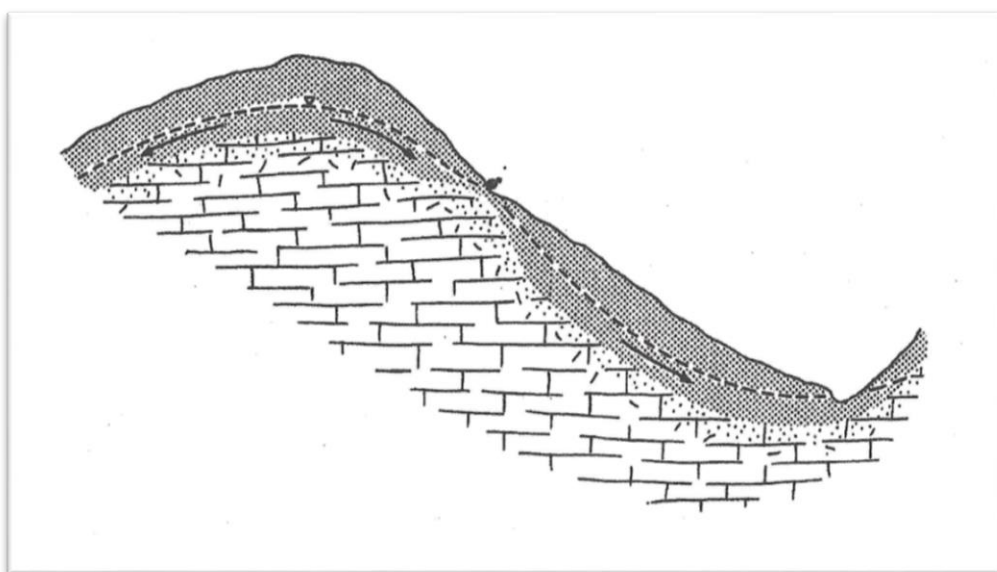


Fig. n.19 - Schema di circolazione idrica sotterranea in acquiferi granitici e coltre arenizzata di superficie.

La superficie piezometrica segue l'andamento della superficie Topografica (Celico, 1986)

B) La seconda riguarda l'estensione areale e i limiti del bacino idrogeologico

L'estensione areale del bacino idrogeologico è identico a quella del bacino idrografico di superficie, in quanto risultano coincidenti i rispettivi spartiacque che ne rappresentano anche i rispettivi limiti. La Fig. n. 20 (Celico, 2002) illustra il caso in esame con specifico riferimento agli acquiferi granitici.

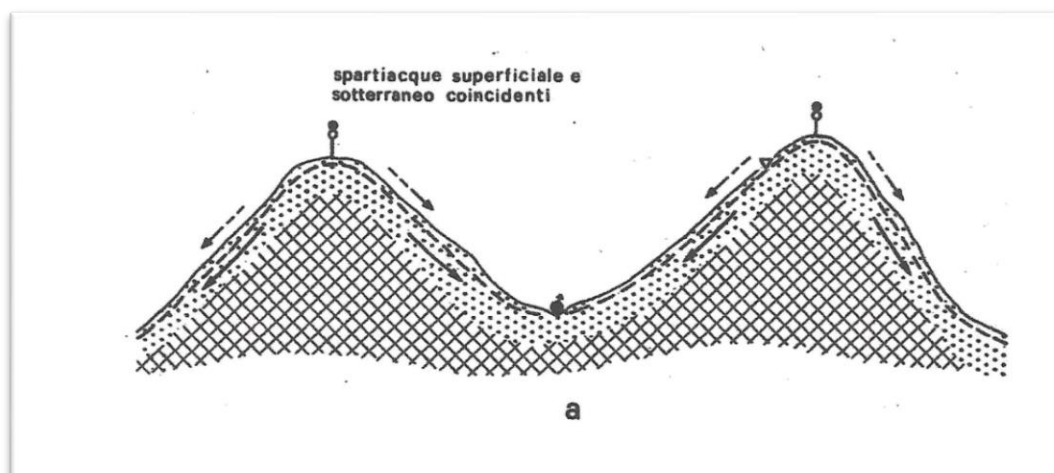


Fig. n. 20 – Rappresentazione schematica di bacino idrografico e bacino idrogeologico coincidenti in acquiferi granitici (Celico, 2002)

C) La terza riguarda la identificazione dell'acquifero e della relativa fonte di alimentazione

Il descritto bacino idrogeologico comprende per quanto sin qui detto, un sistema acquifero con limiti geometrici ben definiti, capaci di condizionare la circolazione idrica sotterranea fino ad impedire travasi idrici in entrata da bacini contigui.

Ne consegue che l'unica fonte di alimentazione del bacino idrogeologico e dell'acquifero che lo caratterizza è data dalle precipitazioni idrometeoriche zenitali. Lo schema riprodotto nella citata Fig. n.20 si adatta perfettamente al sito in studio.

Nel caso in esame, l'acquifero rientra tra quelli a permeabilità mista, essendo costituito dalla coltre arenizzata di superficie permeabile per porosità, con spessori medi generalmente dell'ordine di qualche metro, eccezionalmente eccedenti tali spessori fino a massimi di $8.00 \div 10.00$ metri, e dalla sottostante banda fratturata del complesso granitoide ercinico, per spessori medi generalmente compresi attorno ai $5.00 \div 8.00$ metri, con punte massime che si attestano intorno ai 10.0 metri circa; complessivamente lo spessore dell'acquifero è mediamente compreso entro i 10.00 metri, con massimi non frequenti mediamente attestanti attorno ad una quindicina di metri.

L'acquifero descritto è generalmente meglio caratterizzato, sotto il profilo della permeabilità, nella sua parte alta; verso il basso, invece, la componente argillosa, proveniente dalla coltre superficiale di disfacimento dei granitoidi, tende a riempire le fratture attenuandone progressivamente la capacità di percolazione e conseguentemente la trasmissività e la permeabilità; a profondità superiori entra in gioco la pressione litostatica che tende a chiudere completamente le fratture.

Qui la percolazione è possibile in soli due casi.

Nel primo caso, la percolazione è resa possibile dalla presenza delle fratture in rete che accompagnano i grandi corridoi tettonici di estensione regionale, come ad esempio le faglie di Olbia e Tavolara poste rispettivamente a nord e a sud del sito di Spirito Santo, che possono dar luogo ad una importante circolazione idrica sotterranea in ragione delle caratteristiche geometriche proprie delle fratture (lunghezza, spaziatura, apertura), della loro continuità ed interconnessione spaziale.

Il definito modello geologico di cui alla **Sezione seconda** esclude la presenza nel sito di Spirito Santo di faglie con tali caratteristiche e, di conseguenza, esclude anche la presenza di un acquifero continuo profondo costituito da un sistema tridimensionale di fratture, atto a dar luogo ad una vera e propria falda in rete con una zona di percolazione e una ben definita "**zona di saturazione**" (Custodio, Llamas, 1996) (Fig. n.21).

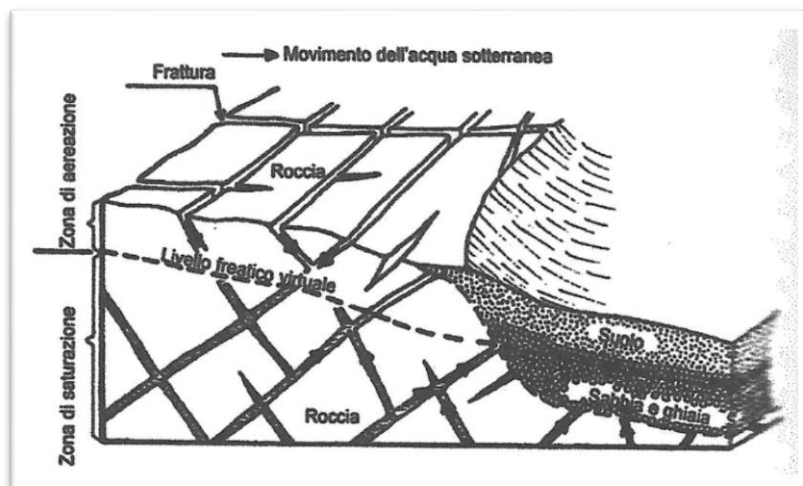


Fig. n.21 – Schema della circolazione dell'acqua sotterranea in una roccia fratturata

Il secondo caso si riferisce, invece, a locali fratture, caratterizzate da notevoli spazature e da lunghezze ed aperture contenute (fattori della permeabilità nei massicci granitoidi), che possono tuttavia costituire “**vie di percolazione**”, quando a mezzo di “**nodi**” (punti di intersezione delle fratture) e “**canali aperti**” (segmenti di fratture compresi tra due nodi) vengono a connettersi tra loro, con un’area di alimentazione e con un’area di recapito.

In tal caso si stabilisce una circolazione idrica spazialmente discontinua, perché costituita da isolate reti di fratture in un mezzo impermeabile, a grande scala definibile di tipo bidimensionale, caratterizzata perciò da portate modeste o molto modeste.

Questa tipologia di circolazione idrica sotterranea, sottesa dalla **teoria della percolazione** (N. Chabot, 1994), ripresa più avanti quando verrà definito il coefficiente di permeabilità k da prove in sito del mezzo roccioso fratturato, è quella che meglio esprime il sistema idrico sotterraneo del sito in esame.

8.2 I parametri idrogeologici caratterizzanti l’acquifero dalle sperimentazioni di campo e di laboratorio

Nel precedente punto 8.1 sono stati definiti il bacino idrografico ed il bacino idrogeologico e relativo acquifero; il primo approccio alla relativa caratterizzazione è stato condotto e sviluppato esclusivamente sulla base del modello geologico proposto nella *Sezione seconda*.

In questa sede la caratterizzazione dell’acquifero si avvarrà delle risultanze delle sperimentazioni di campo e di laboratorio eseguite, quali prove di emungimento, le prove di permeabilità, le prove RQD, le prove geofisiche, le analisi idrochimiche, i rilevamenti piezometrici.

I risultati di dette sperimentazioni saranno analizzati e trattati allo scopo di definire in generale i parametri distintivi della circolazione idrica sotterranea e, in particolare, i suoi aspetti quantitativi, le facies idrochimiche, i caratteri idrodinamici.

La rete di monitoraggio relativa alle acque sotterranee è al momento costituita da n.6 piezometri profondi, n.25 piezometri superficiali, oltre ad una sorgente e al pozzo MISE oggetto delle sole analisi fisico-chimiche.

I punti di monitoraggio sono riportati sulla allegata planimetria (Fig. 22) ed elencati con i dati caratteristici sulla tabella (Fig. n.23) a partire dall'angolo NW della planimetria ed a seguire in senso antiorario.

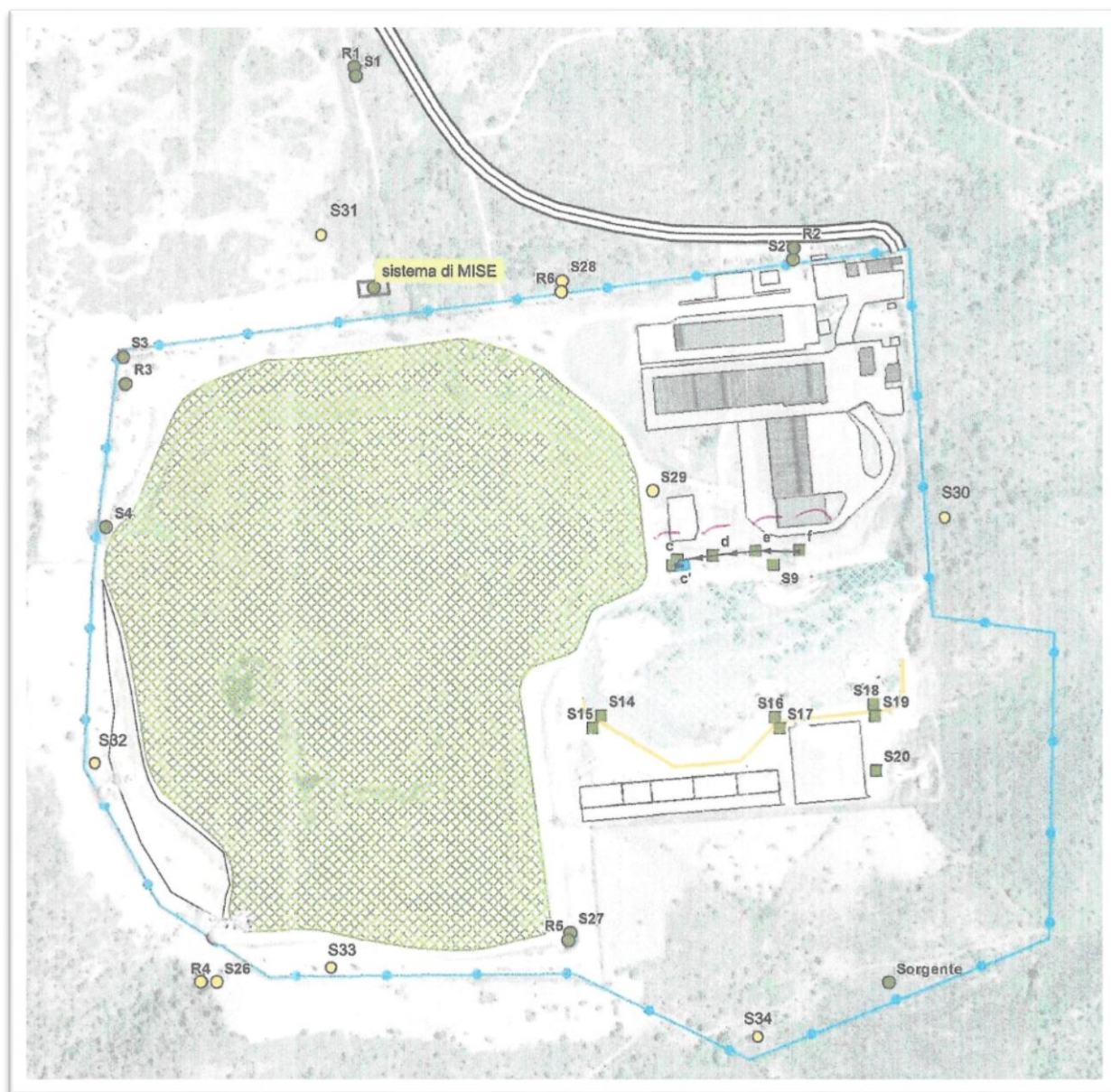


Fig. n.22 – Configurazione attuale della rete piezometrica

N.	Piezometri superficiali	Piezometri profondi	Lunghezza (m)	Quota b.p. (m/lm)	Quota p.c. (m/lm)	Posiz. Fenestr. (m)
1	S3		10.00	63.40		5.00-10.00
2		R3	80.00	64.00		69.00-77.00
3	S4		10.00	63.10		5.00-10.00
4	S32		10.00	76.58		0.50-10.00
5	S26		10.00	74.13		0.50-10.00
6		R4	97.00	73.90		31.50-97.00
7	S33		10.00	80.09		0.50-10.00
8	S27		10.00	70.50		5.00-10.00
9		R5	100.00	70.50		72.00-81.00
10	S34		10.00	75.28	75.10	0.50-10.00
11	Sorgente *					
12	S14		14.00			
13	S15		14.00			
14	S16		14.00			
15	S17		14.00			
16	S18		14.00			
17	S19		14.00			
18	S20		3.00			
19	S9		3.00			
20	C'		10.00			
21	D		10.00			
22	E		10.00			
23	F		10.00			
24	S29		10.00	49.34		0.50-10.00
25	S30		10.00	71.19		0.50-10.00
26	S2		7.00	40.80		3.00-7.00
27		R2	80.00	41.00		70.00-79.00
28	S28		10.00	50.96		0.50-10.00
29		R6	80.00	51.40		35.00-80.00
30	P. MISE *		4.00			1.00-4.00
31	S31		10.00	38.09		0.50-10.00
32	S1		5.00	29.60		2.00-5.00
33		R1	90.00	29.60		75.00-85.00

(*) Sorgente e pozzo MISE interessati solo dalle analisi fisico-chimiche

Fig. n.23 – Dati caratteristici piezometri rete attuale, elencati a partire dall'angolo NW della planimetria di Fig.n.22 e a seguire in senso antiorario

8.2.1 Le prove di emungimento – I Principali parametri idrogeologici

Secondo le prescrizioni del Piano Operativo sono state eseguite nel mese di maggio 2017, da SGM srl, prove di emungimento a gradini ed a portata costante sui piezometri all'uopo predisposti, la cui ubicazione è riportata sulla allegata planimetria (Fig.22); si evidenzia che i cluster R1-S1, R2-S2, R3-S3, R6-S28 sono tutti ubicati sul lato nord della piattaforma IPPC, mentre sul lato sud risultano ubicati i restanti cluster R4-S26, R5-S27.

Le prove a gradini sono state eseguite in data 4 e 5 maggio 2017 e sviluppate secondo le modalità riportate nella tabella che segue.

ID Cluster	Data di esecuzione	Gradino di portata	Portata applicata (mc/h)	Durata del gradino
Cluster R1-S1	04/05/2017	I° gradino	0,117	20 minuti
		II° gradino	0,126	30 minuti
		III° gradino	0,138	20 minuti
Cluster R2-S2	04/05/2017	I° gradino	0,1056	20 minuti
		II° gradino	0,120	30 minuti
		III° gradino	0,132	40 minuti
Cluster R3-S3	05/05/2017	I° gradino	0,036	20 minuti
		II° gradino	0,072	20 minuti
		III° gradino	0,120	60 minuti
Cluster R4-S26	05/05/2017	I° gradino	0,036	120 minuti
		II° gradino	/	/
		III° gradino	/	/
Cluster R5-S27	05/05/2017	I° gradino	0,072	60 minuti
		II° gradino	0,036	90 minuti
		III° gradino	/	/
Cluster R6-S28	04/05/2017	I° gradino	0,072	20 minuti
		II° gradino	0,138	20 minuti
		III° gradino	0,276	90 minuti

Le prove a portata costante sono state eseguite successivamente, precisamente dal 22 al 29 maggio 2017 secondo le modalità riportate nella tabella seguente.

ID piezometri	Data di esecuzione	Portata (mc/h)	Durata (minuti)
Cluster R1-S1	22/05/2017	0,102	300
Cluster R2-S2	23/05/2017	0,078	315
Cluster R3-S3	29/05/2017	0,042	315
Cluster R6-S28	23/05/2017	0,162	300

Le prove sono state eseguite sui piezometri profondi, adottando il piezometro superficiale immediatamente adiacente come piezometro ausiliario di controllo.

Nel corso delle prove, tuttavia, non sono state riscontrate variazioni piezometriche in detti piezometri.

Si evidenzia che nei piezometri R4 ed R5 non è stato possibile eseguire le programmate prove a portata costante a causa della ridottissima capacità di ricarica idrica riscontrate, già evidenziata peraltro nel corso delle prove gradini.

A fine maggio, infatti, a distanza di oltre 20 giorni dalla esecuzione della prove a gradini, condotta peraltro con portate molto ridotte, nei pozzi di prova i livelli piezometrici misurati erano ben lontani dal livello piezometrico originario.

8.2.1.1 Le prove condotte sul cluster R1-S1

Sul cluster R1-S1 sono state condotte una prova a gradini a portate crescenti ed una prova a portata costante.

Il piezometro R1 raggiunge una profondità di 90.00 metri dal p.c. ed il piezometro S1 si spinge, invece, fino a 5.00 m dal p.c.; entrambi sono collocati a N della piattaforma IPPC (v. planimetria di Fig. n.22).

Nel corso delle prove condotte sul piezometro profondo R1 non è stata riscontrata alcuna variazione piezometrica nell'adiacente piezometro di controllo S1.

A) Piezometro R1 – Prova a gradini in discesa e in risalita del 04/05/2017

Come si evince dalla allegata Fig. n.24, la prova è stata sviluppata su n.3 gradini di durata pari a 20, 30, 20 minuti e relative portate di 0.117, 0.126, 0.138 m³/h.

Considerate le anomalie di ricarica del pozzo evidenziate sui grafici di prova relativa al secondo gradino, è teoricamente possibile limitare l'analisi della prova alla sola ricerca della trasmissività T, utilizzando i dati di prova relativi al primo gradino, in quanto la bassa portata impiegata ($Q = 0.117 \text{ m}^3/\text{h}$) può ammettere linearità tra pompaggio e abbassamenti ($s = 2.00 \text{ m}$) e, quindi, una possibile assimilazione ad una prova a portata costante in regime stazionario, valida, per il caso in esame, per falde confinate e libere.

Secondo la relazione di Thiem-Dupuit, la trasmissività T è data da

$$T = Q_c / 2.73 \cdot \log R/r / \Delta h_c$$

Ed essendo secondo Logan (1964), in condizioni medie, $\log R/r \approx 3.33$, per aree idrogeologicamente omogenee, come nel caso in esame, la precedente relazione di Dupuit diventa $T = 1.22 Q_s$ ed essendo $Q = 0.117 \text{ m}^3/\text{h}$ ed $s = 2.00 \text{ m}$, si ha:

$$T = 1.71 \text{ m}^2/\text{die}$$

Ai fini della qualificazione dell'acquifero e delle singole fratture che lo costituiscono e ne determinano - ciascuna in maniera diversificata - la potenzialità, questo primo risultato può già fornire utili indicazioni ed orientamenti.

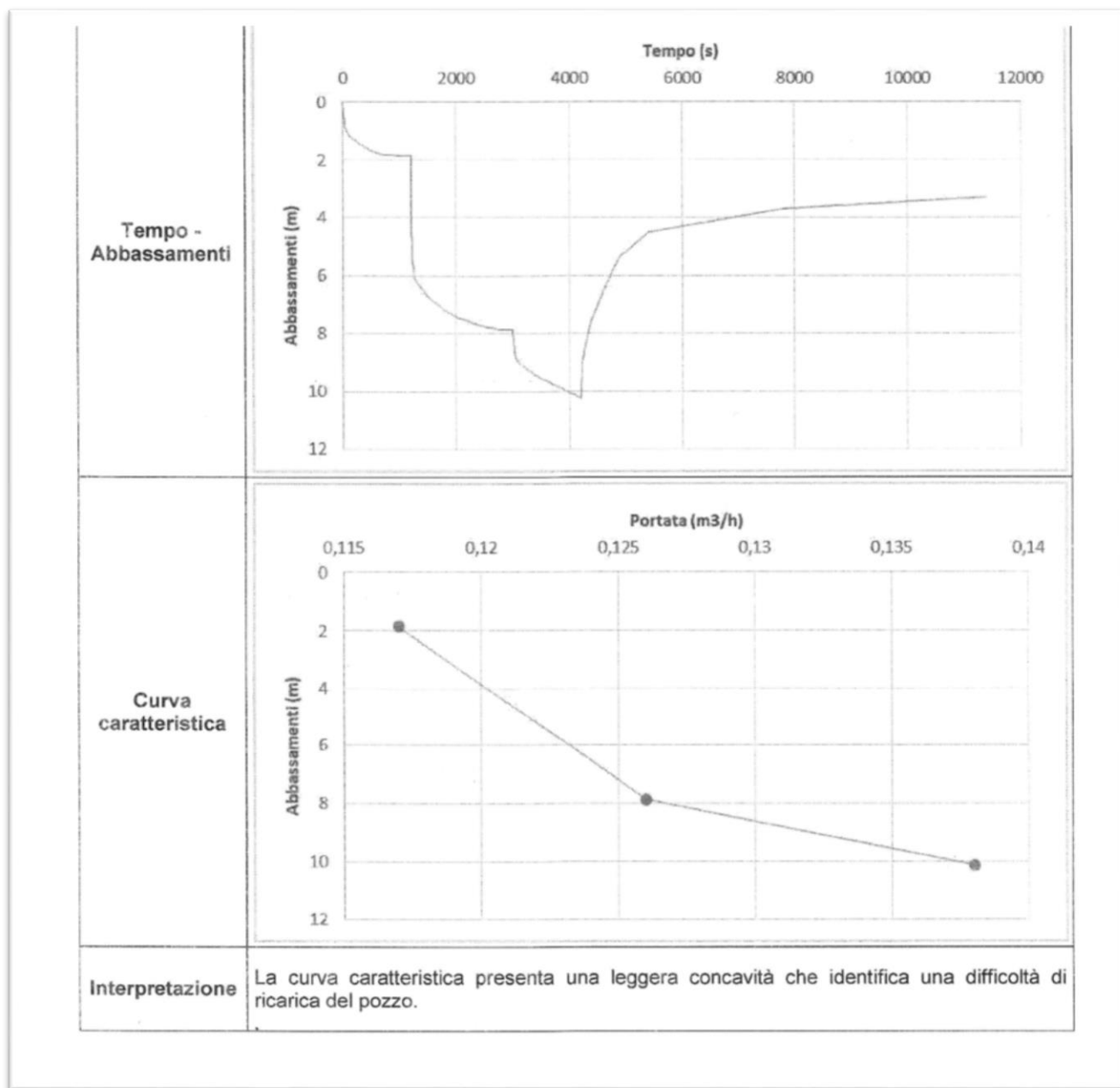


Fig. n. 24 – Risultati della prova a gradini – Piezometro R1

Seguendo la classificazione di Krasny (1993), questo valore di $T = 1.71 \text{ m}^2/\text{die}$ è posto al limite tra la quarta e la quinta classe rispettivamente descritte come “**magnitudo**” “**bassa**” e “**molto bassa**”, a cui corrispondono “**potenzialità di uso della falda**” comprese tra “**limitati approvvigionamenti locali**” e “**non idoneità ad approvvigionamenti neanche locali**”.

