CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA DEL SITO DI MANGINA

COMUNE DI BORGHETTO VARA
Provincia della Spezia

Committente:

Progetto:

STUDIO GEOTECNICO ITALIANO srl
ingegneria geotecnica - ingegneria sismica - ingegneria ambientale
geologia applicata

Luglio 2013	Tavola n°:	Revisione n°: 01/13

SERVIZI GEOLOGICI

IL GEOLOGO (Dott. Gianpiero Brozzo)	

SOMMARIO

1. PREMESSE 4

1.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE 4
1.2 LEGISLAZIONE VIGENTE E VINCOLI DELL'AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME MAGRA 6
1.3 METODOLOGIA DI INDAGINE 8

2. ASSETTO GEOLOGICO - STRUTTURALE 10

2.1 ASSETTO GEOLOGICO GENERALE 10
2.2 ASSETTO STRUTTURALE 12
2.3 RILIEVO DI TERRENO E DESCRIZIONE DELLE FORMAZIONI AFFIORANTI 14
2.3.1 Arenarie del Gottero 14
2.3.2 Depositi detritici 16
2.3.3 Depositi alluvionali attuali e recenti 17
2.3.4 Depositi alluvionali terrazzati 18
2.3.5 Depositi di riporto 18

3. ASSETTO GEOMORFOLOGICO 19

3.1 MORFOLOGIA ALLUVIONALE 19
3.2 MORFOLOGIA DEI VERSANTI 21

4. ASSETTO IDROLOGICO ED IDROGEOLOGICO 23

4.1 INQUADRAMENTO CLIMATICO 23
4.2 INQUADRAMENTO IDROLOGICO DEI BACINI DEL SITO DI MANGINA 26
4.3 DESCRIZIONE DELLE CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE DELLE FORMAZIONI 31
4.4 PROVE DI PERMEABILITÀ 32
4.5 MAPPE DELLE ISOFREATICHE 34
4.6 MONITORAGGIO PIEZOMETRICO 36

5. GEOCHIMICA DELLE ACQUE 37

5.1 ATTIVITÀ DI TERRENO ED ANALISI DI LABORATORIO 37
5.2 CLASSIFICAZIONE CHIMICA DELLE ACQUE 40
5.3 DIAGRAMMA PCO_2 - pH 42
5.4 DIAGRAMMI DEI RAPPORTI IONICI 43
5.5 DIAGRAMMI DI CORRELAZIONE BINARI 45
5.6 IMPLICAZIONI IDROGEOLOGICHE DELLO STUDIO GEOCHIMICO 50

6. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI 52

6.1 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI DEPOSITI DI COPERTURA 52
6.2 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEGLI AMMASSI ROCCIOSI 55
6.3 SEZIONI GEOLOGICHE 57
6.4 CARATTERIZZAZIONE SISMICA TERRENI 58
6.4.1 Inquadramento sismico dell'area 58
6.4.2 Liquefazione 60
6.4.3 Prospezione sismica e prove down-hole 64

7. CONCLUSIONI 67

ALLEGATI

Allegati alla sezione 1

- All. 1.1. Planimetria con la localizzazione dei sondaggi e delle linee di prospezione sismica

Allegati alla sezione 2

- allegato 2.1. Foto aerea con lineazioni
- allegato 2.2. Carta geologica con elementi geomorfologici ed idrogeologici

Allegati alla sezione 4

- allegato 4.1 a,b. Mappe del logaritmo della permeabilità
- allegato 4.2. Mappe piezometriche

Allegati alla sezione 5

- allegato 5.1 a,b. Mappe dell'affinità termodinamica con la calcite

Allegati alla sezione 6

- allegato 6.1. Tabella dei dati geotecnici
- allegato 6.2. Mappa delle isopache dei depositi di copertura del substrato roccioso
- allegato 6.3. Sezione geologica A

1. PREMESSE

1.1 Inquadramento territoriale

Il presente studio riguarda la caratterizzazione geologica, geomorfologica ed idrogeologica del sito di Mangina, nel Comune di Borghetto Vara (Provincia della Spezia). L'area di indagine interessa un versante posto in sponda destra del Torrente Malacqua ed è compresa tra le quote 135 e 400 m s.l.m., per un'estensione di circa 0.6 km^2.

Le risultanze delle indagini di cui alla presente relazione dovranno supportare il progetto di una discarica per rifiuti speciali non pericolosi da realizzare nel sito di Mangina individuato dal "*Piano per l'organizzazione del sistema integrato di gestione dei RU nella Provincia della Spezia*", approvato con Deliberazione del Consiglio Provinciale n° 23 del 03 Marzo 2003.

La localizzazione dell'area di indagine e del sito in cui si intende realizzare la discarica sono evidenziati nella cartografia di figura 1.1 e nella foto di figura 1.2.

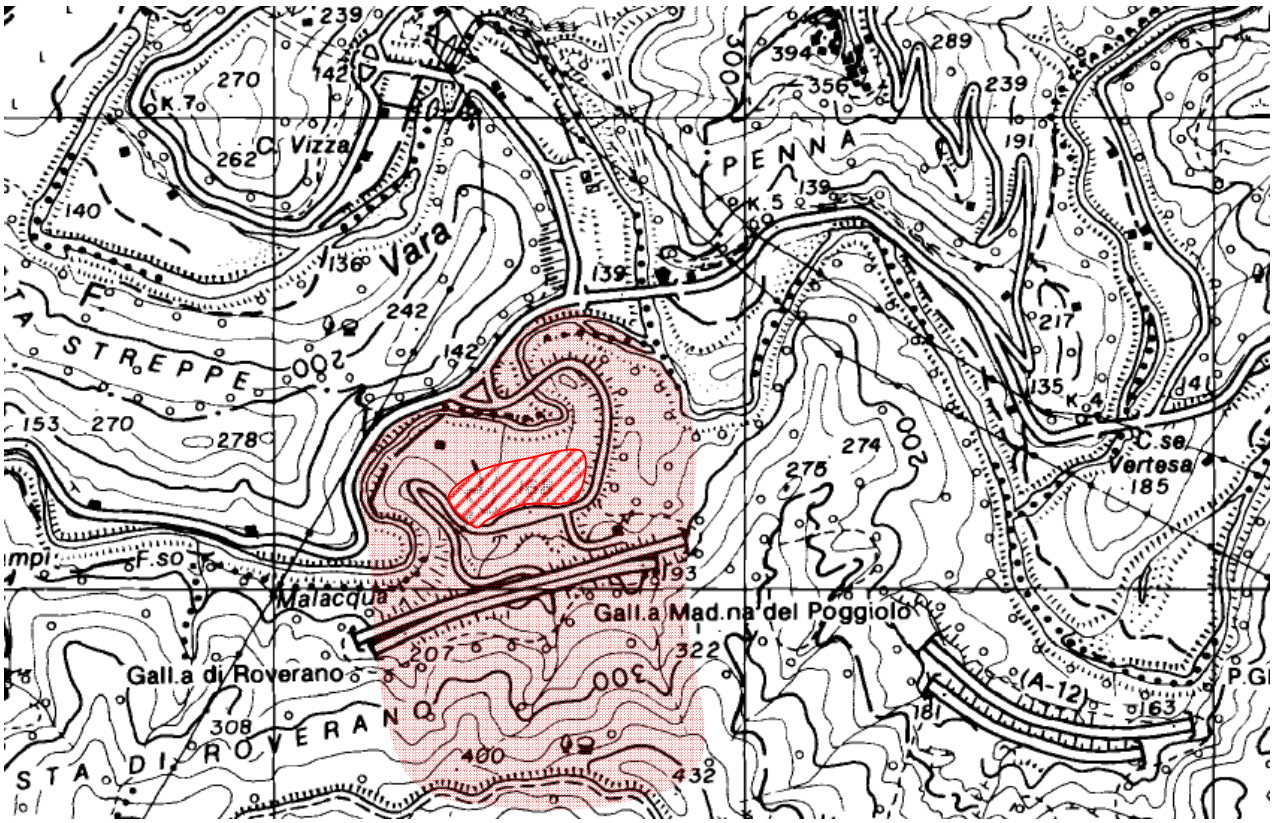


Fig. 1.1. Localizzazione dell'area di indagine (area rosa) con indicazione del sito (area tratteggiata) nel quale si intende realizzare la discarica su estratto CTR 1:25000 (non in scala).

E' necessario premettere che, anche se lo stato attuale di avanzamento delle indagini è da considerarsi soddisfacente, il presente rapporto ha ancora carattere di preliminarità essendo ancora da completare le attività di monitoraggio dei livelli piezometrici che dovranno essere protratte per almeno un anno idrologico e quindi si concluderanno nel dicembre 2013.

Si dovranno acquisire inoltre almeno tre letture inclinometriche sui due fori di misura installati. Rimangono poi ancora da chiarire alcuni aspetti geologici puntuali, attraverso ulteriori rilevi di campo e quindi la mappa geologica potrà subire lievi modifiche.

Sono ancora in corso infine approfondimenti su aspetti geochimici con lo scopo di stabilire i valori di fondo naturali del sito, anche alla luce degli indizi di contaminazione ipotizzati su alcuni punti di campionamento e della recente scoperta di una discarica sepolta sul limite Est dell'area di intervento.



Fig. 1.2. Foto aerea dell' area di indagine

1.2 Legislazione vigente e vincoli dell'Autorità di bacino del fiume Magra

Le indagini sono state eseguite in ottemperanza a quanto previsto nella normativa del D.M. 11.03.1988, D.M. 14.01.2008, Circolare n. 617 del 02.02.09, Eurocodice 8 del 1998, Eurocodice 7.1 del 1997, Eurocodice 7.2 del 2002 ed Eurocodice 7.3 del 2002 ed hanno l'obiettivo di definire le caratteristiche stratigrafiche dei terreni ed il modello geologico, geomorfologico ed idrogeologico della zona di indagine.

Il D.Lgs. n. 36/2003 è il provvedimento normativo di riferimento che stabilisce i requisiti geologici, geomorfologici ed idrogeologici dei siti da destinare all'impianto di discariche per lo smaltimento di rifiuti. Nel seguito se ne riportano alcuni passi significativi.

DECRETO LEGISLATIVO 13 GENNAIO 2003, N. 36

Articolo 8 (Domanda di autorizzazione)
…..
d) la descrizione del sito, ivi comprese le caratteristiche idrogeologiche, geologiche e geotecniche, corredata da un rilevamento geologico di dettaglio e da una dettagliata indagine stratigrafica eseguita con prelievo di campioni e relative prove di laboratorio con riferimento al decreto 11 marzo 1988, pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 127 del 1° giugno 1988;

Articolo 9 (Condizioni per il rilascio dell'autorizzazione delle discariche)
…..
g) il richiedente si impegni ad eseguire preliminarmente all'avviamento dell'impianto una campagna di monitoraggio delle acque sotterranee conformemente a quanto previsto all'allegato 2.

Allegato 2

Criteri costruttivi e gestionali degli impianti di discarica

2. Impianti per rifiuti non pericolosi e per rifiuti pericolosi
2.1. Ubicazione
….
Gli impianti non vanno ubicati di norma:
- in aree interessate da fenomeni quali faglie attive, aree a rischio sismico di 1a categoria così come classificate dalla legge 2 febbraio 1974, n. 64, e provvedimenti attuativi, e aree interessate da attività vulcanica, ivi compresi i campi solfatarici, che per frequenza ed intensità potrebbero pregiudicare l'isolamento dei rifiuti;
- in corrispondenza di doline, inghiottitoi o altre forme di carsismo superficiale;
- in aree dove i processi geologici superficiali quali l'erosione accelerata, le frane, l'instabilità dei pendii, le migrazioni degli alvei fluviali potrebbero compromettere l'integrità della discarica e delle opere ad essa connesse;
- in aree soggette ad attività di tipo idrotermale;
- in aree sondabili, instabili e alluvionabili; dove al riguardo deve essere presa come riferimento la piena con tempo di ritorno minimo pari a 200 anni.

2.4.2. Barriera geologica
Il substrato della base e dei fianchi della discarica deve consistere in una formazione geologica naturale che risponda a requisiti di permeabilità e spessore almeno equivalente a quello risultante dai seguenti criteri:
- discarica per rifiuti non pericolosi: $k \leq 1 \times 10.9$ m/s e $s \geq 1$ m;
- discarica per rifiuti pericolosi: $k \leq 1 \times 10.9$ m/s e $s \geq 5$ m.

La continuità e le caratteristiche di permeabilità della barriera geologica su tutta l'area interessata dalla discarica devono essere opportunamente accertate mediante indagini e perforazioni geognostiche.
La barriera geologica, qualora non soddisfi naturalmente le condizioni di cui sopra, può essere completata artificialmente attraverso un sistema barriera di confinamento opportunamente realizzato che fornisca una protezione equivalente.
Per tutti gli impianti deve essere prevista l'impermeabilizzazione del fondo e delle pareti con un rivestimento di materiale artificiale posto al di sopra della barriera geologica, su uno strato di materiale minerale compattato.
Tale rivestimento deve avere caratteristiche idonee a resistere alle sollecitazioni chimiche e meccaniche presenti nella discarica.

Il piano di imposta dello strato inferiore della barriera di confinamento deve essere posto al di sopra del tetto dell'acquifero confinato con un franco di almeno 1,5 m, nel caso di acquifero non confinato, al di sopra della quota di massima escursione della falda con un franco di almeno 2 m.

2.7. Stabilità

Nella fase di caratterizzazione del sito è necessario accertarsi a mezzo di specifiche indagini e prove geotecniche che il substrato geologico, in considerazione della morfologia della discarica e dei carichi previsti nonché delle condizioni operative, non vada soggetto a cedimenti tali da danneggiare i sistemi di protezione ambientale della discarica.
Inoltre deve essere verificata in corso d'opera la stabilità del fronte dei rifiuti scaricati, come al successivo punto 2.10, e la stabilità dell'insieme terreno di fondazione-discarica con particolare riferimento alla stabilità dei pendii ai sensi del decreto del Ministro dei lavori pubblici in data 11 marzo 1988, pubblicato nel supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale n. 127 del 1° giugno1988, tenendo conto dei normali assestamenti dovuti alla degradazione dei rifiuti.

Secondo il P.A.I. (Piano di assetto idrogeologico) del Bacino del Fiume Magra l'area non ricade in alcuna classe di suscettività al dissesto.

Nella Carta della pericolosità idraulica, con fascia di riassetto fluviale ed aree inondabili (vedi stralcio cartografia di figura 1.3) un ampio settore della pianura alluvionale in destra del Torrente Malacqua, presso il sito di Mangina, è compreso nelle fasce a pericolosità idraulica molto elevata e media. L'area di intervento risulta esterna a tali fasce.

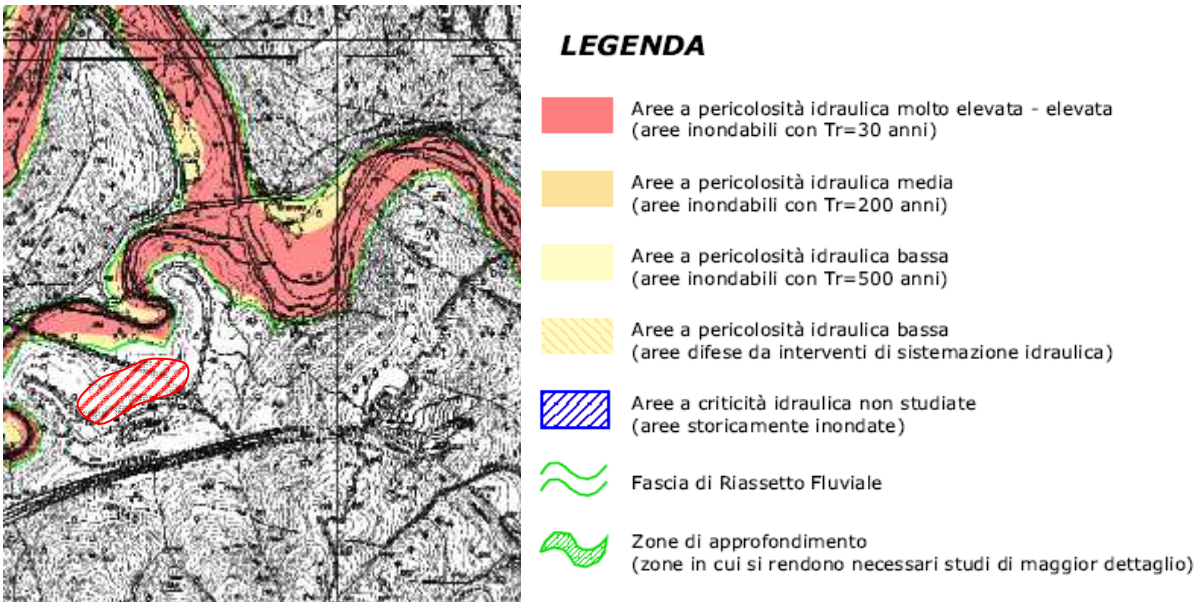


Fig. 1.3.. Stralcio cartografia piano di bacino - Pericolosità idraulica
con delimitazione indicativa dell'area di intervento (area a tratteggio rosso).

1.3 Metodologia di indagine

Le indagini sono state programmate con l'obiettivo di fornire un'approfondita valutazione delle caratteristiche geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche, idrochimiche e geotecniche dell'area di intervento.

In figura 1.4 è riportato lo standard di lavoro suggerito dal Consiglio Nazionale dei Geologi per la redazione di relazioni geologiche a supporto dei progetti di realizzazione di discariche.

La metodologia di lavoro è stata sviluppata attraverso successive fasi che hanno compreso una serie di indagini conoscitive che possono essere così riassunte:

- ricerca bibliografica dei dati di carattere geologico, geomorfologico ed idrogeologico sull'area d'intervento;
- rilevamento geolitologico dei terreni su una superficie congrua nell'intorno dell'area di intervento;
- perforazione di n. 21 sondaggi geognostici (di cui n. 17 attrezzati a piezometro e n. 2 ad inclinometro);
- prove idrogeologiche, geotecniche e geofisiche in foro;
- analisi geotecniche di laboratorio;
- prospezioni geofisiche con metodo sismico a rifrazione;
- campagne di misurazione dei livelli piezometrici nei fori allestiti con livellazione di precisione dei "bocca-pozzo" e loro georeferenziazione;
- Installazione di sonde C.T.D. (misura di conducibilità elettrica, della temperatura e del livello delle acque sotterranee) per l'acquisizione in continuo dei parametri idraulici e fisici delle acque sotterranee.
- campionamento ed analisi di acque sotterranee e superficiali per la loro caratterizzazione geochimica a supporto della definizione del modello idrogeologico del sito;
- produzione di elaborati tecnici e cartografici quali mappe geologiche di dettaglio, mappe piezometriche, mappe delle isobate del substrato roccioso etc.;
- Redazione di relazione descrittiva delle indagini e dei risultati delle elaborazioni.

Alcune delle attività elencate sono tuttora in corso di svolgimento.

La planimetria con la localizzazione dei sondaggi e delle linee di prospezione sismica, è riportata nella mappa di allegato 1.1.

Le stratigrafie dei sondaggi geognostici, gli esiti delle prove in foro, i certificati geotecnici e gli esiti della prospezione sismica sono allegati alla documentazione progettuale (rif. 08562-006R03E01).

Tutte le mappe ad isovalori (e.g. mappe isopiezometriche, mappe di isoconcentrazione etc.) sono state elaborate utilizzando l'algoritmo di interpolazione del "*Kriging*", metodo di regressione usato nell'ambito dell'analisi geostatistica, che permette di interpolare una grandezza nello spazio, minimizzando l'errore quadratico medio.

I dati geologici, geotecnici, idrogeologici, geochimici prodotti da queste indagini, la loro elaborazione ed interpretazione, consentiranno di definire nel dettaglio gli aspetti geologico-tecnici che dovranno supportare le decisioni e le scelte progettuali sul sito.

Indicazioni sulle indagini geognostiche da eseguire per la redazione della relazione geotecnica secondo litologia interessata e complessità geologica del sito.

(La tipologia ed il numero delle indagini da effettuare rimangono a discrezione del professionista in riferimento ai dati in suo possesso relativi ad altri lavori svolti nell'area; in ogni caso dette indagini devono fare riferimento alle indicazioni dettate dalle normative vigenti)

Roccia	Depositi ghiaiosi cementati e/o molto addensati, argilliti	Roccia molto alterata, coperture detritiche, depositi sabbiosi e/o limosi, argillosi compatti	Depositi sabbiosi addensati; limosi ed argillosi da consistenti a mediamente consistenti	Depositi sabbiosi poco addensati, limosi ed argillosi da mediamente consistenti a scarsamente consistenti	Depositi di colmata, limi e sabbie sciolte, argille organiche, torbe, corpi di frana
Indagini in situ	• Pozzetti esplorativi, trincee • Sondaggi a carotaggio continuo • Prove SPT in foro di sondaggio • Prospezioni sismiche a rifrazione • Misure sismiche in foro • Sondaggi elettrici verticali • Piezometri • Prove penetrometriche dinamiche • Prove con immissione di acqua in pozzetti e/o in fori di sondaggio	• Pozzetti esplorativi, trincee • Sondaggi a carotaggio continuo • Prove SPT in foro di sondaggio • Prospezioni sismiche a rifrazione • Misure sismiche in foro • Sondaggi elettrici verticali • Piezometri • Prove penetrometriche dinamiche • Prove con immissione di acqua in pozzetti e/o in fori di sondaggio	• Pozzetti esplorativi, trincee • Sondaggi a carotaggio continuo • Prove SPT in foro di sondaggio • Prospezioni sismiche a rifrazione • Misure sismiche in foro • Sondaggi elettrici verticali • Piezometri • Prove penetrometriche dinamiche • Prove con immissione di acqua in pozzetti e/o in fori di sondaggio	• Pozzetti esplorativi, trincee • Sondaggi a carotaggio continuo • Prove SPT in foro di sondaggio • Prospezioni sismiche a rifrazione • Misure sismiche in foro • Sondaggi elettrici verticali • Piezometri • Prove penetrometriche e statiche • Prove scissometriche • Prove pressiometriche e dilatometriche • Prove di carico su piastra • Prove con immissione di acqua in pozzetti e/o in fori di sondaggio	• Pozzetti esplorativi, trincee • Sondaggi a carotaggio continuo • Prove SPT in foro di sondaggio • Prospezioni sismiche a rifrazione • Misure sismiche in foro • Sondaggi elettrici verticali • Piezometri • Prove penetrometriche statiche • Prove scissometriche • Prove pressiometriche e dilatometriche • Prove di carico su piastra • Prove con immissione di acqua in pozzetti e/o in fori di sondaggio
Prove di laboratorio	• Prove geotecniche di laboratorio su campioni indisturbati	• Prove geotecniche di laboratorio su campioni indisturbati	• Prove geotecniche di laboratorio su campioni indisturbati	• Prove geotecniche di laboratorio su campioni indisturbati	• Prove geotecniche di laboratorio su campioni indisturbati

Fig.1.4. Standard di lavoro n. 9 - relazione geologica discarica

2. ASSETTO GEOLOGICO - STRUTTURALE

2.1 Assetto geologico generale

La località Mangina è situata lungo il tratto terminale della valle del torrente Malacqua, prima della sua confluenza con il fiume Vara. Il sito di interesse è localizzato sul versante destro della valle a quote comprese tra i 135 m del fondovalle e i 168 m dell'attuale area di servizio della società INTERSTRADE S.p.A..

Il settore della Valle del Vara in esame è caratterizzato dalla presenza di affioramenti di rocce appartenenti alle unità Liguri interne (Unità del Gottero), rappresentate, nel sito di interesse, dalla formazione delle *Arenarie del Monte Gottero* (vedi stralcio di figura 2.1 della Carta geologica della Val di Vara, Braga et al., 1972). Tale formazione è ben esposta in affioramento sui tagli stradali della S.P. che corre lungo il versante sinistro della valle del T. Malacqua.

Dal punto di vista litologico la formazione è caratterizzata da un'alternanza di arenarie gradate, di colore grigio nei tagli freschi e di colore giallastro sulle superfici alterate, con subordinati livelli di siltiti ed argilliti scure. Le arenarie sono classificate come grovacche feldspatiche composte dal 40% di quarzo, dal 30% di feldspati (rappresentati quasi esclusivamente da plagioclasio), dal 7% di calcite e per la restante frazione da fillosilicati. Lo spessore della formazione è variabile da 700 a 1500 m (*Commissione Italiana di Stratigrafia della Società Geologica Italiana - Catalogo delle formazioni geologiche italiane - monografia Arenarie del Gottero, 2003*).

La formazione appare interessata da una marcata deformazione tettonica che determina una variabilità nella giacitura delle superfici di strato; il grado di alterazione e di fratturazione è molto accentuato nelle porzioni più superficiali degli ammassi rocciosi, tanto da rendere, in alcuni siti, la roccia simile ad una sabbia debolmente cementata, in cui la stratificazione originaria non è più riconoscibile.

Lungo il versante destro della valle, in prossimità del sito di Mangina, il substrato roccioso arenaceo non è osservabile con affioramenti continui per l'estesa presenza di depositi di copertura rappresentati da sedimenti fluviali, livelli detritici e terreni di riporto.

Sedimenti fluviali attuali e terrazzati sono osservabili nel settore di fondovalle e sono rappresentati da ghiaie e ciottoli in matrice sabbiosa.

Nella parte alta del versante destro si osservano estesi depositi di riporto che formano il rilevato della strada che conduce all'area INTERSTRADE, anch'essa ricavata su un ampio rilevato; sono altresì presenti accumuli detritici naturali rappresentati da blocchi rocciosi arenacei di dimensioni variabili da centimetriche a decimetriche, immersi in una matrice sabbiosa. Tali livelli detritici sembrano attribuibili a paleo-accumuli di frana.

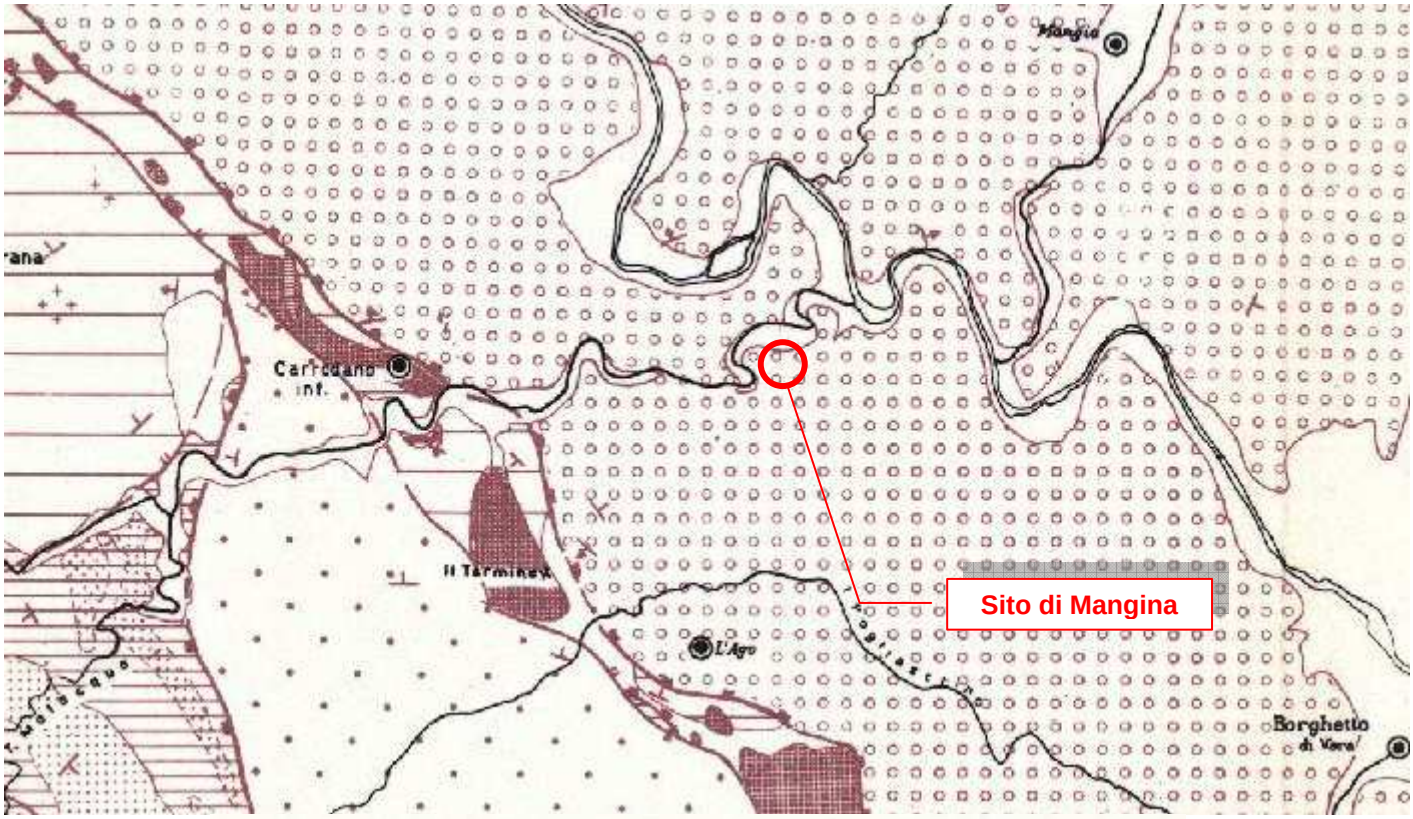




Fig. 2.1. Stralcio della carta geologica della Val di Vara (Braga, Casnedi, Galbiati, Marchetti, 1972)

2.2 Assetto strutturale

Il motivo strutturale dominante della Valle del Vara è l'allungamento delle dorsali montuose secondo la direzione appenninica, approssimativamente orientata 40°W, che, di solito, corrispondono alla culminazione delle strutture tettoniche positive (anticlinali).

Queste strutture si sono originate come sequenza d'anticlinali (e sinclinali) durante le fasi della tettonica compressiva, che hanno portato alla costruzione di un edificio a falde di ricoprimento e poi all'emersione delle terre della primitiva catena appenninica. Le massime culminazioni assiali si trovano a sud presso il Golfo della Spezia, dove un alto strutturale ben definito si trova presso Bocca di Magra-Punta Bianca, affiorandovi rocce analoghe a quelle del basamento metamorfico delle Alpi Apuane (fuori provincia). Se la strutturazione dell'Appennino ha permesso il dispiegarsi da ovest verso est delle grandi strutture plicative, queste sono state poi ribadite ma scomposte dalla tettonica più tardiva che si è espressa soprattutto con faglie distensive di natura listrica e così si sono formate serie di pilastri e di fosse tettoniche. Questa tettonica distensiva, verosimilmente ancora in atto, è legata all'apertura del Mare Ligure, che attualmente appare una grande zona sprofondata. A occidente presso la costa sta una lunga e grandiosa anticlinale con vergenza occidentale, che affiora a sud già dalle isole del Tino e della Palmaria e che coinvolge non solo le unità toscane ma anche parte delle unità subliguri e liguri. La struttura è molto complessa: mentre a ovest dello spartiacque Mare Ligure-Golfo gli strati sono in posizione normale o al massimo verticali, sul fianco est si hanno strati in posizione rovesciata. Inoltre il bordo orientale è segnato da una frattura, più altre minori, di grandissimo rigetto (> 2000 m), poiché alla Foce della Spezia la base della Falda Toscana con il Calcare Cavernoso viene a contatto con l'Arenaria del Gottero, tetto di una delle falde liguri.

A oriente di questa megastruttura si trova la sinclinale del Vara, un'area parzialmente sprofondata in seguito alla tettonica distensiva. A sud ovest di questa si trova la depressione tettonica del Golfo della Spezia, ancor più chiaramente predeterminata dalle faglie longitudinali distensive presenti a suoi lati, forse una depressione minore nell'ambito della più grande struttura negativa della Val di Vara-Val di Magra. Ancora più ad oriente si trova, infatti, la depressione tettonica del basso Magra e successivamente la lunga anticlinale che corrisponde alla dorsale che separa il medio-basso Vara dalla Val di Magra.

Le faglie associate a queste strutture che caratterizzano questo tratto d'Appennino sono orientate secondo due direzioni principali, quella longitudinale o appenninica (NO-SE) e quella trasversale (SO-NE). La prima è tipica delle faglie dirette a carattere distensivo, spesso associate in fasci paralleli che hanno dato origine alla strutturazione a horst e graben delle anticlinali e delle sinclinali. Il loro rigetto tende a ridursi andando verso nord-ovest e in ogni caso hanno determinato una caratteristica fondamentale della catena, con la creazione dei bacini intermontani.

La seconda direzione è propria di linee tettoniche trasversali, probabilmente faglie trascorrenti ben visibili nelle foto aeree o da satellite, poco chiare sul terreno. Una linea molto evidente si allunga fra il Golfo della Spezia e la Val Secchia, in Emilia, passante per Aulla. Una minore passa per Lerici e lo stesso promontorio è bruscamente troncato a sud. Nell'alta Val di Vara sono state individuate linee trasversali fra Varese Ligure e Sesta Godano, un'altra linea trasversale da Deiva Marina-Levanto attraverso la valle del Torrente Torza, passando poco a nord del Monte Gottero, raggiunge la Val di Secchia.

Esse dovrebbero essere contemporanee delle fasi di sovrascorrimento, ma non si esclude una loro riattivazione neotettonica. L'intersezione delle faglie normali longitudinali con quelle trasversali ha geometrizzato le aree, che in tal modo hanno sviluppato movimenti di sollevamento assoluto e relativo differenziale.

E' all'interno dei graben che si conservano bene le coperture degli Insiemi liguri. Ma, come già accennato, oltre a questi, in essi sono presenti sedimenti lacustri, fluvio-lacustri e fluviali terrazzati (e ovviamente discordanti sui complessi tettonici strutturati dalla tettogenesi), eredità dei bacini che in essi si erano formati. I più estesi e potenti depositi si trovano nella zona di Caniparola-Sarzana-Ponzano Magra; altri notevoli sono nel bacino di Sesta Godano-Bergassana. Spesso hanno dato luogo a coltivazioni industriali (lignite, argille per la ceramica). L'età della base va dal Rusciniano (a Sarzana) al Villafranchiano inferiore (a Sesta Godano) e sale con le serie fino al Pleistocene.

Esse mostrano un'evoluzione da ambiente lacustre e fluvio-lacustre a palustre e poi a piana intermontana, quest'ultima testimoniata dalla presenza di depositi di conoide a grossi ciottoli di Macigno o di Arenarie del Gottero, sui quali si può trovare un paleosuolo del Pleistocene superiore. Infine sopra di tutto si trovano alluvioni terrazzate oloceniche.

La tettonica estensionale ha ribadito le linee preferenziali precedenti ed ha avuto il risultato di compartimentare la regione in spazi geometricamente ben definiti. Così i bassi morfologici corrispondono alle zone sprofondate del Mare Ligure, della Val di Vara e del Golfo della Spezia, della bassa Val di Magra. Questi ultimi, tuttavia, fanno parte di un'unica grandiosa struttura distensiva compresa fra la grande faglia della Spezia, posta sul lato interno del promontorio di Portovenere, e un'altra che borda il lato marittimo della catena principale dell'Appennino (faglia di Groppodalosio), con nel mezzo l'horst di M. Cornoviglio e quello del Promontorio orientale del Golfo della Spezia. La distensione non ha esaurito la sua attività e un riflesso di essa è l'attività sismica con meccanismi focali di tipo tensionale. Per quel che riguarda l'Appennino nord-occidentale è documentata solo una sismicità moderata. Tuttavia nel territorio di Varese Ligure fra il 1927 e il 1929 vi è stata una sequenza tellurica con massimi non superiori al VII grado della scala Mercalli. Recentemente (1982) una sequenza tellurica è stata avvertita e registrata nell'alta Val Taro contigua all'Alto Vara (estratto da Atlante dei centri abitati instabili della Regione Liguria - Provincia della Spezia, 2001).

Il rilievo di terreno e l'analisi di foto aeree e satellitari ha permesso di individuare lineazioni associabili a faglie e fratture della compagine rocciosa. Nella foto presentata in allegato 2.1 sono indicate le lineazioni tracciate nella zona di indagine. Coerentemente con il quadro generale sopra descritto, le principali e più persistenti orientazioni rappresentate sono quella appenninica, orientata, come detto approssimativamente 40°W e quella ad essa ortogonale caratterizzata da una direzione di circa 50°E. Sono visibili anche lineazioni minori orientate 70°E e 20°E.

Buona parte delle orientazioni ricavate dall'analisi foto-geologica sono state rilevate anche sugli affioramenti della formazione delle Arenarie del Gottero esaminati durante il rilievo di campagna, come si vedrà nei paragrafi successivi.

2.3 Rilievo di terreno e descrizione delle formazioni affioranti

Il rilievo geologico di terreno ha riguardato un'area che comprende tutti i bacini tributari di destra del torrente Malacqua che interessano il sito di Mangina e parte del versante sinistro della valle. La mappa geologica con elementi geomorfologici ed idrogeologici dell'area è riportata in allegato 2.2.

2.3.1 Arenarie del Gottero

Il substrato roccioso locale è rappresentato dalla formazione delle Arenarie del Gottero descritta nei suoi caratteri generali nel paragrafo 2.1.

Nell'area interessata dal rilievo geologico, gli affioramenti osservabili di questa formazione sono molto limitati; nel sito in cui si intende realizzare la discarica è presente un unico affioramento lungo un'incisione valliva posta sul limite Est dell'area, dove è stata misurata una direzione degli strati di 45°W con immersione di 40° verso Est e disposizione a traver-poggio rispetto all'inclinazione del pendio.

Affioramenti più estesi e continui sono stati rilevati lungo il crinale a monte del sito di Mangina che separa le valli dei Torrenti Malacqua e Pogliasca (località Costa di Roverano).

Negli affioramenti osservati in questa località (foto di figura 2.2) la formazione delle Arenarie del Gottero si presenta con bancate di arenaria di spessore metrico con rare intercalazioni argillitico-siltitiche di modesto spessore (generalmente inferiore al decimetro).

La direzione degli strati varia da 40°E a NS con immersioni comprese tra 10°E a 40°E e disposizione a traver-poggio rispetto all'inclinazione del pendio.



Fig. 2.2. Affioramenti della formazione delle arenarie del Gottero in località Costa di Roverano con indicazione delle tracce dei piani di strato e dei piani di fratturazione

Le bancate arenacee sono attraversate da diversi piani di fratturazione che le suddividono in prismi rocciosi di dimensioni variabili.

Il grado di fratturazione risulta generalmente elevato con spaziatura dei piani di discontinuità variabile da decimetrica a centimetrica.

I sistemi di fratturazione individuati sono i seguenti (fare riferimento anche alla figura 2.3 e all'allegato 2.1):

N.	AZIMUT	NOTE
1	≈ 0°	Direzione costante, spaziatura circa 4 cm
2	≈ 55°	Spaziatura circa 7 cm
3	≈ 70°	Direzione costante, spaziatura 1-2 cm
4	≈ 100°	Poco rappresentata
5	≈ 145°	Direzione variabile prossima alla direzione appenninica, spaziatura circa 5 cm
6	≈ 160°	Spaziatura circa 10 cm

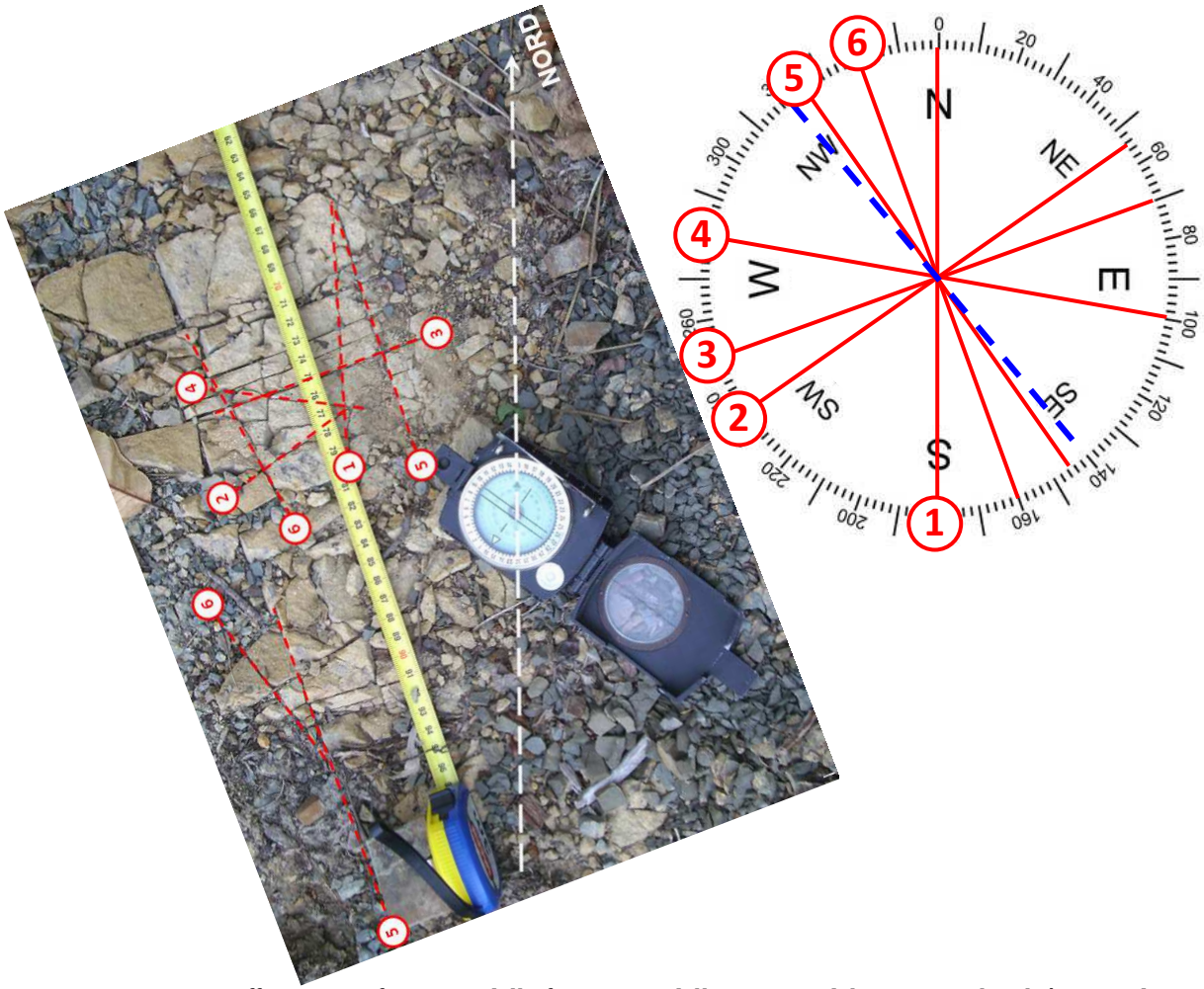


Fig. 2.3. Affioramento fratturato della formazione delle arenarie del Gottero in località Costa di Roverano con indicazione delle tracce dei principali piani di fratturazione.

Alcuni dei sistemi di fratturazione rilevati sull'affioramento di figura 2.3 hanno direzione coincidente o prossima ad alcuni gruppi di lineazioni individuati sulle foto aeree di allegato 2.1. In particolare due linee prolungate in direzione prossima all'appenninica del sistema n. 5, delimitano ad E ed W il settore terminale della valle del T. Malacqua, dove ricade il sito di Mangina; altre lineazioni meno allungate hanno direzione circa ortogonale alle precedenti (direzioni prossime ai sistemi n. 2 e 3 rilevati sull'affioramento di figura 2.3).

2.3.2 Depositi detritici

Nel settore di versante compreso tra il crinale della Costa di Roverano ed il tracciato dell'Autostrada A12, il substrato roccioso risulta estesamente ricoperto da depositi detritici originati sia dall'alterazione in posto della roccia arenacea, sia da diffusi ed estesi fenomeni gravitativi originatisi in prossimità del crinale.

Si tratta di depositi detritici di natura incoerente e semi-incoerente costituiti da una matrice sabbioso-limosa con frammenti rocciosi arenacei di dimensioni variabili. L'origine di questi depositi sarà discussa nella sezione sull'assetto geomorfologico dell'area.

I depositi di origine gravitativa (foto di figura 2.4) sono caratterizzati dalla presenza di blocchi rocciosi eterometrici di dimensioni da medie a grandi (da decimetiche a pluri-decimetriche) e sono ben osservabili in affioramento lungo il fondovalle dei due rivi che scendono con direzione prossima all'appenninica verso il T. Malacqua.

Lungo le sponde di questi corsi d'acqua, questi materiali presentano un notevole spessore, valutabile, nella parte bassa delle incisioni vallive, in prossimità degli attraversamenti della A12, superiore a 3 m. L'alveo di questi canali è completamente ricoperto da questi sedimenti ed anche nelle sezioni più incise, il substrato roccioso non risulta praticamente mai affiorante.

L'assetto morfologico attuale di questi modesti corsi d'acqua, caratterizzato dal fenomeno del cosiddetto sovra-alluvionamento, è da ricondurre all'evento pluviometrico eccezionale dell'Ottobre 2011, che ha innescato diffusi ed estesi fenomeni franosi a carico dei versanti vallivi. Questi movimenti hanno rimobilizzato gli accumuli detritici riversando sui fondovalle ingenti volumi di materiali solidi. E' da sottolineare che attualmente tali processi geomorfologici non hanno ancora raggiunto un equilibrio.



Fig. 2.4. Affioramenti di depositi detritici di origine gravitativa a monte del sito di intervento

Nel tratto di versante compreso tra la autostrada e l'area INTERSTRADE i depositi detritici sono ricoperti da terreni di riporto che costituiscono l'ampio rilevato sul quale insistono gli impianti di trattamento inerti della società INTERSTRADE stessa. A valle di tale rilevato, il pendio naturale si raccorda con un'inclinazione molto blanda alla pianura alluvionale del T. Malacqua.

In questo tratto di versante i depositi detritici sono mal distinguibili in affioramento e appaiono frammisti sia a materiale di riporto, nella zona immediatamente a valle del rilevato, sia a depositi di natura fluviale in prossimità della pianura alluvionale del T. Malacqua.