In sintesi questo primo risultato, in perfetto accordo con quanto riportato nei *report* delle perforazioni circa la carenza di alimentazione idrica riscontrata anche nella fase di spurgo, consente già di evidenziare la modestia della circolazione idrica sotterranea, che appare condizionata dalle caratteristiche geometriche e idrauliche di ciascuna frattura, dalle interconnessioni reciproche e con l'area di alimentazione.

Proviamo, nonostante la difficoltà di alimentazione del pozzo riscontrata nel corso del secondo gradino di prova, a calcolare T mediando le portate dei tre gradini di prova in quanto caratterizzate da valori tra loro poco differenziati (le tre portate sono pari rispettivamente a 1.92 l/min, 2.10 l/min, 2.28 l/min e la loro media è pari a 2.10 l/min) e considerando l'intero abbassamento misurato nel corso dell'intera prova, pari a 10.00 m, ottenendo in definitiva:

$$T = 0.368 \text{ m}^2/\text{die}$$

La trasmissività T è stata ottenuta con la stessa relazione ricavata in precedenza dalla elaborazione della notazione di Dupuit, applicabile ad aree idrogeologicamente omogenee, con modeste approssimazioni adattabile a falde libere ed artesiane, e, date le basse portate impiegate, ad un regime assimilabile a quello stazionario.

In questo caso la trasmissività T appare sottostimata proprio a causa dell'anomalia di ricarica riscontrata nel corso del secondo gradino di prova che ha dato luogo ad un abbassamento eccessivo, complessivamente non compatibile con le caratteristiche dell'acquifero, come dimostrano i risultati ottenuti, sullo stesso piezometro R1 con la prova a portata costante di seguito analizzata.

E' possibile formulare una osservazione conclusiva dall'analisi di questa prima prova di emungimento, attinente alla quantificazione della produttività della falda che appare comunque povera, poiché la trasmissività T, indipendentemente dal fatto che sia leggermente sovrastimata o sottostimata, è caratterizzata da valori bassi attribuibili in ogni caso ad una circolazione idrica quantitativamente povera, che ne limita o ne impedisce del tutto usi finalizzati ad approvvigionamenti.

B) Piezometro R1 – Prova a portata costante in discesa e in risalita del 22/05/2017

La prova è stata condotta con emungimento a portata costante pari a $Q = 0.102 \text{ m}^3/\text{h}$ e per un tempo $t = 300$ minuti.

I dislivelli sono stati misurati in discesa e in risalita e riportati nell'allegato diagramma tempo-abbassamenti (Fig. n.25).

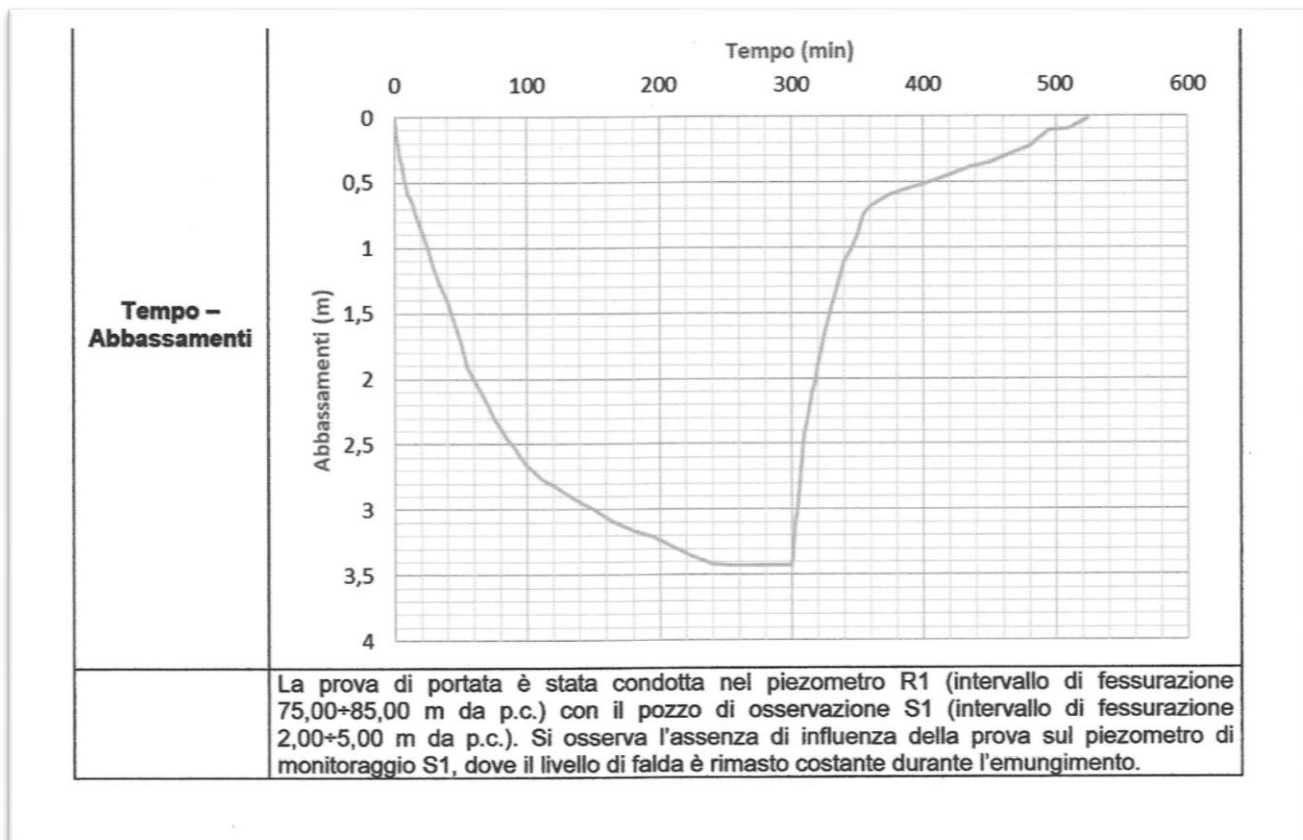


Fig. n. 25 – Risultati della prova a portata costante – Piezometro R1

La prova è da ritenersi eseguita su pozzo singolo in quanto il limitrofo piezometro di controllo S1 risultava prosciugato alla data della prova.

Per ottenere il valore della trasmissività T direttamente dal pozzo di prova con esclusione, quindi, del piezometro di controllo, è possibile far ricorso alla approssimazione logaritmica della relazione di Theis come sviluppata da Cooper-Jacob.

Partendo dalla relazione Cooper-Jacob, secondo cui $\Delta = (0.183Q/T) \log (2.25 T t/r^2 S)$, ponendo:

$$\Delta' = \Delta - \Delta_R, \text{ in cui:}$$

$$\Delta = (0.183Q/T) \log (2.25 T t/r^2 S)$$

$$\Delta_R = (0.183Q/T) \log (2.25 T t_R/r^2 S), \text{ si ha:}$$

$$\Delta' = (0.183Q/T) \log (t/t_R)$$

e risolvendo in T si ha:

$$T = 0.183 Q \cdot \log (t/t_R)/\Delta', \text{ in cui:}$$

$$T = \text{trasmissività (m}^2/\text{sec)}$$

$$Q = \text{portata a pompaggio costante (m}^3/\text{sec)}$$

$$t = \text{durata ciclo discesa-risalita (sec)}$$

$$t_R = \text{durata ciclo di risalita (sec)}$$

$$\Delta = \text{abbassamento in discesa (m)}$$

$$\Delta_R = \text{dislivello guadagnato in risalita (m)}$$

$$\Delta' = \text{dislivello residuo in risalita (m)}$$

Ponendo, pertanto:

$$Q = 0.102 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$t = 500 \text{ min}$$

$$t_R = 200 \text{ min}$$

$$\Delta' = 0.10 \text{ m}$$

dalla relazione Jacob-Cooper sopra richiamata, si ha:

$$T = 0.183 Q \log (t/t_R)/\Delta' = 1.783 \text{ m}^2/\text{die}$$

Il valore qui ottenuto dalla trasmissività $T = 1.783 \text{ m}^2/\text{die}$ è, con riferimento alla precedente prova a gradini, assimilabile al valore di T della prima analisi ($T = 1.71 \text{ m}^2/\text{die}$) e risulta, come previsto, superiore al valore sottostimato della seconda analisi ($T = 0.368 \text{ m}^2/\text{die}$), a causa del rilevato difetto di alimentazione idrica del secondo gradino.

Risultando i primi due valori di T correlabili, in quanto compresi nello stesso ordine di grandezza e di poco discosti in valore assoluto, valgono anche per la prova a portata costante le medesime considerazioni già svolte per la prova a gradini, circa il modesto valore assunto dalla trasmissività T , tipico di **alimentazione molto povera**, con portate locali sicuramente variabili ma, in ogni caso, con potenzialità poco apprezzabili anche con riferimento ai soli limitati approvvigionamenti locali.

Si approccia il calcolo del coefficiente di permeabilità k facendo ricorso alla relazione di Dupuit, adattandola al caso in esame, preliminarmente osservando che la stessa può essere utilizzata anche nel solo pozzo di pompaggio in luogo dei due piezometri di controllo richiesti e, come da letteratura consolidata, assumendo per le distanze pozzo-piezometri il raggio del pozzo di pompaggio “ r ” e per il raggio di influenza “ R ” del pozzo di pompaggio un valore fittizio, data la scarsa incidenza esercitata da “ R ” nella relazione di Dupuit (Celico, 1990).

Pertanto, la relazione così adattata è la seguente:

$$k = 2.3 Q \log (R/r) / \pi s^2$$

ove

$$Q = 0.102 \text{ m}^3/\text{h} = 0.0000283 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$R = 100 \text{ m}$$

$$r = 0.125 \text{ m}$$

$$s = 3.30 \text{ m}$$

per cui si ha:

$$k = 0.0000055 = 5.5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

Si osserva per inciso che anche raddoppiando o dimezzando il valore fittizio di R , ponendo cioè $R = 200 \text{ m}$ o $R = 50 \text{ m}$, k conserva lo stesso ordine di grandezza, variando

solo di pochissimo in valore assoluto, risultando nei due casi $k = 6.1 \cdot 10^{-6}$ m/s e $k = 5.0 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Commentando il valore del coefficiente di permeabilità ottenuto come sopra, da classificarsi comunque “**basso**”, si ritiene lo stesso compatibile con il quadro fessurativo in profondità del complesso granitoide, sottolineando, inoltre, come tale valore attiene esclusivamente alla frattura o alla limitata rete di fratture intercettata dal piezometro e perciò caratterizzante solo un locale e modesto volume di roccia.

L’argomento sarà ripreso e approfondito più avanti a conclusione delle analisi delle prove di emungimento.

8.2.1.2 Le prove condotte sul cluster R2-S2

Sul cluster R2-S2 sono state condotte una prova a gradini a portata crescente ed una prova a portata costante.

Il piezometro R2 raggiunge una profondità di 80.00 m dal p.c. ed il piezometro S2 si spinge, invece, fino a 7.00 m dal p.c.

Entrambi sono collocati a N della piattaforma IPPC (V. planimetria di Fig. n.22), nei pressi dell’angolo NE.

Nel corso delle prove condotte sul piezometro profondo R2 non è stata riscontrata alcuna variazione piezometrica nell’adiacente piezometro di controllo S2.

A) Piezometro R2 – Prova a gradini in discesa e in risalita del 04/05/2017

Come si evince dalla allegata Fig.n.26, la prova è stata sviluppata su n.3 gradini di durata pari a 20, 30, 40 minuti con relative portate di 0.1056, 0.120, 0.132 m³/h.

La prova consente di ottenere la curva caratteristica su diagramma portata-abbassamenti, da cui si traggono:

- la portata critica pari a $Q_c = 0.120$ m³/h = 2.00 l/min
- la portata di esercizio pari a $Q_e \approx 1.4$ l/min
- la qualificazione idrodinamica dell’acquifero che risulta essere di tipo “libero”.

L'esame comparato delle due curve consente di classificare l'acquifero libero come molto povero sotto il profilo della produttività, considerando che a fronte di portate emunte molto basse (per i tre gradini rispettivamente pari a 1.76 – 2.00 – 2.22 litri per minuto) è stato registrato un abbassamento notevole pari a circa 11.00 metri, particolarmente accentuato nell'ultimo gradino nel corso del quale si è operato con una portata di poco superiore.

L'esame della curva di risalita conferma la sopra configurata povertà della falda, poiché il suo quasi planare andamento si protrae per oltre 4 ore dalla fine del pompaggio, con un guadagno in risalita di soli 2.00 m sul complessivo abbassamento di 11.00 metri.

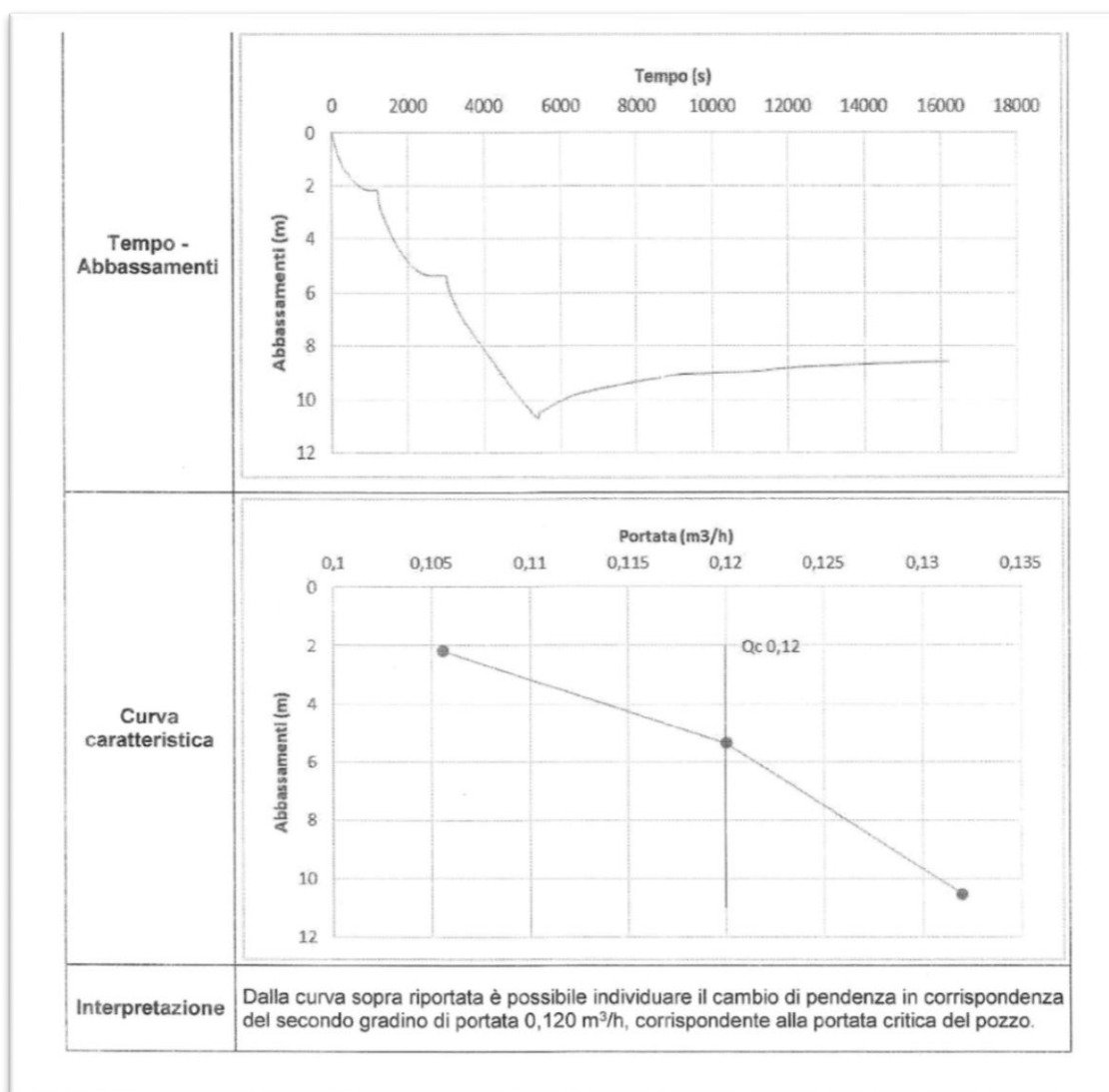


Fig. n. 26 – Risultati della prova a gradini – Piezometro R2

Piezometro R2 – Prova a portata costante in discesa e in risalita del 23/05/2017

La prova è stata condotta con un emungimento a portata costante pari a $Q = 0.078 \text{ m}^3/\text{h}$ e per un tempo $t = 315$ minuti.

I dislivelli sono stati misurati in discesa e in risalita e riportati sull'allegato diagramma tempo-abbassamenti (Fig. n.27).

La prova è da ritenersi eseguita su pozzo singolo, in quanto nel limitrofo piezometro di controllo S2 non è stata riscontrata alcuna variazione piezometrica nel corso della prova.

Si ricerca, quindi, il valore della trasmissività T direttamente dal pozzo di prova, facendo ricorso alla approssimazione logaritmica della relazione Cooper-Jacob, come sviluppata nel precedente paragrafo, e traendo i parametri necessari dal diagramma di prova.

Pertanto si ha:

$$T = 0.183 Q \log (t/t_R)/\Delta'$$

in cui

$$Q = 0.078 \text{ m}^3/\text{h} = 0.0013 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$t = 660 \text{ min}$$

$$t_R = 360 \text{ min}$$

$$\Delta' = 2.40 \text{ m}$$

ottenendo:

$$T = 0.0000261 \text{ m}^2/\text{min} = 0.0376 \text{ m}^2/\text{die}$$

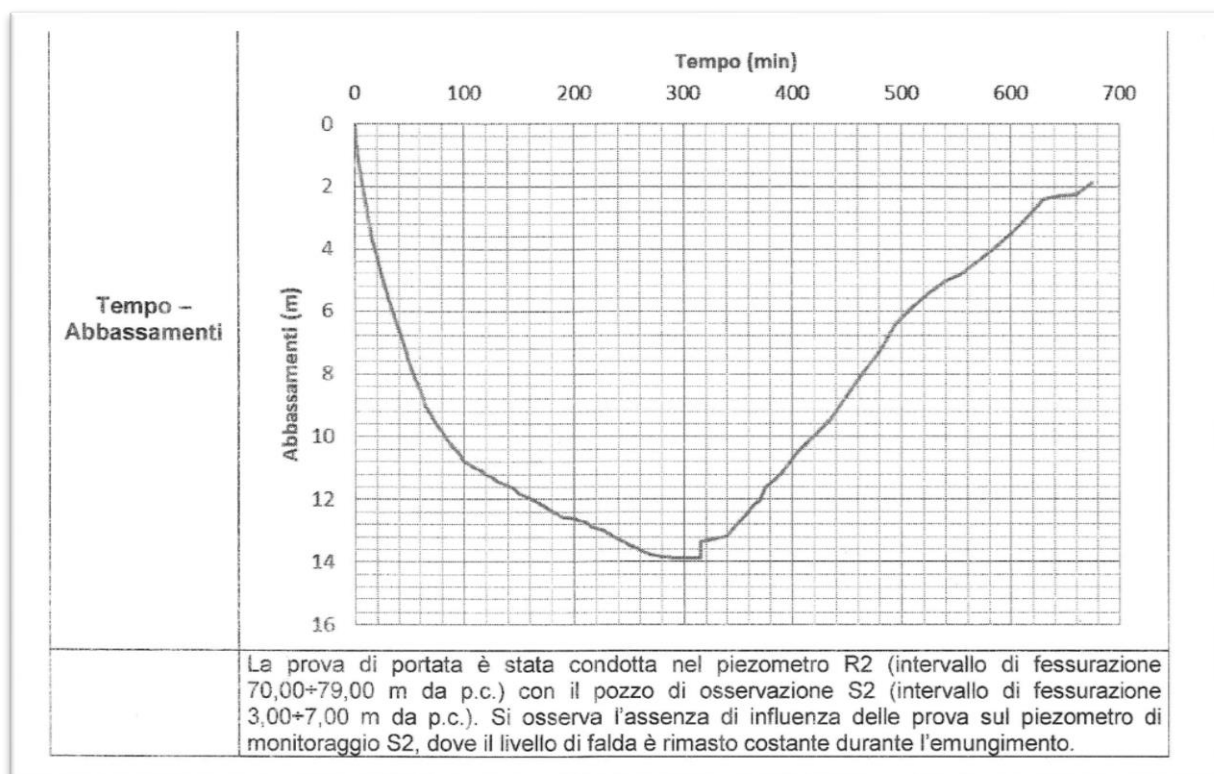


Fig. n. 27 – Risultati della prova a portata costante – Piezometro R2

L'estrema povertà della capacità produttiva delle fratture locali (trattandosi di acquifero discontinuo la cui capacità produttiva è legata esclusivamente alla capacità idraulica delle fratture intercettate localmente dal piezometro), già preannunciata dalle precedenti calcolazioni, è in questa sede ulteriormente confermata.

La trasmissività ottenuta T rientra nella VI classe di "magnitudo" secondo Krasny, classificata come "**impercettibile**" con potenzialità della falda in relazione agli usi "**non idonea per alcun tipo di approvvigionamento**".

Si approssima il calcolo del coefficiente di permeabilità k facendo ricorso alla relazione di Dupuit con le limitazioni e gli adattamenti esposti in precedenza.

La relazione, pertanto, è la seguente:

$$k = 2.3 Q \log (R/r) / \pi s^2$$

ove

$$Q = 0.078 \text{ m}^3/\text{h} = 0.0000217 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$R = 100 \text{ m}$$

$$r = 0.125 \text{ m}$$

$$s = 14 \text{ m}$$

per cui si ha:

$$\mathbf{k = 2.0 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}}$$

Il valore di k ottenuto come sopra qualifica la rete locale di fratture a permeabilità bassa, coerente con gli altri parametri idrogeologici ottenuti e con il quadro fessurativo in profondità del complesso granitoide in oggetto.

8.2.1.3 Le prove condotte sul cluster R3-S3

Sul cluster R3-S3 sono state condotte una prova a gradini ed una prova a portata costante.

Il piezometro R3 raggiunge una profondità di 80.00 m dal p.c. ed il piezometro S3 si spinge, invece, a 10.00 m dal p.c.; entrambi sono collocati a N della piattaforma IPPC (v. planimetria di Fig. n.22), nei pressi dell'angolo NW.

Nessuna variazione piezometrica è stata riscontrata nel corso della prova sull'adiacente piezometro di controllo S3.

A) Piezometro R3 – Prova a gradini in discesa e in risalita del 05/05/2017

La prova, come si rileva dagli allegati diagrammi di Fig.n.28, è stata condotta su n.3 gradini di durata pari a 20, 20, 60 minuti con relative portate pari a 0.036, 0.072, 0.120 m³/h.

Dalla curva caratteristica del diagramma portata-abbassamenti si traggono:

- la portata critica pari a $Q_c = 0.072 \text{ m}^3/\text{h}$
- la portata di esercizio pari a $Q_e \approx 0.05 \text{ m}^3/\text{h}$
- la qualificazione idrodinamica dell'acquifero che risulta essere di tipo "**libero**".

L'esame delle due curve consente di qualificare l'acquifero in esame come molto povero sotto l'aspetto della produttività, considerando che a fronte di portate emunte molto contenute (per i tre gradini rispettivamente pari a 0.6 – 1.2 – 2.0 litri per minuto) è stato registrato un abbassamento di circa 25.00 m, di cui ben 15 m registrati nel terzo gradino con una evidente e grave difficoltà di ricarica.

L'esame della curva di risalita conferma la sopra configurata povertà della circolazione in frattura, in quanto a poco meno di 5 ore dalla fine del pompaggio si registra un guadagno in risalita di soli 2.00 m sul complessivo abbassamento di 25.00 m.