In questo areale, nel quale si intende realizzare l'impianto di discarica, la natura dei depositi detritici ed i loro rapporti con i terreni di riporto, i sedimenti alluvionali ed il substrato roccioso, sono stati indagati nel dettaglio con una campagna di indagini geognostiche e geofisiche (n. 13 sondaggi a carottaggio continuo, prospezione sismica, prove down-hole) i cui esiti saranno descritti nel dettaglio nelle sezioni successive.

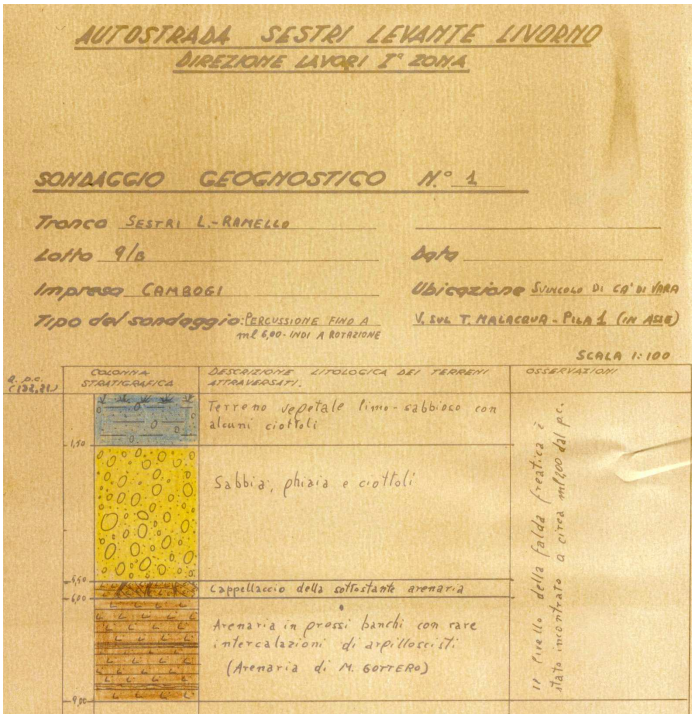
2.3.3 Depositi alluvionali attuali e recenti

Nella parte a quota più bassa dell'area di indagine, identificabile con la modesta pianura alluvionale formata dal T. Malacqua, affiorano i sedimenti fluviali attuali e recenti depositati dal torrente nelle sue diverse fasi evolutive.

Attualmente il corso d'acqua scorre sui propri sedimenti; sono evidenti inoltre, particolarmente in sponda sinistra, lungo l'ansa del torrente, nei pressi del viadotto che conduce all'area INTERSTRADE, terrazzi alluvionali recenti, ad una quota superiore di circa 2 m rispetto all'alveo attuale del torrente.

I depositi alluvionali attuali e recenti sono costituiti da ciottoli e ghiaie poligenici con granulometria variabile da centimetrica a decimetrica in matrice prevalentemente sabbiosa. Le litologie rappresentate sono principalmente attribuibili a rocce di tipo *flyschoide* di natura arenacea o calcareo-marnosa; in subordine si riscontrano litologie ofiolitiche o ciottoli di diaspro.

Lo spessore di questi depositi, nella pianura alluvionale (quota di circa 132 m s.l.m.) è di circa 5.5 m, come da stratigrafia reperita dall'archivio SALT (fig. 2.5); i sedimenti fluviali poggiano su un substrato roccioso di natura arenacea attribuibile alla formazione delle Arenarie del Gottero.


AUTOSTRADA SESTRI LEVANTE LIVORNO
DIREZIONE LAVORI 1° ZONA

SONDAGGIO GEOGNOSTICO N.° 1

Tronco SESTRI L.-RAMELLO
Lotto 9/a
Impresa CAMBOGI
Tipo del sondaggio: PERCUSSIONE FINO A m 6,00 - INDI A ROTAZIONE
Data
Ubicazione SVINCOLO DI CO' DI VARA
V. SVIL. T. MALACQUA - PILA 1 (IN ASSE)

SCALA 1:100

COLONNA STRATIGRAFICA | DESCRIZIONE LITOLOGICA DEI TERRENI ATTRAVERSATI | OSSERVAZIONI

Terreno vegetale limo-sabbioso con alcuni ciottoli

Sabbia, ghiaia e ciottoli

Cappellaccio della sottostante arenaria

Arenaria in grossi banchi con rare intercalazioni di argilloscisti (Arenaria di M. GOTTERO)

Il livello della falda freatica è stato incontrato a circa m 4,00 dal p.c.

Fig. 2.5. Stratigrafia Archivio SALT eseguita sul fondovalle del T. Malacqua in corrispondenza del viadotto che conduce all'area INTERSTRADE

2.3.4 Depositi alluvionali terrazzati

Alla sommità della piccola dorsale allungata approssimativamente in direzione NS, che delimita a valle la pianura alluvionale, sono visibili in affioramento ciottoli arenacei arrotondati polimodali di dimensioni da decimetriche a metriche in matrice sabbioso-limosa.

I depositi appaiono molto alterati ed in alcune parti ossidati con evidenti patine rossastre di ossidi di ferro. Queste osservazioni di terreno sono confermate anche dall'esito dei sondaggi geognostici (sondaggio S1).

Questi terreni sono verosimilmente attribuibili alle sequenze lacustri, fluvio-lacustri e fluviali terrazzate, riconosciute in vari settori delle valli del Vara e del Magra.

L'età della base di queste sequenze va dal *Rusciniano* (a Sarzana) al *Villafranchiano inferiore* (a Sesta Godano) e sale con le serie fino al *Pleistocene*. I più estesi e potenti depositi si trovano nella zona di Caniparola, Sarzana, Ponzano Magra; altri notevoli sono nel bacino di Sesta Godano e Bergassana.

Queste sequenze mostrano un'evoluzione da ambiente lacustre e fluvio-lacustre a palustre e poi a piana intermontana, quest'ultima testimoniata dalla presenza di depositi di conoide a grossi ciottoli di Macigno o di Arenarie del Gottero, sui quali si può trovare un paleosuolo del Pleistocene superiore. A quest'ultimo tipo di facies sembrano associabili i depositi osservati nel sito di Mangina.

2.3.5 Depositi di riporto

Il rilevato che delimita a Sud l'area in cui si intende realizzare la discarica è formato da depositi di riporto costituiti prevalentemente da materiali inerti la cui natura è stata indagata nel dettaglio mediante un sondaggio posizionato alla sommità del rilevato stesso (sondaggio S13).

3. ASSETTO GEOMORFOLOGICO

3.1 Morfologia alluvionale

Il torrente Malacqua, immediatamente a monte del sito di Mangina, scorre incassato in roccia per poi aprirsi in una modesta area alluvionale colmata da sedimenti fluviali attuali e recenti. L'area alluvionale ha un'estensione di circa 18'000 m^2 e si chiude a valle del sito, dove il fiume scorre nuovamente con un alveo inciso in roccia, prima di confluire nel fiume Vara (località Cà di Vara).

In prossimità del sito, la valle del torrente Malacqua è contraddistinta da una marcata asimmetria con il versante sinistro piuttosto ripido ed il versante destro caratterizzato da un'inclinazione decisamente più blanda; su questa sponda insistono depositi fluviali recenti ed antichi nella parte bassa, mentre, a quota più elevata, le forme del rilievo e gli affioramenti osservati testimoniano la presenza di estesi accumuli detritici.

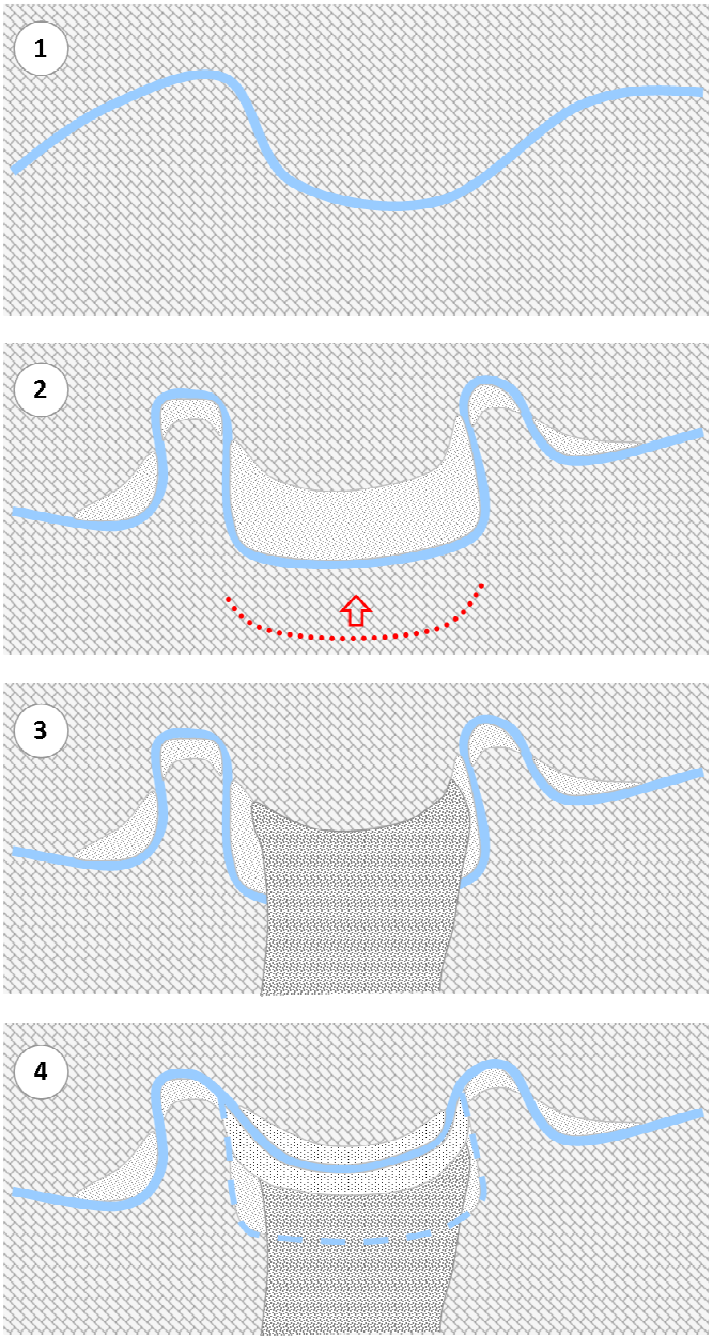


Fig. 3.1. Evoluzione geomorfologica del T. Malacqua presso il sito di Mangina

Questo conformazione della valle suggerisce un'evoluzione geomorfologica caratterizzata dalle seguenti fasi evolutive (fare riferimento alla figura 3.1).

Fase 1. Nella prima fase evolutiva il corso del torrente scorre presumibilmente incassato in roccia con un percorso a meandri poco accentuati;

Fase 2. In questa fase, con l'avanzamento dei processi erosivi a carico delle sponde, il percorso a meandri diviene più tortuoso; gli stessi processi erosivi fluviali causano scalzamenti al piede dei versanti vallivi innescando fenomeni franosi nella parte attiva del meandro (parte convessa in sponda destra) e deposizione di sedimenti alluvionali fluviali nella parte non attiva (parte concava in sponda sinistra).

Fase 3. In questa fase l'accumulo di frana in sponda destra ha invaso l'alveo del torrente causandone il parziale sbarramento ed il cambio di percorso.

Fase 4. Nell'ultima fase (assimilabile alla fase attuale) il torrente scorre spostato sulla sponda sinistra dopo aver parzialmente asportato e rielaborato il deposito di frana.

Il risultato dell'evoluzione geomorfologica descritta è la presenza di un paleo-alveo e dei relativi depositi fluviali al di sotto dell'accumulo di frana come schematizzato nella sezione di figura 3.2.

Tale evoluzione è confermata dagli esiti dei sondaggi geognostici (in particolare S13) nei quali è stata riscontrata la presenza di depositi alluvionali poligenici con elementi di diaspro (provenienti quindi dal bacino del T. Malacqua) al di sotto di terreni di riporto e di livelli di natura detritica ad elementi arenacei angolosi, attribuibili ai movimenti gravitativi dei versanti a monte dell'area di Mangina (versanti a valle del crinale della Costa di Roverano).

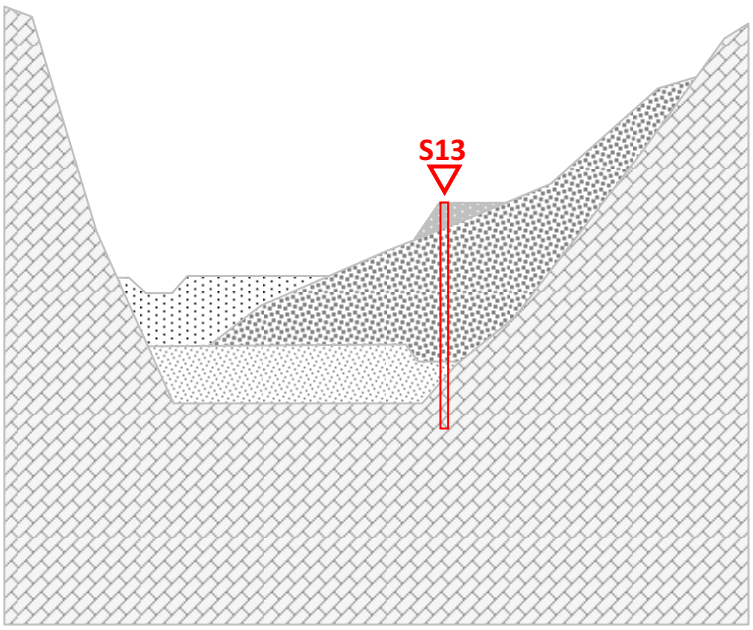


Fig. 3.2. Sezione schematica non in scala della valle del T. Malacqua presso il sito di Mangina con indicazione del'ubicazione del sondaggio S13.

E' da notare che il corso d'acqua, nei pressi del sito di interesse, è attualmente caratterizzato da un'attività di deposito, all'ingresso della pianura alluvionale, mentre, a valle, dove l'alveo si restringe ed aumenta la pendenza, il torrente esercita un'azione erosiva al piede del piccolo promontorio che delimita ad Est il sito stesso (sponda destra del corso d'acqua, foto di fig. 3.3).

Tale azione, in occasione di eventi di piena del torrente, potrebbe innescare fenomeni franosi con conseguenti sbarramenti del corso d'acqua ed innalzamento del livello idraulico a monte. Tale eventualità, anche se remota, non può essere esclusa e potrebbe determinare conseguenze sull'argine di valle della discarica.



Fig. 3.3. Zona di erosione in sponda destra del T. Malacqua

3.2 Morfologia dei versanti

Il rilievo di terreno esteso a tutta la dorsale montuosa posta a Sud del sito, ha evidenziato morfologie e depositi attribuibili ad estesi e profondi movimenti gravitativi originatisi in passato e quindi classificabili come paleo-frane.

La genesi di questi complessi processi geomorfologici, riconosciuti in diverse località della valle del Vara, è ben inquadrata nell'Atlante dei centri abitati instabili della Provincia della Spezia (Regione Liguria, 2001) del quale si riporta integralmente un estratto.

In provincia della Spezia, come in altre parti dell'Appennino settentrionale, sono presenti alcune grandi frane in roccia, che si sono manifestate in passato in un contesto tettonico, morfologico e climatico verosimilmente diverso da quello odierno. Attualmente sono inattive, ma talvolta mostrano attività in alcune loro parti, sia pure molto limitate. Lo spostamento di masse rocciose così ingenti è stato il frutto del concomitante convergere di alcuni fattori predisponenti, essenzialmente derivati dal manifestarsi della neotettonica in Appennino. Si è già detto che una tettonica estensionale ha preso il sopravvento all'esaurirsi delle fasi compressive e che si è espressa con una serie di movimenti lungo faglie listriche che hanno segmentato le strutture plicative dando origine definitivamente a una serie di alti e bassi morfologici. E' lungo queste superfici di faglia che si è avuta tutta una serie di movimenti differenziali con la creazione di formidabili dislivelli e d'acclività non presenti in precedenza. In questo contesto morfo-strutturale si sono generati intensi processi geomorfologici quali la deposizione dei sedimenti fluvio-lacustri nei bacini intermontani e il loro terrazzamento, la genesi di sequenze di meandri incastrati e appunto grandi frane, con il rimodellamento d'interi versanti. ***Alla creazione dei grandi dislivelli fra i fondi dei bacini intermontani e le parti alte dei versanti si sono aggiunte le riprese dell'incisione fluviale, che hanno operato lo scalzamento al piede degli stessi****. Infine, almeno nelle parti più alte della catena è sopravvenuta anche una degradazione delle caratteristiche meccaniche delle rocce in conseguenza del ripetuto passaggio durante il Pleistocene e anche nell'Olocene da condizioni di biostasia a rexistasia e viceversa. Un ultimo balzo in questo senso si è avuto con la comparsa della Piccola Età Glaciale, in concomitanza della quale si è avuto in tutta Europa un brusco aumento dei fenomeni franosi e fatti dissestivi in genere. Fra le cause innescanti le grandi frane del passato vanno sicuramente annoverate le scosse sismiche. Se ancora oggi la provincia è interessata da una sismicità a bassa intensità (a Varese Ligure nel 1828 è stata registrata una sequenza sismica il 21 e 27 Febbraio), essa durante il Pleistocene e l'Olocene pre Attuale doveva essere certamente più intensa proprio per l'attività neotettonica.*

In particolare la genesi dei movimenti gravitativi antichi osservati sui rilievi di Mangina, è con tutta probabilità legata alle riprese dell'incisione fluviale, che hanno operato uno scalzamento al piede del versante, coerentemente con l'evoluzione della morfologia del Torrente Malacqua descritta nel paragrafo precedente.

Le nicchie di distacco di questi movimenti franosi non sono facilmente individuabili ma, in base all'estensione dei depositi, sono collocabili in prossimità del crinale che separa il bacino del T. Malacqua da quello del T. Pogliasca (località Costa di Roverano).

Gli accumuli di paleofrana sono caratterizzati da marcata eterogeneità granulometrica e composti prevalentemente da una matrice limo-argillosa in cui sono immersi abbondanti clasti e ciottoli angolosi eterometrici (vedi sezione 2.3.2).

I paleo-accumuli sono stati reincisi dalle acque di ruscellamento superficiale e in alcuni settori localizzati, parzialmente rimobilizzati innescando nuovi fenomeni franosi. Tali processi recenti hanno conosciuto una fase di parossismo durante i gravi eventi alluvionali dell'Ottobre 2011 che hanno visto il territorio del Comune di Borghetto Vara tra i più colpiti.

Le piogge eccezionali del 2011, caratterizzate da una cumulata giornaliera di ben 217.2 mm (stazione di Mattarana) hanno causato profondi ed estesi movimenti gravitativi i cui effetti non si sono ancora esauriti. In particolare i piccoli bacini tributari di sinistra del F. Vara e del T. Malacqua, incisi in rocce arenacee, facilmente erodibili ed alterabili da parte degli agenti meteorici, mostrano ancora i segni di questi eventi, con dinamiche di pendio che non hanno ancora raggiunto un equilibrio. E' il caso dei due piccoli bacini tributari del Malacqua a monte del sito di Mangina caratterizzati da versanti ripidi estesamente interessati da nicchie di distacco attive in rapido arretramento e da alvei colmati da depositi di frana (foto di fig. 3.4).



Fig. 3.4. Nicchie di distacco sulle sponde del bacini tributari del T. Malacqua monte del sito di Mangina

Nel sito in cui si intende realizzare la discarica, il versante è caratterizzato da debole acclività e si raccorda gradualmente con la pianura alluvionale del torrente Malacqua. In quest'area, durante l'attività di rilievo, non sono stati registrati indizi di importanti movimenti gravitativi dei pendii in atto.

4. ASSETTO IDROLOGICO ED IDROGEOLOGICO

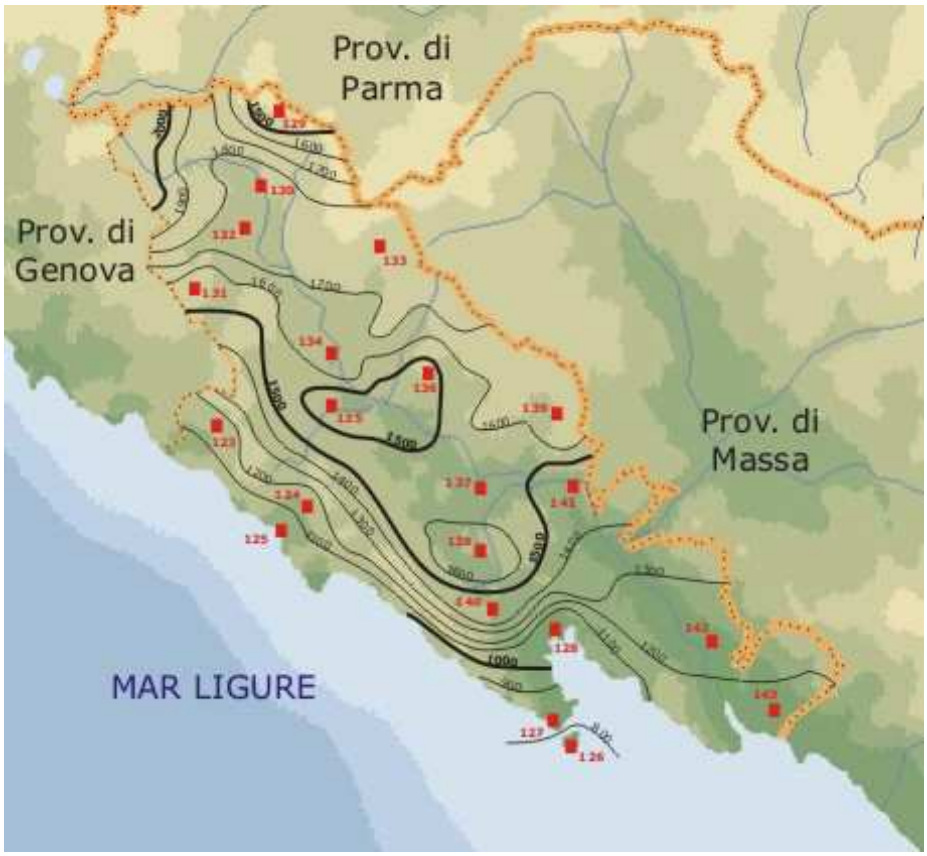
4.1 Inquadramento climatico

Si riporta una breve descrizione del clima della Provincia della Spezia tratto dal sito della Società Meteorologica Italiana (SMI)

La conformazione orografica della provincia della Spezia non consente la formazione di corsi d'acqua di una qualche importanza lungo tutta la costa a occidente del capoluogo. La catena delle Cinque Terre che, correndo parallelamente alla costa, separa quest'ultima dalla Val di Vara, si erge a una distanza media di soli 2 km dal litorale e costituisce una barriera alta mediamente 800 metri. Viceversa sul versante opposto, la conca valliva del fiume Vara, interessa quasi interamente la provincia, dal monte Chiappozzo (1126 m s.l.m.) fino all'immissione nel fiume Magra, proveniente dalla provincia di Massa, in prossimità di Ceparana. Da qui, dopo circa 14 km, le acque si gettano nel Mar Ligure.

La fascia costiera a ovest di Portovenere presenta un repentino aumento della quantità media annua delle precipitazioni con l'altitidine.

Osservando la carta, risalta la progressiva diminuzione delle piogge annue che si delinea dalla porzione più orientale delle Cinque Terre verso l'estrema propaggine della penisola che chiude a occidente il Golfo della Spezia, passando per gli 884 mm di Portovenere (n° 127) fino ai 792 mm dell'Isola Palmaria (n° 126), quantitativo che ci riporta a quello della Riviera di Ponente a ovest di Capo Noli. Sempre lungo la costa, dal capoluogo verso la Toscana, la media annua ritorna a superare i 1000 mm.



Procedendo verso l'interno, lungo le valli del Magra e poi del Vara, il quantitativo annuo di piogge cresce gradualmente, fino a raggiungere l'isoieta di 1500 mm poco a monte della confluenza tra i due corsi d'acqua. Nella parte più a monte del fondovalle le piogge aumentano fino ai quasi 1800 mm per anno di Varese Ligure (n° 130) e di Cembrano (n° 132).

Nel lembo più interno della provincia si constatano da un lato il progressivo aumento verso ovest e il confine con la provincia di Genova, con i 2000 mm raggiunti sul contrafforte del monte Zatta, e dall'altro la diminuzione verso est e la provincia di Parma, ritornando al di sotto di 1500 mm al Passo Cento Croci (n° 129).

Seguendo le isoiete lungo la valle del Vara, si riscontra un gradiente pluviometrico di 163 mm ogni 100 metri di quota.

Il valore è piuttosto elevato ma è necessario far notare che il fondovalle si presenta con un lieve declivio lungo tutto il suo percorso, fino ai contrafforti che cingono la provincia a settentrione. Il dislivello medio è di circa 7 m per ogni chilometro; Varese Ligure infatti, posta a circa 50 km in linea d'aria dalla foce del Magra, è situata solo a 347 m sul livello del mare.

Nella tabella a pagina seguente sono riportate le cumulate pluviometriche mensili relative alla stazione di misura di Mattarana, mentre in figura 4.1 sono riportati i dati climatici statistici salienti di questa stazione.

Stazione: MATRA				
Localizzazione				
Descrizione	**MATTARANA - DATI DAL 2010.03.30**			
Longitudine	**Gradi° Primi' Secondi''**	**9° 36' 53.064''**	**Gradi.decimi di grado**	**9.61474**
Latitudine	**Gradi° Primi' Secondi''**	**44° 14' 41.964''**	**Gradi.decimi di grado**	**44.24499**
Altezza sul livello del mare (m)	**470**			
	Situazione climatica della stazione a partire dal 01/2010			
	Giorno più freddo	**05/02/2012**	*Temperatura media (°C): -4.8*	
	Temperatura più bassa (°C)	**-7.3**	*Giorno: 06/02/2012*	
	Anno più freddo	**2010**	*Temperatura media (°C): 12.6*	
	Giorno più caldo	**22/08/2011**	*Temperatura media (°C): 29.5*	
	Temperatura più alta (°C)	**37.3**	*Giorno: 22/08/2011*	
	Anno più caldo	**2011**	*Temperatura media (°C): 13.9*	
	Massima intensità del vento (m/s)		*Giorno:*	
	Massima raffica (m/s)		*Giorno:*	
	Massima precipitazione in 24 ore (mm)	**220.2**	*Giorno: 25/10/2011*	
	Giorno più piovoso	**25/10/2011**	*Precipitazione cumulata (mm): 217.2*	
	Anno più piovoso	**2010**	*Precipitazione cumulata (mm): 2199.8*	
	Anno più secco	**2012**	*Precipitazione cumulata (mm): 1491.2*	

Fig. 4.1 Dati climatici statistici della stazione di Mattarana.

MATTARANA													
Parametro meteorologico: PRECIPITAZIONE CUMULATA (mm)													
Anno	Totale Annuo	Totali mensili											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
1957	1526	156.6	156.6	82.2	181.6	166.0	59.2	66.4	48.8	16.4	60.0	236.2	296.4
1958	1388	82.6	103.6	102.6	186.2	53.6	73.6	56.8	42.0	60.6	171.0	122.8	332.6
1959	1827	119.4	6.0	115.4	170.6	112.8	55.0	16.0	91.2	208.4	251.4	234.6	446.6
1960	2150	83.6	169.8	232.2	25.0	17.2	150.2	64.4	95.4	298.8	388.6	362.4	262.0
1961	1672	245.6	40.8	43.0	232.6	71.4	69.7	31.2	45.8	136.2	117.6	491.8	146.2
1962	1539	107.5	109.0	256.8	220.4	60.8	32.6	31.6	-	95.4	187.2	306.8	131.2
1963	2215	265.2	179.4	305.0	171.0	55.6	140.4	125.4	197.4	214.4	81.8	345.6	134.2
1964	1946	49.6	378.2	251.6	217.8	78.6	81.4	145.2	31.4	14.0	393.8	133.8	170.4
1965	1635	204.8	21.2	313.8	31.2	53.0	50.2	4.4	130.2	233.4	67.8	242.2	282.8
1966	1820	102.0	205.6	13.6	155.8	95.0	45.6	24.8	86.0	103.2	613.6	251.0	123.6
1967	1142	128.0	98.0	73.4	94.0	71.8	95.8	19.0	69.0	81.8	37.8	257.0	116.4
1968	1925	47.6	561.6	101.8	89.6	204.2	83.2	43.0	98.6	101.0	164.8	247.6	182.2
1969	1392	294.6	166.5	164.8	101.6	80.4	70.0	33.0	39.8	215.6	1.4	186.2	37.8
1970	1353	442.8	9.6	205.6	41.0	127.4	31.2	17.4	133.0	2.0	21.2	206.4	115.8
1971	1408	223.8	143.4	156.4	118.2	190.2	110.6	14.0	58.8	57.8	50.4	215.8	68.2
1972	1724	179.0	302.8	140.2	113.8	88.4	98.8	8.8	23.6	193.4	158.4	119.2	297.8
1973	1032	165.2	88.0	54.6	104.8	40.6	91.0	68.4	43.4	151.2	76.4	22.4	126.0
1974	1220	139.6	263.1	86.0	115.0	79.8	103.2	21.2	28.4	131.0	85.4	124.8	42.6
1975	1741	243.8	119.0	211.0	100.4	173.6	64.2	27.2	116.2	90.8	151.4	253.6	190.2
1976	1076	27.6	62.0	23.2	-	3.2	-	-	119.2	121.2	314.8	194.4	210.2
1977	1956	433.2	273.2	194.0	65.0	153.6	66.6	56.0	217.6	60.0	188.4	67.8	180.4
1978	531	275.9	176.0	71.1	7.5	-	-	-	-	-	-	-	-
1979	1943	363.6	186.4	276.8	169.6	12.6	50.6	25.8	60.4	168.0	241.4	123.0	264.4
1980	1135	83.8	60.2	203.6	2.4	80.4	144.2	20.4	95.8	40.2	360.8	43.4	-
1981	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1982	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1983	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1984	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1985	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1986	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1987	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1988	807	-	-	-	59.8	100.0	190.6	32.2	142.2	23.8	62.8	24.0	172.0
1989	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1990	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1991	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1992	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1993	695	26.4	-	-	121.8	47.4	35.0	14.4	67.8	183.8	-	121.0	77.0
1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1995	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1996	972	-	-	8.4	128.8	115.6	117.4	36.4	77.0	90.4	125.8	121.0	151.2
1997	1203	-	-	25.6	-	53.4	230.0	-	88.6	14.6	-	459.4	331.2
1998	68	53.8	-	-	-	-	-	-	1.0	-	12.4	0.4	
1999	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2003	495	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	212.6	282.8
2004	1167	122.8	224.2	160.6	85.0	-	27.2	3.8	13.4	97.2	191.2	98.8	142.8
2005	1067	33.2	59.8	53.2	120.4	43.8	17.0	66.6	164.2	94.0	89.6	159.4	165.8
2006	1165	125.6	138.6	88.6	35.0	21.8	8.4	40.4	94.6	113.6	124.6	162.8	210.8
2007	1014	158.4	163.8	42.8	10.8	107.6	51.8	2.0	92.4	55.6	81.8	202.2	44.8
2008	1628	241.0	78.6	66.0	228.0	90.8	181.0	13.0	4.4	40.0	159.8	248.2	277.0
2009	1879	301.2	221.8	214.8	130.0	23.4	32.4	20.4	4.0	128.2	119.8	241.2	442.2
2010	2440	122.4	226.6	64.2	74.0	188.8	198.4	112.8	178.4	329.2	259.0	393.8	292.6
2011	1726	141.8	133.6	296.6	22.2	10.0	170.0	71.8	3.6	218.8	276.6	164.8	215.8
2012	1491	67.6	35.8	81.8	281.2	74.4	4.4	11.2	5.2	103.2	374.0	291.2	161.2
2013	1415	262.4	162.6	603.4	169.4	170.2	46.6	-	-	-	-	-	-
Medie a.i.	1413	170	157	150	116	87	85	40	78	119	173	202	198

4.2 Inquadramento idrologico dei bacini del sito di Mangina

Il versante a monte del sito in cui si intende realizzare l'opera, orientato a Nord, è suddiviso in tre sottobacini idrografici, uno ad Ovest (che denomineremo bacino *Roverano*), uno in posizione mediana di estensione maggiore (che denomineremo bacino *Cerreta*) ed infine un piccolo bacino ad Est (che denomineremo bacino *Poggiolo*).

La linea di spartiacque che racchiude questi tre bacini contigui delimita un'area di forma approssimativamente rettangolare con la base minore, rappresentante il limite Sud del bacino Cerreta, che corre ad una quota di circa 400 m e separa il bacino del T. Malacqua da quello del T. Pogliasca (fare riferimento alla mappa di fig. 4.2). I limiti Est ed Ovest dei due bacini principali sono orientati circa N-S e sono pressoché perpendicolari al corso del T. Malacqua.

A Nord i tre bacini sono stati chiusi in prossimità del rilevato INTERSTRADE dove i corsi d'acqua che drenano i bacini Roverano e Cerreta attraversano con due manufatti sotterranei il rilevato stesso, mentre il piccolo bacino denominato Poggiolo è raccolto da un materasso drenante che origina una risorgenza alla base del rilevato INTERSTRADE.

Le principali caratteristiche morfometriche dei bacini individuati sono riassunte nella tabella seguente:

	Bacino Roverano	Bacino Cerreta	Bacino Poggiolo
Area [km^2]	0.050700	0.115652	0.010436
Quota massima [m]	360	425	225
Quota minima [m]	162	165	165
Lunghezza asta principale [m]	275	595	90
Pendenza media [m/m]	0.69	0.44	0.61

Il comportamento idrologico dei tre bacini è differente:

- il bacino Cerreta, di maggiore estensione, ha un reticolo drenante ben definito composto da due rami principali che confluiscono ad una quota di circa 240 m, poco più a monte dell'autostrada A12. Il regime del corso d'acqua è caratterizzato da un coefficiente di decremento molto alto e quindi da un rapido esaurimento dopo gli impulsi pluviometrici; anche la composizione geochimica delle sue acque conferma questo comportamento (vedi sezione dedicata). E' da sottolineare peraltro che questo bacino, poco più a monte del rilevato INTERSTRADE, sembra alimentare i depositi detritici sui quali scorre, infatti, in più di un'osservazione, all'assenza di deflusso a valle del rilevato, corrispondeva un deflusso rilevabile a monte.
- Il bacino Roverano di estensione pari a circa la metà del bacino Cerreta, non presenta un reticolo definito e sembra originarsi ai piedi di un accumulo detritico, in prossimità dell'attraversamento dell'autostrada A12; in questo sito il corso d'acqua risulta più inciso rispetto al vicino bacino Cerreta, infatti la quota del suo alveo è più bassa di circa una decina di metri rispetto alla quota dell'alveo dell'altro bacino. Anche il regime di questo corso d'acqua è differente in quanto caratterizzato da un esaurimento più lungo (la portata non si annulla mai al contrario di quello che si osserva sul bacino contiguo) e da una portata media che appare superiore. Questo diverso comportamento è coerente con un'alimentazione sostenuta da apporti sotterranei di acque accumulate nei depositi detritici o nel sottostante substrato roccioso fratturato, ipotesi confermata dalla composizione geochimica delle acque (vedi sezione dedicata). Per spiegare il diverso regime di questo bacino si può ipotizzare anche un bacino idrogeologico drenante più ampio rispetto a quello idrologico.

- Anche il bacino Poggiolo ha un comportamento simile al bacino Roverano con un regime ancor più modulato anche se con portate minori, in accordo con la sua modesta estensione.

Nella tabella seguente sono riportate, per i tre bacini descritti, le stime di portata al colmo della piena sulle sezioni di chiusura ottenute con diverse formule di calcolo per un tempo di ritorno pari a 200 anni.

	Portate al colmo della piena con tempo di ritorno di 200 anni [m^3/s]		
	Bacino Roverano	Bacino Cerreta	Bacino Poggiolo
Area [km^2]	0.050700	0.115652	0.010436
Canuti, Moisello (1979)	1.21	2.30	0.36
Formula razionale	2.04	2.88	0.71
Autorità di Bacino del F. Magra	4.96	8.84	1.64

Nelle pagine seguenti è presentato un esempio delle tabelle di calcolo elaborate per il bacino Cerreta.

Alla luce delle osservazioni di terreno, le stime di portata fornite dalla formula razionale e dalle formule elaborate da Canuti e Moisello (Canuti P., Moisello U., 1979, "*Indagine regionale sulle portate di massima piena in Liguria e Toscana*", Pubbl. Istituto di Idraulica dell'Università di Pavia, n. 57, 56 p.), sembrano rispecchiare più fedelmente il comportamento idrologico dei bacini studiati.

CALCOLI IDROLOGICI BACINO							
CARATTERISTICHE MORFOCLIMATICHE DEL BACINO						***Bacino Cerreta***	
A - superficie [Kmq]							0.1156522
hm - max afflusso meteorico mensile medio [mm]							411.3
shm - scarto quadratico medio di hm [mm]							103.3
hl - media max di precipitazione durata 1 giorno [mm]							108.5
J - pendenza media del corso d'acqua							0.437
L - distanza massima percorsa dall'acqua [Km]							0.595
dH - differenza di quota punto più lontano - sez. chiusura [m]							260
METODI EMPIRICI PER LA STIMA DI Q							**Q [mc/s]**
Forti (1922) - piccoli bacini hl<250 mm							**1.14**
Forti (1922) - piccoli bacini hl>400 mm							**-**
Giandotti (1940) - Appennino Ligure 2<A<940 Kmq							**-**
Pagliaro (1936) - A<1000 Kmq							**3.72**
Kresnik - sistemazioni montane							**9.18**
CALCOLO Q ASSOCIATA AL T DI RITORNO						**T [anni]**	200
Canuti Moisello (1979) - Liguria							
Qm [mc/s]	**0.67**		s(Qm) [mc/s]	**0.44**			
a	0.47		b	0.34	**Q[T]=a+bz**		**2.30**
Canuti Moisello (1979) - Toscana							
Qm [mc/s]	**0.62**		s(Qm) [mc/s]	**0.54**			
a	0.38		b	0.42	**Q[T]=a+bz**		**2.62**
Canuti Moisello (1979) - Toscana (bacini pianeggianti, A>500Kmq)							
Qm [mc/s]	**0.00**		s(Qm) [mc/s]	**0.00**			
a	-		b	-	**Q[T]=a+bz**		**-**
Q - Formula razionale						**Q [mc/s]**	**2.88**
C - coefficiente di deflusso (da tabella C)							0.20
tc - tempo di corrivazione [h]							0.09
hc - pioggia critica di durata pari a tc	**Vara (V) Magra (M)**					V	38
i_T - intensità pioggia critica con durata pari a tc e periodo di rit. T [mm/h]							448
CALCOLO TEMPO DI CORRIVAZIONE - tc						**tc [ore]**	**tc [min]**
Ventura - reti di bonifica						**0.07**	**3.9**
Pasini						**0.07**	**4.0**
Ogrosky						**0.06**	**3.6**
Formula combinata						**0.09**	**5.1**

CURVE DI POSSIBILITA' PLUVIOMETRICA (Autorità di Bacino del Fiume Magra)

Le curve di possibilità pluviometrica ottenute con il procedimento prescelto devono essere calibrate in funzione della longitudine del sito sul quale si vogliono costruire; esse hanno forma:

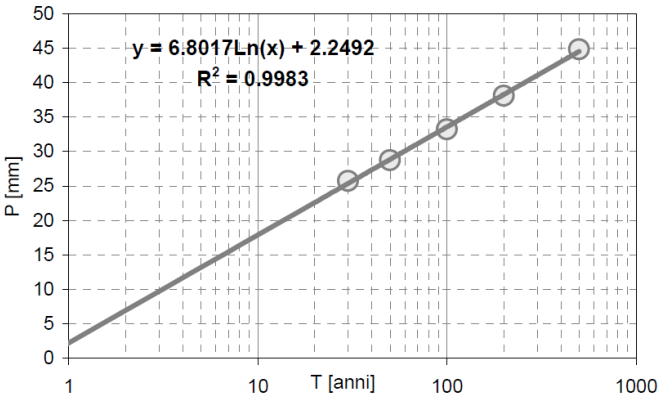
$$h(T,d) = K_T E[H_1] d^{0.39}$$

dove il *fattore di frequenza* K_T è funzione del periodo di ritorno, mentre $E[H_1]$ della longitudine del sito. Sono state quindi stimate le curve inserendo due valori medi per $E[H_1]$, differenti per le due aree principali e corrispondenti alla longitudine del baricentro dei bacini; $E[H_1]=35.7$ *mm* per il bacino del Vara, $E[H_1]=32.1$ *mm* per il bacino del Magra. I valori di K_T sono riportati, per i periodi di ritorno presi in considerazione, nella Tabella

T [anni]	Kt	Vara P [mm]
30	1.882	26
50	2.101	29
100	2.429	33
200	2.784	38
500	3.277	45

Bacino	$E[H_1]$	Dur. d [h]
Vara	35.7 mm	0.09
Magra	32.1 mm	0.09

Durata d [h]		1.0
Durata d = tc ?	Si / No	Si



CALCOLI IDROLOGICI BACINO

Piano stralcio assetto idrogeologico del bacino del Fiume Magra e del Torrente Parmignola ai sensi Art.17 comma 6 ter L.183/89 e Art.1 comma 1 D.L.180/98 Adottato con Delibera Comitato Istituzionale n° 180 del 27 aprile 2006

CARATTERISTICHE MORFOCLIMATICHE DEL BACINO	*Bacino Cerreta*
A - superficie [Kmq].....	0.115652

Bacino del Magra a monte della confluenza - Q [mc/s]

T [anni]	Magra	**Vara**
30	5.74	**5.30**
100	7.95	**7.29**
200	9.50	**8.84**
500	11.93	**11.27**

Bacino del Magra a valle della confluenza - Q [mc/s]

T [anni]	Magra
30	1.04
100	1.39
200	1.62
500	1.85

Periodo di ritorno	Magra	Vara
30 anni	$Q = 26 \cdot A^{0.7}$	$Q = 24 \cdot A^{0.7}$
100 anni	$Q = 36 \cdot A^{0.7}$	$Q = 33 \cdot A^{0.7}$
200 anni	$Q = 43 \cdot A^{0.7}$	$Q = 40 \cdot A^{0.7}$
500 anni	$Q = 54 \cdot A^{0.7}$	$Q = 51 \cdot A^{0.7}$

2.9.1.3: relazioni area – portata al colmo di piena per i sottobacini a monte della confluenza; nelle relazioni riportate l'area A è espressa in Kmq e la portata al colmo in mc/s.

Periodo di ritorno	Portata al colmo
30 anni	$Q = 9 \cdot A$
100 anni	$Q = 12 \cdot A$
200 anni	$Q = 14 \cdot A$
500 anni	$Q = 16 \cdot A$

2.9.1.4: relazioni area – portata al colmo di piena per i sottobacini a valle della confluenza; nelle relazioni riportate l'area A è espressa in Kmq e la portata al colmo in mc/s.

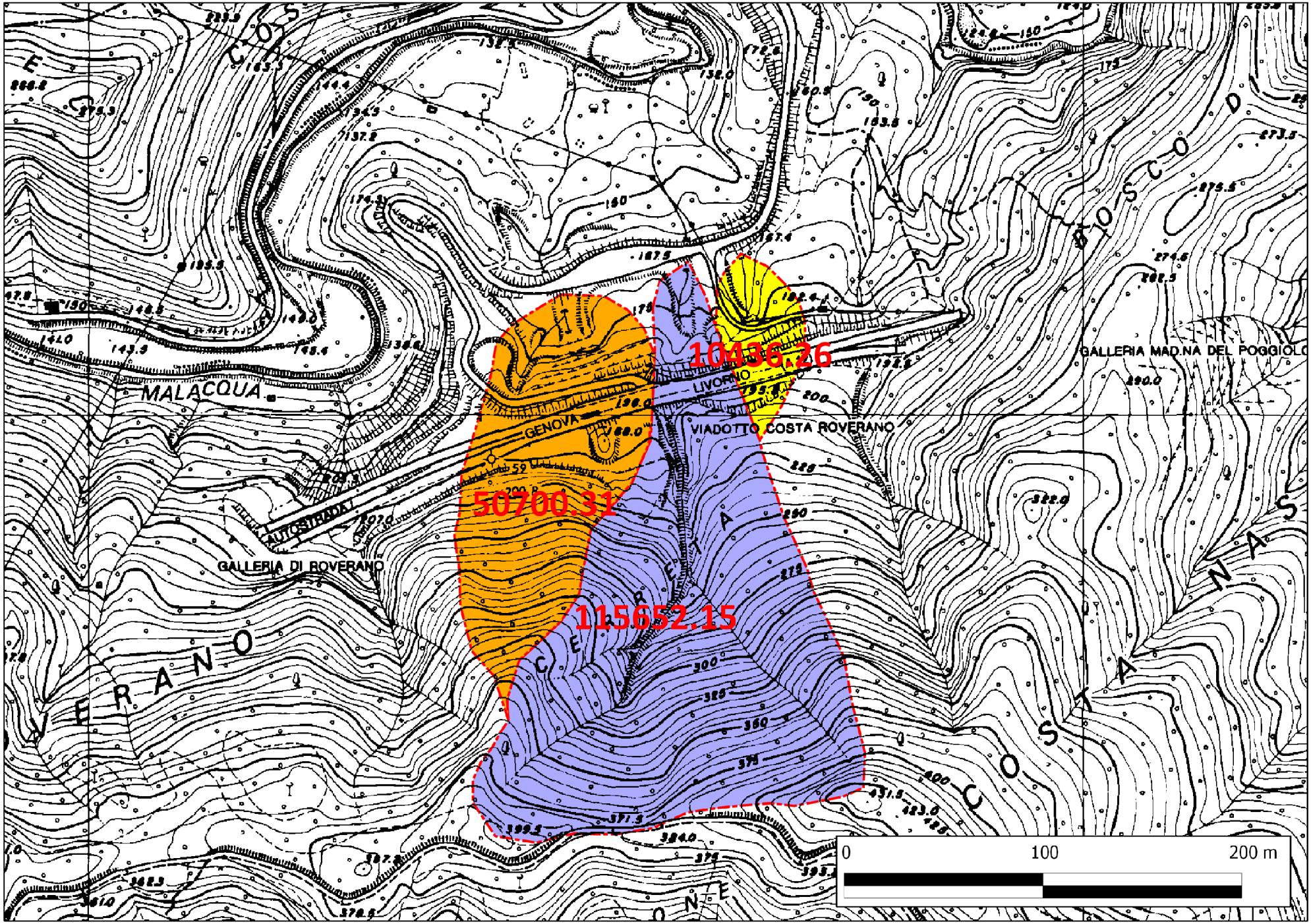


Fig. 4.3. Mappa dei bacini idrografici con indicazione della loro estensione in m^2. In arancio il bacino Roverano, in viola il bacino Cerreta e in giallo il bacino Poggiolo.