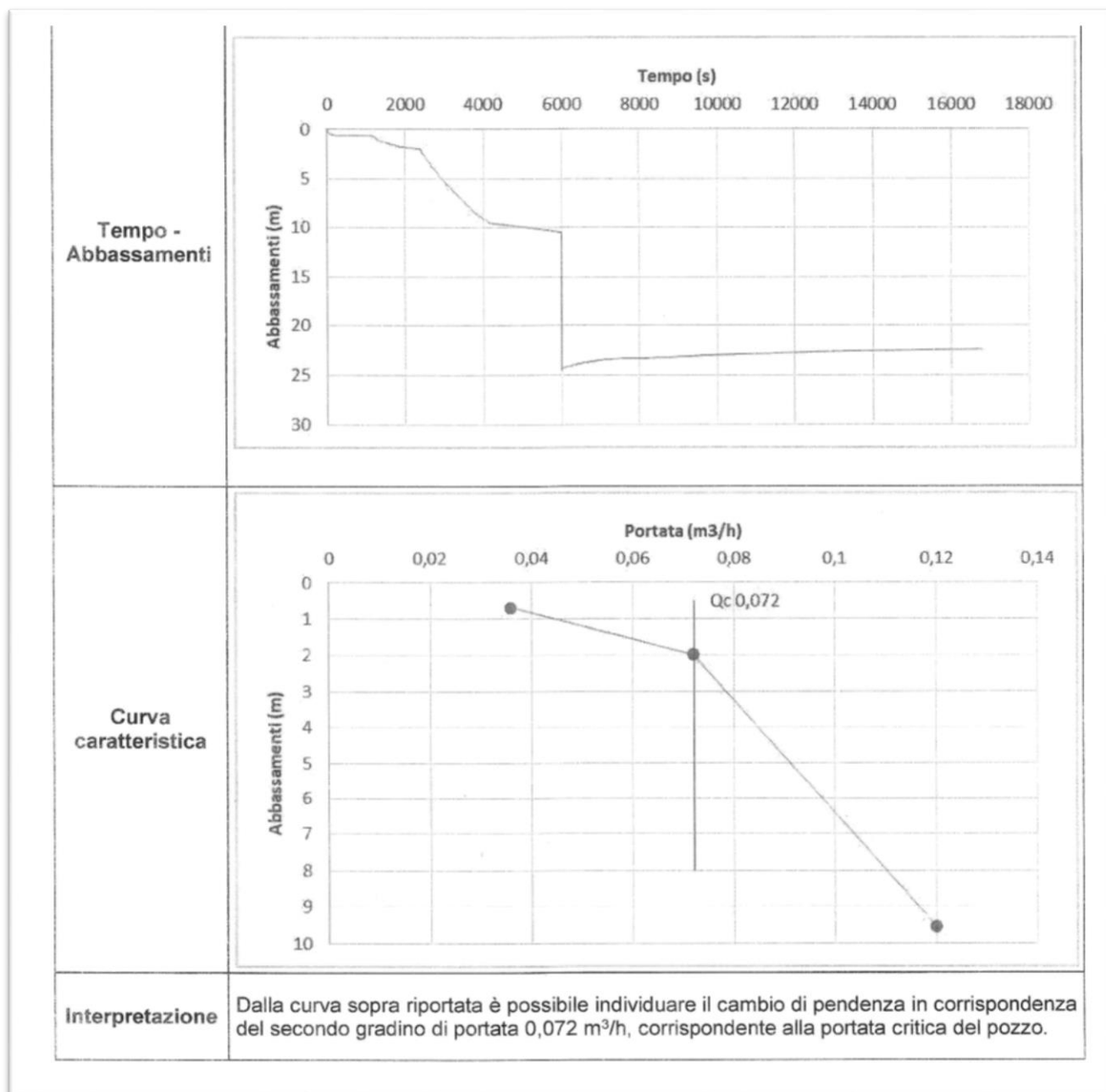


Fig. n. 28 – Risultati della prova a gradini – Piezometro R3

B) Piezometro R3 – Prova a portata costante in discesa e in risalita del 29/05/2017

La prova è stata condotta con un emungimento a portata costante pari a $Q = 0.042 \text{ m}^3/\text{h}$ e per un tempo $t = 300$ minuti.

I dislivelli sono stati misurati in discesa e in risalita e riportati sull'allegato diagramma tempo-abbassamenti (Fig. n.29).

La prova è da ritenersi eseguita su pozzo singolo, in quanto nel limitrofo piezometro di controllo S3 non è stata riscontrata alcuna variazione piezometrica nel corso della prova.

Si ricerca, quindi, il valore della trasmissività T direttamente dal pozzo di prova, facendo ricorso alla approssimazione logaritmica della relazione Cooper-Jacob, come sviluppata nel precedente paragrafo, e traendo i parametri necessari dal diagramma di prova.

Pertanto si ha:

$$T = 0.183 Q \log (t/t_R)/\Delta'$$

in cui

$$Q = 0.042 \text{ m}^3/\text{h} = 0.0007 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$t = 800 \text{ min}$$

$$t_R = 500 \text{ min}$$

$$\Delta' = 6.20 \text{ m}$$

ottenendo:

$$T = 0.0000042 \text{ m}^2/\text{min} = 0.006 \text{ m}^2/\text{die}$$

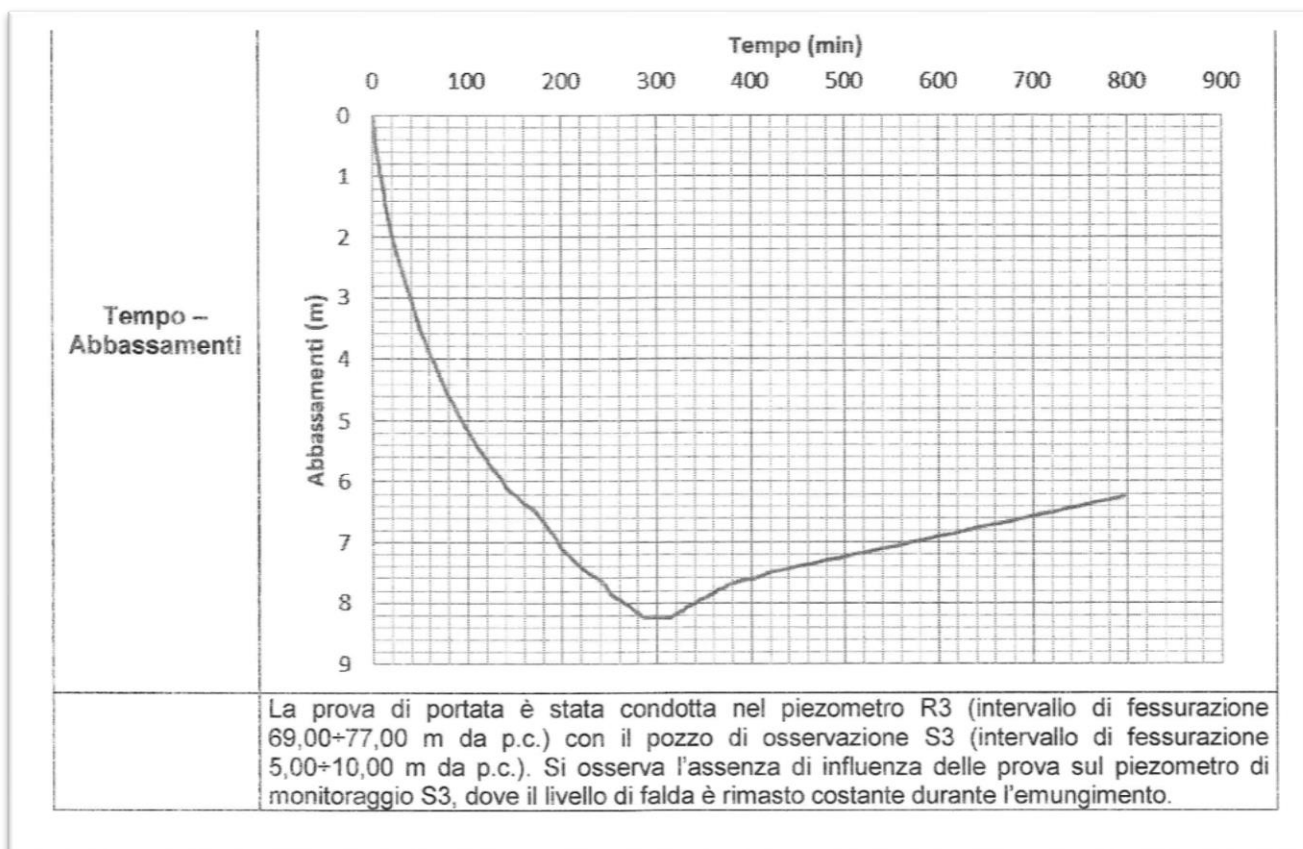


Fig. n.29 – Risultati della prova a portata costante – Piezometro R3

La capacità produttiva delle fratture intercettate dal piezometro è quasi nulla; in questa prova si trova ulteriore e definitiva conferma dell'analisi condotta con le prove a gradini.

La trasmissività ottenuta T rientra nella VI classe di "magnitudo" secondo Krasny, da classificarsi come assolutamente "**impercettibile**" con potenzialità d'uso della falda "**non idonea per alcun tipo di approvvigionamento**".

Il calcolo del coefficiente di permeabilità k viene condotto con riferimento alla relazione di Dupuit con le limitazioni e gli adattamenti discussi in precedenza.

La relazione, pertanto, è la seguente:

$$k = 2.3 Q \log (R/r) / \pi s^2$$

ove

$$Q = 0.042 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$R = 100 \text{ m}$$

$$r = 0.125 \text{ m}$$

$$s = 8.40 \text{ m}$$

per cui si ha:

$$\mathbf{k = 4.0 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}}$$

Il basso valore di k ottenuto è proprio della rete di fratture locali a risposta idraulica molto modesta e risulta coerente con tutti i parametri idrogeologici ottenuti, indicanti una alimentazione e, conseguenzialmente, una ricarica molto esigua.

8.2.1.4 Le prove condotte sul cluster R4-S26 del 05/05/2017

Sul cluster R4-S26 è stata condotta la prova a gradini, limitata peraltro al solo primo gradino per le evidenti difficoltà nella ricarica idrica.

Il piezometro R4 raggiunge una profondità di 97.00 m dal p.c. ed il limitrofo piezometro di controllo S26 raggiunge i 10.00 m dal p.c.; il cluster è posizionato (v. planimetria di Fig. n.22) sul confine posto a sud della piattaforma IPPC e precisamente nell'angolo SW.

La prova a gradini, avviata con l'esigua portata di soli 0.036 m³/h, non ha dato luogo ad alcuna stabilizzazione, raggiungendo dopo 2 ore di emungimento un abbassamento di 2.6 m (v. diagramma tempi-abbassamenti di Fig. n.30).

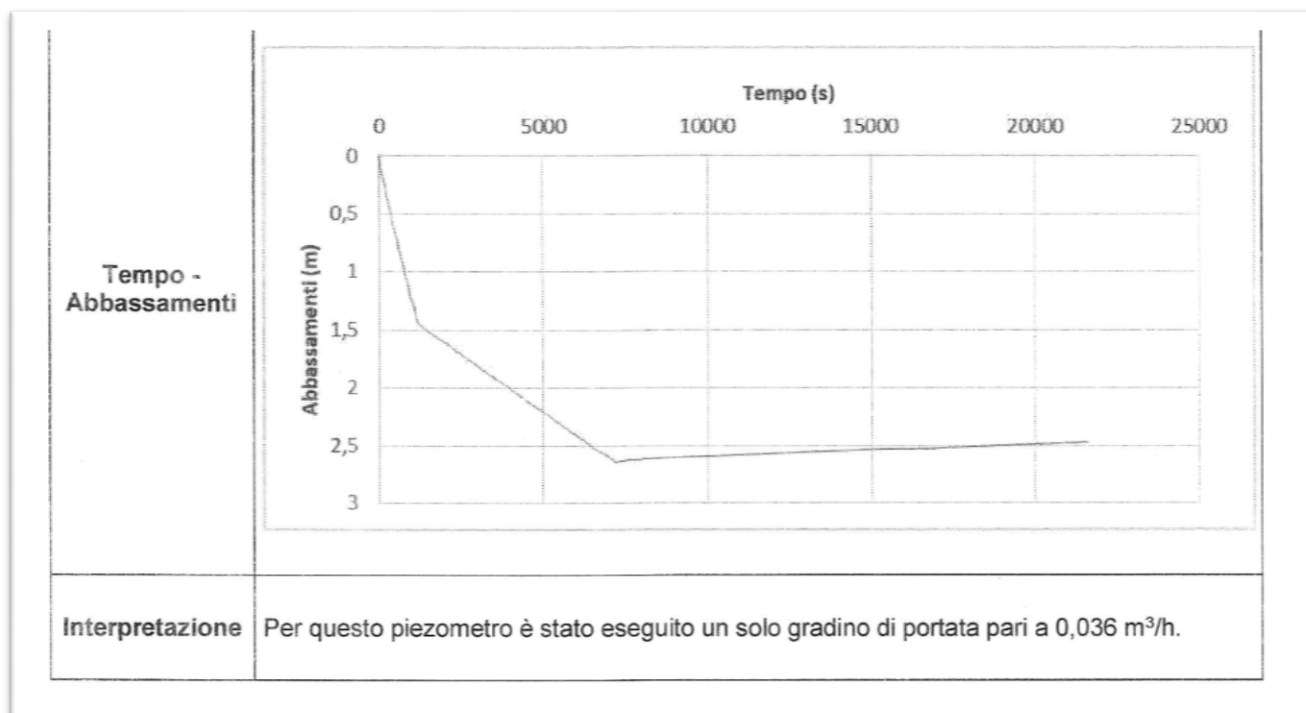


Fig. n.30 – Risultati della prova a gradini – Piezometro R4

La riprova della scarsa capacità di ricarica si riscontra nella curva di risalita, la quale a circa 4 ore dalla fine dell'emungimento, conserva un andamento planare, guadagnando in risalita solo 10 cm.

Il pozzo, in definitiva, può ritenersi sostanzialmente sterile.

8.2.1.5 Le prove condotte sul cluster R5-S27 del 05/05/2017

Sul cluster R5-S27 è stata condotta la prova a gradini, limitata peraltro ai soli primi due gradini per le evidenti difficoltà nella ricarica idrica.

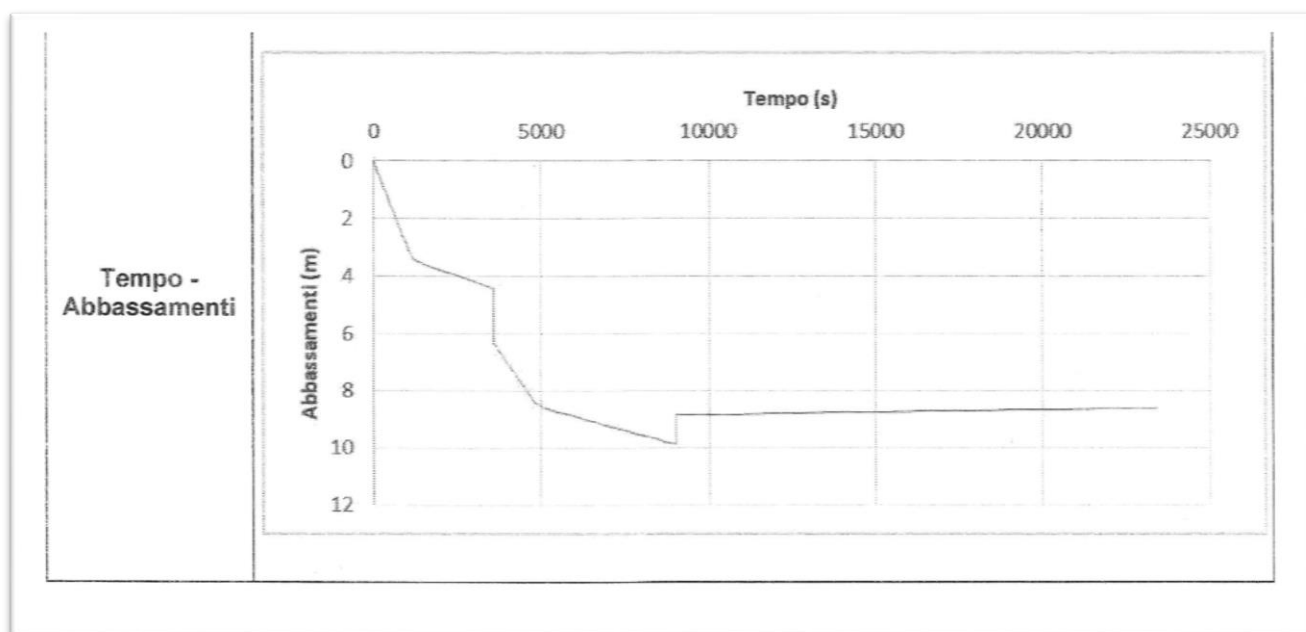
Il piezometro R5 raggiunge una profondità di 100.00 m dal p.c. mentre l'adiacente piezometro di controllo S27 raggiunge i 10.00 m di profondità; il cluster è posizionato sul lato sud della piattaforma IPPC, all'incirca in posizione mediana.

La prova a gradini, avviata con la modesta portata di soli $0.072 \text{ m}^3/\text{h}$, ha dato immediati segni di difficoltà di alimentazione idrica non pervenendo, dopo due ore di emungimento e 4.00 m di abbassamento, ad una posizione di stabilizzazione.

Al secondo gradino si riduce la portata a $0.036 \text{ m}^3/\text{h}$ (procedura impropria ma finalizzata a testare la capacità dell'acquifero), non ottenendo comunque alcun segno di stabilizzazione dopo una ulteriore 1 ora e mezza di pompaggio e un abbassamento totale di 10.00 m (v. diagramma tempi-abbassamenti di Fig. n.31).

La curva di risalita conferma l'andamento planare dopo oltre 4 ore dal fermo pompa.

Anche in questo caso il pozzo è da ritenersi sostanzialmente sterile.



Interpretazione: per questo piezometro sono stati eseguiti due soli gradini di portata pari a $0.072 \text{ m}^3/\text{h}$ e $0.036 \text{ m}^3/\text{h}$.

Fig. n. 31 – Risultati della prova a gradini – Piezometro R5

8.2.1.6 Le prove condotte sul cluster R6-S28

Sul cluster R6-S28 sono state condotte una prova a gradini ed una prova a portata costante.

Il piezometro R6 raggiunge una profondità di 80.00 m dal p.c. e l'adiacente piezometro di controllo S28 raggiunge i 10.00 m dal p.c.; entrambi sono ubicati sul confine a N della piattaforma IPPC, all'incirca in posizione mediana (v. planimetria di Fig. n.22).

Nessuna variazione piezometrica è stata riscontrata nel corso della prova sul limitrofo piezometro di controllo S28.

A) Piezometro R6 – Prova a gradini in discesa e in risalita del 04/05/2017

La prova, come si rileva dagli allegati diagrammi di Fig.n.32, è stata condotta su n.3 gradini di durata pari a 20, 20, 90 minuti con relative portate pari a 0.072, 0.138, 0.276 m³/h.

Dalla curva caratteristica del diagramma portata-abbassamenti si traggono:

- la portata critica pari a $Q_c = 0.138 \text{ m}^3/\text{h}$
- la portata di esercizio pari a $Q_e \approx 1.6 \text{ l/min}$
- la qualificazione idrodinamica dell'acquifero che risulta essere di tipo "**libero**".

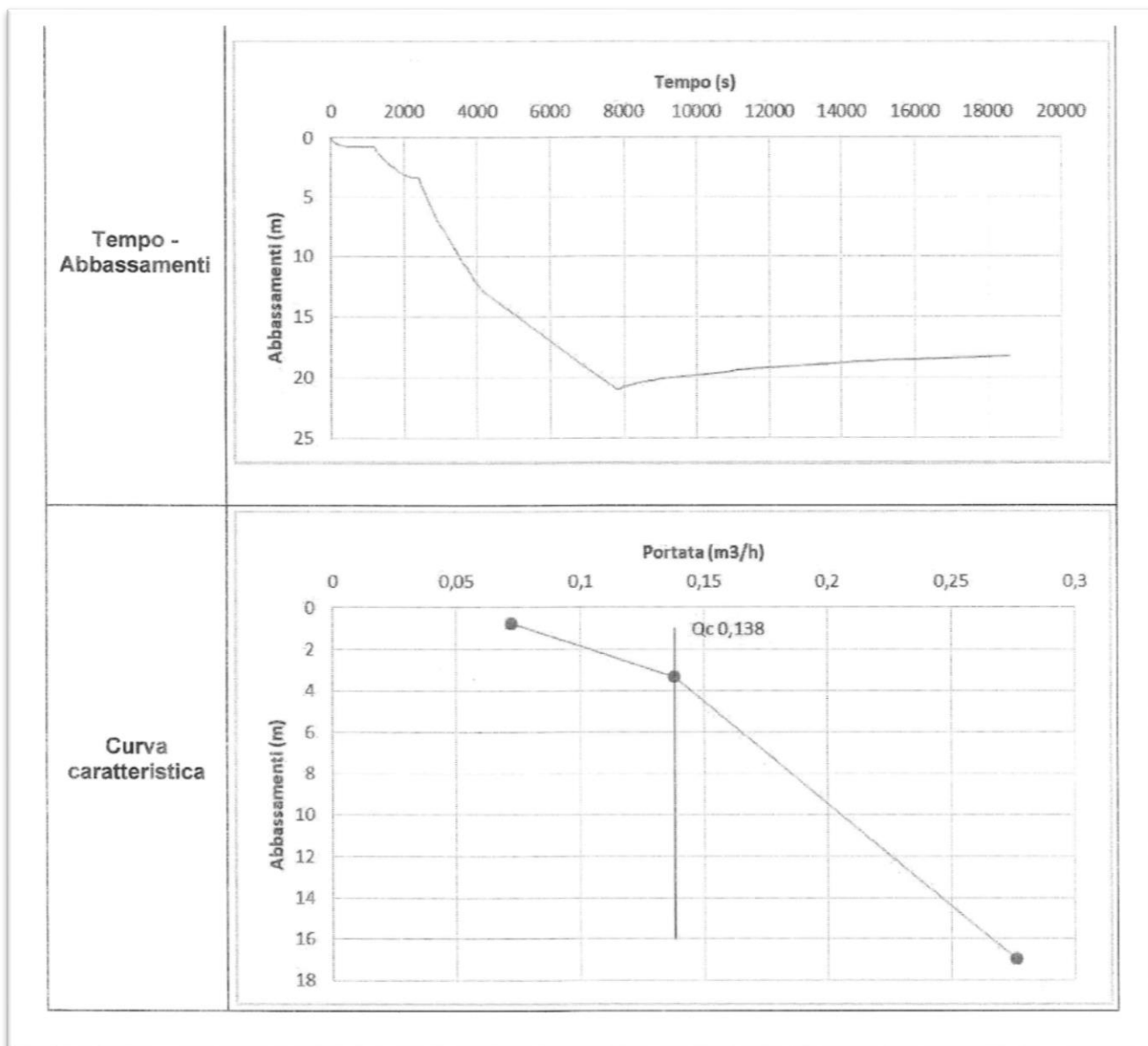


Fig. n.32 – Risultati della prova a gradini – Piezometro R6

B) Piezometro R6 – Prova a portata costante in discesa e in risalita del 23/05/2017

La prova è stata condotta con un emungimento a portata costante pari a $Q = 0.162 \text{ m}^3/\text{h}$ e per un tempo $t = 300$ minuti.

I dislivelli sono stati misurati in discesa e in risalita e riportati sull'allegato diagramma tempo-abbassamenti (Fig. n.33).

La prova è da ritenersi eseguita su pozzo singolo, in quanto nel limitrofo piezometro di controllo S28 non è stata riscontrata alcuna variazione piezometrica nel corso della prova.

Si ricerca, quindi, il valore della trasmissività T direttamente dal pozzo di prova, facendo ricorso alla approssimazione logaritmica della relazione Cooper-Jacob, come sviluppata nel precedente paragrafo, e traendo i parametri necessari dal diagramma di prova.

Pertanto si ha:

$$T = 0.183 Q \log (t/t_R)/\Delta'$$

in cui

$$Q = 0.162 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$t = 600 \text{ min}$$

$$t_R = 300 \text{ min}$$

$$\Delta' = 2.20 \text{ m}$$

ottenendo:

$$T = 0.0000676 \text{ m}^2/\text{min} = 0.097 \text{ m}^2/\text{die} \approx 0.1 \text{ m}^2/\text{die}$$

La capacità produttiva delle fratture intercettate dal piezometro è quasi nulla.

Infatti, la trasmissività ottenuta T ottenuta è posta quasi al limite tra la V e la VI classe di “magnitudo” secondo Krasny, rispettivamente classificate come “***molto bassa***” e “***impercettibile***”, a cui corrispondono rispettivamente le “***capacità di uso della falda***” come “***non idonea ad approvvigionamenti locali***” e “***non idonea ad approvvigionamenti***”.

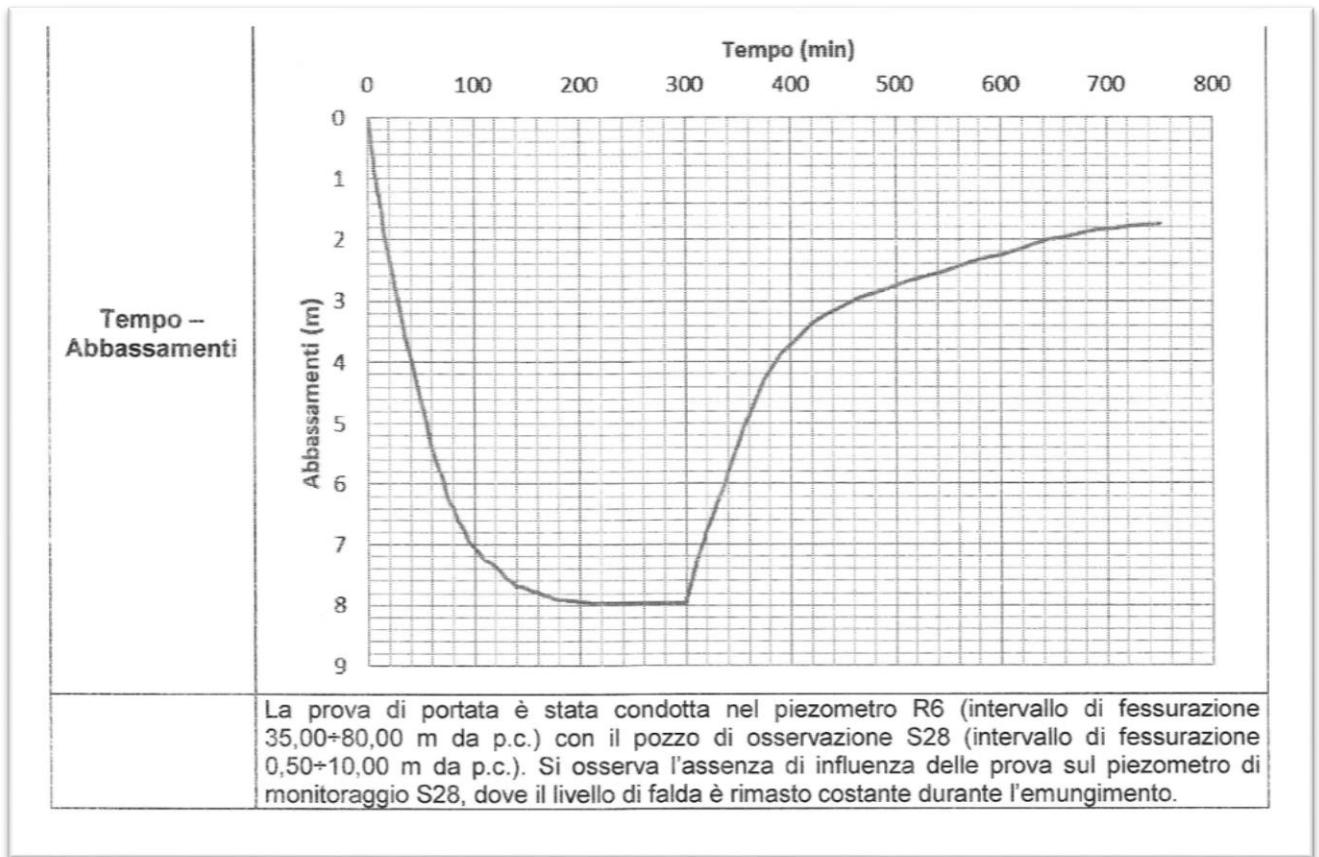


Fig. n.33 – Risultati della prova a portata costante – Piezometro R6

Il calcolo del coefficiente di permeabilità k viene condotto con riferimento alla relazione di Dupuit con le limitazioni e gli adattamenti discussi in precedenza.

La relazione, pertanto, è la seguente:

$$k = 2.3 Q \log (R/r) / \pi s^2$$

ove

$$Q = 0.162 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$R = 100 \text{ m}$$

$$r = 0.125 \text{ m}$$

$$s = 8.00 \text{ m}$$

per cui si ha:

$$k = 1.5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

Anche in questo caso si rileva coerenza tra il contenuto valore di k e gli altri parametri idrogeologici, indicanti alimentazione e ricarica assolutamente esigue.

8.2.1.7 Osservazioni conclusive sulle prove di emungimento del Piano Operativo

Le prove di emungimento condotte in esecuzione del Piano Operativo nel mese di maggio 2017 fissano chiaramente le principali caratteristiche dell'acquifero profondo, di seguito così riassumibili.

- 1) Il riferimento all'acquifero profondo discende dal fatto che le prove di emungimento sono state condotte esclusivamente sui piezometri profondi e dalla concomitante circostanza che gli adiacenti piezometri superficiali di controllo non sono stati per nulla sollecitati idraulicamente nel corso delle prove medesime.
- 2) Il complesso granitoide ercinico esplorato con i sei piezometri profondi deve essere considerato un **mezzo idraulicamente discontinuo**, in quanto la circolazione idrica è limitata a locali reti di fratture distribuite casualmente nel complesso granitico impermeabile.
- 3) Le curve caratteristiche ottenute dalle prove di emungimento a gradini sui piezometri profondi consentono di definire la circolazione idrica sotterranea di tipo **"libero"**.
- 4) La circolazione idrica sotterranea appare qualificata da un coefficiente di permeabilità medio-basso, da una trasmissività da bassa a bassissima e da una potenzialità intesa come risorsa utilizzabile bassissima; tanto è chiaramente documentato:
 - dalle **portate estremamente contenute** (da meno di 1 litro al minuto ad un massimo di circa 2 litri al minuto) impiegate nel corso delle prove di emungimento a portata costante, che tuttavia, hanno dato luogo ad **abbassamenti significativi** (da 8 metri a 14 metri, in un solo caso di circa 3 metri);
 - dalle prove a gradini sospese per **carenza di ricarica** (R4 ed R5) o per non aver dato luogo a risalite significative dopo il fermo pompaggio (R2 ed R3);

- dalle prove a portata costante con debolissima risalita dopo il fermo pompaggio (R3) ovvero con eccessivo abbassamento a fronte di una portata di emungimento molto contenuta di circa 1 l/min (R2), o non eseguite per carenza di alimentazione (R4 ed R5).
- 5) Nella generalizzata carenza della circolazione idrica sotterranea denunciata dalle prove di campo sui n.6 piezometri profondi è tuttavia necessario cogliere, per ciascun piezometro, la relazione esistente tra la propria ubicazione rispetto alla morfologia del bacino idrogeologico e la potenzialità idrica espressa nel corso delle prove di pompaggio.

I risultati sono i seguenti.

I piezometri R4 ed R5 sono ubicati sul confine sud della piattaforma IPPC, a ridosso delle due linee di displuvio, quella superficiale che delimita il bacino idrografico e quella immediatamente sottostante che delimita il bacino idrogeologico, come individuati e descritti nel precedente punto 8.1.2.

Questa circostanza fa sì che i piezometri di cui sopra siano privi di un'area di alimentazione sufficientemente estesa atta ad intercettare ed a consentire l'infiltrazione delle acque di pioggia, che rappresentano l'unica fonte di approvvigionamento del bacino idrogeologico locale e dell'acquifero ivi contenuto.

Situazione ben nota nella letteratura scientifica specifica ed ottimamente illustrata da Stewart (1967) e da Custodio-Llamas (1996) che, nella situazione riportata alla lettera "e" della seguente Fig. n.34, descrivono il caso tipico del pozzo con ricarica precaria, in quanto attraversante coltre arenizzata e sottostante roccia granitica superficialmente fratturata e, nel contempo, ubicato proprio in prossimità di spartiacque idrografico e idrogeologico coincidenti e, quindi, privo della necessaria area di alimentazione.

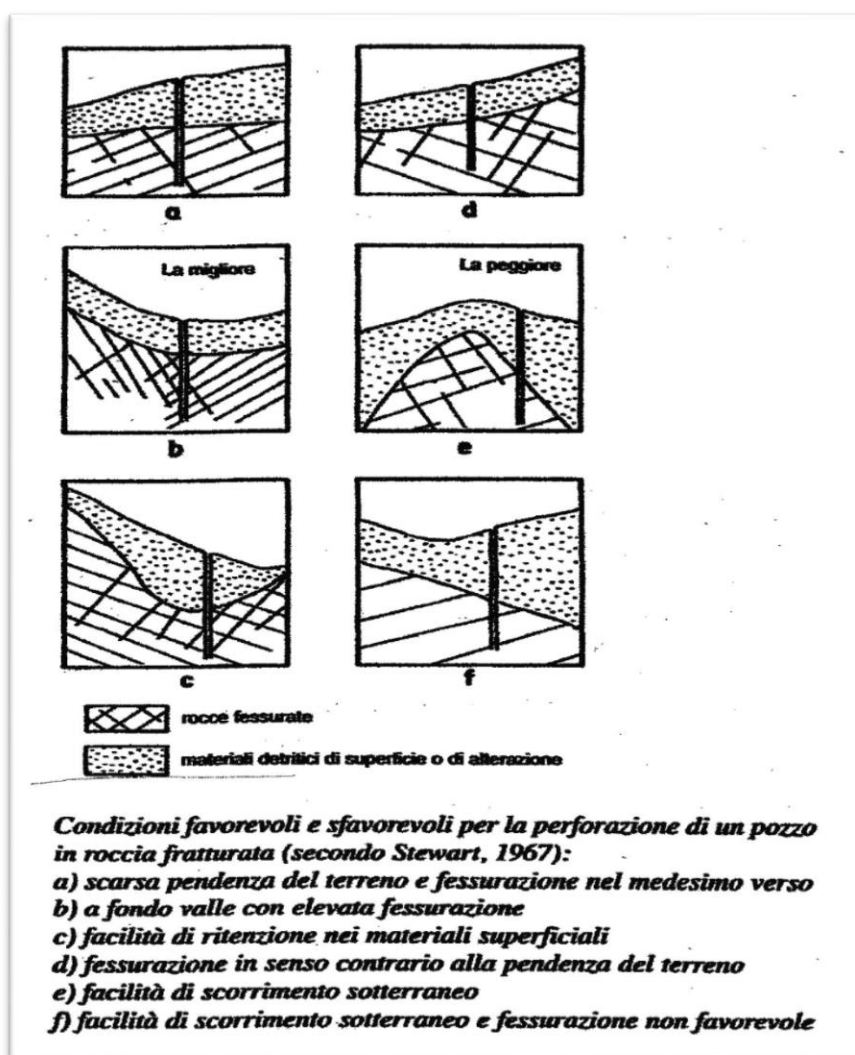


Fig. n. 34

Non a caso, quindi, questi due piezometri hanno fatto registrare, nel corso ed a seguito delle prove di emungimento, i peggiori risultati in assoluto, con prove a gradini sospese per insufficiente ricarica anche con portate minimali e con prove a portata costante non praticate per scarsissima risalita del livello piezometrico anche a distanza di alcune settimane, non consentendo, perciò, alcuna valutazione quantitativa della permeabilità e della trasmissività.

Come già riferito nel punto 7.10.2.1 (Sezione terza – Il modello geologico locale – Indagini del Piano Operativo), il “report” litostratigrafico, redatto nel corso della perforazione del piezometro R4, indica la presenza a 55.00 metri di profondità, di una manifestazione

idrica “*di scarsa entità*”, tanto da richiedere, per le operazioni di lavaggio del pozzo condotte per una durata di 6 ore, “*una continua immissione di acqua potabile dal boccaforo data la scarsa alimentazione idrica sotterranea*”.

In situazione simile ma leggermente più favorevole si trovano i piezometri R2 ed R3, ubicati sul confine N della piattaforma IPPC, rispettivamente nei pressi degli spartiacque di NE e di NW.

Rispetto ai precedenti piezometri R4 ed R5, posti quasi sugli spartiacque, i piezometri R2 ed R3 si trovano un poco più a valle rispetto ai propri soprastanti spartiacque, dando luogo ad una appena accennata e sempre molto contenuta area di alimentazione, ma comunque tale da consentire almeno la conclusione delle prove di pompaggio e la valutazione quantitativa dei parametri permeabilità e trasmissività.

La permeabilità è da ritenersi “*bassa*”, perché per R2 ed R3 è rispettivamente pari a $k = 2.0 \cdot 10^{-7}$ m/s e a $k = 4.0 \cdot 10^{-7}$ m/s, rilevando le difficoltà della o delle fratture a lasciarsi attraversare dall’acqua denuncia ridotte caratteristiche geometriche del sistema fratture (apertura, persistenza, ecc.); la trasmissività è rispettivamente pari per R2 e R3 a $T = 0.0376$ m²/die e a $T = 0.0060$ m²/die, che danno luogo a valori della “**magnitudo**” qualificati come “**impercettibili**” e occupanti l’ultima delle sei classi di magnitudo, quindi la VI, secondo Krasny.

Il piezometro R6, ubicato sempre sul lato N della piattaforma IPPC, risente positivamente della maggiore distanza dal displuvio di NE e di una più ampia area di alimentazione, facendo registrare valori di k e T appena leggermente più alti dei precedenti, accusando però sempre e comunque un regime estremamente ridotto di alimentazione e capacità produttiva; pertanto, i valori della permeabilità e della trasmissività risultano i seguenti: $k = 1.5 \cdot 10^{-6}$ m/s e $T = 0.00960$ m²/die, con la trasmissività posta nella VI classe di Krasny, ma prossima al limite inferiore della superiore classe V, i cui valori di trasmissività sono compresi tra 0.1 e 1 m²/die.

Infine, il piezometro R1, posto nella condizione idrogeologica più favorevole rispetto a tutti gli altri piezometri profondi, fa registrare le migliori risposte idrauliche alle prove di emungimento.

Il piezometro R1 è ubicato, infatti, a N della piattaforma IPPC, in posizione mediana rispetto ai displuvi posti ad E e ad W, quindi proprio nell’impluvio di fondovalle dove si

raccogliono e scorrono le acque superficiali di origine meteorica e, in sotterraneo, quelle circolanti lungo il principale asse di drenaggio del bacino idrogeologico; situazione ben rappresentata nella Fig. n.34, alla lettera “b”.

Ma la limitata estensione del bacino idrogeologico, l'assenza di travasi idrici da altri bacini limitrofi e l'alimentazione affidata alle sole acque zenitali danno luogo ad una generalizzata e modesta infiltrazione e circolazione idrica sotterranea, che limita drasticamente la potenzialità idrica dell'acquifero rispecchiata soprattutto nei bassissimi valori della trasmissività.

Esposte queste osservazioni si riportano di seguito i valori della permeabilità e della trasmissività ottenute dalle prove di emungimento.

Per il coefficiente di permeabilità si ha $k = 5.5 \cdot 10^{-6}$ m/s, da ritenersi “bassa”, e per la trasmissività $T = 1.783$ m²/die, con classe di magnitudo tra “bassa” e “molto bassa”, essendo il valore T posto quasi al limite tra la IV classe, con limiti di $T = 1 \div 10$ m²/die, e la V classe, con limiti di $T = 0.1 \div 1$ m²/die, a cui corrispondono comunque potenzialità di uso, nel migliore dei casi, poco idonei ad approvvigionamenti anche locali.

- 6) I risultati delle prove di emungimento condotte sui sei piezometri profondi, unitamente alle risultanze del modello geologico come definito alla Parte 3 della Sezione II, e alle definite caratteristiche del bacino idrografico, del bacino idrogeologico, del connesso acquifero e fonti di alimentazione di cui al punto 8.1, consentono di ***individuare nella falda libera superficiale l'alimentazione della circolazione idrica profonda.***

Confrontando i risultati delle prove di emungimento sui sei piezometri profondi previsti dal Piano Operativo con i risultati delle prove di emungimento eseguite dal CIPNES nel 2016 sui piezometri superficiali per la realizzazione dell'area di stoccaggio materiali di seguito riportati, si riscontrano valori delle portate critiche e di esercizio, dei coefficienti di permeabilità, della trasmissività, tutti caratterizzati dagli stessi ordini di grandezza e dalle medesime criticità, ***derivanti dal modello geologico e idrostrutturale sopra richiamati e dalla ridotta alimentazione di origine esclusivamente meteorica.***

Nel successivo punto 7 verranno chiariti i meccanismi che controllano, regolano e consentono questa particolare circolazione idrica sotterranea.

7) **La fonte di alimentazione idrica dei piezometri profondi è data dalla falda libera di superficie**, allocata nella coltre arenizzata a tetto della banda fratturata del complesso granitoide, da cui **si dipartono in maniera asistemica e non organizzata fratture singole o modeste reti di fratture**, distribuite nello spazio in maniera casuale e soprattutto discontinua, e **perciò impediscono a dar luogo ad una zona satura di fondo**, cioè ad una vera e propria falda profonda circolante in fratture.

Queste locali e casuali modeste reti di fratture possono costituire “**vie di percolazione**”, solo nel caso in cui risultino connesse oltre che tra loro, formando “**nodi**” e “**canali aperti**”, anche con **la falda libera di superficie** e con **l’area di recapito finale**.

Ove nel percorso la “**via di percolazione**” venga interrotta da un “**canale chiuso**”, la stessa assume una dimensione finita e perciò, pur restando satura se in connessione con l’acquifero di superficie, non può più consentire il passaggio dell’acqua dando luogo ad assenza di circolazione in rete.

Si schematizzano di seguito, nella Fig. n.35, i diversi casi di “**reti di percolazione**” come ricavati dalla “**Teoria della Percolazione**”, a cui questo punto fa riferimento.



Fig. n.35 – Teoria della Percolazione, esempi di circolazione idrica in ammassi rocciosi fratturati (da Scesi, 2007):

caso a) nodi e canali chiusi, percolazione e circolazione idrica assente;

caso b) raggruppamento localizzato, canali parzialmente aperti con stoccaggio idrico, circolazione idrica assente;

caso c) canali aperti, con via di percolazione, circolazione idrica continua.

Nel caso “a” della Fig. n.35, un piezometro che intercetti i “**canali**” resterà comunque sterile in quanto, essendo presenti solo “**canali chiusi**” (cioè fratture), non esiste una “**via di percolazione**”; nel caso “b” vi sono “canali aperti ed una “via di percolazione” a dimensione finita connessa con la sola falda libera superficiale ma non con un’area finale di recapito, dando luogo perciò solo ad uno stoccaggio idrico in frattura ma non ad una circolazione in rete: un piezometro che intercetti detti canali (o fratture) sarà perciò produttivo secondo le potenzialità proprie della falda superficiale e le caratteristiche del “**fattore di percolazione**” proprio dei “canali”; nel caso “c” sono rappresentati “**canali aperti**” costituenti “**vie di percolazione**” con circolazione in rete perché connesse con l’acquifero di superficie e con l’area di recapito finale: un piezometro che le intercetti sarà caratterizzato da una potenzialità produttiva dipendente da quella della falda e dalle caratteristiche del “**fattore di percolazione**” sopra citato (dato da $\pi^2 r^3/s^3$, ove r = raggio medio delle discontinuità e s = spaziatura media delle discontinuità, grandezze difficili da definire a profondità elevate se non ricorrendo a modellazione complessa ed approfondite ricerche sul campo).

E’ il caso di precisare che la caratterizzazione fisica di queste reti è quanto mai complessa e può essere affrontata teoricamente e in via probabilistica con la citata “Teoria della Percolazione”, a cui devono affiancarsi ricerche sul campo e sperimentali di notevole impegno e difficoltà per la costruzione di modelli comunque sempre molto approssimati e semplificati rispetto alle situazioni reali.

Basti far riferimento, ad esempio, alla individuazione del coefficiente di permeabilità di queste reti, dipendente dalla connettività e dai dati geometrici del sistema, dal volume di roccia da considerare per poter ritenere il mezzo roccia sufficientemente omogeneo ed isotropo, dalla profondità considerata giacchè mentre la pressione litostatica aumenta con la profondità diminuiscono la frequenza, l’apertura, la persistenza delle fratture (Carlsson & Olsson, 1977; Burgess, 1977, ecc.).

Risultando, perciò, sempre difficile, aleatorio e dispendioso l’acquisizione di tutti quanti i parametri, appare utile far riferimento alle prove correntemente usate nella pratica professionale, consolidate ed acquisite nella letteratura tecnico-scientifica, per ottenere almeno realistici ordini di grandezza delle misure eseguite, come correttamente perseguito nel presente lavoro.

8.2.1.8 Le prove di emungimento CIPNES per la realizzazione area deposito materiali (dicembre 2015 – febbraio 2016)

Nel periodo dicembre 2015 – febbraio 2016, il CIPNES ha condotto una serie di prove di emungimento e di misure in sito della permeabilità per la realizzazione di un'area deposito per materiali.

L'area è ubicata nella zona SE della piattaforma IPPC, immediatamente a S della ex discarica comunale e ad E della discarica CIPNES.

Su detta area, con andamento sub-pianeggiante e leggera vergenza verso NNW, a seguito di lavori di sbancamento operati anche con esplosivo, sono stati realizzati n.8 sondaggi a carotaggio continuo, per profondità comprese tra 10.00 e 16.00 metri dal p.c., comprendenti misure RQD su tutti i carotaggi e n.4 prove di permeabilità in foro Lugeon.

Il carotaggio continuo e il rilevamento dell'indice RQD hanno evidenziato l'esistenza, in superficie, della residua coltre arenizzata e rimaneggiata per spessori compresi tra 1.00 e 3.00 metri circa, con maggiore frequenza attestati attorno ad 1.00 metro circa.

A seguire, il livello di graniti molto fratturati per spessori generalmente inferiori ai 5.00 metri, e, in soli due casi, per spessori compresi tra gli 8.00 e gli 11.00 metri circa.

Infine, il terzo livello comprendente graniti in genere poco fratturati, da considerarsi limite basale del soprastante acquifero misto, costituito dalla coltre arenizzata superficiale, con permeabilità per porosità, e dal sottostante livello granitico molto fratturato, permeabile per fratturazione secondaria.

Dalle indagini condotte si evince, in particolare, che la permeabilità del livello granitico basale poco fratturato è limitata “....dal decremento del coefficiente di permeabilità per la pressione litostatica, che tende a chiudere le fratture in profondità e dal **progressivo deposito nelle fratture della frazione fina limoso-argillosa derivante dal disfacimento chimico dei graniti**, la cui porosità efficace è sempre molto bassa, generalmente dell'ordine dell'1%”.

Su alcuni sondaggi sono state realizzate prove di emungimento a gradini ed a portata costante nonché prove di permeabilità in sito Lugeon; i risultati sono esposti nelle tabelle seguenti.

La prima tabella contiene i risultati delle prove di permeabilità Lugeon, raffrontati con l'RQD delle camere di prova, con le Unità Lugeon e con il valore orientativo della trasmissività ponendo lo spessore dell'acquifero superficiale pari a 10.00 m.

CORRELAZIONI RQD-U.L.-K-T

SONDAGGIO	PROFONDITA' Camera di prova (m)	RQD Camera di prova (%)	U.L. Caratteristica media gradini 1,2,4,5 (l/min/m)	K Caratteristica media gradini 1,2,4,5 (m/s)	T	
					(m ² /s)	Classe (Krasny)
S7-2	8.00-10.00	88-52	0.11	$1.08 \cdot 10^{-8}$	$1.08 \cdot 10^{-7}$	VII non valutab.
S18-1	4.00-6.00	84-72	2.64	$2.59 \cdot 10^{-7}$	$2.59 \cdot 10^{-6}$	VI molto basso
S18-3	8.00-10.00	25-62	3.20	$3.14 \cdot 10^{-7}$	$3.14 \cdot 10^{-6}$	VI molto basso
S28-1	12.00-14.00	57-87	0.25	$2.49 \cdot 10^{-8}$	$2.49 \cdot 10^{-7}$	VII non valutab.

Nella seguente tabella invece vengono confrontati i valori della permeabilità e della trasmissività ottenuti dalle prove di permeabilità Lugeon con gli analoghi valori ottenuti dalle prove di emungimento.

VALORI DI K E T DA PROVA LUGEON E DI EMUNGIMENTO

PROVE LUGEON				PROVE EMUNGIMENTO	
SONDAGGIO	PROFONDITA' (m)	K (m/s)	T (m ² /s)	K m/s	T m ² /s
S7-1	-			$2.50 \cdot 10^{-6}$	$1.08 \cdot 10^{-6}$ $1.50 \cdot 10^{-5}$ $2.50 \cdot 10^{-5}$
S7-2	8.00 – 10.00	$1.08 \cdot 10^{-8}$	$1.08 \cdot 10^{-7}$	-	-
S18-1	4.00 – 6.00	$2.59 \cdot 10^{-7}$	$2.59 \cdot 10^{-6}$	-	$0.70 \cdot 10^{-6}$
S18-3	8.00 – 10.00	$3.14 \cdot 10^{-7}$	$3.14 \cdot 10^{-6}$	-	$0.90 \cdot 10^{-6}$
S28-1	12.00 – 14.00	$2.49 \cdot 10^{-8}$	$2.49 \cdot 10^{-7}$	-	-

Lo studio evidenzia che le variazioni osservate dipendono dalla fluttuante piovosità del periodo, dalle portate emunte, dalla quasi planarità dell'area che favorisce il ristagno

dell'acqua di pioggia e quindi l'infiltrazione e l'alimentazione della falda idrica, dalle distanze dei punti di esplosione (operati per spianamento) che influenzano le caratteristiche geometriche e la densità delle fratture.

Molto rilevante anche l'effetto delle portate emunte sui valori dei parametri k e T , poiché, quando eccedono le portate critiche, portano il livello dinamico in prossimità del fondo pozzo, sollecitando i livelli meno permeabili e meno trasmissivi con conseguenti basse risposte in termini di permeabilità e trasmissività; nel caso contrario, come rilevato per il pozzo S7-1 con la prova a gradini, in cui per il primo gradino è stata prescelta una portata di soli 0.60 litri/minuto, il livello dinamico risulta abbassato di soli 40.00 cm, interessando solo i livelli più permeabili e più trasmissivi con conseguenti più alte risposte per permeabilità e trasmissività.

In generale si è avuta ***conferma dei bassi valori di k e T , tipica di acquiferi poco permeabili***, di bassissimo se non nullo interesse quantitativo della risorsa in relazione alla ***trasmissività rientrante nelle ultime due classi, la VI e la VII, della classificazione Krasny***.

Concludendo sul punto, si osserva che ***i valori della permeabilità e della trasmissività e, più in generale, l'intero profilo idrogeologico locale, assumendo caratteristiche ed ordini di grandezza perfettamente correlabili con quelli derivanti dalle campagne esplorative del Piano Operativo del 2017 (v. precedente punto 8.2.1) e delle precedenti campagne CIPNES del 2013 e del 2015/2016 (v. precedenti punti 7.10.2.2 e 7.10.2.3), possono ritenersi caratterizzanti l'intero bacino idrogeologico ed i relativi acquiferi***.

8.2.1.9 Osservazioni conclusive sulla caratterizzazione idrogeologica dell'area deposito materiali

Si procede di seguito ad un inquadramento di sintesi degli elementi geologici, idrogeologici e idraulici di base che caratterizzano l'area sotto il profilo idrogeologico.

Nell'area di interesse, il cui bacino idrografico è individuato sulla allegata cartografia di Fig. n. 36, le caratteristiche litostratigrafiche sono date dal complesso granitoide di base e dalle sovrastanti coperture detritiche quaternarie.