4.3 Descrizione delle caratteristiche idrogeologiche delle formazioni

Le rocce costituenti il substrato roccioso locale (*flysch arenaceo*) possono essere considerate litologie a ridotta permeabilità o localmente a media permeabilità per fratturazione. Queste rocce acquistano una permeabilità secondaria in funzione del numero, dell'ampiezza e della continuità delle fratture; si tratta di una permeabilità decrescente, perché in profondità le fratture tendono a richiudersi sia per il carico litostatico sia per la presenza di prodotti d'alterazione della roccia stessa. Di frequente pozzi relativamente profondi (profondità tra i 50 ed i 100 m) perforati in queste rocce, risultano produttivi con portate dell'ordine delle decine di litri al minuto.

La particolare struttura stratificata di queste formazioni condiziona la circolazione delle acque, infatti, il deflusso idrico è concentrato all'interno degli strati o dei banchi maggiormente fratturati che costituiscono le vie preferenziali seguite dalle acque sotterranee; ciò favorisce l'instaurarsi di falde acquifere che possono alimentare emergenze in corrispondenza dell'intersezione dei banchi fratturati con la superficie topografica, tipicamente nelle zone più depresse degli ammassi rocciosi o lungo le incisioni vallive.

I materiali che costituiscono le coltri detritiche, invece, possono essere classificati permeabili per porosità, con un grado di permeabilità variabile da medio a medio-basso in funzione del locale grado di compattazione e di composizione granulometrica. Le acque meteoriche che s'infiltrano all'interno di questi depositi possono venire a giorno incontrando lenti di materiale meno permeabile, oppure possono raggiungere il substrato roccioso a minore permeabilità relativa e da qui defluire al contatto con la roccia in posto o scendere ancora più in profondità, in corrispondenza delle sue porzioni maggiormente fratturate.

I deposti alluvionali di fondovalle sono caratterizzati da una buona permeabilità primaria essendo rappresentati da ghiaie, sabbie e limi. Nella piccola pianura alluvionale che formano ai piedi del sito di interesse, possono essere sede di un modesto acquifero freatico (vedi sondaggio SALT di fig. 2.5) la cui quota piezometrica è regolata dal livello idraulico del torrente.

Nell'area in cui si intende realizzare la discarica sono presenti due emergenze di acque sotterranee che scaturiscono alla base del rilevato INTERSTRADE, una ad Est ed una ad Ovest caratterizzata da acque ferruginose (foto di figura 4.4). L'origine di queste emergenze sarà discussa nella sezione dedicata alla geochimica delle acque sotterranee.



Fig. 4.4. Sorgente ferruginosa settore W del sito di Mangina (portata ≈ 1 l/s)

4.4 Prove di permeabilità

Sono state eseguite prove di permeabilità nei fori di sondaggio del tipo carico variabile e del tipo a carico costante. Nella documentazione di progetto (rif. 08562-006R03E01) sono riportati i certificati di prova.

Le prove sono state effettuate sia sui terreni di copertura del substrato roccioso, sia sul substrato roccioso stesso.

Nella tabella seguente sono riassunti i dati di permeabilità ottenuti sui terreni di copertura con l'indicazione del sondaggio, la descrizione litologica del livello sul quale è stato effettuato il test e la sua profondità.

La permeabilità media dei terreni di copertura, supponendo una distribuzione di valori log-normale, è risultata di circa 10^{-7} m/s.

Sond.	Profondità	Descrizione stratigrafia	K (m/s)	log(K)
S1	9.7 -10.7	Sabbia con clasti arenacei arrotondati	2.15E-07	-6.7
S2	8.2 -9.2	Sabbia con clasti arenacei angolosi	1.98E-08	-7.7
S3	5.2 -6.2	Sabbia con clasti arenacei angolosi	6.30E-07	-6.2
S3	9.0 -9.5	Sabbia con clasti arenacei angolosi	8.97E-06	-5.0
S3	15.7 -16.7	Clasti angolosi marnoso-arenacei	9.63E-08	-7.0
S4	9.0 -10.5	N.D.	2.55E-07	-6.6
S4	18.0 -19.8	Sabbia limosa con livelli di ossidazione	2.45E-08	-7.6
S5	1.8 -3.0	Sabbia limosa con clasti angolosi	1.41E-07	-6.9
S5	6.0 -7.6	Clasti arenacei angolosi	5.24E-08	-7.3
S7	4.5 -6.0	Sabbia limoso-argillosa	2.50E-09	-8.6
S8	4.5 -6.5	Sabbia limosa	1.73E-09	-8.8
S9	6.0 - 6.8	Sabbia media gran. con livelli limosi	6.58E-04	-3.2
S9	12.0 -13.0	Clasti arenacei alterati	1.13E-07	-6.9
S10	4.5 -5.5	Sabbia limosa e clasti arenacei sub-arrot.	1.25E-07	-6.9
S10	9.0 -9.5	Sabbia media gran. con livelli limosi	3.38E-05	-4.5
S11	3.0 -4.0	Limo argilloso con clasti angolosi	2.66E-08	-7.6
S11	5.7 -5.7	Sabbia con clasti angolosi arenacei	3.90E-08	-7.4
S12	3.0 -3.0	Sabbia limosa e clasti arenacei sub-arrot.	4.11E-07	-6.4
S13	9.0 -10.5	Limo sabbioso con clasti di alterazione	8.80E-09	-8.1
S13	21.0 -23.0	Limo sabbioso con clasti di alterazione	4.48E-08	-7.3
			Media	**-6.8**
			Massimo	-3.2
			Minimo	-8.8

Nella tabella a pagina seguente sono riassunti i dati di permeabilità ottenuti sul substrato roccioso con l'indicazione del sondaggio, la descrizione litologica del livello sul quale è stato effettuato il test e la sua profondità.

La permeabilità media del substrato roccioso, supponendo una distribuzione di valori log-normale, è risultata circa 10^{-5} m/s quindi due ordini di grandezza superiore rispetto alla media ottenuta per i terreni di copertura.

Sond.	Profondità	Descrizione stratigrafia	K (m/s)	log(K)
S1	17.0 -18.0	Arenaria grossolana alterata	7.95E-08	-7.1
S2	19.0 -20.0	Arenaria grossolana alterata	8.05E-08	-7.1
S4	31.5 -33.0	Arenaria molto fratturata	2.04E-04	-3.7
S5	9.0 -9.5	Arenarie e siltiti molto fratturate	2.19E-04	-3.7
S6	9.0 -15.0	Arenaria molto fratturata	1.16E-03	-2.9
S6	15.0 -17.0	Arenaria molto fratturata	3.54E-07	-6.5
S8	10.0 -11.0	Arenaria fratturata	1.40E-06	-5.9
S11	14.9 -14.9	Arenaria fratturata	8.40E-07	-6.1
S13	36.5 -37.5	Arenaria fratturata	8.23E-04	-3.1
			Media	**-5.1**
			Massimo	-2.9
			Minimo	-7.1

In allegato 4.1a e 4.1b sono riportate le due mappe del logaritmo negativo delle permeabilità misurate nei fori di sondaggio, rappresentanti la distribuzione di questa variabile nei sedimenti di copertura e nel substrato roccioso.

Il confronto tra le due mappe consente di osservare quanto segue:

- La distribuzione della variabile -logK nei terreni di copertura mostra una zona a permeabilità più elevata, in corrispondenza del sondaggio S9 ed in generale, nel settore Est dell'area. Un'area a bassa permeabilità è osservabile in corrispondenza dei sondaggi S8 e S9 (settore W dell'area).
- La distribuzione della variabile -logK nel substrato roccioso ha un andamento approssimativamente opposto con valori più alti di K nel settore W e sul limite S mentre i valori più bassi si registrano nel settore E (sondaggi S2 e S9).

Tale andamento è in accordo con quanto osservato sul terreno, con una vivace circolazione sotterranea nel substrato più permeabile nel settore W, tamponata da sedimenti di copertura a bassa permeabilità che possono costituire localmente un *acquicludo / acquitardo*. Nel settore E i sedimenti di copertura sono invece caratterizzati da permeabilità più elevata e possono favorire l'ingresso in falda delle acque superficiali del Rio Cerreta. Questa ipotesi è confortata da quanto emerso dallo studio geochimico delle acque sotterranee (vedi sezione dedicata).

4.5 Mappe delle isofreatiche

A partire dal gennaio 2013 sono state effettuate n. 5 campagne di misura dei livelli piezometrici su tutti i piezometri perforati superficiali (sigle con pedice s) e profondi (sigle con pedice p). I piezometri superficiali drenano esclusivamente i depositi granulari posti al di sopra del substrato roccioso mentre i piezometri superficiali drenano esclusivamente il substrato roccioso arenaceo.

Le caratteristiche costruttive di ogni piezometro sono contenute nelle monografie dei sondaggi di cui alla documentazione progettuale (rif. 08562-006R03E01).



Fig. 4.5. Freatimetro Corr-Tek modello KL010.

La misura dei livelli piezometrici è stata eseguita con un freatimetro Corr-Tek modello KL010 che consente di apprezzare il cm (fig. 4.5) previa livellazione topografica di precisione dei bocca-foro dei piezometri.

Per ogni sessione di misura sono state elaborate le seguenti mappe:

- mappa delle isopiezometriche relative ai piezometri superficiali;
- mappa delle isopiezometriche relative ai piezometri profondi;
- mappa della differenza tra le quote piezometriche dei piezometri superficiali e dei piezometri profondi.

Sono state inoltre elaborate le mappe della massima escursione della falda durante il periodo di osservazione (sia per piezometri superficiali che per quelli profondi) e la mappa della permeabilità misurata nei piezometri, anche in questo caso distinta tra piezometri superficiali e profondi.

Queste mappe sono contenute nell'allegato 4.2.

Le campagne di misura sono state eseguite nei giorni 14/01, 21/01, 14/03, 15/05 e 27/06 dell'anno 2013.

Il regime delle precipitazioni, durante le sessioni di misura, è stato caratterizzato da eventi pluviometrici giornalieri massimi di 82.2 mm il 18/03 e di 77.0 mm il 06/03, corrispondenti a tempi di ritorno rispettivamente di 2.8 e 2.6 anni. Sono state registrate inoltre precipitazioni nevose.

Se si eccettua il dato di giugno, le medie pluviometriche mensili nel periodo di osservazione sono risultate tutte molto più elevate rispetto alle medie stagionali riferite all'anno idrologico medio 1957/2013, con uno scostamento massimo di ben +223% nel mese di Marzo.

	Stazione di Mattarana					
	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU
Medie A.I. 1957-2013	170	157	150	116	87	85
Anno 2013	**262**	**163**	**484**	**169**	**170**	**47**
Differenza %	54	4	223	46	97	-45

Un dato degno di sottolineatura è che il piezometro S7 profondo, ha intercettato acque salienti in pressione con livello piezometrico più elevato di 1 m rispetto al piano campagna.

Questo comportamento è stato riscontrato in tutte le sessioni di misura anche se con portate erogate variabili (foto di figura 4.5).

In questo settore dell'area di intervento (settore di valle), sia i livelli misurati sui piezometri superficiali che quelli misurati sui piezometri profondi sono prossimi al piano di campagna.



Fig. 4.5. Piezometro S7 profondo con acque salienti sopra il p.c. (novembre 2012).

Osservando le mappe relative alle diverse campagne di misura si possono formulare le seguenti considerazioni generali:

- La morfologia della superficie piezometrica ricalca approssimativamente la morfologia del terreno nel settore E dell'area di indagine, dove la superficie assume una forma concava con un asse di drenaggio poco pronunciato quasi coincidente con il rio che delimita ad Est l'area stessa.
- Nel settore W generalmente la superficie piezometrica assume una forma convessa in corrispondenza di una superficie topografica caratterizzata invece da una linea di drenaggio (Rio Roverano); si tratta di uno spartiacque sotterraneo orientato circa NS che collega i piezometri S5, S7, S8 e S11. La convessità è più pronunciata nelle mappe relative ai piezometri profondi.
- in tutte le sessioni di misura le differenze tra i livelli misurati nei piezometri superficiali ed i livelli misurati nei piezometri profondi sono massime e positive nel quadrante SE dell'area, a quota più elevata (piezometri S02 e S03), mentre bassi valori, valori nulli o negativi sono riscontrabili nei quadranti W e NE.
- In tutte le tavole il gradiente piezometrico più elevato si riscontra nel quadrante SE per i piezometri superficiali mentre per i piezometri profondi i gradienti sono più blandi.
- La massima escursione osservata durante il periodo di osservazione è stata riscontrata nei fori S2s e S3s e nel S2p per i piezometri profondi.

In base a queste considerazioni si può confermare quanto già osservato nel commento alle mappe di permeabilità e cioè che, sostanzialmente, si possono distinguere due settori:

a) Settore comprendente i quadranti SW e NW: risalita di acque in pressione dal substrato roccioso che possono permeare anche i terreni superficiali, localmente tamponate da livelli impermeabili (zona dei piezometri S07p e S08p), che favoriscono l'instaurarsi di una circolazione in pressione.
b) Settore comprendente i quadranti SE e NE: circolazione di tipo freatico con forti escursioni temporali di livello connesse con gli impulsi pluviometrici alimentata in parte dalle acque del Rio Cerreta (zona piezometro S3s) o del Rio Poggiolo (zona del piezometro S9s), che scorrono in questo settore.

4.6 Monitoraggio piezometrico

In data 14/03/2013 sono state installate nei due piezometri S5p e S5s due sonde per l'acquisizione in continuo dei dati di temperatura, conducibilità e livello delle acque sotterranee. Si tratta di una sonda STS Dl-70/N Multi e di una sonda Greenspan modello CTD350 (fig. 4.6).



Fig. 4.6. Sonde multiparametriche installate nei piezometri S07p e S07s (sonda STS a destra, sonda Greenspan a sinistra).

Queste sonde sono tuttora installate ed in acquisizione. L'intenzione è di protrarre il monitoraggio per almeno un anno.

Una serie di misure è già stata acquisita, questi dati devono essere ancora elaborati ed interpretati.

5. GEOCHIMICA DELLE ACQUE

Con lo scopo di validare il modello idrogeologico descritto nella sezione 4 è stata programmata un'indagine geochimica sulle acque sotterranee e superficiali che insistono nel sito di interesse. Gli obiettivi specifici di questa indagine erano in sintesi:

- riconoscere i processi geochimici che spiegano la composizione delle acque sotterranee distinguendo i processi naturali da eventuali fenomeni di contaminazione;
- evidenziare differenze composizionali tra le acque campionate nei piezometri profondi e le acque prelevate dai piezometri superficiali eventualmente correlabili a diversi regimi di circolazione sotterranea;
- riconoscere i rapporti tra le acque del reticolo superficiale e le acque sotterranee;
- contribuire a definire il fondo geochimico naturale del sito (questa ultima parte è ancora in corso di elaborazione).

Per la caratterizzazione geochimica delle acque sotterranee sono state programmate le seguenti attività:

- Individuazione dei punti di campionamento; sono stati selezionati un numero significativo di punti di prelievo comprendenti tutti i piezometri perforati (totale n. 18 punti), n. 2 campioni di acque sorgive e n. 3 campioni di acque del reticolo superficiale.
- Operazioni di campionamento e di misura sui punti individuati.
- Analisi di laboratorio dei principali parametri per la caratterizzazione geochimica delle acque.
- Elaborazione ed interpretazione dei dati.

5.1 Attività di terreno ed analisi di laboratorio

In data 21 e 22/01/2013 sono stati prelevati campioni di acque dei piezometri, di acque sorgive e di acque del reticolo superficiale. La localizzazione dei punti di prelievo è mostrata nelle mappe degli allegati 5.1a e 5.1b.

Nel caso di piezometri, per poter ottenere un campione rappresentativo della falda idrica nelle vicinanze del sondaggio e non dell'acqua stagnante all'interno dello stesso, dove è stato possibile, è stata prelevata acqua dal sondaggio per un tempo sufficientemente lungo, mediante una pompa ad immersione (alimentata da batterie, con portata inferiore a 10 litri/minuto). In ogni caso, lo spurgo è stato protratto fino alla stabilizzazione dei parametri chimico-fisici di campo; nei casi in cui è avvenuto uno svuotamento del sondaggio, a causa della bassa permeabilità delle formazioni da esso attraversate, lo spurgo è stato necessariamente più breve.

L'acqua è stata raccolta in un contenitore sufficientemente capiente e quindi frazionata nelle differenti aliquote, per evitare di indurre disomogeneità fra queste ultime.

All'atto del campionamento sono stati misurati:

- livello piezometrico con freatimetro (al cm);
- temperatura di acqua con termometro digitale al decimo di grado;
- pH con pH-mV-metro digitale munito di elettrodo a vetro e compensazione automatica della temperatura;
- potenziale redox con pH-mV-metro digitale munito di elettrodo a Pt;
- conducibilità elettrica specifica a 20°C con conducimetro digitale.

Direttamente sul sito di prelievo, sono state raccolte due aliquote di campione, un contenitore da 250 ml di campione "tal quale" ed un'aliquota da 50 ml successivamente filtrata (attraverso membrane con diametro dei pori di 0.45 μm) e acidificata con HNO3 ultrapuro in laboratorio.

Il profilo completo delle determinazioni eseguite sul terreno ed in laboratorio è riportato nella tabella seguente:

Determinazione	**Metodo**	**Determinazione**	**Metodo**
Calcio	EPA 300.7	Cadmio	ASTM D 1976
Sodio	EPA 300.7	Ferro	ASTM D 1976
Magnesio	EPA 300.7	Litio	ASTM D 1976
Potassio	EPA 300.7	Manganese	ASTM D 1976
Ammoniaca	EPA 300.8	Nichel	ASTM D 1976
Cloruri	M.U. 876	Piombo	ASTM D 1976
Solfati	M.U. 876	Rame	ASTM D 1976
Nitrati	M.U. 876	Silice	ASTM D 1976
Fluoruri	M.U. 876	Stronzio	ASTM D 1976
Alcalinità	IRSA 2010	Zinco	ASTM D 1976
Temperatura	IRSA 2110	Eh	Std.Met. 20°ed. 2580
Conducibilità	M.U. 930	pH	M.U. 929

Tutte le analisi sono state effettuate presso il Laboratorio Centrale di ACAM Acque S.p.A.. Sono stati impiegati un cromatografo ionico DIONEX mod. ICS-2000 (determinazione di anioni e cationi maggiori), uno spettrofotometro ICP-OES Perkin-Elmer mod. OPTIMA 2000 DV (analisi dei metalli in traccia e della silice) dotato di sistema di nebulizzazione, riscaldamento e condensazione del nebulizzato mod. Apex-E® ed uno spettrofotometro Hach-Lange per la determinazione del COD.

L'alcalinità totale è stata determinata per titolazione acidimetrica con HCl 0.1N ed un indicatore misto (rosso metile e verde bromo-cresolo).

I limiti di rilevabilità sui parametri determinati sono:

- 0.1 mg/l per la SiO_2 disciolta;
- 0.05 mg/l per anioni e cationi maggiori, F, specie dell'azoto;
- 5 ppb per Cu, Cr, Fe, Li, Mn, Sr e Zn;
- 2 ppb per Cd, Ni e Pb.

Effettuata l'analisi chimica dei campioni, prima di procedere alle successive fasi di elaborazione e di interpretazione dei dati, è stato eseguito un controllo della qualità dei dati analitici dei principali costituenti ionici, applicando la seguente relazione (concentrazioni in unità equivalenti):

$$\%dev = \left(\frac{\Sigma_{cationi} - \Sigma_{anioni}}{\Sigma_{cationi} + \Sigma_{anioni}} \cdot 100 \right) \qquad (1)$$

Infatti, dovendo essere soddisfatta la condizione di elettro-neutralità della soluzione acquosa, la somma delle concentrazioni dei costituenti cationici deve essere uguale, entro limiti accettabili (±5%), alla somma delle concentrazioni dei costituenti anionici, entrambe espresse in unità equivalenti.

Questa condizione è risultata essere soddisfatta per tutte le acque campionate con una percentuale di sbilancio media pari al 3.2% ed una percentuale di sbilancio massima del 4.8%, entrambe espresse in valore assoluto. Nella Tabella a pagina seguente sono riportati i principali dati analitici relativi ai campioni prelevati.