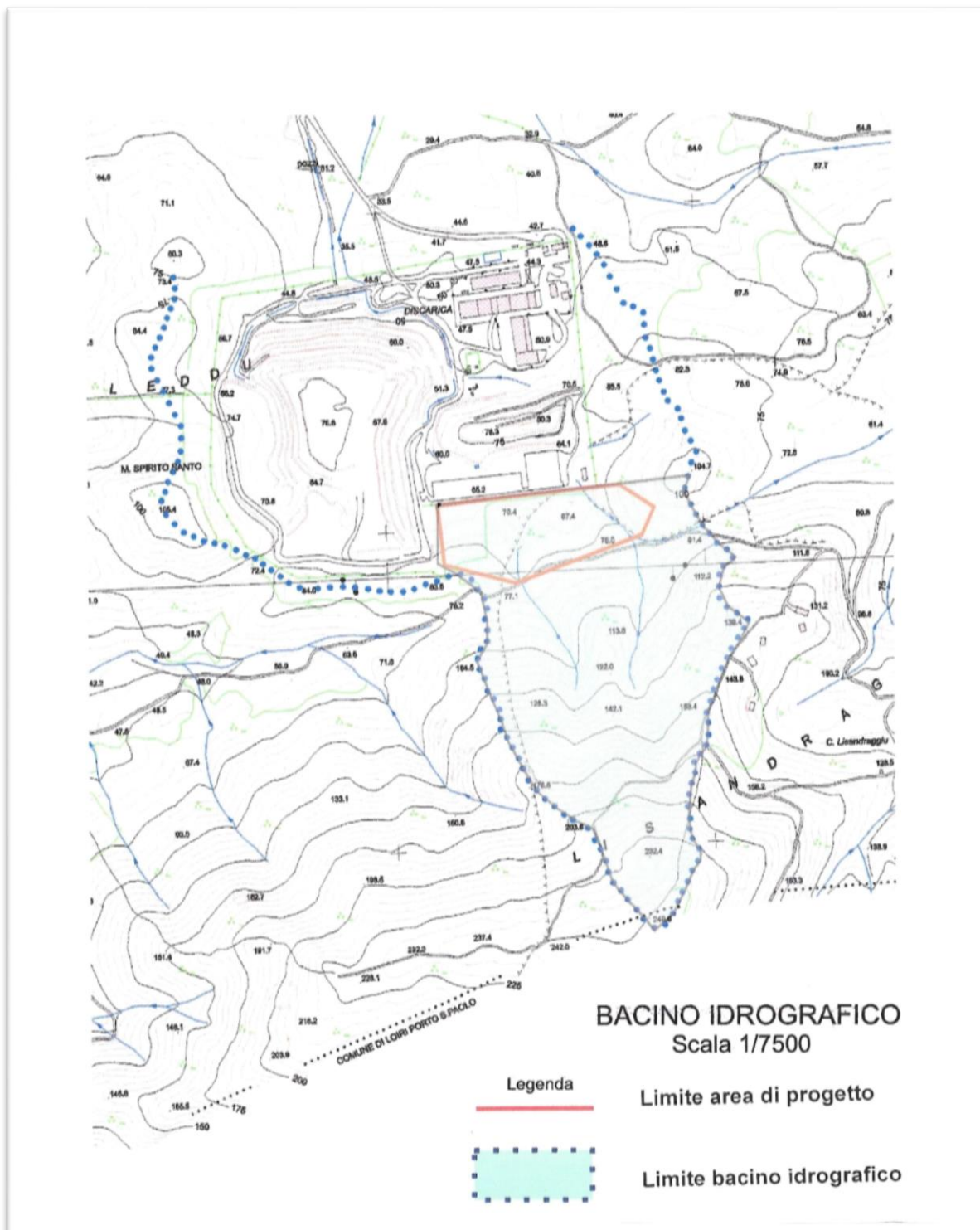


Fig. n. 36 – Bacino idrografico

Lo spessore di dette coltri è dell'ordine di pochissimi metri, da 1.00 a $3.00 \div 4.00$ metri, con permeabilità medio-bassa, in relazione alla quantità di “fino” presente, in genere data da $k = 10^{-4} \div 10^{-6}$ m/s.

In queste coperture si svolgono i processi di ruscellamento, di infiltrazione e di gran parte della circolazione idrica sotterranea.

A dette coltri segue il complesso granitico, caratterizzato da una rete di **fratture generalmente poco persistenti** e con **aperture mediamente inferiori al millimetro**, a limitata permeabilità, in genere compresa tra $k = 2.59 \cdot 10^{-7} \div 2.49 \cdot 10^{-8}$ m/s ma con punte di $k = 9.6 \cdot 10^{-9}$ m/s e trasmissività altrettanto limitata, con valori compresi tra $T = 2.59 \cdot 10^{-6} \div 2.49 \cdot 10^{-7}$ m²/s, propri di acquiferi delle classi VI e VII secondo Krasny con capacità da “molto bassa” a “non valutabile”.

Mentre le bande granitiche prossime alla superficie, anche e soprattutto a causa dell'uso di esplosivi usato per lo spianamento dell'area, assumono valori di RQD bassi, compresi tra il 20% ed il 35%, i livelli più profondi assumono, invece, valori consistenti, mediamente compresi tra minimi del 55% \div 60% e massimi dell'85% \div 95%.

In questo contesto, nel quale vanno evidenziate, altresì, la limitatissima estensione del bacino idrogeologico, inferiore ai 20ha, coincidente per altro con il bacino imbrifero e la altrettanto molto limitata ricarica idrica identificata con le sole piogge zenitali, **le prove di emungimento** non potevano che **confermare la povertà dell'acquifero** come sopra descritto, facendo misurare portate critiche attorno al litro per minuto primo e valori di k e T correlabili con quelli ottenuti con prove Lugeon.

La povertà dell'acquifero è ulteriormente confermata dal “**bilancio idrologico**” che per il bacino in esame (v. Fig. n.36), ha evidenziato analiticamente la scarsa entità delle “entrate” idriche, rappresentate da una lama d'acqua compresa tra un minimo di 6.3 mm/a ed un massimo non superiore a 10.4 mm/a, e la altrettanto **scarsa potenzialità idrica U compresa tra 1190 m³/a e 1965 m³/a, tipica di acquiferi molto poveri** secondo i criteri dettati da Custodio (1996).

Detto acquifero, infine, secondo il D. L.vo 152/2006, All.1, Parte terza, è esplicitamente classificato come “**non acquifero**” dato **che i descritti valori di $U = 1190 \div 1965$ m³/a sono largamente inferiori a quelli minimi prescritti da detta norma e resi pari a 3650 m³/a.**

Completano il quadro idrogeologico le risultanze delle **indagini geofisiche** (MASW ed elettrotomografia) che indicano per l'acquifero superficiale uno **spessore pari a 10.00 ÷ 12.00 m.**

La piezometria, infine, consente:

- a) di **rilevare l'immediata risposta tra pioggia e quote piezometriche**, ad ulteriore dimostrazione della superficialità della circolazione idrica, della ridotta estensione del bacino idrografico e dell'assenza di altre fonti di alimentazione;
- b) di evidenziare **l'analogia morfologica tra la superficie topografica e la superficie piezometrica**, la cui soggiacenza media è compresa tra 1.00 e 2.00 m dal p.c.

8.2.2 Caratterizzazione geochimica delle acque circolanti nel sottosuolo dalle analisi chimiche del Piano Operativo (Maggio-Giugno 2017)

Nel maggio 2017, secondo le programmazioni del P.O., sono stati prelevati ed analizzati n.32 campioni di acque circolanti nel sottosuolo, per rilevare la qualità e le CSC codificate in materia di bonifica di siti contaminati.

Per l'elenco dei parametri ricercati, delle metodiche analitiche impiegate e dell'esito completo delle analisi (queste ultime riportate anche in un tabellone di sintesi), si rimanda ai fascicoli annessi al piano delle indagini, queste ultime eseguite da R.T.I., costituito da SGM srl e Theolab SpA, affidatarie dei lavori previsti dal P.O.

Nel periodo 09-12 maggio 2017, dai n.33 piezometri della rete di monitoraggio sono stati prelevati n.29 campioni di acqua, esclusi i punti S1, S32, S33 e sorgente, in quanto rinvenuti secchi al campionamento; in data 29 maggio 2017 sono stati prelevati ulteriori n.3 campioni di acqua dai soli piezometri S16, S17, S9.

Si evidenzia, infine, che le aree poste ai margini degli impianti di smaltimento e trattamento dei materiali lavorati o destinate al transito di automezzi o macchine di cantiere, sono state assoggettate, a più riprese nel tempo, a lavori di sbancamento (anche a mezzo

esplosivi), a riporti e a depositi dei materiali di risulta, con conseguenti rimaneggiamenti dei terreni superficiali e possibili alterazioni locali delle caratteristiche geochemiche delle acque ruscellanti in superficie e della sottostante falda freatica.

Ciò premesso, di seguito si procede ad una elaborazione delle analisi chimiche eseguite tesa a definire, per ciascun piezometro, la **facies idrogeochemica**, allo scopo di verificare l'esistenza o meno di eventuali convergenze tra le acque circolanti nei piezometri superficiali e quelle circolanti nei piezometri profondi, da inquadrarsi nel **modello geologico**, già definito al precedente punto 7 e nelle **caratteristiche idrodinamiche**, come emergenti nei vari passi del presente studio.

Per la identificazione delle **facies idrogeochemiche**, è stato necessario prima di tutto convertire, per ciascun campione, le unità di misura delle concentrazioni in meq/l, in quanto espresse in µg/l sui certificati di laboratorio, relative ai principali cationi, quali calcio, magnesio, sodio, potassio, e dei principali anioni, quali cloruri, solfati, carbonati e bicarbonati, nitrati, necessari per la redazione dei diagrammi di seguito riportati.

Le correlazioni tra gli ioni presenti vengono eseguite facendo ricorso al diagramma di Schoeller – Berkaloff, che, oltre a consentire la caratterizzazione delle acque, permette le correlazioni tra acque diverse, conservando peraltro i valori assoluti delle singole concentrazioni ioniche.

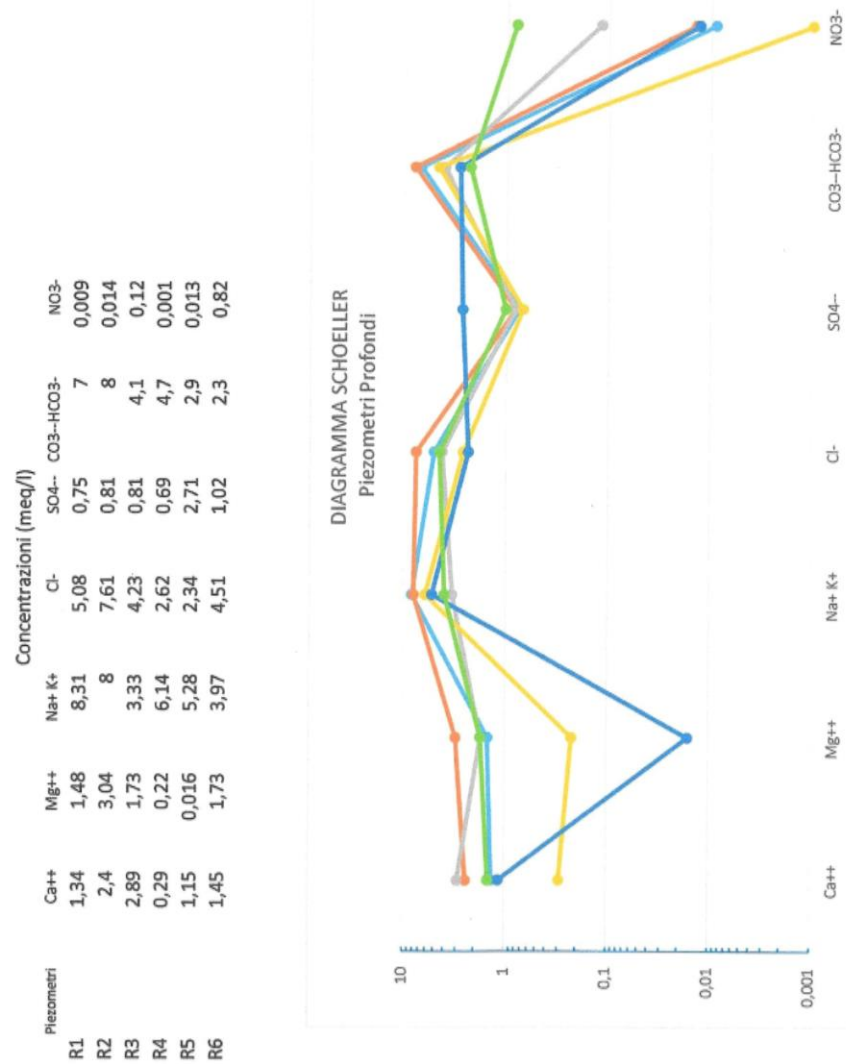
Questo ultimo aspetto è particolarmente importante perché consente di distinguere acque a diversa mineralizzazione, acque con caratteristiche idrochimiche diversificate e di valutare i rapporti caratteristici tra i diversi ioni.

Sono state, per questi motivi, eseguite correlazioni geochemiche tra le acque dei piezometri superficiali e profondi, dei soli piezometri superficiali, dei soli piezometri profondi e per gruppi di piezometri di aree particolari, quali, ad esempio, aree ubicate a monte e a valle delle discariche, a monte e a valle della barriera impermeabile, lungo le direttrici di assi drenanti o di displuvi sotterranei, ecc.

Di seguito si allegano i diagrammi di Schoeller ottenuti per singolo piezometro, opportunamente raggruppati come sopra specificato per facilitarne correlazioni e lettura; per la planimetria si rimanda alla Fig. n.22.

A) In questo primo diagramma sono raggruppati i profili idrochimici dei sei piezometri profondi: R1, R2, R3, R4, R5, R6.

E' possibile notare che i sei profili sono accomunati dalla medesima facies geochimica bicarbonato-alcalina, fatte salvo solo variazioni non significative del rapporto Mg/Ca soprattutto nel piezometro R5, l'unico con pH =10, al contrario degli altri distinti da un pH di poco superiore ad 8; mentre potenziale redox ha un valore all'incirca costante per i sei piezometri essendo compreso tra 250 e 280 mV; molto marcata la presenza di cloruri; estremamente variabile la componente NO₃, attribuibile a contaminazioni antropica.



B) I tre successivi diagrammi mettono a confronto i cluster formati da un piezometro profondo R ed un piezometro superficiale S per cogliere gli aspetti peculiari dei rispettivi profili idrochimici; si correlano prima i cluster posti a nord della piattaforma IPPC e poi quelli a sud della stessa.

Si correlano le coppie di piezometri ubicate a N della piattaforma IPPC (v. planimetria), così raggruppate:

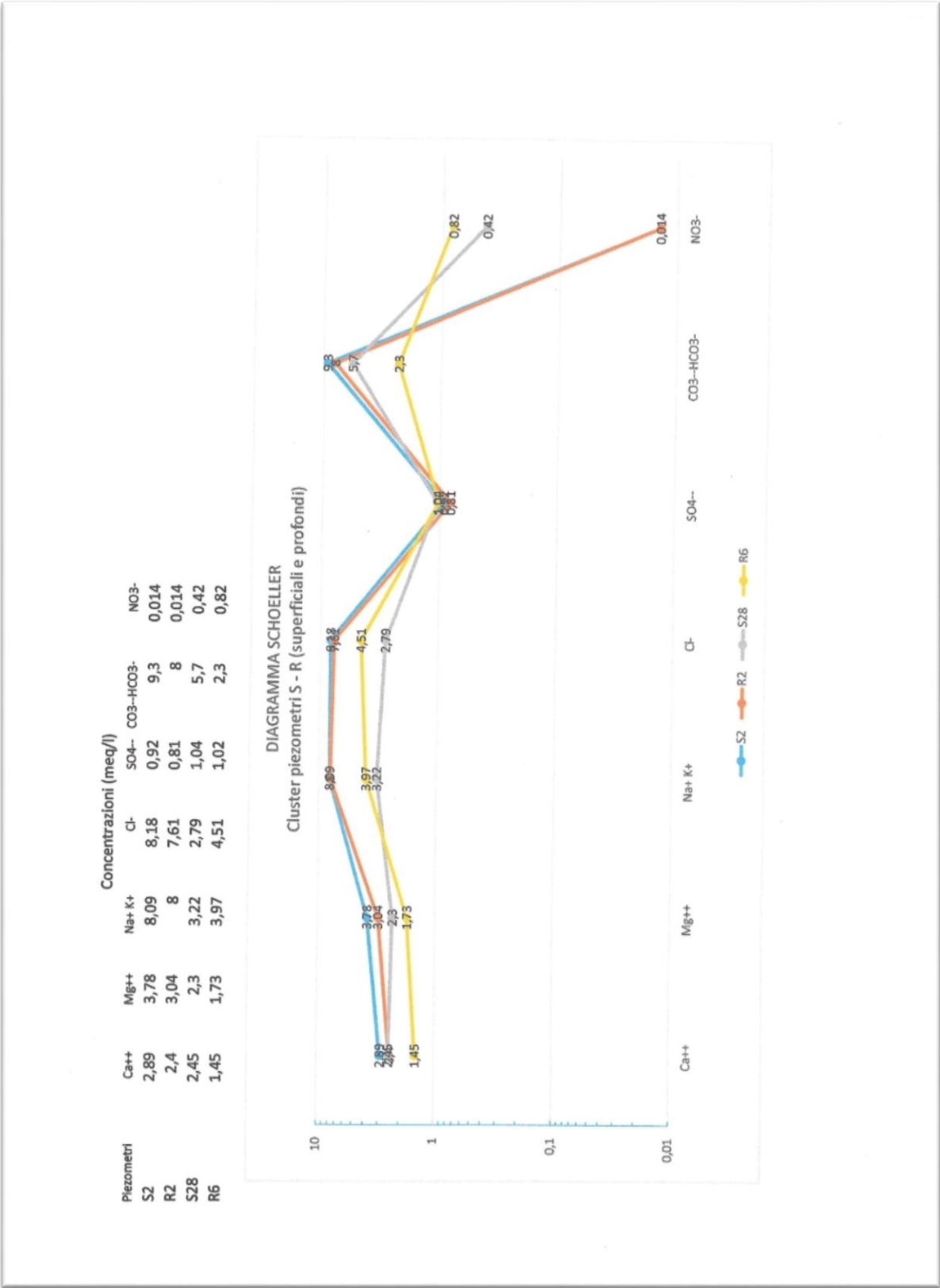
- Diagramma con i profili S2-R2, S28-R6;
- Diagramma con i profili S31-R1, S3-R3.

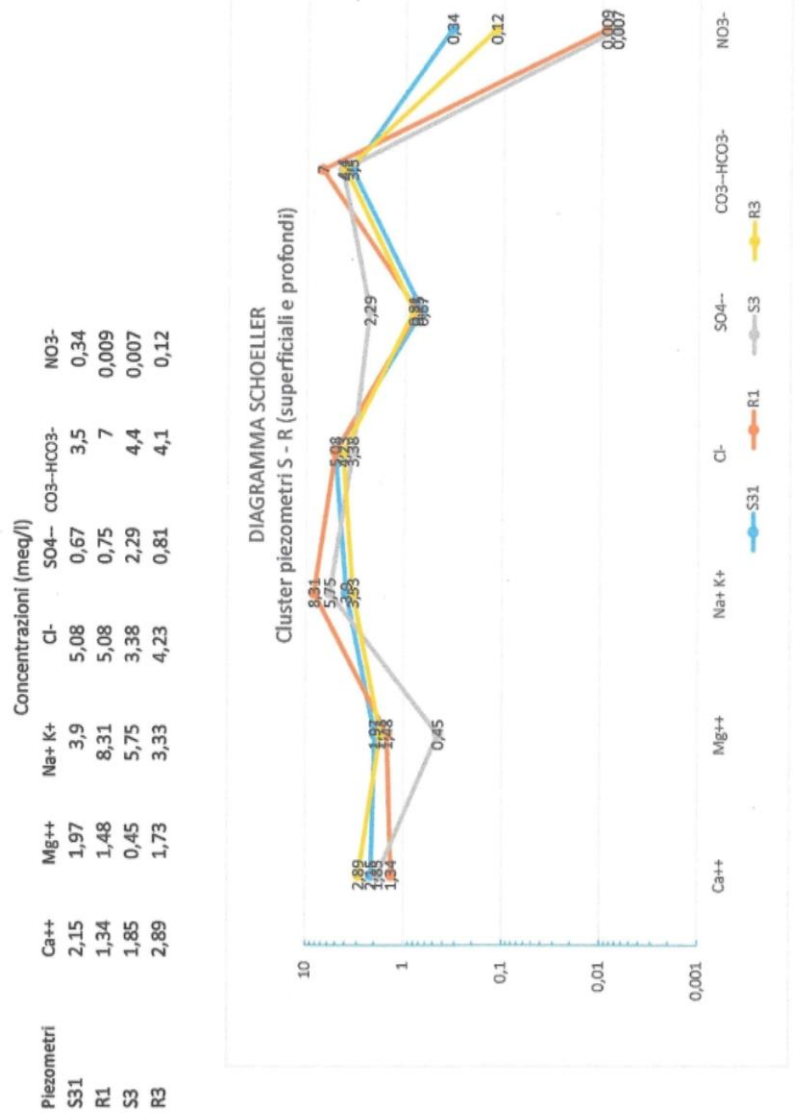
Si evidenzia che il cluster S31-R1 è in effetti un cluster fittizio, dato che quello reale è rappresentato dai piezometri S1-R1; in pratica è stato accoppiato al piezometro profondo R1 il piezometro superficiale S31 poiché al campionamento il piezometro S1 è stato rinvenuto secco.

E' immediato osservare che la facies geochimica, anche in questo caso, è bicarbonato-alcaina, con presenza significativa dei cloruri; la mineralizzazione è omogenea assumendo all'incirca lo stesso ordine di grandezza per gli otto piezometri, fatta eccezione per i nitrati distribuiti in due ordini di grandezza ed attribuibili a contaminazione antropica.

Conformemente a quanto già riportato per i profili dei piezometri profondi descritti in A), il pH è compreso tra 7,1 ed 8,1.

Anche il valore del potenziale redox si mantiene costante, tra 260 e 290 mV, eccezion fatta per il piezometro S2 in cui assume un valore di 160: valori correlabili con quelli dei piezometri profondi esposti in A).





A sud della piattaforma IPPC sono ubicati solamente i seguenti cluster: S26-R4 e S27-R5.

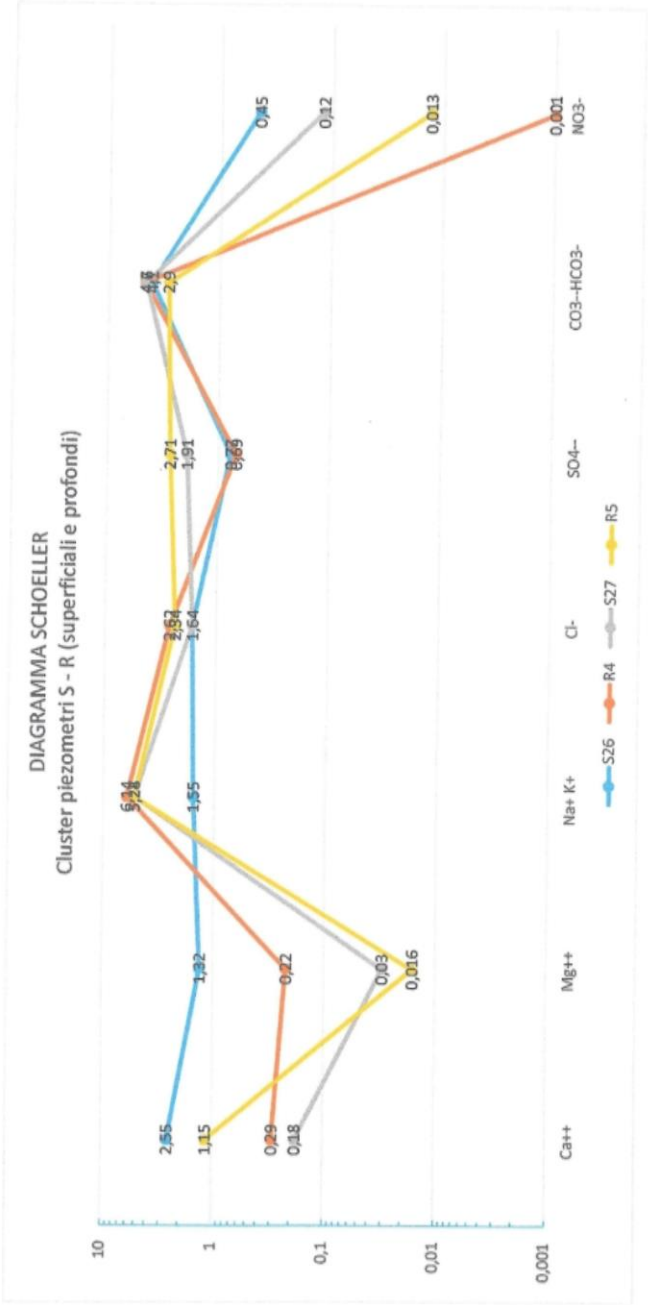
Si riscontra la medesima facies idrochimica anche per questi due cluster, rientrante nella bicarbonato-alcalina, con concentrazioni ioniche dello stesso ordine di grandezza, eccezion fatta per il magnesio distribuito in due ordini di grandezza e per i nitrati, dispersi in tre ordini di grandezza, con concentrazioni modeste, attribuibili a contaminazione antropica. I due cluster, che si differenziano leggermente solo per la diversa concentrazione del catione magnesio, sono però omogenei al loro interno.

Infatti il cluster S27-R5 espone profili idrochimici assolutamente confrontabili, accomunati anche dalla contenuta concentrazione della componente magnesiaca; un po' meno il cluster S26-R4, soprattutto per la componente alcalina.

Il cluster S27-R5 fa rilevare valori del pH rispettivamente pari a 9.9 e a 10, quindi uguali, e altrettanto comparabili a valori del redox rispettivamente pari a 270 e a 280.

Per il cluster S26-R4 si registrano valori non confrontabili per il pH, rispettivamente pari a 7.1 e a 8.7; prossimi, invece, quelli del potenziale redox, rispettivamente pari a 290 e a 260 mV.

Piezometri	Ca++	Mg++	Na+ K+	Concentrazioni (meq/l)				
				Cl-	SO4--	CO3--HCO3-	NO3-	
S26	2,55	1,32	1,55	1,64	0,77	4,1	0,45	
R4	0,29	0,22	6,14	2,62	0,69	4,7	0,001	
S27	0,18	0,03	5,24	1,64	1,91	4,6	0,12	
R5	1,15	0,016	5,28	2,34	2,71	2,9	0,013	



C) Si confrontano di seguito esclusivamente i piezometri superficiali S, suddivisi per aree peculiari come si chiarirà di volta in volta.

C.1) Si considera per primo l'allineamento E-W, posto a nord della piattaforma IPPC, dato dai piezometri superficiali S2, S28, S31, S3. Manca il rilevamento del piezometro S1, in quanto rinvenuto secco al campionamento.

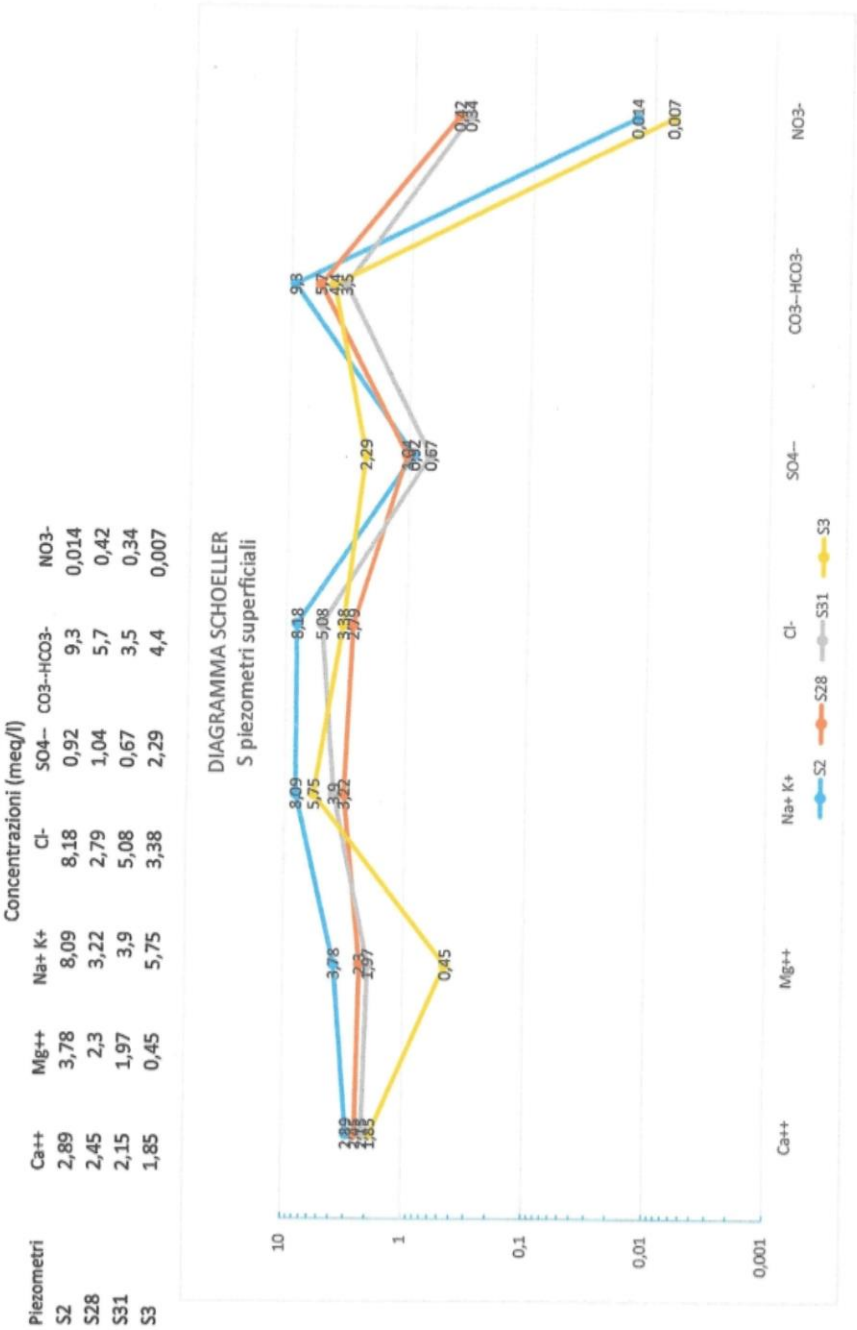
La facies idrochimica, comune ai quattro piezometri, è quella carbonatica-alcalina, con marcata presenza dell'anione cloruro.

Le concentrazioni ioniche, deboli come le altre precedenti, sono all'incirca dello stesso ordine di grandezza, salvo che per il catione magnesio presente con concentrazione ridotta nel piezometro S3.

L'anione nitrato è presente in concentrazioni variabili, ed attribuibile a contaminazione di origine antropica.

Il pH comprende valori tra 7.2 e 8.1, tranne che per il piezometro S31 ove è pari a 8.9.

Il potenziale redox è compreso tra 160 e 260 mV.



C.2) Si esamina l'allineamento dei piezometri superficiali S3, S4, S26, disposto lungo la direttrice N-S posta ad W della piattaforma IPPC; manca tra i profili il piezometro S32 rinvenuto secco al campionamento.

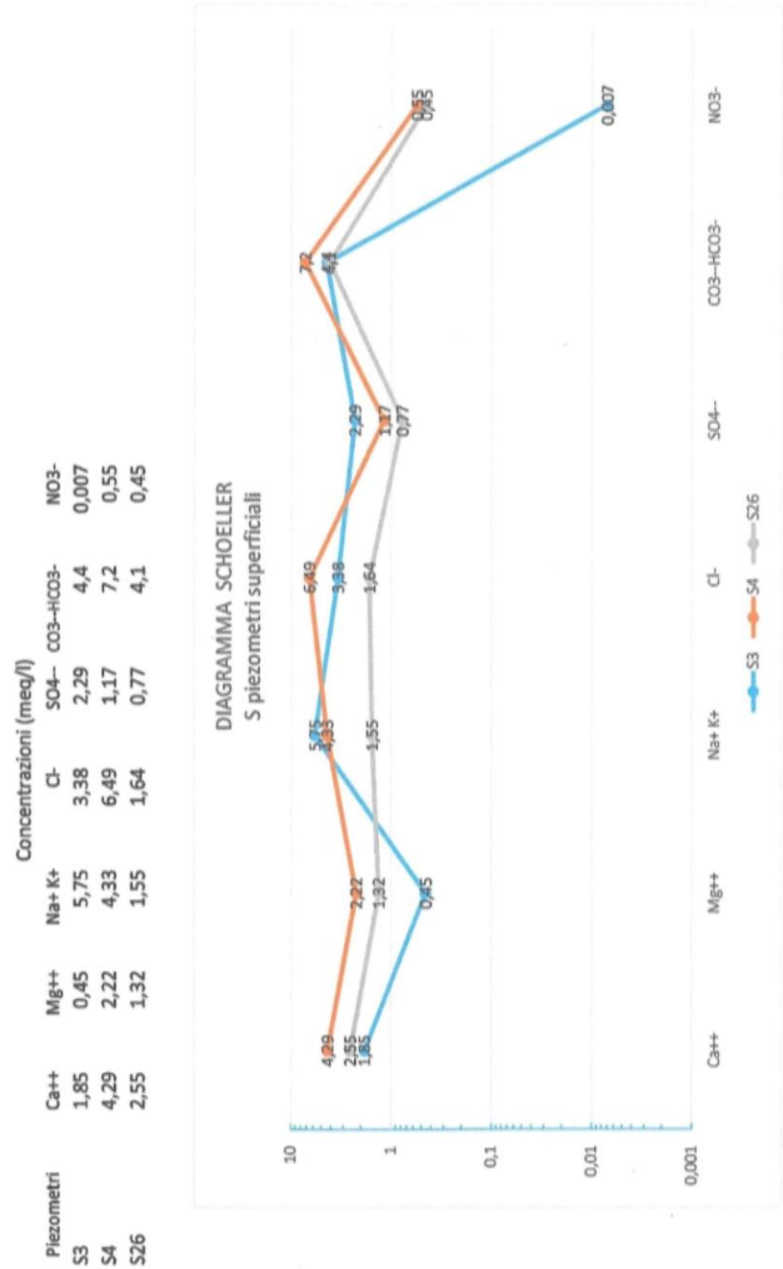
I profili idrochimici dei tre piezometri non si discostano da quelli rilevati in precedenza in quanto disegnano una facies bicarbonato-alcalina, con marcata concentrazione dei cloruri soprattutto nel piezometro S4.

Contenuta la mineralizzazione, con concentrazioni comprese all'incirca nello stesso ordine di grandezza, comparabili con quelle dei profili precedentemente analizzati, in leggero aumento procedendo da monte verso valle, cioè da S26 ad S4, non rilevabile però nel piezometro S3.

I nitrati sono presenti con concentrazioni variabili ma molto contenute, soprattutto nel campione S3.

Rientrano nella media i valori del pH e del potenziale redox, rispettivamente compresi tra 7.1 ed 8.1 con incremento da monte verso valle, e tra 260 e 290 mV con decremento da monte verso valle.

La conducibilità varia dai 630 $\mu\text{S}/\text{cm}$ del campione S26 di monte, ai 1300 ed ai 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dei campioni S4 ed S3 procedendo verso valle.



C.3) Si esamina l'allineamento dei piezometri superficiali S26, S27, S34, disposto a S della piattaforma IPPC; manca tra questi il piezometro S33 in quanto rinvenuto secco alla data del campionamento.

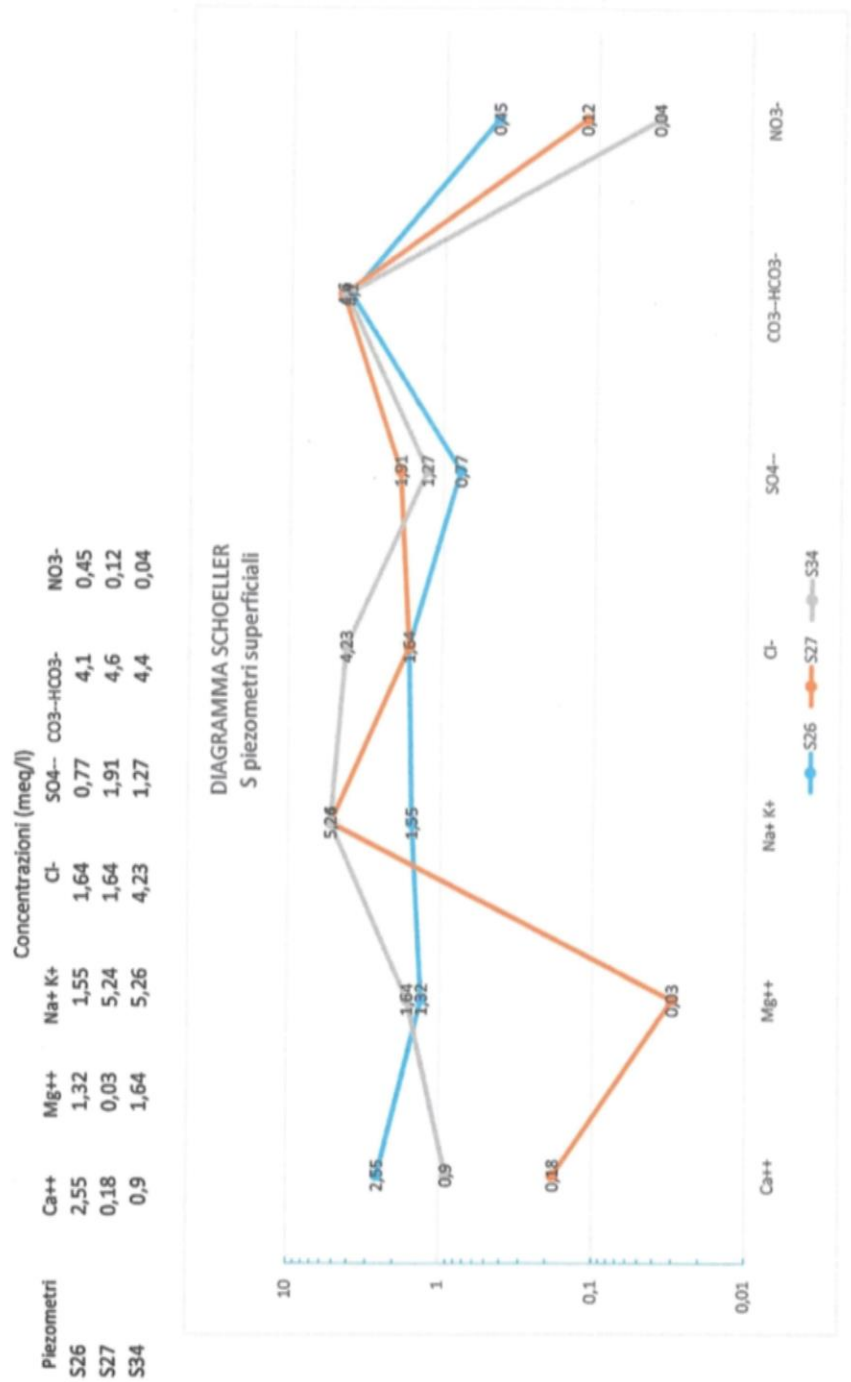
Il profilo idrochimico in questo allineamento non è omogeneo, in quanto il piezometro S26 è caratterizzato da una facies idrochimica bicarbonato-calcica, mentre i due restanti piezometri S27 ed S34 sono caratterizzati dalla solita facies idrochimica bicarbonato-alcalina.

Meno marcata del solito appare la componente cloruri dei piezometri S26 ed S27 ed ancora più sbilanciata verso basse concentrazioni (0.03 meq/l) il catione magnesio nel piezometro S27, molto affine però al limitrofo piezometro profondo R5 con il quale forma per l'appunto un cluster analizzato nel precedente paragrafo B.

Le concentrazioni ioniche, come per i casi precedenti, risultano comprese nello stesso ordine di grandezza, eccezion fatta per il già segnalato piezometro S27 che registra concentrazioni più contenute dei cationi calcio e magnesio come per l'omologo R5.

Presenti i nitrati in concentrazioni variabili ma molto contenuti.

Rientrano nella media i valori del potenziale redox per tutti i piezometri in quanto compresi tra 630 e 750 mV; più dispersi i valori del pH pari a 7.1, 9.9, 8.7 rispettivamente per i piezometri S26, S27 ed S34.



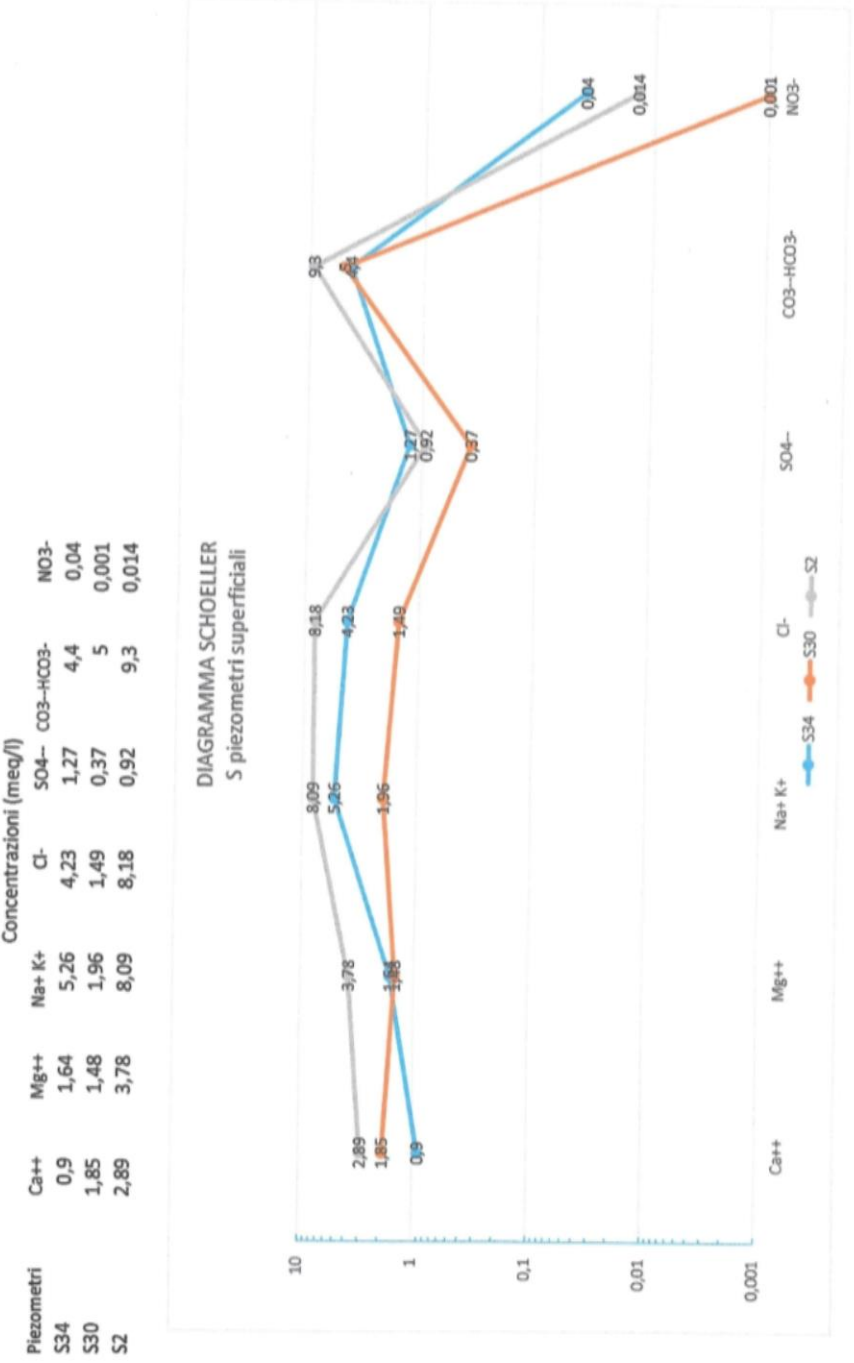
C.4) Si esamina l'allineamento dei piezometri superficiali S34, S30, S2, disposto a est della piattaforma IPPC.

Il profilo idrochimico in questo allineamento rimarca mediamente quelli precedenti, in quanto la facies idrochimica caratterizzante è quella bicarbonato-alcalina, con la solita marcata concentrazione dei cloruri.

Sempre contenuta la mineralizzazione con concentrazioni comprese mediamente nello stesso ordine di grandezza e comparabili con quelle dei profili precedentemente analizzati.

I nitrati sono presenti, anche in questo caso, con concentrazioni molto basse e disperse in due ordini di grandezza.

Rientrano nella media i valori del pH e del potenziale redox, rispettivamente compresi tra 7.2 e 7.5 e tra 160 e 280 mV.



C.5) Si esaminano congiuntamente per le evidenti affinità idrochimiche i seguenti due raggruppamenti di piezometri superficiali:

il primo, ubicato a monte del diaframma impermeabile della discarica comunale, è costituito dai piezometri S20, S15, S17, S19, con il piezometro S20 posto leggermente più a monte dei restanti piezometri S15, S17, S19, che, invece, sono situati a ridosso della citata barriera impermeabile;

il secondo allineamento, ubicato immediatamente a valle del diaframma impermeabile, è costituito dai piezometri S14, S16, S18, specularmente disposti rispetto ai tre precedenti.

Si osserva quanto segue.

Fatta eccezione per il profilo relativo al piezometro S15, il primo ad W dell'allineamento a monte del diaframma impermeabile, i restanti n.5 profili idrochimici sono quasi sovrapponibili, assumendo le concentrazioni ioniche lo stesso ordine di grandezza e valori assoluti tra loro molto vicini; la facies è del tipo bicarbonato-alcalina, con marcata presenza dei cationi cloruri.

I nitrati, come sempre, sono presenti in concentrazioni contenute e disperse in un campo di valori più ampio, soprattutto per l'allineamento a valle del diaframma impermeabile; la salinizzazione appare leggermente più alta per i piezometri posti a valle del diaframma impermeabile rispetto a quelli ubicati a monte.

I valori del pH assumono valori tra loro confrontabili e rientranti nella media dei campioni fin qui analizzati essendo compresi, per l'allineamento di monte, escluso il piezometro S15, tra 7.9 ed 8.1; per l'allineamento di valle i valori del pH sono compresi tra 7.5 ed 8.5; lo stesso dicasi per i valori del potenziale redox tutti compresi nel *range* 250 ÷ 280 mV.

Una valutazione a parte va fatta per il campione del piezometro S15 ubicato a monte del diaframma impermeabile.

Il diagramma di Schoeller mostra un profilo idrochimico molto più articolato rispetto agli altri, pur rientrando la facies tra quelle bicarbonato-alcaline.

Le concentrazioni ioniche sono molto diverse tra loro e con quelle mediamente riscontrate nei campioni fin qui osservati, essendo distribuite in circa tre ordini di grandezze; il pH per questo piezometro assume un valore di 11.80, valore massimo non osservato in nessun altro campione; altrettanto elevato il valore della conducibilità pari a 7400 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Rientra nella media, invece, sia pure tra i valori più contenuti, il valore del potenziale redox pari a 230 mV.

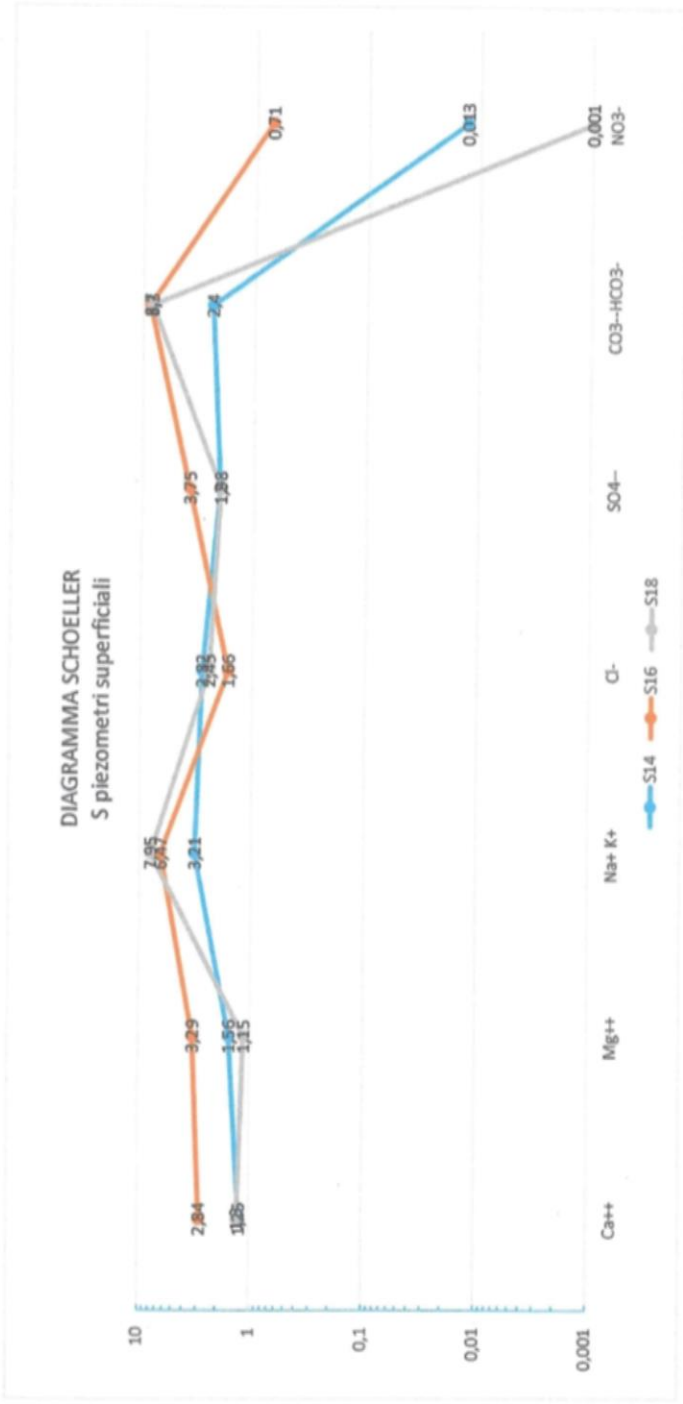
Le concentrazioni dei nitrati sono molto contenute.