Nome	Data	CERT.	pH field	T °C	EC_{20} µS/cm	Eh (mV)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO_3 (mg/l)	SO_4 (mg/l)
S09p	21/01/13	125	6.78	12.7	289	53	51.0	7.4	15.3	1.5	168.0	4.5
S09s	21/01/13	126	5.69	11.9	109	165	8.2	2.0	10.5	2.6	18.9	10.1
S12p	21/01/13	127	7.65	12.8	214	82	34.5	5.4	11.5	3.4	134.2	3.8
S07p	21/01/13	128	7.30	12.6	316	95	61.8	4.5	11.8	1.9	194.0	8.0
S07s	21/01/13	129	7.58	11.4	318	95	59.3	5.5	13.3	1.9	192.2	8.7
S08p	21/01/13	130	7.23	12.2	329	20	55.2	7.3	14.1	1.8	187.9	14.8
S08s	21/01/13	131	6.95	12.2	276	12	47.7	5.0	15.5	1.8	143.4	9.3
S11p	21/01/13	132	6.86	12.8	445	-85	69.9	14.9	13.3	2.2	262.9	13.4
S11s	21/01/13	133	6.49	9.8	429	-70	40.4	12.4	19.0	1.7	169.6	14.9
S05p	21/01/13	134	7.64	12.9	211	77	36.6	2.9	11.1	1.7	127.5	4.6
S05s	21/01/13	135	6.71	10.0	287	190	49.1	7.3	7.9	2.5	149.5	18.1
S03s	21/01/13	136	5.63	11.8	95	260	7.4	2.9	7.1	3.5	28.1	14.8
S03p	21/01/13	137	6.59	12.7	212	210	30.0	5.0	11.4	4.4	103.7	11.7
S13s	22/01/13	138	6.32	11.7	288	140	34.8	4.0	22.5	1.8	69.5	10.1
S13p	22/01/13	139	6.55	12.4	285	110	51.6	3.7	18.6	1.9	131.0	9.8
RCR	22/01/13	140	7.26	9.6	63	240	4.0	0.8	7.0	3.6	22.0	4.7
S02p	22/01/13	141	6.38	13.2	183	150	25.8	5.5	8.7	3.8	109.8	1.2
S02s	22/01/13	142	5.94	13.9	100	170	5.6	2.2	11.6	1.7	31.1	1.8
SgW	22/01/13	144	6.50	11.8	437	-20	47.0	8.3	34.3	3.1	98.8	16.9
RRV	22/01/13	145	7.76	9.7	276	170	35.1	2.8	22.9	2.1	85.4	11.9
S10p	22/01/13	146	7.07	12.9	241	70	28.8	4.0	19.3	3.0	73.2	20.9
TMA	22/01/13	147	8.30	9.6	184	150	25.3	5.8	8.0	2.5	94.6	7.9
SgE	22/01/13	148	6.75	12.3	277	150	20.6	6.6	30.2	1.5	64.1	11.3

Nome	Data	CERT.	Cl (mg/l)	NO_3 (mg/l)	SiO_2 (mg/l)	Sr (mg/l)	Li (mg/l)	Fe (mg/l)	E %
S09p	21/01/13	125	22.9	3.5	16.73	0.265	0.009	0.027	4.25
S09s	21/01/13	126	14.5	4.6	5.47	0.046	<l.r.	0.008	4.42
S12p	21/01/13	127	11.5	0.6	14.26	0.213	<l.r.	0.011	2.64
S07p	21/01/13	128	12.3	2.2	15.35	0.290	0.012	0.055	3.78
S07s	21/01/13	129	12.7	1.9	12.75	0.318	0.008	<l.r.	4.20
S08p	21/01/13	130	14.7	1.7	16.21	0.272	0.010	<l.r.	2.48
S08s	21/01/13	131	23.1	0.9	11.11	0.218	0.005	<l.r.	4.60
S11p	21/01/13	132	20.7	0.5	12.18	0.429	0.012	0.049	1.71
S11s	21/01/13	133	29.0	0.7	4.97	0.111	<l.r.	0.049	0.22
S05p	21/01/13	134	8.2	0.5	10.87	0.244	0.015	0.025	3.30
S05s	21/01/13	135	5.8	15.5	3.01	0.161	<l.r.	0.010	3.24
S03s	21/01/13	136	4.6	3.9	7.38	0.042	<l.r.	<l.r.	2.31
S03p	21/01/13	137	12.5	3.8	13.23	0.156	0.005	0.005	3.26
S13s	22/01/13	138	49.8	6.3	6.12	0.119	<l.r.	0.013	3.87
S13p	22/01/13	139	34.6	4.5	6.57	0.154	<l.r.	0.050	4.63
RCR	22/01/13	140	8.4	1.3	8.30	0.024	<l.r.	0.085	-4.02
S02p	22/01/13	141	9.7	2.1	9.48	0.100	<l.r.	<l.r.	2.06
S02s	22/01/13	142	13.3	8.2	7.28	0.028	<l.r.	<l.r.	-2.36
SgW	22/01/13	144	83.8	5.8	6.14	0.177	<l.r.	2.279	2.76
RRV	22/01/13	145	36.1	6.7	8.27	0.112	<l.r.	0.096	4.50
S10p	22/01/13	146	27.1	2.1	21.30	0.174	0.006	0.128	4.83
TMA	22/01/13	147	11.0	2.6	8.73	0.095	<l.r.	0.222	2.32
SgE	22/01/13	148	52.3	2.0	9.98	0.075	<l.r.	0.144	2.30

5.2 Classificazione chimica delle acque

Nel diagramma quadrangolare classificativo di Langelier e Ludwig di figura 5.1, una buona parte delle acque campionate nei piezometri si colloca nel quadrante delle acque bicarbonato alcalino-terrose in sovrapposizione con la composizione delle acque sotterranee circolanti in rocce arenacee della Provincia della Spezia (cerchi vuoti nei diagrammi). La restante parte dei piezometri, delle acque sorgive e delle acque superficiali sono caratterizzate da composizioni più spostate verso i vertici SO_4+Cl e Na+K (campioni RCR, RRV, SgE, SgW, S02s, S03s, S09S, S13s).

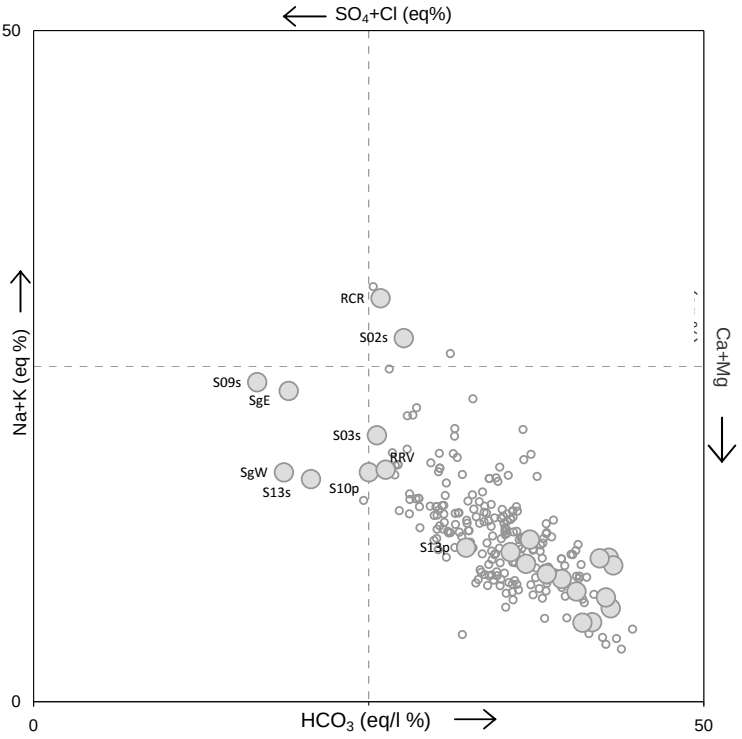


Figura 5.1. Diagramma di classificazione di Langelier e Ludwig

Nella sezione del diagramma di Langelier e Ludwig (figura 5.2) che consente di recuperare l'informazione relativa alla salinità ionica totale (TDS), i campioni con composizione HCO_3-Ca sono caratterizzati da TDS compresa tra 4 meq/l e 8 meq/l (a parte un campione con TDS anomala di circa 10 meq/l) mentre la maggior parte delle acque sotterranee circolanti in rocce arenacee della Provincia della Spezia è caratterizzata da TDS compresi tra 2 e 4 meq/l. In questo diagramma le acque più ricche in SO_4, Cl e Na hanno salinità comprese tra 2 e 8 meq/l. Si distinguono acque a bassa salinità perlopiù rappresentate dai campioni di acque superficiali (piezometri superficiali del settore Est del sito e l'acqua del bacino denominato Cerreta prossimo ad essi).

L'analisi dei due diagrammi descritti e dei rapporti ionici consente di separare tre gruppi omogenei di acque, come riportato nella tabella seguente.

Gruppo	**Composizione**	**TDS [meq/l]**	**Campioni**
[A]	HCO3 - Na (Ca)	< 2	RCR, S02s, S03s, S09s
[B]	HCO3 – Ca	4 ÷ 8	S02p, S03p, S05p, S07p, S08p, S11p, S12p S13p, S07s, S08s, S09p, S11s, TMA, S05s
[C]	Cl (HCO3) - Ca, Na		S13s, SgE, SgW, S10p, RRV
Le parentesi tonde indicano che il catione/anione è generalmente subordinato rispetto al catione/anione dominante			

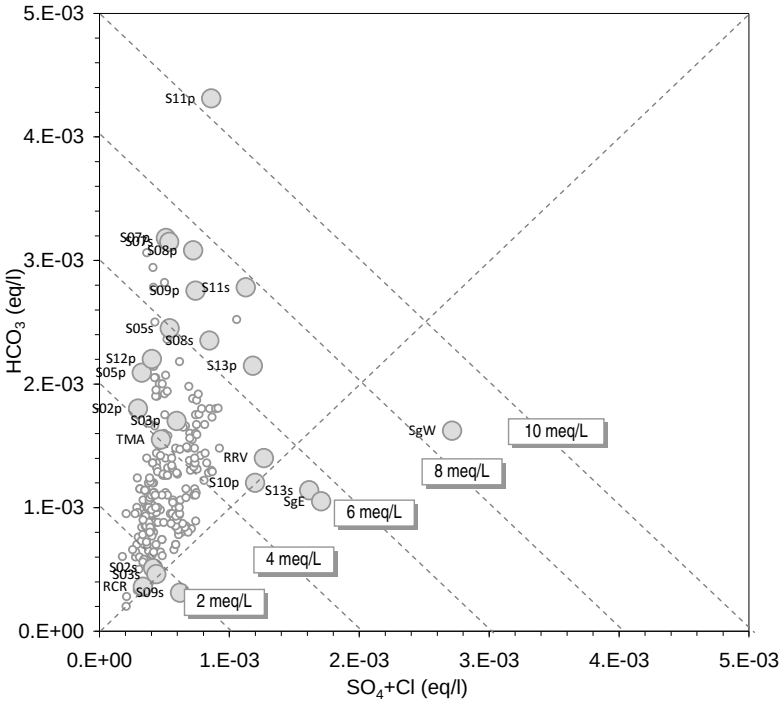


Figura 5.2. Sezione del diagramma di classificazione di Langelier e Ludwig

5.3 Diagramma PCO_2 - pH

Il diagramma di correlazione fra pH e PCO_2 (Figura 5.3) mostra che per tutti i punti campionati e per i punti rappresentativi delle acque sotterranee circolanti in rocce arenacee della Provincia della Spezia, la PCO_2 è compresa fra il valore atmosferico medio (0.00032 bar) e un massimo attorno a 0.04 bar; si tratta di valori compatibili con gli apporti di CO_2 biogenica prodotta naturalmente nei suoli, per decomposizione delle sostanze organiche e respirazione degli apparati radicali (Appelo e Postma, 1996).

Il diagramma in esame mostra in particolare che:

- le acque di minore salinità ionica appartenenti al gruppo [A] sono sottosature in calcite, hanno TDIC[1] attorno a 100 mg HCO_3/L; anche le acque del gruppo [C] sono caratterizzate da valori di TDIC attorno a 100 mg HCO_3/L ma da una PCO_2 più elevata ma comunque compresa nell'intervallo tipico dei suoli.
- le acque di maggiore salinità ionica, perlopiù appartenenti al gruppo [B], si differenziano dalle precedenti essendo più prossime alla linea di saturazione rispetto alla calcite ed avendo TDIC mediamente più elevato attorno a 200 mg HCO_3/L. Un gruppo di queste acque campionate nei piezometri nella parte bassa del sito è caratterizzato da PCO_2 relativamente più elevate attorno 0.04 bar.
- come era lecito attendersi le acque campionate sul reticolo superficiale hanno una PCO_2 prossima a quella atmosferica;

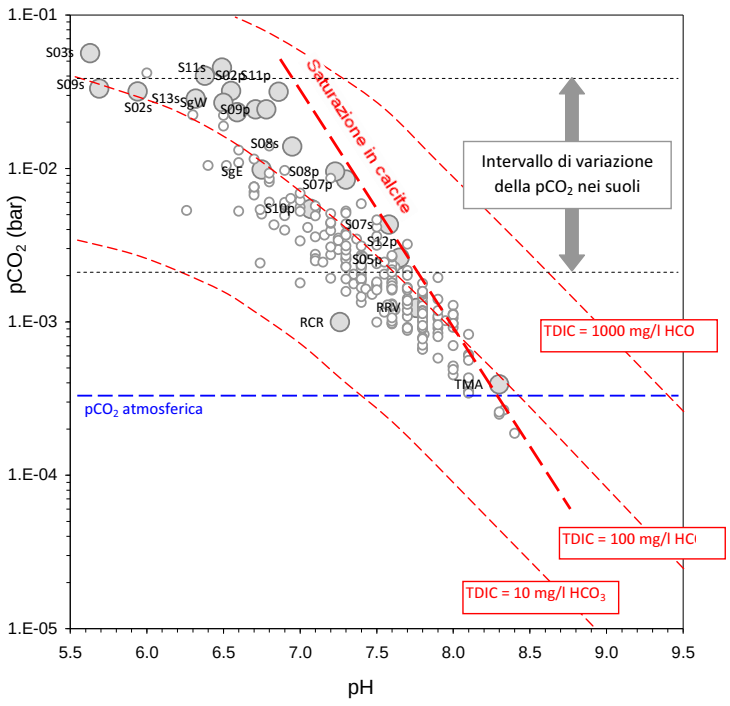


Figura 5.3. Diagramma di correlazione fra pH e pressione parziale di CO_2 (in scala logaritmica). Sono indicate anche la pressione atmosferica media, alcune linee di iso-TDIC, e la condizione di saturazione in calcite per il sistema CaO-CO_2-H_2O.

[1] *Con l'acronimo TDIC si fa riferimento al carbonio totale inorganico disciolto, ossia alla somma delle concentrazioni di CO_2 acquosa, HCO_3^- e CO_3^{2-}, inclusi i complessi acquosi di questi due leganti anionici.*

5.4 Diagrammi dei rapporti ionici

Ulteriori indicazioni sono fornite dal diagramma di Pastorelli (Pastorelli et al., 1999) di figura 5.4 che si può utilizzare per la maggior parte delle acque in oggetto, considerando la generale prevalenza di Ca e HCO_3 fra i principali soluti ionici.

Sul diagramma vengono mostrate le composizioni attese per dissoluzione di calcite ($CaCO_3$), dolomite [$CaMg(CO_3)_2$], magnesite ($MgCO_3$), anidrite ($CaSO_4$) e gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), nonché quella determinata da dissoluzione ossidativa di solfuri (e.g. pirite FeS_2) seguita da neutralizzazione della soluzione acquosa per interazione con minerali carbonatici.

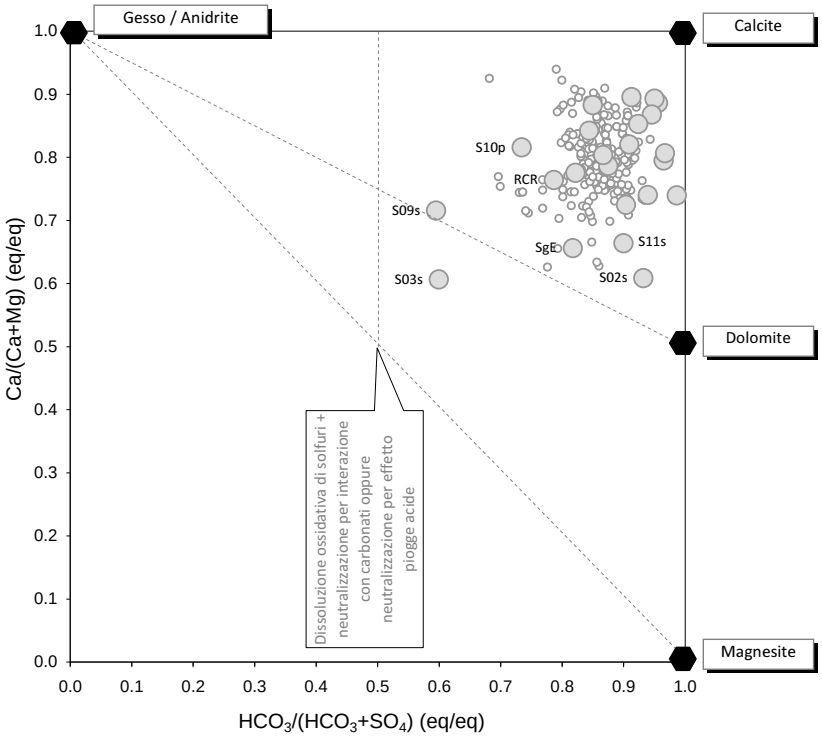


Fig. 5.4. Diagramma di Pastorelli.

Se si eccettuano i campioni S09s e S03s, caratterizzati da bassa salinità (<2 meq/l) ma anche da una concentrazione relativamente alta di SO_4, la cui composizione è presumibilmente influenzata da miscela con acque superficiali molto diluite, in questo diagramma le composizioni di tutti gli altri campioni sono spiegabili in base a:

- dissoluzione di calcite:

$$CaCO_{3(s)} + CO_{2(g)} + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + 2\ HCO_3^- \quad (2)$$

- dissoluzione di dolomite:

$$CaMg(CO_3)_{2(s)} + 2CO_{2(g)} + 2H_2O \rightarrow Ca^{2+} + Mg^{2+} + 4\ HCO^{3-} \quad (3)$$

- dissoluzione ossidativa di solfuri (e.g. pirite) ad opera dello O_2 atmosferico, schematizzabile mediante la reazione seguente (e.g., Appelo e Postma, 1996):

$$FeS_{2(s)} + 15/4\ O_{2(g)} + 7/2\ H_2O \rightarrow Fe(OH)_{3(s)} + 2\ SO_4^{2-} + 4\ H^+, \quad (4)$$

seguita dalla neutralizzazione della soluzione acquosa acida così prodotta, per interazione con minerali carbonatici (es. calcite):

$$4\ CaCO_{3(s)} + 4\ H^{+} \rightarrow 4\ Ca^{2+} + 4\ HCO^{3-}. \quad (5)$$

Da notare che l'insieme delle reazioni (4) e (5) determina la presenza dello stesso numero di equivalenti di HCO^{3-} e SO_4^{2-} nella soluzione acquosa, ossia rapporto $HCO_3/(HCO_3 + SO_4^{2-}) = 0.5$, come indicato in Figura 5.4. Lo svolgimento di queste due reazioni potrebbe spiegare almeno in parte la composizione dei campioni S09s e S03s caratterizzati da una concentrazione relativamente elevata di SO_4. E' da notare che lo stesso effetto è spiegabile dalla neutralizzazione dello H_2SO_4 delle acque di pioggia.

In sintesi, questi processi naturali di interazione acqua-roccia spiegano le composizione HCO_3-Ca che caratterizza la maggior parte delle acque in esame ed in particolare quelle appartenenti al gruppo [B]. Fra i reagenti solidi implicati, calcite e dolomite sono presenti sia nel cemento carbonatico delle arenarie che nei suoli e nei depositi detritici ed alluvionali sovrastanti le arenarie stesse. In effetti la calcite è un minerale pressoché ubiquitario negli ambienti sedimentari; inoltre è caratterizzata da velocità di dissoluzione (in condizioni di lontananza dall'equilibrio) relativamente elevate, comunque superiori di vari ordini di grandezza rispetto a quelle di silicati ed allumino-silicati (e.g., Marini, 2006 e Brozzo, Marini 2012); ne consegue che nel sito di indagine la calcite ha un ruolo preponderante nei processi di interazione acqua-roccia.

Anche la pirite è un minerale molto diffuso, soprattutto in argilliti e scisti; nel sito di interesse, la presenza della pirite è localmente testimoniata dalle macchie bruno-arancione di ossi-idrossidi di ferro trivalente (che si formano attraverso la reazione 4) rilevate sulle carote di alcuni sondaggi (e.g. sondaggi S1 e S13) e dalla presenza di acque ricche in ferro (campione SgW).

Le variazioni di salinità riscontrabili all'interno del gruppo [B] indicano un maggiore avanzamento delle reazioni di dissoluzione di calcite (ed in subordine di dolomite) per alcuni campioni in ragione di:

- per le acque captate dai piezometri che drenano il solo substrato roccioso (campioni con pedice p): diversi tempi di permanenza nell'acquifero e diversi tempi di interazione acqua-roccia;
- per le acque captate dai piezometri che drenano i depositi di copertura (campioni con pedice s): granulometria dei depositi di copertura del substrato roccioso che offre una maggiore superficie di reazione o pressioni parziali di CO_2 relativamente elevate nei suoli/sedimenti.

Al fine di meglio indagare l'origine delle acque del gruppo [C] caratterizzate da una composizione relativamente più complessa rispetto alle acque degli altri gruppi, è stato elaborato un diagramma nel quale sono contrapposti i rapporti $HCO_3/(HCO_3+Cl)$ e $Ca/(Ca+Na)$ (fig. 5.5).

In questo diagramma sono prese in considerazione la reazione (2) già discussa sopra, la reazione di dissoluzione del salgemma (*halite*) e la reazione di dissoluzione incongruente dell'albite, minerale diffusamente presente nelle rocce arenacee del substrato roccioso locale (rif. Note illustrative CARG, foglio La Spezia):

$$2\ NaAlSi_3O_{8(s)} + 2\ CO_2 + 3\ H_2O = 2\ Na^{+} + 2\ HCO_3^{-} + Al_2Si_2O_5(OH)_{4(s)} \quad (6)$$

Nel grafico sono stati inseriti anche i percorsi di reazione di dissoluzione contemporanea di calcite ed albite in presenza di CO_2 nei due casi di sottosaturazione o soprassaturazione rispetto alla calcite (i percorsi di reazione sono stati elaborati mediante il sw di modellazione geochimica Phreeqc).

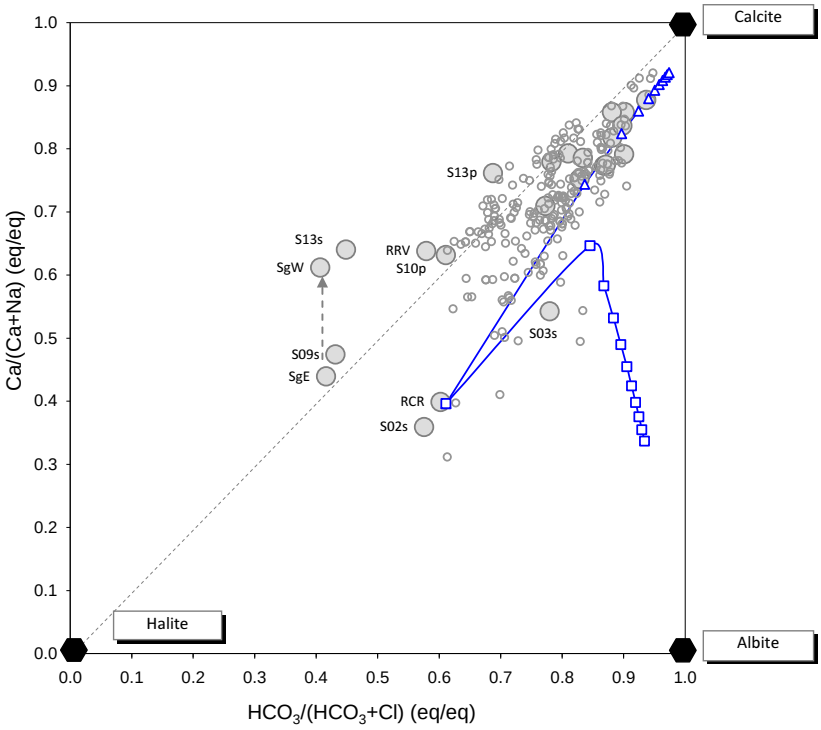


Fig. 5.5. Diagramma $HCO_3/(HCO_3+Cl)$ vs. $Ca/(Ca+Na)$.

Nel diagramma i campioni appartenenti al gruppo [A], che corrispondono alle acque superficiali o sub-superficiali di bassissima salinità, con composizione molto simile a quella delle acque di pioggia, sono stati considerati il termine di partenza dei due percorsi di reazione. Il percorso di reazione, in condizioni di sottosaturazione rispetto alla calcite, può spiegare la composizione di buona parte dei campioni del gruppo [B] che sarebbero pertanto il risultato della progressiva reazione della CO_2 con calcite ed albite. Peraltro il percorso in condizioni di sottosaturazione rispetto alla calcite è sicuramente il più plausibile constatando che i campioni più vicini al vertice della calcite sono quelli caratterizzati da contenuto ionico più elevato e considerando le cinetiche di dissoluzione molto differenti dei due minerali.