Piezometri	Ca++	Mg++	Na+ K+	Cl-	SO4--	CO3--HCO3-	NO3-
S20	1,9	2,38	4,41	4,79	1,33	4,7	0,03
S15	10,48	0,07	26,75	1,6	0,21	78	0,048
S17	2,25	2,06	2,83	2,68	1,98	3,7	0,11
S19	1,75	1,81	3,45	2,4	1,5	4,2	0,18

DIAGRAMMA SCHOELLER
S piezometri superficiali



Piezometri	Concentrazioni (meq/l)						
	Ca++	Mg++	Na+ K+	Cl-	SO4--	CO3-HCO3-	NO3-
S14	1,25	1,56	3,21	2,82	2	2,4	0,013
S16	2,84	3,29	6,47	1,66	3,75	8,7	0,71
S18	1,3	1,15	7,95	2,45	1,98	8,3	0,001



C.6) Si analizzano i campioni relativi ai piezometri superficiali S9, S29, S28; sono tutti ubicati a valle della discarica comunale ed allineati, procedendo da S-E verso N-W, lungo la direttrice di un asse di drenaggio sotterraneo: il piezometro S9 è ubicato ai piedi della discarica; il piezometro S29 ancora più a valle verso NW ed infine, ancora più a valle, il piezometro S28.

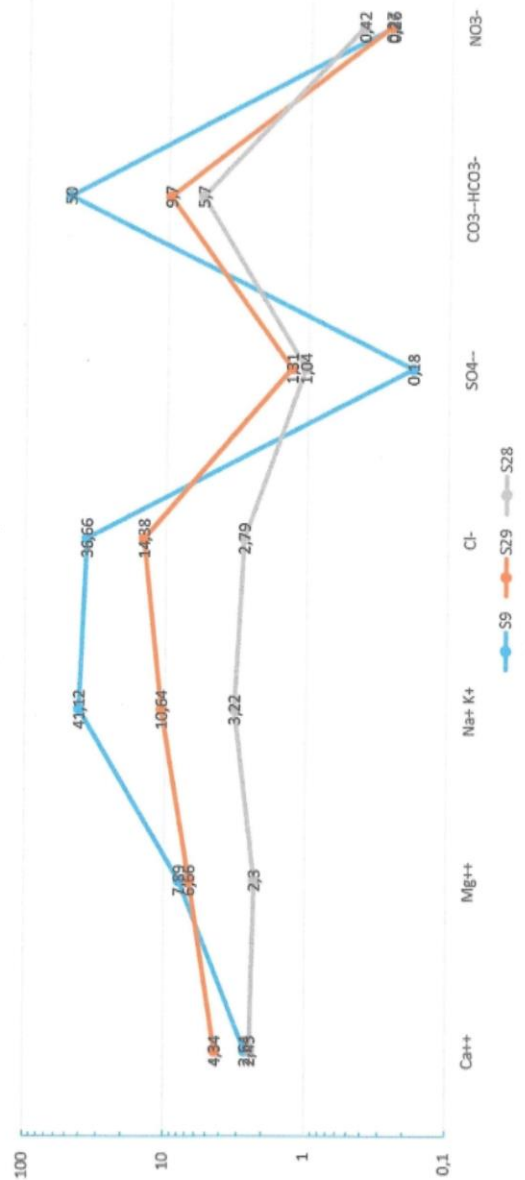
I tre profili idrochimici sono tra loro abbastanza simili e la facies idrochimica è quella bicarbonato-alcalina con la consueta marcata presenza dell'anione cloruro (ancora più evidente nel campione S29); si rileva, però, una importante differenza tra i tre campioni che si manifesta in una progressiva riduzione delle concentrazioni ioniche procedendo da monte verso valle, via via che ci si allontana dal piede della discarica comunale.

La conducibilità segue lo stesso andamento, facendo segnare per i tre piezometri S9, S29, S28, procedendo da monte verso valle, rispettivamente valori pari a 8500, 2400, 910 $\mu\text{S}/\text{cm}$; il potenziale redox aumenta all'accrescersi della distanza dal piede della discarica, facendo registrare valori pari a 150, 250, 260 mV.

Il valore del pH per i tre piezometri S9, S29, S28, in sequenza da monte verso valle, risulta rispettivamente pari a 7.6, 8.1, 7.8.

Piezometri	Concentrazioni (meq/l)					
	Ca++	Mg++	Na+ K+	Cl-	SO4--	CO3--HCO3-
S9	2,64	7,89	41,12	36,66	0,18	50
S29	4,34	6,66	10,64	14,38	1,31	9,7
S28	2,45	2,3	3,22	2,79	1,04	5,7

DIAGRAMMA SCHOELLER
S piezometri superficiali



8.2.2.1 Conclusioni

Si è proceduto nel precedente punto all'esame comparato dei profili idrogeochimici per ciascun piezometro superficiale e profondo.

Sono stati esaminati insieme i piezometri profondi R1, R2, R3, R4, R5, R6; poi sono stati comparati tra loro i vari cluster rappresentati da un piezometro superficiale ed un piezometro profondo, quali S31-R1, S3-R3, S26-R4, S27-R5, S2-R2, S26-R6, ed infine per gruppi affini tutti i piezometri superficiali.

Le analisi sono state condotte adottando i diagrammi quantitativi di Schoeller che, tra l'altro, consentono di individuare acque tra loro diverse o mescolanze delle stesse in termini di concentrazioni assolute.

Si premette che i granitoidi presenti nel bacino in esame sono costituiti prevalentemente da monzograniti anche a due miche e con vene pegmatitiche, associati a cortei filoniani a composizione variabile da dacitica a basatica, nonché, in via subordinata, da migmatiti dell'adiacente complesso metamorfico; queste diverse rocce silicatiche sono soggette ad alterazione chimica di tipo idrolitico che, in linea del tutto generale, determina dapprima la dissoluzione dei silicati, con formazione di minerali secondari, in prevalenza allumosilicati, e messa in soluzione di alcuni ioni, e, successivamente, con ulteriori e complessi processi chimico-fisici, riguardanti anche gli stessi allumosilicati, si ha la messa in soluzione di ulteriori ioni semplici quali sodio, potassio, magnesio, calcio, alluminio, ferro, manganese, ecc. ed altri complessi, che, in definitiva, caratterizzano con le rispettive concentrazioni le acque circolanti nel sottosuolo.

Dette acque, fatte salve tutte le complessità connesse con le infinite reazioni di carattere chimico che possono verificarsi nel sottosuolo a causa delle variazioni della lunghezza e profondità del percorso sotterraneo, delle condizioni di temperatura, di redox, di pH, ecc., devono comunque far proprie alcune caratteristiche chimico-mineralogiche della roccia madre, attraverso l'acquisizione di ioni derivanti dalle circostanze sopra richiamate, più quelle del chimismo derivante dalle attività antropiche.

Queste ultime, nel nostro caso, possono essere rappresentate, ad esempio, dai nitriti e nitrati, dai solfati, in parte dai cloruri (questi ultimi data la vicinanza del sito alla costa possono, in parte, derivare dalle precipitazioni idrometeoriche (Berner, 1996; Cotecchia,

1976), e da altri ioni connessi alla movimentazione, al trattamento e allo smaltimento di r.s.v. e derivati.

Nonostante le appena accennate complessità che regolano il comportamento geochimico tra rocce e acque circolanti al loro interno, le analisi e le interpretazioni condotte nel presente studio consentono di pervenire alle seguenti conclusioni:

- a) non è stata riscontrata alcuna significativa diversità tra le concentrazioni ioniche delle acque prelevate nei piezometri superficiali (fino a 10.00 m di profondità) e le concentrazioni ioniche delle acque prelevate nei piezometri profondi (fino a 100.00 m di profondità, filtrate solo nella porzione inferiore dei piezometri);
- b) le concentrazioni dei principali cationi ed anioni rappresentativi delle acque esaminate, di superficie e di profondità, sono generalmente tra loro comparabili sotto il duplice profilo qualitativo e quantitativo in misura tale che i relativi profili idrochimici rappresentati nei diagrammi di Schoeller sono, per gran parte, addirittura sovrapponibili;
- c) le modeste e non frequenti difformità riscontrate per alcune concentrazioni ioniche sono da attribuirsi ad incidenze di origine fisico-ambientale e/o di origine antropica; tra le prime si individuano le forti escursioni termiche, che possono trasmettersi in profondità tramite le acque di infiltrazione e gli incrementi del regime pluviometrico, che, nei periodi particolarmente piovosi, possono rendere più attiva la circolazione idrica sotterranea; questi due fenomeni fisici possono dar luogo a variazioni sostanziali del pH e del potenziale redox con ripercussioni sugli equilibri chimici in seno alle soluzioni; si annoverano, ancora, tra le incidenze di tipo ambientale, il sollevamento ed il trasporto di polveri anche contaminate ad opera del vento e, infine, le già accennate precipitazioni idrometeoriche con provenienza dal mare che *“sono dominate da concentrazioni di ioni Cl e Na”* (Berner, 1996) e che secondo altri ricercatori *“influenzano il chimismo delle acque sotterranee”* (Cotecchia, 1971);
- d) l'affinità geochimica tra le acque rilevate dai piezometri profondi e da quelli superficiali esclude la possibilità che, nel sito in esame, vi siano acque di diversa genesi e con circuiti diversificati; l'unica falda presente è quella freatica superficiale, da cui, a mezzo di più o meno isolate e modeste reti di fratture (i “nodi” e i “canali aperti” di cui si è detto nel precedente paragrafo richiamando **la teoria della percolazione**), l'acqua percola a quote più basse e può essere

casualmente intercettata dai piezometri profondi, senza peraltro costituire una vera e propria falda di fondo; queste circostanze sono chiaramente illustrate sulla allegata Fig. n. 38, in cui è riportato il caso (A) di “*canali chiusi*” non comunicanti con la falda freatica di superficie e perciò sterili; il caso (B) di “*canali aperti*”, connessi con la falda di superficie e con la zona di recapito, che consentono la percolazione, la circolazione continua ed anche l’alimentazione del piezometro che li intercetta; infine il caso (E), in cui è rappresentato un piezometro attivo che intercetta però un sistema di “*canali aperti localizzati*”, non costituenti “via di percolazione” in quanto l’acqua non è circolante, mancando una “zona di recapito”: il sistema, quindi, si comporta solo come zona di stoccaggio idrico, con possibili fenomeni di ipo-anossia e ripercussioni sul pH e sul potenziale redox, cioè sui parametri regolanti gli equilibri chimici delle soluzioni. (Le Grand, 1967)

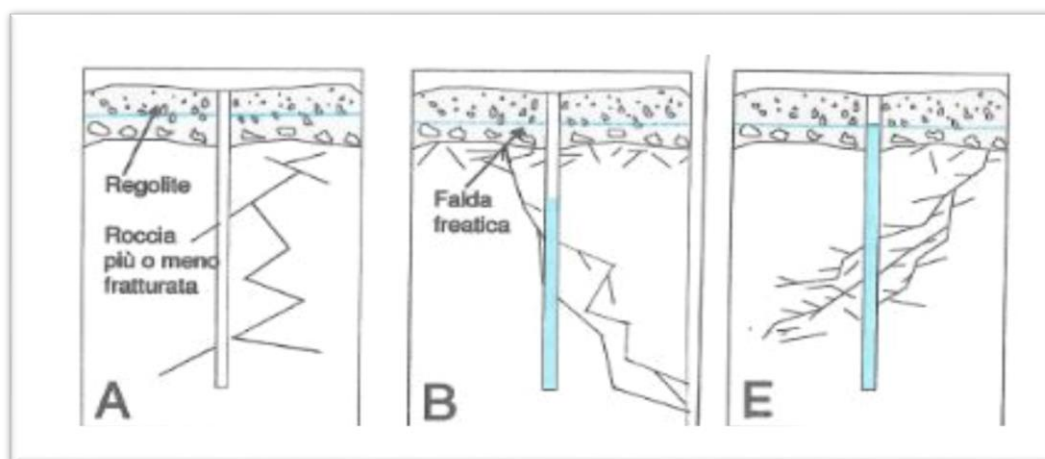


Fig. n.38 – Comportamento idraulico delle fratture profonde in ammassi granitoidi
(da Le Grand, 1967, modificato e reinterpretato secondo la “teoria della percolazione”)

Rappresentazione schematica qualitativa del comportamento idraulico delle fratture profonde in ammassi granitoidi con copertura regolitica e falda freatica:

Caso A) – Piezometro sterile intercettante un sistema di “canali chiusi” (1)

Caso B) – Piezometro attivo intercettante un sistema di “canali aperti” (1) con “via di percolazione” (1) e “zona di recapito” (1); si ha circolazione idrica costante, con perdita di carico nel piezometro.

Caso E) – Piezometro attivo intercettante un sistema di “canali aperti localizzati” (1), che in assenza di una “via di percolazione” (1) e una “zona di recapito” (1) (fiume, sorgente, mare, altro acquifero, ecc.), si identifica solo come zona di stoccaggio idrico, con possibili fenomeni di ipo-anossia.

(1) Definizione riferita alla “Teoria della Percolazione”

e) l'unicità della genesi delle acque presenti nel sottosuolo dell'area di interesse è ulteriormente confermata dalle osservazioni svolte da ARCADIS Italia srl nella *Relazione al Piano di Caratterizzazione*, redatta parallelamente al presente studio, relativamente all'esito del monitoraggio chimico-fisico delle acque circolanti nel sottosuolo per l'anno 2017 (P.O.) e per gli anni antecedenti, 2013-2017 (PMA). Relativamente alla campagna di monitoraggio dell'anno 2017, la citata relazione conclude osservando che “...non si evidenziano significative differenze nei parametri, tali da identificare nettamente la presenza di distinte caratteristiche tra la porzione superficiale e quella profonda dell'acquifero”.

Con riferimento alla campagna di monitoraggio degli anni 2013-2017, la medesima relazione conclude osservando che “...negli anni, diversi eventi con concentrazioni superiori alle CSC...sono presenti sia per la porzione superficiale dell'acquifero che per quella profonda...” e, più avanti, rileva come “...le concentrazioni siano, nella maggior parte dei casi, molto simili tra loro e non mostrano nette e costanti differenze, come potrebbero essere nel caso di acquiferi differenti o non comunicanti.”.

Per i dettagli ed i grafici si rimanda alla relazione citata, senza riprendere ulteriormente l'argomento in questa sede, in quanto si ritiene esaustiva l'analisi operata da ARCADIS Italia srl, che si deve ritenere integrata dalle analisi geochimiche a mezzo dei diagrammi semilogaritmici di Schoeller svolte in precedenza in questo medesimo paragrafo.

8.2.3 Le osservazioni piezometriche dei rilievi del Piano Operativo

Le osservazioni considerate comprendono un arco di tempo intercorrente tra gennaio 2017 ed aprile 2018, all'interno del quale vengono ricomprese anche quelle effettuate nel corso delle indagini del Piano Operativo.

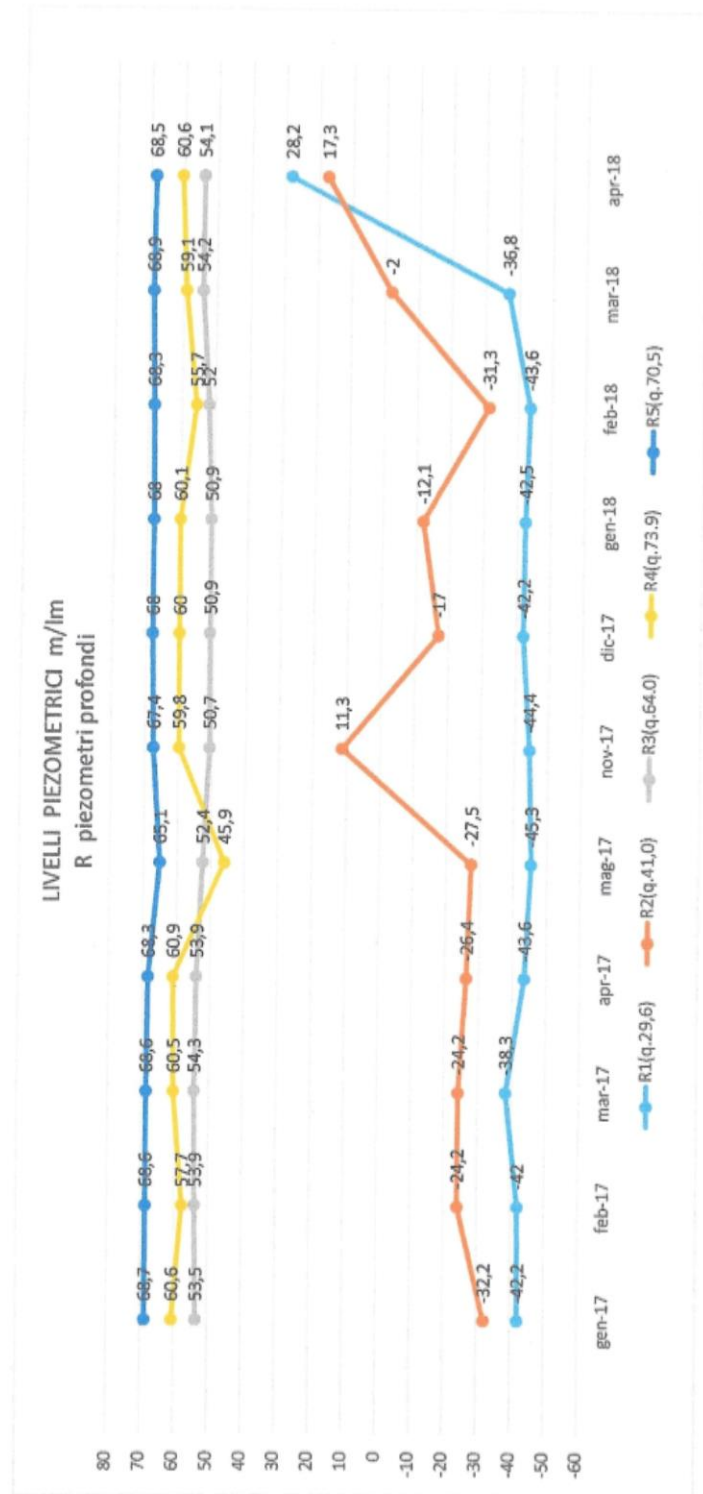
Le misure effettuate sono state esposte nei grafici allegati per meglio evidenziare i *trend* evolutivi.

Il primo grafico riguarda i piezometri riportati in tabella con le loro caratteristiche principali.

Piezometri profondi	Quota boccaforo (m/lm)	Lunghezza (m)
R1	29.6	90.0
R2	41.0	80.0
R3	64.0	80.0
R4	73.9	97.0
R5	70.5	100.0

Nel grafico seguente sono stati confrontate le variazioni delle quote piezometriche assolute riferite al boccaforo.

Piezometri	QUOTE PIEZOMETRICHE m/lm										
	gen-17	feb-17	mar-17	apr-17	mag-17	nov-17	dic-17	gen-18	feb-18	mar-18	apr-18
R1(q.29,6)	-42,2	-42	-38,3	-43,6	-45,3	-44,4	-42,2	-42,5	-43,6	-36,8	28,2
R2(q.41,0)	-32,2	-24,2	-24,2	-26,4	-27,5	11,3	-17	-12,1	-31,3	-2	17,3
R3(q.64,0)	53,5	53,9	54,3	53,9	52,4	50,7	50,9	50,9	52	54,2	54,1
R4(q.73,9)	60,6	57,7	60,5	60,9	45,9	59,8	60	60,1	55,7	59,1	60,6
R5(q.70,5)	68,7	68,6	68,6	68,3	65,1	67,4	68	68	68,3	68,9	68,5



Dal grafico si evince che i piezometri R3, R4 ed R5 accusano, nel periodo di scarsa piovosità, abbassamenti della piezometrica che si attestano sui 2.00 – 3.00 metri; la soggiacenza media per R3 è di circa 10.00 m, per R4 è di circa 14.00 m, per R5 è di circa 2.00 m.

I rilevamenti dei piezometri R1 e R2 non assumono alcun significato in quanto oggetto di emungimento continuo, regolato con dispositivi automatici di sollevamento e controllo dei livelli idrici, per esigenze del sistema di messa in sicurezza di emergenza (MISE) tenuto in esercizio nell'ambito della piattaforma IPPC.

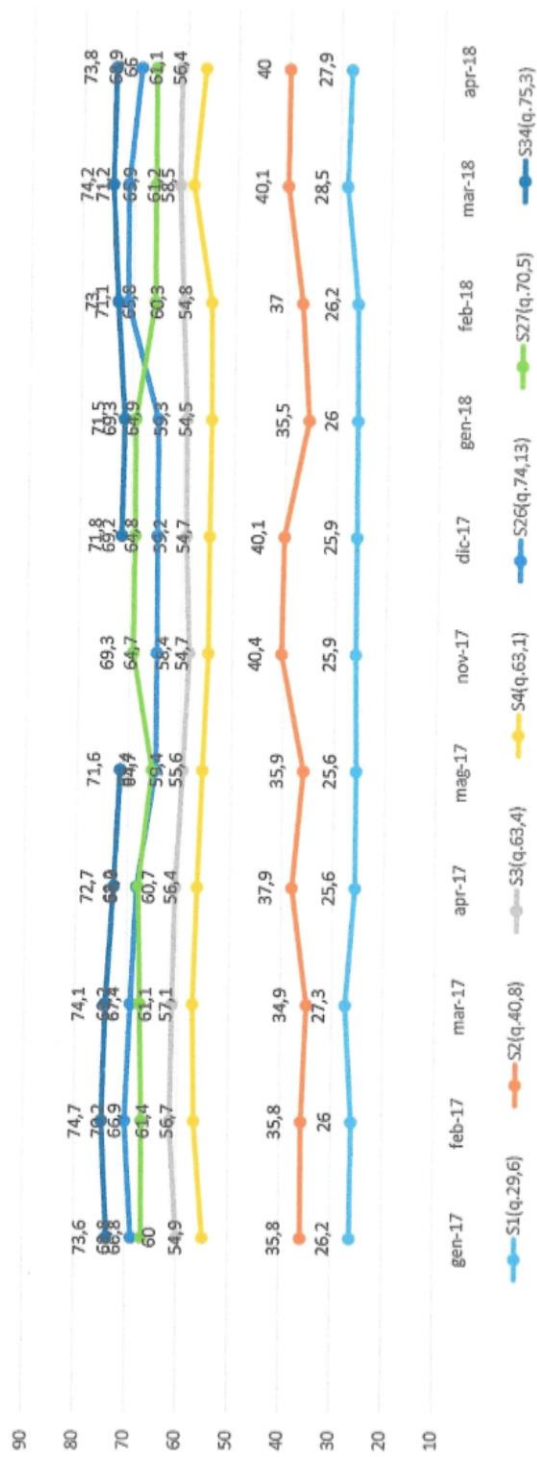
Segue l'analisi, mediante confronto, delle variazioni piezometriche assolute, sempre riferite ai rispettivi boccafori, dei piezometri superficiali così caratterizzati:

Piezometri profondi	Quota boccaforo (m/lm)	Lunghezza (m)
S1	29.6	5.0
S2	40.8	7.0
S3	63.4	10.0
S4	63.1	10.0
S26	74.1	10.0
S27	70.5	10.0
S34	75.3	10.0

Anche in questo caso si eliminano dall'analisi i piezometri S1 e S2 in quanto, insieme ai già citati R1 ed R2, fanno capo al sistema MISE.

Piezometri	QUOTE PIEZOMETRICHE m/lm										
	gen-17	feb-17	mar-17	apr-17	mag-17	nov-17	dic-17	gen-18	feb-18	mar-18	apr-18
S1(q,29,6)	26,2	26	27,3	25,6	25,6	25,9	25,9	26	26,2	28,5	27,9
S2(q,40,8)	35,8	35,8	34,9	37,9	35,9	40,4	40,1	35,5	37	40,1	40
S3(q,63,4)	60	61,4	61,1	60,7	59,4	58,4	59,2	59,3	60,3	61,2	61,1
S4(q,63,1)	54,9	56,7	57,1	56,4	55,6	54,7	54,7	54,5	54,8	58,5	56,4
S26(q,74,13)	68,8	70,2	69,2	68,2	64,7	64,7	64,8	64,9	71,1	71,2	68,9
S27(q,70,5)	66,8	66,9	67,4	67,9	65,4	69,3	69,2	69,3	65,8	65,9	66
S34(q,75,3)	73,6	74,7	74,1	72,7	71,6	71,8	71,8	71,5	73	74,2	73,8

LIVELLI PIEZOMETRICI m/lm
S piezometri superficiali



I restanti piezometri fanno registrare, nei periodi di scarsa piovosità, abbassamenti della piezometrica dell'ordine di qualche metro, che per S3 è di circa 3.00 m, per S4 è di circa 4.00 m, per S26 è di circa 4.00 ÷ 5.00 m, per S27 è pari a circa 2.00 ÷ 3.00 m, per S34 è di circa 3.00 m.

Le soggiacenze medie risultano le seguenti, ovviamente più accentuate nei periodi secchi: per S3 è pari a circa 4.00 m, per S4 è pari a circa 7.00 ÷ 8.00 m, per S26 è pari a circa 7.00 ÷ 8.00 m, per S27 è di circa 3.00 ÷ 4.00 m, per S34 è mediamente pari a circa 2.00 ÷ 3.00 m.

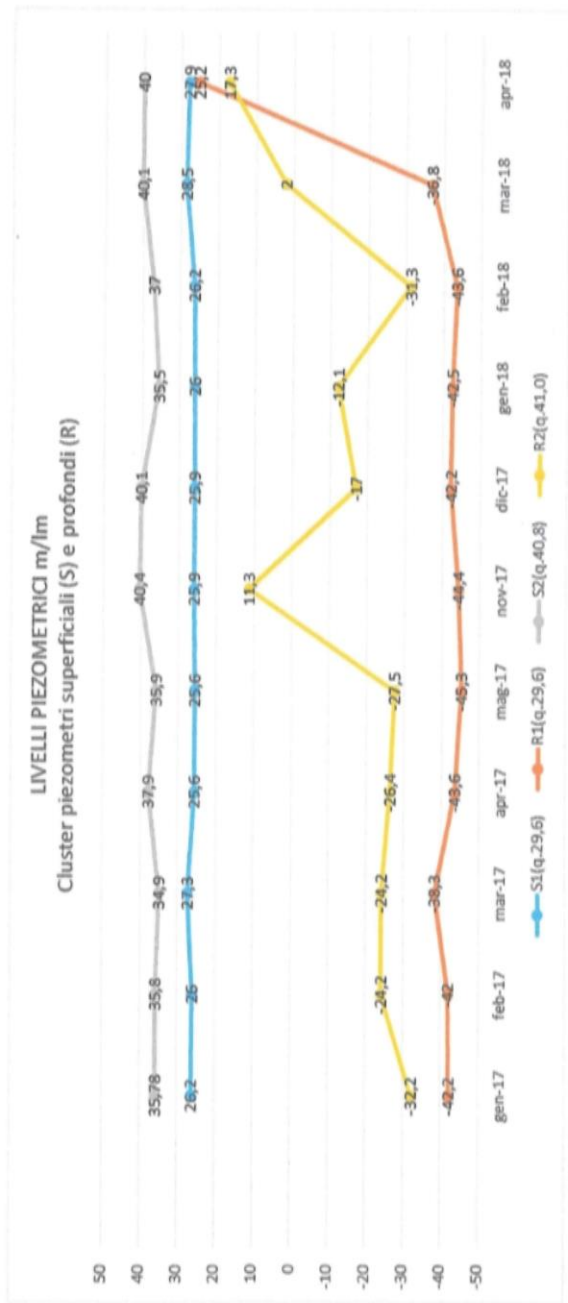
Le successive analisi piezometriche sono state condotte confrontando tra loro i singoli cluster formati da un piezometro profondo R ed un piezometro superficiale S.

I cluster confrontati sono i seguenti: S1-R1, S2-R2, S3-R3, S26-R4, S27-R5.

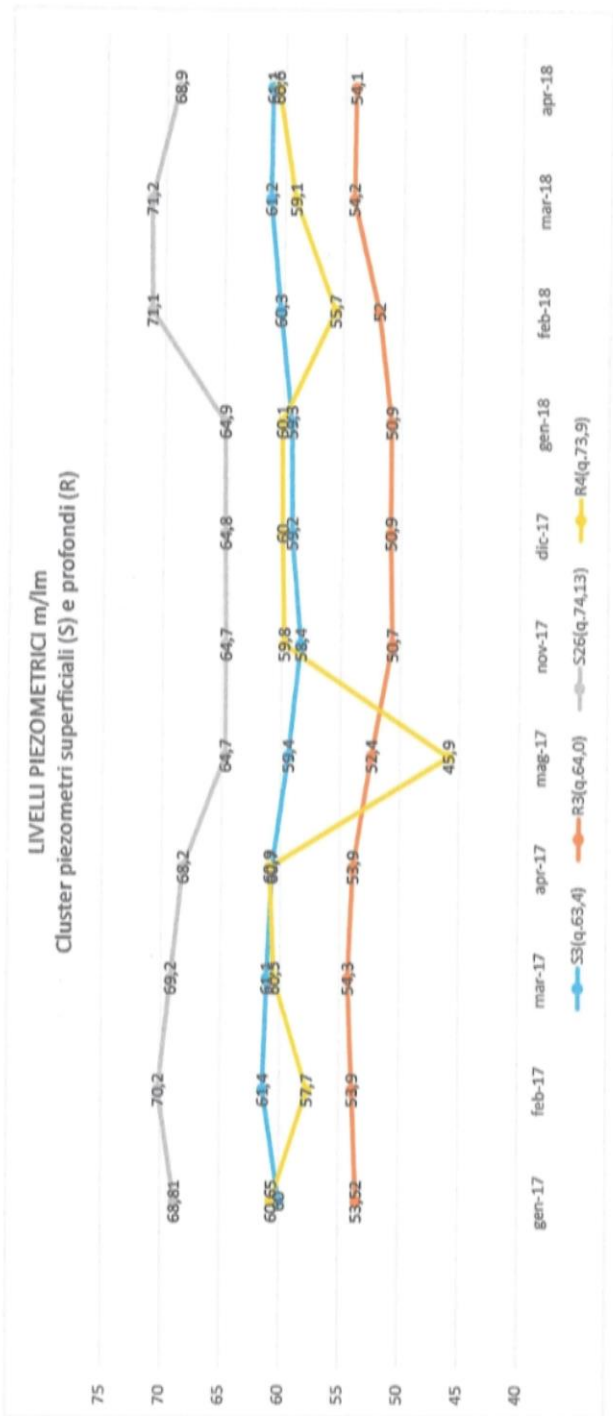
Il primo ed il secondo cluster, S1-R1 ed S2-R2, non possono essere oggetto di valide considerazioni in quanto componenti del già citato sistema di messa in sicurezza di emergenza (MISE) della piattaforma IPPC.

I restanti tre cluster sono analizzati nei due grafici alle pagine seguenti.

Piezometri	QUOTE PIEZOMETRICHE m/lm											
	gen-17	feb-17	mar-17	apr-17	mag-17	nov-17	dic-17	gen-18	feb-18	mar-18	apr-18	
S1(q.29,6)	26,2	26	27,3	25,6	25,6	25,9	25,9	26	26,2	28,5	27,9	
R1(q.29,6)	-42,2	-42	-38,3	-43,6	-45,3	-44,4	-42,2	-42,5	-43,6	-36,8	25,2	
S2(q.40,8)	35,78	35,8	34,9	37,9	35,9	40,4	40,1	35,5	37	40,1	40	
R2(q.41,0)	-32,2	-24,2	-24,2	-26,4	-27,5	11,3	-17	-12,1	-31,3	2	17,3	



Piezometri	QUOTE PIEZOMETRICHE m/lm										
	gen-17	feb-17	mar-17	apr-17	mag-17	nov-17	dic-17	gen-18	feb-18	mar-18	apr-18
S3(q.63,4)	60	61,4	61,1	60,7	59,4	58,4	59,2	59,3	60,3	61,2	61,1
R3(q.64,0)	53,52	53,9	54,3	53,9	52,4	50,7	50,9	50,9	52	54,2	54,1
S26(q.74,13)	68,81	70,2	69,2	68,2	64,7	64,7	64,8	64,9	71,1	71,2	68,9
R4(q.73,9)	60,65	57,7	60,5	60,9	45,9	59,8	60	60,1	55,7	59,1	60,6



Nel primo si raffrontano i cluster S3-R3 ed S26-R4, nel secondo il cluster S27-R5.

Il cluster S3-R3 evidenzia un andamento nel tempo molto simile tra i due piezometri, con un maggior carico piezometrico di S3 rispetto a R3 di circa 7.00 – 8.00 m con la già segnalata flessione nei mesi meno piovosi; anche per il cluster S26-R4 si registra un maggior carico piezometrico per il piezometro superficiale S26 rispetto a quello profondo R4 ma con minor regolarità, presentando il piezometro profondo R4 due flessi nei mesi di febbraio 2017 e 2018 (trascurando quello del mese di maggio 2017 effetto residuale della prova di emungimento condotta in quei giorni).

Il successivo cluster S27-R5 evidenzia un andamento piezometrico del tutto irregolare con fluttuazioni positive e negative per entrambi i piezometri, mediamente contenute entro circa 2.00 m.

Piezometri	QUOTE PIEZOMETRICHE m/lm											
	gen-17	feb-17	mar-17	apr-17	mag-17	nov-17	dic-17	gen-18	feb-18	mar-18	apr-18	
	66,85 68,67	66,9 68,6	67,4 68,6	67,9 68,3	65,4 65,1	69,3 67,4	69,2 68	69,3 68	65,8 68,3	65,9 68,9	66 68,5	

LIVELLI PIEZOMETRICI m/lm
Cluster piezometri superficiali (S) e profondi (R)



I diversi carichi piezometrici osservati in alcuni cluster tra i piezometri superficiali ed i piezometri profondi dimostrano che le *aree di alimentazione* di questi ultimi sono poste a quote diverse da quelle dei piezometri superficiali; evidenziando però che entrambi i piezometri sono alimentati dalla stessa falda freatica superficiale, come dimostrano i profili idrochimici di cui al precedente paragrafo e i comuni *marker* contaminanti.

Si osserva, ancora, che le peculiarità come sopra rilevate per alcuni cluster sono del tutto qualitativamente simili a quelle già oggetto di studi precedenti condotti negli anni 2013-2014.

I risultati di queste osservazioni, soprattutto per l'aspetto concernente il diversificato trend piezometrico per alcuni cluster, integrano e completano il quadro idrogeologico fin qui sviluppato.

8.3 – Definizione del modello idrogeologico

Il modello idrogeologico di seguito definito deriva:

- a) dal modello geologico individuato nella precedente Sezione Seconda, Parti A e B, basato sui rilievi di campagna e sulle indagini sperimentali di tipo geologico, geomeccanico, geognostico e geofisico;
- b) dalla somma dei rilievi ed indagini di tipo idrogeologico, idraulico, geochimico e geofisico esposti nella Sezione Terza.

Il modello idrogeologico, costruito passo dopo passo nei precedenti punti, è sinteticamente configurato come segue, a partire dall'alto:

- Complesso quaternario dei depositi sciolti detritico-alluvionali e alluvionali sabbioso-limosi e, a luoghi, anche argillosi, derivanti dalla coltre arenitica di disfacimento chimico delle masse granitoidi; il Complesso assume spessori ridotti, mediamente dell'ordine di qualche metro, che, localmente e in casi non frequenti, possono raggiungere una decina di metri.

E' caratterizzato da una permeabilità per porosità e, perciò, sede di una modesta e discontinua falda freatica.

- Complesso magmatico ercinico, costituito prevalentemente da monzograniti e leucograniti anche a due miche, con filoni aplitici, pegmatitici anche a composizione basaltica; il Complesso si presenta alterato e fratturato nella banda superficiale, per spessori mediamente contenuti entro i dieci metri, poco frequentemente di poco superiori.

E' caratterizzato da una permeabilità per fratturazione, perciò sede di circolazione idrica in continuità con quella insediata nella coltre arenizzata di superficie.

Questa continuità idrogeologica dà luogo, in definitiva, ad un acquifero unico, caratterizzato da permeabilità mista, il cui spessore medio complessivo è compreso entro i dieci metri dal piano di campagna, superati di poco in casi non frequenti.

Le prove di emungimento condotte su questo acquifero superficiale (CIPNES, 2015-2016) hanno consentito di attribuire alla permeabilità un valore medio di $k = 10^{-6}$ m/s, mentre con le prove Lugeon sono stati ottenuti valori più bassi, pari a $k = 10^{-7} \div 10^{-8}$ m/s, valori meno attendibili del precedente perché determinati con una prova a carattere più puntuale.

La trasmissività media di questo "acquifero misto" comprende i seguenti valori $T = 10^{-5} \div 10^{-7}$ m²/s.

Il Complesso granitoide prosegue in profondità migliorando le proprie caratteristiche fisico-strutturali, diradandosi e chiudendosi le discontinuità anche per effetto della pressione litostatica crescente; il Complesso assume, perciò, caratteristiche idrogeologiche rientranti, a grande scala, nel campo della impermeabilità, risultando assenti i grandi corridoi tettonici e le zone cataclastiche, in genere sedi di importanti circolazioni idriche sotterranee in rete, con carattere di continuità spaziale e perciò costituenti vere e proprie *falde di fondo*.

Tuttavia tale Complesso è interessato in profondità da modeste e puntuali manifestazioni idriche nei casi in cui isolate microfratture si connettono tra loro e con la falda freatica superficiale (**con nodi e canali aperti**), dando luogo ad una circoscritta "**via di percolazione**", senza peraltro costituire una falda di fondo.

Questa tipologia di circolazione idrica sotterranea, interpretata secondo la "**teoria della percolazione**" e chiaramente sintetizzata nei tre casi di Fig. n.38, dà ragione dei seguenti aspetti:

- a) della riscontrata conservazione dei caratteri geochimici tra acque dei piezometri superficiali e profondi, in ogni caso alimentati dalla falda freatica di superficie;
- b) della presenza anche nei piezometri profondi di *marker* contaminanti provenienti dalla superficie per il medesimo motivo di cui sopra;
- c) dei diversi carichi piezometrici rilevati tra i piezometri superficiali e profondi; questi ultimi, infatti, possono trovarsi in posizione di monte o di valle rispetto all'area di alimentazione (sempre ubicata nella falda di superficie) della “**via di percolazione**” (cioè la rete di microfratture interconnesse);
- d) del comportamento “libero” (cioè non in pressione) delle descritte manifestazioni idriche profonde, rilevato in via sperimentale dalle prove di emungimento dei piezometri profondi, del Piano Operativo;
- e) della scarsa potenzialità idrica di queste manifestazioni profonde, identica a quella della falda libera superficiale da cui si alimenta; detta scarsa potenzialità è stata rilevata sia sperimentalmente dalle prove di emungimento dei piezometri superficiali e profondi, sia osservata direttamente nel corso delle perforazioni dei piezometri profondi (i rapporti di cantiere descrivono, infatti, i tratti acquiferi come modeste venute d'acqua o come zone umide, in taluni casi con depositi idrici nei piezometri insufficienti anche alle operazioni di spurgo degli stessi e richiedenti, perciò, immissioni di acqua potabile dall'alto); detta scarsa potenzialità deriva dalla coincidenza dei limiti del bacino idrografico e del bacino idrogeologico, dalla modestissima estensione areale del bacino idrogeologico e dall'unica e peraltro scarsa fonte di alimentazione data dalle sole piogge zenitali;
- f) della scarsa presenza nei volumi rocciosi profondi delle “vie di percolazione” (cioè delle reti di microfratture che portano l'acqua in profondità), evidenziata dalla massiccia campagna di indagini geofisiche, costituita da n.19 MASW e n.10 SEV (CIPNES, 2014), questi ultimi spinti a 90.00 ÷ 135.00 m di profondità ed eseguiti sia all'interno che all'esterno della piattaforma IPPC; oltre ad escludere circolazioni idriche massive e/o discontinuità con portate idriche significative, i SEV, con lievi e appena accennati “flessi”, rilevati in due soli casi, dettero spazio all'ipotesi, a 55.00 m e ad 80.00 m, che in profondità potessero essere presenti manifestazioni idriche puntuali e di scarsa entità;
- g) delle condizioni di anossia per stasi idrodinamica e/o per assenza di turbolenza, comunque per ridotta capacità di aerazione o per mancanza di contatto diretto delle acque con l'atmosfera, con ripercussioni sul pH e sul potenziale redox e,

conseguentemente, con variazione degli equilibri idrodinamici; il caso è chiarito nella Fig. n.38, caso E.

Osservato quanto sopra si riportano di seguito i risultati delle prove di emungimento per l'attribuzione dei parametri idraulici alla circolazione idrica presente nelle isolate reti di fratture in profondità.

La caratterizzazione idraulica della circolazione profonda è stata ottenuta con prove di emungimento sui piezometri profondi senza ausilio dei piezometri superficiali, che non hanno fornito risposta idraulica agli emungimenti; gli esiti, perciò, sono riferiti alla sola stazione di pompaggio, con la conseguenza che non è stato possibile calcolare il valore del coefficiente di immagazzinamento.

Per la permeabilità si sono ottenuti i seguenti valori medi: $k = 10^{-6}$ m/s e per la trasmissività si sono ottenuti valori massimi pari a $T = 1.78$ m²/die: valori bassi per la permeabilità, molto bassi per la trasmissività, tipici di acquiferi a scarsa potenzialità.

Concludendo sul punto, si osserva quanto segue.

I rilevati bassi valori dei parametri quantitativi di carattere idraulico attribuiti come sopra ai descritti acquiferi, si correlano perfettamente con i risultati ottenuti dal “*bilancio idrogeologico*”, eseguito dallo scrivente per precedenti studi (CIPNES, 2014), di seguito sintetizzati.

La falda freatica di superficie è caratterizzata da un areale molto modesto pari a 475'000 m², identico a quello del bacino idrografico e del bacino idrogeologico per i motivi in precedenza esposti.

La superficie di detta falda, come già riferito, segue e si adatta al piano di campagna, anche perché il *top* dell'acquifero è costituito da un mezzo poroso; l'andamento medio della superficie freatica, superando le discontinuità presenti con opportune interpolazioni, è riportato nella carta delle isopieze, già redatta dallo scrivente per un precedente studio (CIPNES, 2014) e che qui si ripropone conservando intatta la sua validità (Fig. 39).

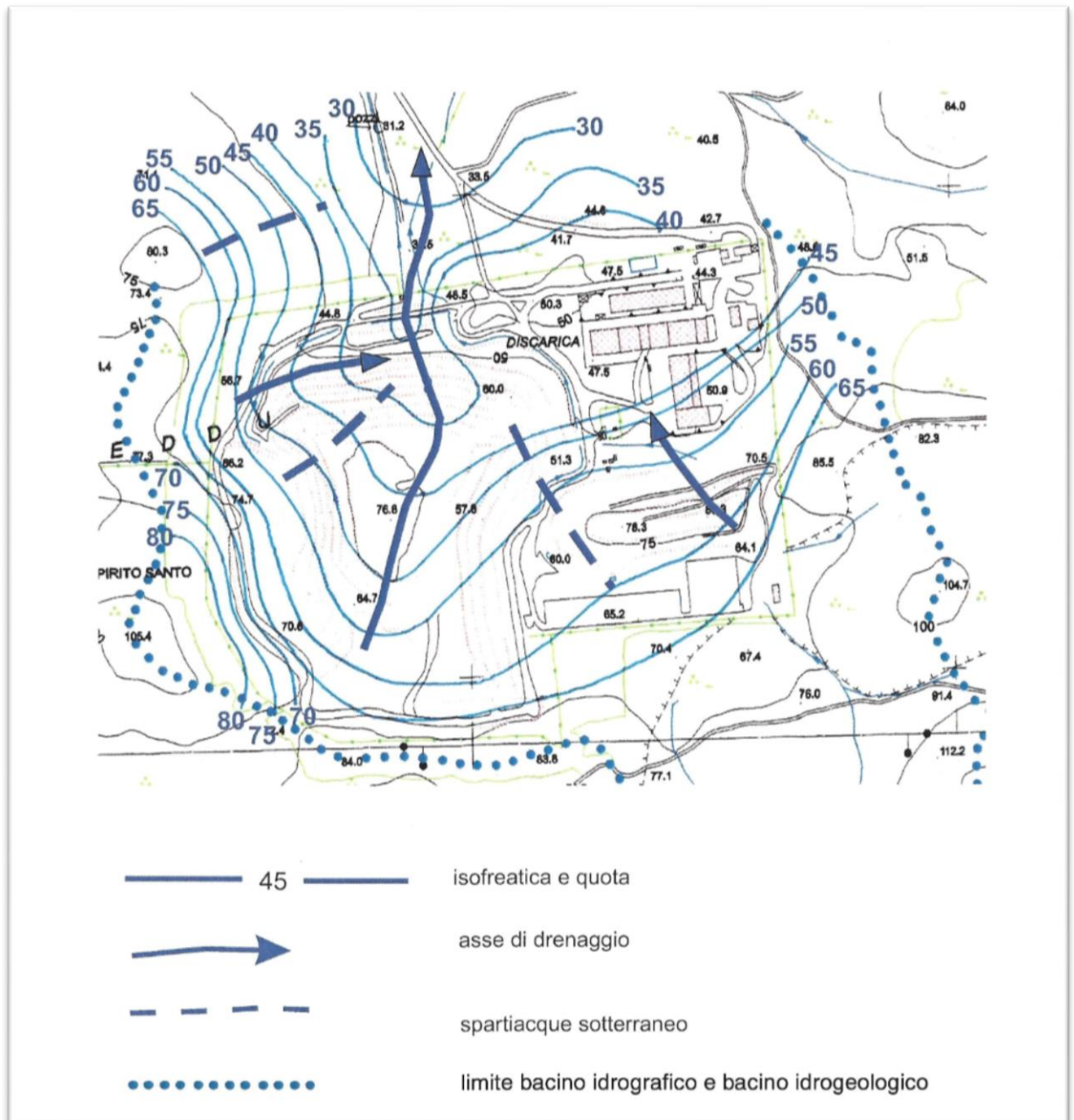


Fig. n. 39 – Carta delle isofreatiche (De Paola, 2014)

Il “*bilancio idrogeologico*” del bacino in questione fornisce una “*resa unitaria*”, meglio nota come “*alimentazione unitaria specifica*”, pari a $I_s = 0.51 \div 0.82$ l/s per km², valore assai modesto, tipico di una potenzialità idrica molto ridotta, che trova peraltro riscontro in letteratura dato che, per bacini della Sardegna più estesi di quello in oggetto, viene fornito un valore compreso tra 1.0 e 2.0 l/s per km², giustificato dalle diverse superfici areali dei bacini considerati (Baiocchi ed Al., 2016).

Ciò vale per la falda libera di superficie, ma vale anche per la circolazione idrica profonda, alimentata in via esclusiva dalla prima.

I piezometri superficiali e profondi, che attingono acqua i primi direttamente dalla falda superficiale ed i secondi, in via indiretta e con un percorso in fratture ad andamento sub-verticale, non possono perciò che esprimere potenzialità idriche povere, dello stesso ordine di grandezza della matrice da cui dipendono.

L'allegata colonna litostratigrafica tipo con l'annessa caratterizzazione idrogeologica chiarisce quanto fin qui esposto (Fig. n.40)

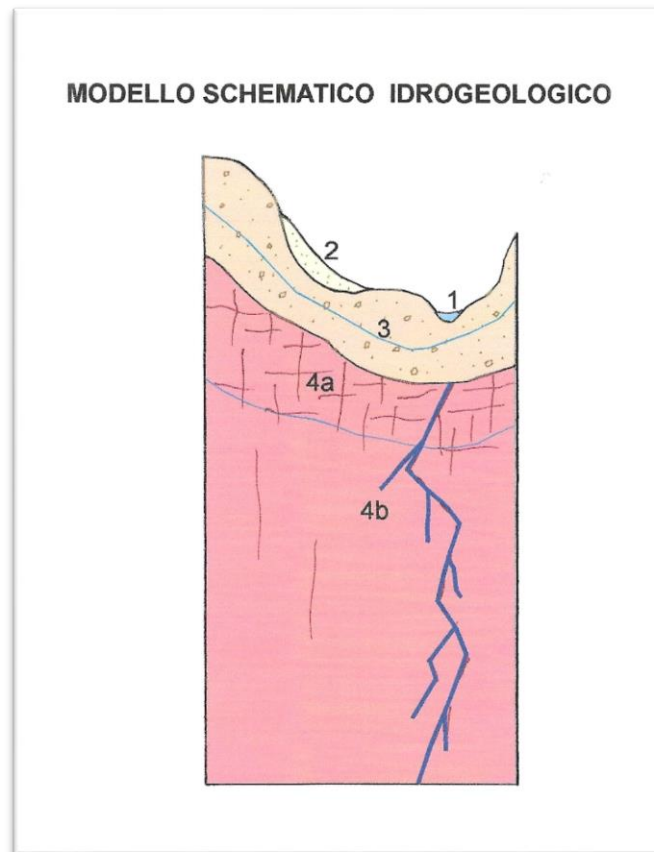


Fig. n.40 – Modello idrogeologico

FORMAZIONE IDROGEOLOGICA SUPERFICIALE

ACQUIFERO MISTO PERMEABILE PER POROSITA' E FRATTURAZIONE

- UNITA' LITOSTRATIGRAFICHE E TIPO DI PERMEABILITA'
Coltre arenizzata, permeabile per porosità
Granitoidi ercinici, permeabili per fratturazione
- PARAMETRI IDRAULICI ACQUIFERO
Permeabilità $k = 10^{-6} - 10^{-8}$ m/s bassa
Tramissività $T = 10^{-5} - 10^{-7}$ m²/s IV – VII da bassa a impercettibile
Spessore medio $s = 8.0 - 10.0$ m
Spessore max $s = 10.0 - 15.0$ m

FORMAZIONE IDROGEOLOGICA PROFONDA

ACQUIFERO IMPERMEABILE A LUOGHI PERMEABILI PER FRATTURAZIONE

- UNITA' LITOSTRATIGRAFICA E TIPO DI PERMEABILITA'
Granitoidi ercinici, generalmente impermeabili, localmente resi permeabili da isolate microreti di fratture
- PARAMETRI IDRAULICI DELLE MICRORETI ACQUIFERE
(da prove di pompaggio su n.6 piezometri profondi, di cui n.2 – S4 ed S5 – praticamente improduttivi)
Permeabilità $k = 10^{-6} - 10^{-7}$ m/s bassa
Tramissività media $T = 0.037 - 0.1$ m²/die
Classificazione Krasny: V – VI, molto bassa – impercettibile
Non idonea ad approvvigionamenti
Tramissività min $T = 0.006$ m²/die
Classificazione Krasny: VI, impercettibile
Non idonea ad approvvigionamenti
Tramissività max $T = 1.78$ m²/die
Classificazione Krasny: IV, bassa
Limitati approvvigionamenti locali

Si ritiene, pertanto, che il modello idrogeologico proposto interpreta e sintetizza questi aspetti, inquadrando i parametri ottenuti per via sperimentale nell'ottica più rigorosa e più prospettica dei principi basici di carattere teorico.

Benevento, Luglio 2018

Prof. geol. Pietro Antonio De Paola