I campioni del gruppo [C] sono ben separati dagli altri gruppi e la loro composizione è spiegabile in parte dalla reazione di dissoluzione della calcite ma è anche caratterizzata da una componente Na-Cl anomala. La spiegazione di questa anomalia sarà approfondita nella trattazione seguente.

5.5 Diagrammi di correlazione binari

Prima di esaminare i diagrammi di correlazione è utile premettere alcuni presupposti di base utili per la loro interpretazione. I costituenti disciolti nelle acque naturali possono essere suddivisi in:

(1) costituenti mobili o conservativi; sono quelli la cui attività non è limitata dalla condizione di saturazione rispetto ad una fase solida o gassosa ne da altri effetti reattivi; in genere, hanno comportamento mobile Cl, Br, B e talora anche Li, Rb e Cs; questi costituenti sono ottimi traccianti dei fenomeni di miscelazione fra acque differenti;

(2) costituenti compatibili; sono quelli la cui attività è limitata dalla condizione di saturazione rispetto ad una fase solida o gassosa o da altre reazioni (es. adsorbimento su fasi solide); hanno comportamento compatibile molti costituenti disciolti, fra cui Ca, Mg, Na, K, HCO3, F, e SiO2.

In particolare, il cloruro ha comportamento mobile nella maggior parte delle acque naturali, ad eccezione delle salamoie sature rispetto alla halite (NaCl), condizione che determina il comportamento compatibile anche per il cloruro, ma che viene raggiunta solo in ambienti molto particolari, quali i bacini evaporitici. A parte questi casi molto particolari, il cloruro può essere utilizzato come costituente mobile di riferimento per investigare il comportamento degli altri costituenti disciolti, mediante semplici diagrammi di correlazione.

I diagrammi di correlazione con il cloruro come specie di riferimento sono inoltre informativi sia perché rappresenta il tracciante degli aerosol marini (componenti tipici delle piogge delle zone costiere) sia perché viene acquisito in maniera trascurabile dalle acque di origine meteorica nel corso delle prime fasi di interazione acqua-roccia (per una trattazione più approfondita dell'argomento si faccia riferimento a Marini, Ottonello, 1997 e Berner, Berner, 1996).

In alcuni diagrammi descritti nelle prossime sezioni i punti campionati nel corso di questa indagine sono stati confrontati con la composizione delle acque sotterranee circolanti in rocce arenacee fratturate della Provincia della Spezia (cerchi vuoti nei diagrammi) e con la composizione chimica delle acque di pioggia (croci rosse nei diagrammi). Sono stati presi in considerazioni i dati composizionali di piogge campionate in diverse località italiane (Morselli, 1991 ed altre fonti), un dato relativo ad un'acqua di pioggia campionata a La Spezia ed altri dati relativi a piogge di regioni costiere. E' indicata anche la retta di diluizione degli aerosol marini (linea rossa nei diagrammi).

Il diagramma Cl vs. SO_4 di figura 5.6 contrappone due anioni che, nel contesto in esame, possono essere considerati conservativi e quindi possono essere utili per evidenziare eventuali fenomeni di miscelazione tra acque a diversa composizione.

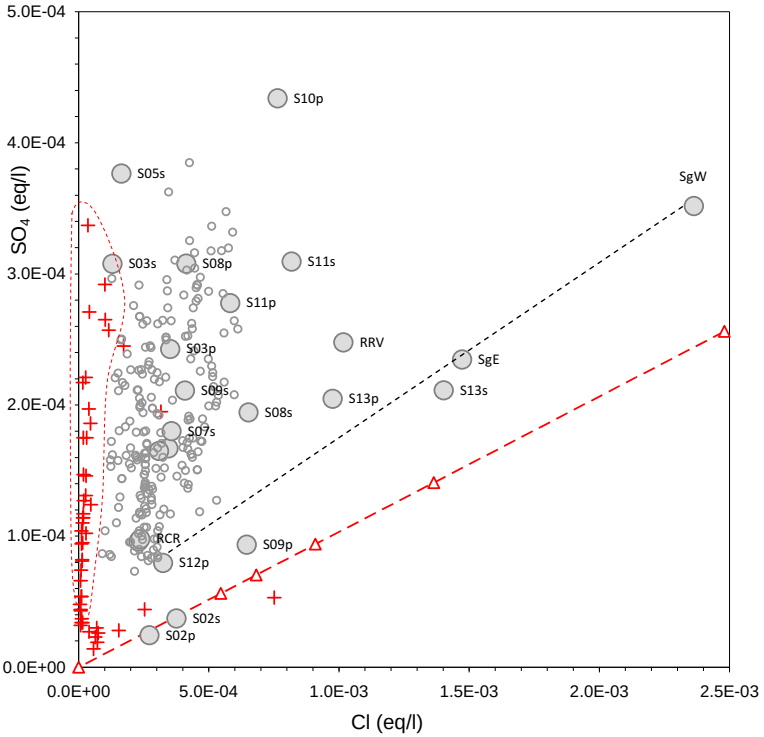


Fig. 5.6. Diagramma Cl vs. SO_4.

In questo diagramma tutti i punti sono caratterizzati da contenuti di solfato confrontabili con quelli delle piogge più ricche in SO_4 e una buona parte dei punti campionati rispecchia la composizione delle acque provenienti da rocce arenacee.

Il gruppo [C] è ben separato rispetto agli altri ed alcuni punti sembrano descrivere una linea di miscela tra il termine a bassa salinità delle acque del gruppo [A] ed il termine ad alta salinità rappresentato dalla sorgente ferruginosa SgW. Le composizioni intermedie sono indicate dai campioni S13s e SgE.

Questo allineamento non si riscontra nel diagramma Na-Cl (fig. 5.7) dove i campioni S13s e SgW presentano un evidente deficit di Na rispetto al tipico allineamento con rapporto Na/Cl prossimo a 1 della maggior parte dei punti e della linea di miscela individuata nel precedente diagramma. Tale comportamento potrebbe essere imputabile a processi di scambio ionico i quali implicano che acque a componente clorurato-sodica con iniziale rapporto Na/Cl prossimo a 1, interagendo con livelli argillosi, scambino Na con un catione quale il Ca.

In questo processo i sedimenti di natura argillosa sono assimilabili ad uno scambiatore cationico, i cui siti sono saturati in prevalenza da ioni Ca^{2+} e Mg^{2+}, derivanti dai fenomeni di interazione acqua-roccia. Nel momento in cui un'acqua clorurato-sodica interagisce con i sedimenti di copertura, possono avvenire le seguenti reazioni di scambio ionico:

$$Na^{+} + \tfrac{1}{2}\, Ca\text{-}X2 \rightarrow Na\text{-}X2 + \tfrac{1}{2}\, Ca^{2+} \qquad (7)$$

$$Na^{+} + \tfrac{1}{2}\, Mg\text{-}X2 \rightarrow Na\text{-}X2 + \tfrac{1}{2}\, Mg^{2+} \qquad (8)$$

dove X2 indica lo scambiatore cationico rappresentato i sedimenti di natura argillosa. A seguito di queste reazioni la fase acquosa si arricchisce in ioni Ca^{2+} e Mg^{2+} e si impoverisce in ione Na^{+} che va a saturare lo scambiatore cationico, ossia i sedimenti argillosi. In tal modo, la fase acquosa acquisisce una composizione Cl-Ca (o Cl-Mg), del tutto simile a quella osservata nel campione SgW e S13s (Appelo, Postma, 1999).

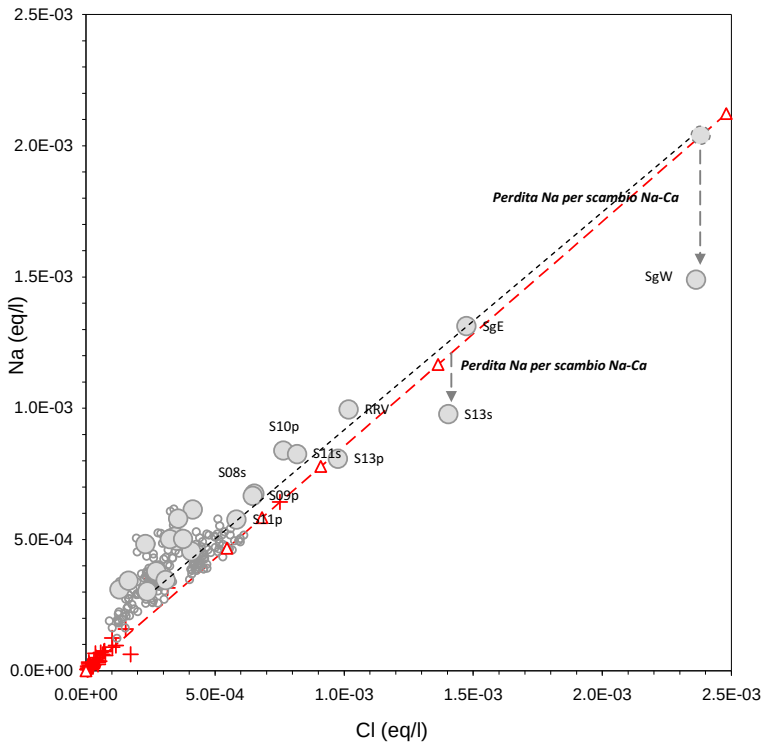


Fig. 5.7. Diagramma Cl vs. Na.

L'ipotesi che queste reazioni possano avvenire nell'acquifero è confermata dal diagramma Cl-Ca (fig. 5.8) nel quale, rispetto alla linea di miscela segnalata dai campioni del gruppo [A] e dal campione SgE, i campioni S13s e SgW presentano, in questo caso, un eccesso di calcio.

Nel diagramma Cl-Ca un gruppo di punti del gruppo [C], relativo ai piezometri della parte bassa ad W del sito, è caratterizzato da contenuti di Ca più alti rispetto alla composizione delle acque circolanti in arenaria della provincia della Spezia; questo differente comportamento potrebbe essere attribuibile, per i piezometri perforati in roccia, ad una circolazione più lunga e profonda di queste acque e, per i piezometri superficiali, a maggiori pressioni parziali di CO_2 nei sedimenti e nei suoli di questo settore del sito, con conseguente dissoluzione di $CaCO_3$.

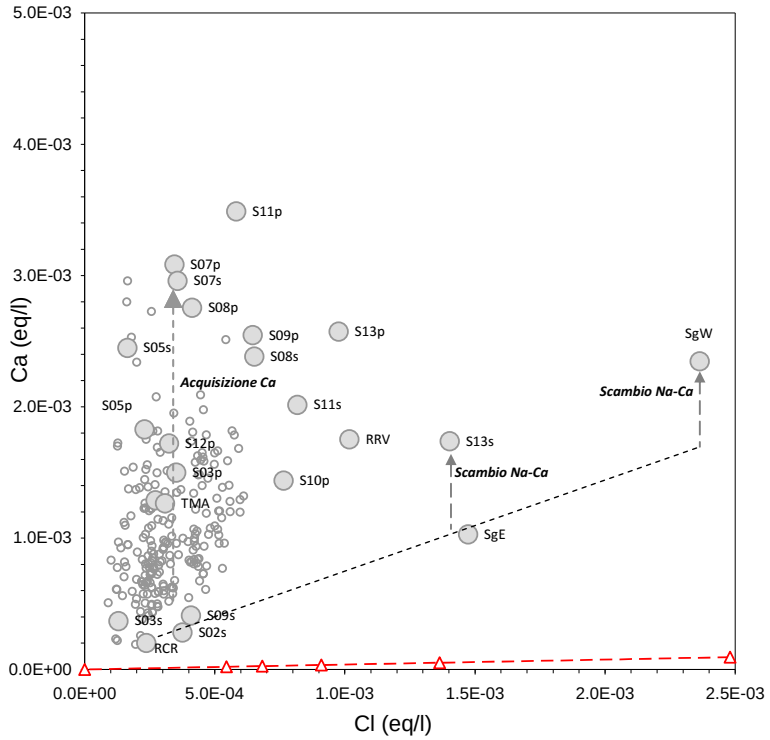


Fig. 5.8. Diagramma Cl vs. Ca.

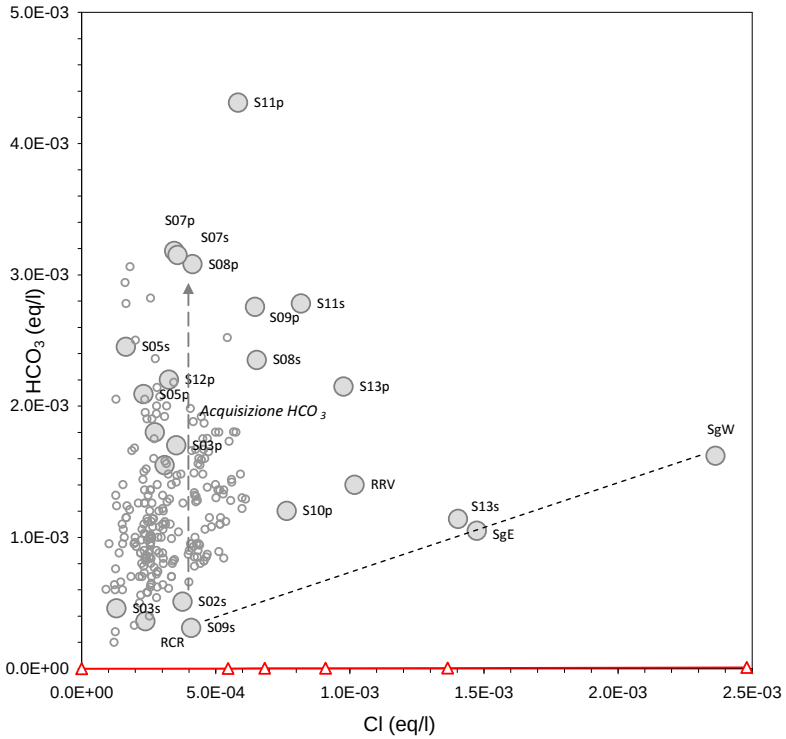


Fig. 5.9. Diagramma Cl vs. HCO3.

La stessa informazione è fornita dal diagramma HCO_3-Cl (fig. 5.9) dove, in effetti, gli stessi punti sono caratterizzati da concentrazioni più elevate di HCO_3 rispetto agli altri.

La linea di miscela segnalata nel grafico Cl-SO_4 (fig. 5.6), anche in questo diagramma è ben individuata, suggerendo che per il processo di miscela tra i campioni dei gruppi [A] e [C], l'anione HCO_3, in questo caso, può essere considerato conservativo.

Il diagramma Na-HCO_3 (fig. 5.10) è stato elaborato per evidenziare i possibili percorsi di reazione implicanti l'albite secondo la reazione (6). Come nel grafico di figura 5.5 sono stati riportati i percorsi di reazione del sistema albite, calcite e CO_2.

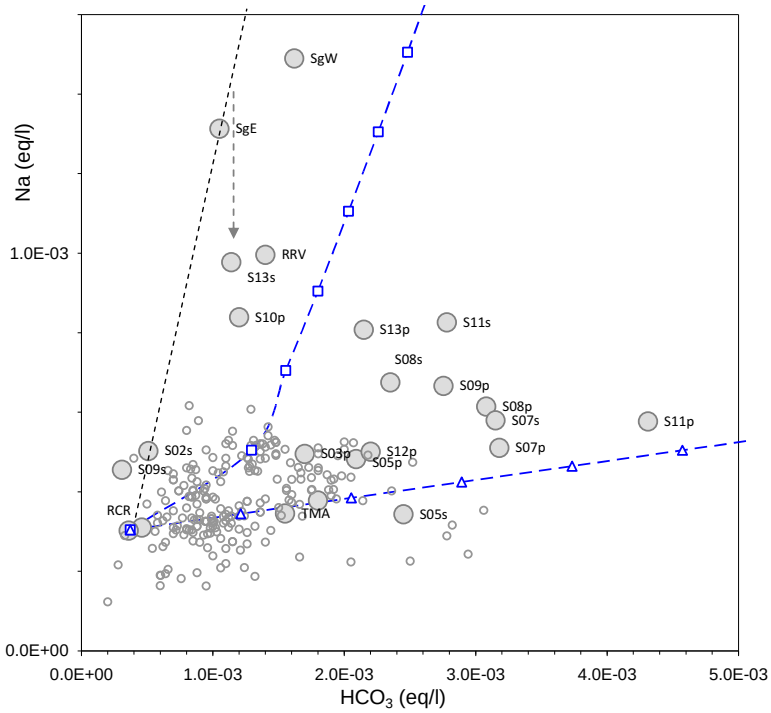


Fig. 5.10. Diagramma HCO_3 vs. Na.

La disposizione di un buon numero di punti in prossimità del percorso in sottosaturazione rispetto alla calcite conferma che, per una parte di campioni del gruppo [B], la dissoluzione contemporanea di calcite ed albite è un processo possibile. In particolare si tratta ancora di alcuni campioni dei piezometri della parte bassa del sito (e.g. S8).

Il deficit di calcio degli stessi campioni rispetto alla linea HCO_3:Ca=1 nel diagramma Ca vs. HCO_3 (fig. 5.11) conferma l'ipotesi di dissoluzione contemporanea di calcite ed albite. Questi campioni, quasi tutti rappresentati da piezometri profondi, potrebbero rappresentare i termini geochimicamente più evoluti rispetto alle composizioni medie attese per queste acque.

In questo grafico infine l'eccesso di Ca rispetto alla linea HCO_3:Ca=1 è un ulteriore conferma della possibile incidenza di reazioni di scambio ionico per i campioni SgW e S13s.

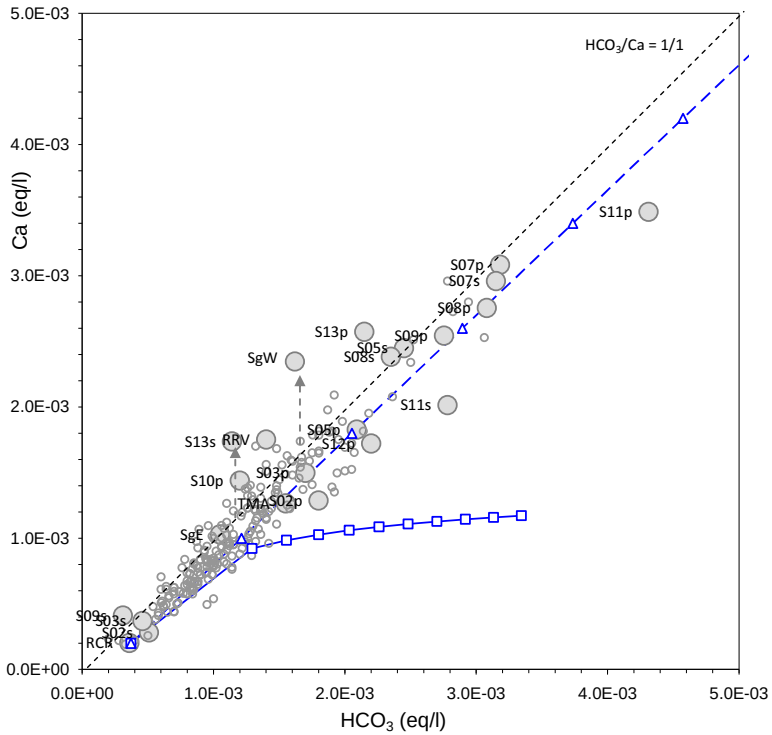


Fig. 5.11. Diagramma HCO_3 vs. Ca.

5.6 Implicazioni idrogeologiche dello studio geochimico

La caratterizzazione geochimica delle acque sotterranee e superficiali che insistono sul sito di intervento, ha permesso di riconoscere i principali processi che spiegano la loro composizione. Sono stati evidenziati fenomeni di differenziazione geochimica che possono aiutare a meglio comprendere i meccanismi di circolazione sotterranea all'interno dei depositi di copertura ed all'interno del substrato roccioso.

L'interpretazione di questi risultati è ancora in corso con l'elaborazione di mappe ad isovalori e attraverso l'utilizzo di software di modellazione geochimica.

Mappe particolarmente informative e di sintesi sono quelle che rappresentano la distribuzione dei valori di affinità termodinamica con la calcite per i piezometri superficiali e profondi (allegati 5.1a e 5.1b). Confrontando le due distribuzioni è evidente che le acque circolanti in roccia sono caratterizzate da valori più elevati di affinità termodinamica con la calcite, che raggiungono i livelli massimi e prossimi alla saturazione in prossimità del lato Ovest del sito, in corrispondenza del piezometro S7p.

Le acque circolanti nei depositi di copertura sono invece caratterizzate da una maggiore variabilità della distribuzione con valori tipici di acque fortemente sottosature nel settore Est e valori più alti ad Ovest.

In conclusione si possono distinguere tre settori all'interno del sito di indagine.

Settore Ovest

In questo settore le acque dei piezometri profondi e di quelli superficiali hanno una composizione simile. Si può ipotizzare che le acque salienti dal substrato roccioso (e.g. piezometro S7p) arrivino a permeare anche i sedimenti di ambiente paludoso con ulteriore aggiunta di CO_2 ed ulteriore reattività delle acque.

La composizione di queste acque è più evoluta, come confermato anche da concentrazioni di litio e stronzio rilevabili, da contenuti più elevati di Ca e Na e dal loro approssimarsi alla saturazione rispetto alla calcite.

In base a queste considerazioni si può affermare che in questo settore sembra esistere un solo acquifero indifferenziato, alimentato dalle acque in pressione, provenienti dalla roccia fratturata.

Settore Est

In questa parte del sito si riscontra una diversa composizione delle acque captate dai piezometri profondi rispetto a quelle provenienti dai piezometri superficiali. Vi sono chiare evidenze di un'alimentazione dei depositi di copertura da parte di acque a bassa salinità, simili all'acqua di pioggia, provenienti dal Rio Cerreta (e.g. piezometro S3s). Tale dato è confermato anche dalle maggiori escursioni del livello riscontrato nei piezometri di questo settore.

In quest'area si possono quindi distinguere due tipi di circolazione: una più profonda in roccia con regime più modulato, una superficiale alimentata dal corso d'acqua con regime variabile, fortemente influenzato dagli impulsi pluviometrici.

Settore Nord (base del rilevato)

E' stata riscontrata in questo settore la presenza di acque ricche in Cl (in particolare S13s e SgW) e localmente in Fe e Mn (SgW), correlate a condizioni riducenti.

Tali condizioni possono essere attribuite ad uno scarso rifornimento di ossigeno al di sotto del rilevato e/o alla presenza di materia organica che controlla le reazioni di mobilizzazione di Fe e Mn presenti naturalmente nelle rocce (e.g. livelli ferrettizzati nelle carote del sondaggio S13). Tali caratteri, assieme alla scarsa evoluzione geochimica ed alla relativamente elevata concentrazione di nitrati di queste acque, potrebbe far propendere per un'origine della componente clorurata legata a contaminazione antropica.

Queste acque hanno perso il sodio dell'originale componente clorurato-sodica per fenomeni di scambio ionico che avvengono nei livelli argillosi dei depositi di copertura.

6. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI

6.1 Caratterizzazione geotecnica dei depositi di copertura

Nella tabella di allegato 6.1 sono riportati i dati geotecnici di laboratorio completi assieme ai dati delle prove in foro (Nspt, prove di permeabilità), mentre le relative certificazioni sono contenute nella documentazione di progetto (rif. 08562-006R03E01).

Per i terreni di copertura sono riportate le granulometrie espresse in percentuale assieme agli altri parametri geotecnici determinati sui campioni prelevati nei 13 sondaggi eseguiti.

Si ricorda che la granulometria dei terreni in laboratorio viene determinata tramite l'utilizzo di setacci in grado di separare le varie classi. Si definisce quindi:

- Ghiaia, materiale passante al setaccio da 76,2 mm e trattenuto dal setaccio da 4,75 mm
- Sabbia, materiale passante al setaccio da 4,75 mm e trattenuto dal setaccio da 0,075 mm (#200)
- Limo e Argilla, materiale passante al setaccio da 0,075 mm

In base alle caratteristiche granulometriche dei depositi sono state raggruppate tre classi di materiali.

La classe più rappresentata e piuttosto omogenea è quella della sabbia con limo con percentuali subordinate e variabili di ghiaia e argilla, denominata [SL]. Le caratteristiche geotecniche di questi sedimenti sono riassunte nella tabella seguente assieme ai loro valori medi ed alla deviazione standard.

Sond.	#	Profondità	Granulometria	CL	G (%)	S (%)	L (%)	A (%)	γ (kN/m³)	γ_d (kN/m³)	W (%)	Øp (°)	Ør (°)	Cp (kPa)	Cr (kPa)
S1	C1	4.6 ÷ 5.0	Sabbia con limo	SL	4.2	63.0	28.3	4.5	18.0	14.6	23.52	35.6	33.4	5.3	0.3
S2	C1	4.3 ÷ 4.7	Sabbia con limo	SL	2.2	66.9	27.3	3.6	18.6	15.7	18.75	35.1		6.0	
S2	C2	8.5 ÷ 8.9	Sabbia con limo	SL	5.0	49.8	37.5	7.7	19.2	16.3	17.30				
S4	C1	13.0 ÷ 13.3	Sabbia con limo e ghiaia	SL	8.1	56.4	28.3	7.2	19.4	15.1	15.14	31.1	28.7	[16.2]	2.0
S6	C1	4.5 ÷ 5.0	Sabbia con limo argillosa	SL	5.3	49.0	35.5	10.2	18.7	15.4	21.59	33.6		8.7	
S7	C1	3.1 ÷ 3.5	Sabbia limosa	SL	1.8	72.4	20.9	4.9	19.6	16.8	16.48				
S8	C1	3.2 ÷ 3.5	Sabbia con limo ghiaiosa	SL	10.4	54.8	31.4	3.3	16.1	11.3	41.62	38.9		6.7	
S8	C2	6.3 ÷ 6.7	Sabbia limosa deb. argill.	SL	2.6	66.8	23.6	7.0	19.6	16.1	21.48	39.6		7.5	
S9	C1	6.2 ÷ 6.5	Sabbia con limo argillosa	SL	4.9	55.3	29.8	10.1	19.6	17.2	14.49	36.3		3.8	
S9	C2	9.7 ÷ 10.0	Sabbia limoso ghiaiosa	SL	13.4	64.4	16.5	5.6	18.7	17.1	9.17				
S10	C1	9.6 ÷ 10.0	Sabbia limosa	SL	2.5	74.5	19.3	3.7	20.0	16.7	19.70	36.4	15.4	[34.5]	0.2
S12	C1	4.5 ÷ 5.0	Sabbia con limo argillosa	SL	0.3	55.3	32.1	12.3	19.8	16.9	17.52	33.1	14.7	[31.4]	3.4
S12	C2	5.7 ÷ 6.0	Sabbia con limo argillosa	SL	3.0	54.7	31.1	11.2	19.7	16.6	18.61	35.4		4.7	
S13	C1	9.7 ÷ 10.0	Sabbia limoso ghiaiosa	SL	18.4	49.3	21.8	10.5	18.0	16.2	10.56				
S13	C3	14.0 ÷ 14.5	Sabbia con limo	SL	6.4	52.3	31.9	9.4	19.7	17.1	14.80				
			MEDIA		**5.9**	**59.0**	**27.7**	**7.4**	**19.0**	**15.9**	**18.7**	**35.5**	**23.1**	**6.1**	**1.5**
			STD		*4.9*	*8.4*	*6.1*	*3.1*	*1.0*	*1.5*	*7.4*	*2.6*	*9.4*	*1.7*	*1.5*

La seconda classe, meno numerosa della precedente, comprende la sabbia con limo e ghiaia con percentuali subordinate di argilla, denominata [SGL]. La sabbia prevale su limo e ghiaia caratterizzati da percentuali simili. Le caratteristiche geotecniche di questi sedimenti sono riassunte nella tabella seguente assieme ai loro valori medi ed alla deviazione standard.

Sond.	#	Profondità	Granulometria	CL	G (%)	S (%)	L (%)	A (%)	γ (kN/m³)	γ_d (kN/m³)	W (%)	Øp (°)	Ør (°)	Cp (kPa)	Cr (kPa)
S1	C2	6.5 ÷ 7.0	Sabbia con limo e ghiaia	SGL	21.8	35.1	34.7	8.5	19.0	15.8	20.05				
S3	C2	7.1 ÷ 7.5	Sabbia con ghiaia e limo	SGL	28.9	40.9	23.6	6.6	19.1	16.4	16.53				
S4	C2	19.5 ÷ 20.0	Sabbia con ghiaia limosa	SGL	34.6	36.7	20.1	8.6	19.9	17.1	15.85	36.0		[12.6]	
S13	C2	11.0 ÷ 11.5	Sabbia con ghiaia limosa	SGL	25.1	53.6	14.7	6.6	18.8	15.3	23.18	35.7		6.4	
			MEDIA		**27.6**	**41.6**	**23.3**	**7.6**	**19.2**	**16.2**	**18.9**	**35.9**		**6.4**	
			STD		*5.5*	*8.4*	*8.5*	*1.1*	*0.5*	*0.8*	*3.4*	*0.2*			

L'ultima classe conta solo sue campioni dove prevale la frazione limosa su quella sabbiosa assieme a percentuali variabili di argilla [LSA]. La ghiaia in questi campioni è nettamente subordinata se non assente. Le caratteristiche geotecniche di questi sedimenti sono riassunte nella tabella seguente assieme ai loro valori medi ed alla deviazione standard.

Sond.	#	Profondità	Granulometria	CL	G (%)	S (%)	L (%)	A (%)	γ (kN/m^3)	γ_d (kN/m^3)	W (%)	Øp (°)	Ør (°)	Cp (kPa)	Cr (kPa)
S1	C3	8.5 ÷ 8.8	Limo con sabbia	LSA	3.3	29.2	59.8	7.7	19.2	16.2	18.77	24.4	20.2	9.8	2.0
S3	C1	3.6 ÷ 4.0	Limo con sabbia argilloso	LSA	0.1	33.3	41.5	25.0	18.0	13.5	34.07	27.8		10.5	
			MEDIA		**1.7**	**31.3**	**50.7**	**16.4**	**18.6**	**14.9**	**26.4**	**26.1**	**20.2**	**10.2**	**2.0**
			STD		*2.3*	*2.9*	*12.9*	*12.2*	*0.8*	*1.9*	*10.8*	*2.4*		*0.5*	

Al fine di classificare la sola "*matrice*", escludendo cioè la frazione ghiaiosa, sono state ricalcolate le frazioni percentuali di sabbia, limo e argilla dei diversi campioni.

Per la classificazione è stata utilizzato il diagramma triangolare per la determinazione della classe tessiturale secondo la metodica USDA (*United States Department of Agriculture*). Tale metodica anche se più utilizzata in campo agronomico che geotecnico, offre tuttavia una chiave di classificazione univoca e molto precisa dei terreni ed è quindi stata giudicata utile per classificare la matrice dei depositi analizzati.

La proporzione relativa delle singole frazioni dimensionali determina la classe granulometrica del terreno secondo le 12 classi sotto elencate dalla più grossolana alla più fine.

[S]	Sabbiosa
[SF]	Sabbioso franca
[L]	Limosa
[FS]	Franco sabbiosa
[F]	Franca
[FL]	Franco limosa
[FSA]	Franco sabbiosa argillosa
[FA]	Franco argillosa
[FLA]	Franco limosa argillosa
[AS]	Argilloso sabbiosa
[AL]	Argilloso limosa
[A]	Argillosa

Il diagramma triangolare di figura 6.1 che mostra la distribuzione dei campioni raccolti, evidenzia che, se si eccettuano quattro campioni, tutti i restanti ricadono nel campo "*franco sabbioso*" [FS]. Solo una campione prelevato nel sondaggio S1 ed uno relativo al sondaggio S3 sono attribuibili alla classe "*franco*" [F], un campione prelevato nel sondaggio S1 alla classe "*franco limoso*" [FL] ed un ultimo campione relativo al sondaggio S10 appartenente alla classe "*sabbioso franco*" [SF].

Si tratta in conclusione di depositi in cui la componente sabbiosa è preponderante coerentemente con le caratteristiche litologiche della "*roccia madre*" (flysch arenaceo) che li ha generati. Anche i parametri di resistenza al taglio, caratterizzati da valori di coesione molto bassi, sono tipici di depositi sostanzialmente incoerenti di natura prevalente sabbiosa o sabbioso-limosa.

In allegato 6.2 è riportata la mappa delle isopache dei terreni di copertura del substrato roccioso nella quale si osserva che lo spessore maggiore di questi depositi si registra nel settore SE alla sommità del rilevato (spessore massimo attorno a 28 m); la potenza dei terreni di copertura diminuisce progressivamente procedendo verso valle in direzione NW, sino ad assumere uno spessore di circa 6 m sul fondovalle.

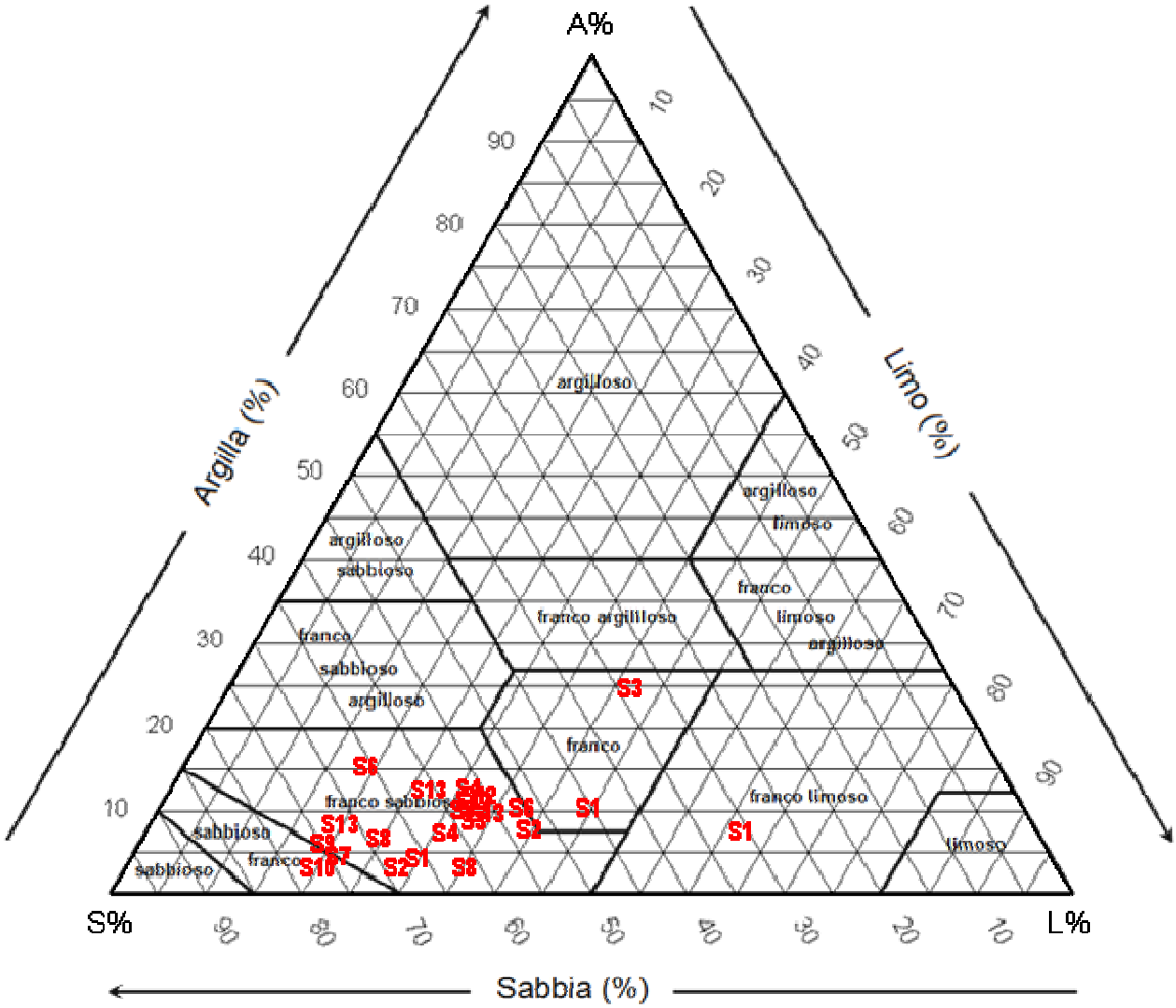


Fig. 6.1. Diagramma triangolare di classificazione tessiturale USDA con i punti rappresentanti la matrice.

6.2 Caratterizzazione geotecnica degli ammassi rocciosi

Per l'attribuzione al substrato roccioso dei parametri fisico-meccanici sono stati utilizzati i dati ricavati dalle analisi geotecniche eseguite su 16 campioni di roccia raccolti nei diversi sondaggi e dai dati di RQD (Rock Quality Designation) valutati sulle carote estratte.

Mediante questi parametri e attraverso correlazioni sono stati ottenuti gli indici per la classificazione degli ammassi rocciosi secondo il metodo di Bieniawski che si basa sulla determinazione dell'indice RMR dato dalla sommatoria di indici parziali relativi a:

- ✓ resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta;
- ✓ indice RQD (Rock Quality Designation);
- ✓ spaziatura dei giunti di discontinuità;
- ✓ condizione dei giunti di discontinuità (scabrezza, alterazione delle pareti, apertura, presenza di materiale di riempimento);
- ✓ condizioni idrauliche.

I valori degli indici parziali sono stati determinati sulla base della seguente tabella e di formule di correlazione che li legano a RQD e resistenza alla compressione uniassiale.

A - Classification parameters and their ratings

PARAMETER			RANGES OF VALUES						
1	Streing of intact rock material	Point-load strengt index	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range uniaxial compressive test is preferred		
		Uniassial compressive strengt	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
	Rating		15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core quality RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces OR Gouge < 5 mm thinck OR Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge > 5 mm thinck OR Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel lenght	None	< 10 litres/min	10 - 25 litres/min	25 - 125 litres/min	>125 litres/min		
		Ratio joint water pressure / maior principal stress	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		General condition	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating		15	10	7	4	0		

Total Rating	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Classe	I	II	III	IV	V
Descrizione	Ottimo	Buono	Discreto	Scadente	Pessimo

I dati bibliografici attestano che i litotipi arenacei, costituenti il substrato roccioso locale, sono classificati come rocce dalle discrete caratteristiche geomeccaniche che possono tuttavia subire un sensibile peggioramento laddove risultino particolarmente alterate e fratturate o sia presente un'importante circolazione d'acqua all'interno dei giunti di discontinuità.

I dati dell'indice RMR ottenuti sui campioni analizzati sono riassunti nella tabella seguente dove sono stati calcolati, attraverso formule di correlazione, anche i parametri geotecnici di resistenza al taglio dell'ammasso roccioso.

PARAMETRI GEOTECNICI DELL'AMMASSO ROCCIOSO SECONDO BIENIAWSKI (1989)

			RMR 1 σ (MPa)	RMR 2 RQD (%)	RMR 3 Spacing (mm)	RMR 4 Discont.	RMR 5 Groundwater		c (kPa)	∅ (°)	Em (GPa)
S1	12.0 ÷ 22.0 m	(*) rif. S3-C3	113.4 (*)	21	65			RMR			
		RMR Rating	10.0	5.1	5.8	14	4	38.9	194	24.4	5.3
S2	11.4 ÷ 17.7 m	(*) rif. S3-C3	113.4 (*)	14	57			RMR			
		RMR Rating	10.0	4.5	5.1	14	4	37.6	188	23.8	4.9
S2	17.7 ÷ 25.0 m	(*) rif. S3-C3	113.4 (*)	24	68			RMR			
		RMR Rating	10.0	6.0	6.0	14	4	40.0	200	25.0	5.6
S3	17.7 ÷ 30.0 m	S3-C3	113.4	40	90			RMR			
		RMR Rating	10.0	8.0	6.8	16	4	44.8	224	27.4	7.4
S5	6.3 ÷ 21.0 m	(*) rif. S7-C2	120.6 (*)	37	85			RMR			
		RMR Rating	11.0	8.0	6.7	16	4	45.7	228	27.8	7.8
S5	21.0 ÷ 25.0 m	rif. S6-C3	162.1 (*)	57	121			RMR			
		RMR Rating	13.0	12.0	7.4	19	4	55.4	277	32.7	10.7
S6	7.8 ÷ 19.0 m	(*) rif. S7-C2	120.6 (*)	29	74			RMR			
		RMR Rating	11	6.5	6.3	14	4	41.8	209	25.9	6.2
S6	19.0 ÷ 30.0 m	S6-C3	162.1	77	172			RMR			
		RMR Rating	13	15	7.8	19	4	58.8	294	34.4	17.7
S7	7.3 ÷ 21.0 m	S7-C2	120.6	35	82			RMR			
		RMR Rating	10.7	7.5	6.6	16	4	44.8	224	27.4	7.4
S8	10.0 ÷ 15.0 m	(*) rif. S7-C2	120.6 (*)	24	68			RMR			
		RMR Rating	11.0	6.0	6.0	14	4	41.0	205	25.5	6.0
S9	13.0 ÷ 18.0 m	S9-C3	133.0	26	70			RMR			
		RMR Rating	11.5	6.2	6.1	14	4	41.8	209	25.9	6.2
S10	12.6 ÷ 18.0 m	S10-C2	31.7	20	63			RMR			
		RMR Rating	7	5.0	5.7	14	4	35.7	178	22.8	4.4
S11	7.2 ÷ 9.6 m	(*) rif. S10-C2	31.7 (*)	20	63			RMR			
		RMR Rating	7	5.0	5.7	14	4	35.7	178	22.8	4.4
S11	9.6 ÷ 30.0 m	S11-C1	79.2	65	139			RMR			
		RMR Rating	8	13.0	7.6	19	4	51.6	258	30.8	3.1
S12	7.6 ÷ 15.0 m	(*) rif. S10-C2	31.7 (*)	16	59			RMR			
		RMR Rating	7	4.5	5.3	14	4	34.8	174	22.4	4.2
S13	29.7 ÷ 60.0 m	(*) rif. S6-C3	162.1 (*)	72	156			RMR			
		RMR Rating	13	14.0	7.7	19	4	57.7	289	33.9	15.4
								MEDIE	**44.1**	**221**	**27.1**	**7.3**
								STD	*7.8*	*39*	*3.9*	*4.1*

c - *Coesione*
Em - *Modulo di deformazione in sito*
∅ - *Angolo di attrito*

I valori massimo, minimo e medio dell'indice RMR sono riportati nella tabella seguente:

	RMR	Classe	Descrizione ammasso
RMR massimo	58.8	**III**	Discreto
RMR minimo	34.8	**IV**	Scadente
RMR medio	44.1	**III**	Discreto

La classe prevalente è la III che attesta condizioni discrete degli ammassi rocciosi analizzati.

E' da notare tuttavia che, elaborando i dati ricavati su affioramenti osservati nelle aree circostanti il sito di Mangina (località costa di Roverano), relativi ad ammassi particolarmente alterati e fratturati, si ottengono valori di RMR corrispondenti mediamente a rocce dalle caratteristiche geomeccaniche scadenti (classe IV) o talora pessime (classe V), dove prevalgono interstrati pelitici e argillitici.

6.3 Sezioni geologiche

Correlando i dati stratigrafici ottenuti con i sondaggi, i dati geotecnici, le osservazioni di terreno è stata elaborata la sezione geologica interpretativa di dettaglio denominata A riportata in allegato 6.3. Questo profilo collega i sondaggi S5, S7 e S11.

I parametri geotecnici attribuiti ai livelli dei depositi di copertura distinti in questa sezione sono riportati nella seguente tabella (valori in grassetto).

LIVELLI SEZIONE A	γ (kN/m^3)	γ_d (kN/m^3)	W (%)	Øp (°)	Ør (°)	Cp (kPa)	Cr (kPa)
Livello [D] (rif. S6-C1)	**18.7**	**15.4**	**21.59**	**33.6**		**8.7**	
Livello [D] (media livelli omogenei)	19.0	15.9	18.72	35.5	**23.05**	6.1	**1.5**
Livello [E] (rif. S7-C1)	**19.6**	**16.8**	**16.48**				
Livello [E] (media livelli omogenei)	19.0	15.9	18.72	**35.5**	**23.05**	**6.1**	**1.5**
Livello [C] (dati bibliografici)	**18.5**			**35.0**		**0.0**	
Livello [F] (dati bibliografici)	**18.5**			**30.0**		**0.0**	

Al substrato roccioso sono stati assegnati i seguenti parametri geomeccanici.

PARAMETRI GEOTECNICI DELL'AMMASSO ROCCIOSO SECONDO BIENIAWSKI (1989)

	RMR 1 σ (Mpa)	RMR 2 RQD (%)	RMR 3 Spacing (mm)	RMR 4 Discont.	RMR5 Groundwater		c (kPa)	∅ (°)	Em (GPa)
[LIV. **A**] S7 C2 (-13.0 / -13.3 m)	120.6	35	80			TOT.			
RMR Rating	10.7	7.5	6.5	16	4	44.7	224	27.4	7.4
[LIV. **B**] S6 C3 (-20.6 / -21.0 m)	162.1	60	120						
RMR Rating	13	12	7	19	4	55.0	275	32.5	10.0

c - *Coesione*
Em - *Modulo di deformazione in sito*
∅ - *Angolo di attrito*

Altre sezioni sono in fase di elaborazione.

La prospezione simica a rifrazione, calibrata con le stratigrafie dei diversi sondaggi, ha consentito di ricostruire nel dettaglio il modello stratigrafico del sottosuolo del sito e di elaborare sezioni sismo-stratigrafiche interpretative, consultabili nella documentazione progettuale (rif. 08562-006R03E01).

Per la trattazione approfondita degli esiti della prospezione e la consultazione delle sezioni si rimanda alla documentazione allegata al progetto (rif. 08562-006R03E01).

6.4 Caratterizzazione sismica terreni

6.4.1 Inquadramento sismico dell'area

L'area oggetto del presente studio si trova nel Comune di Borghetto Vara che, in base a quanto previsto dal D.G.R. n. 1308 del 24/10/2008, viene classificato sismico di zona 3A con ag max = 0.15g (vedi cartografia di figura 6.2).

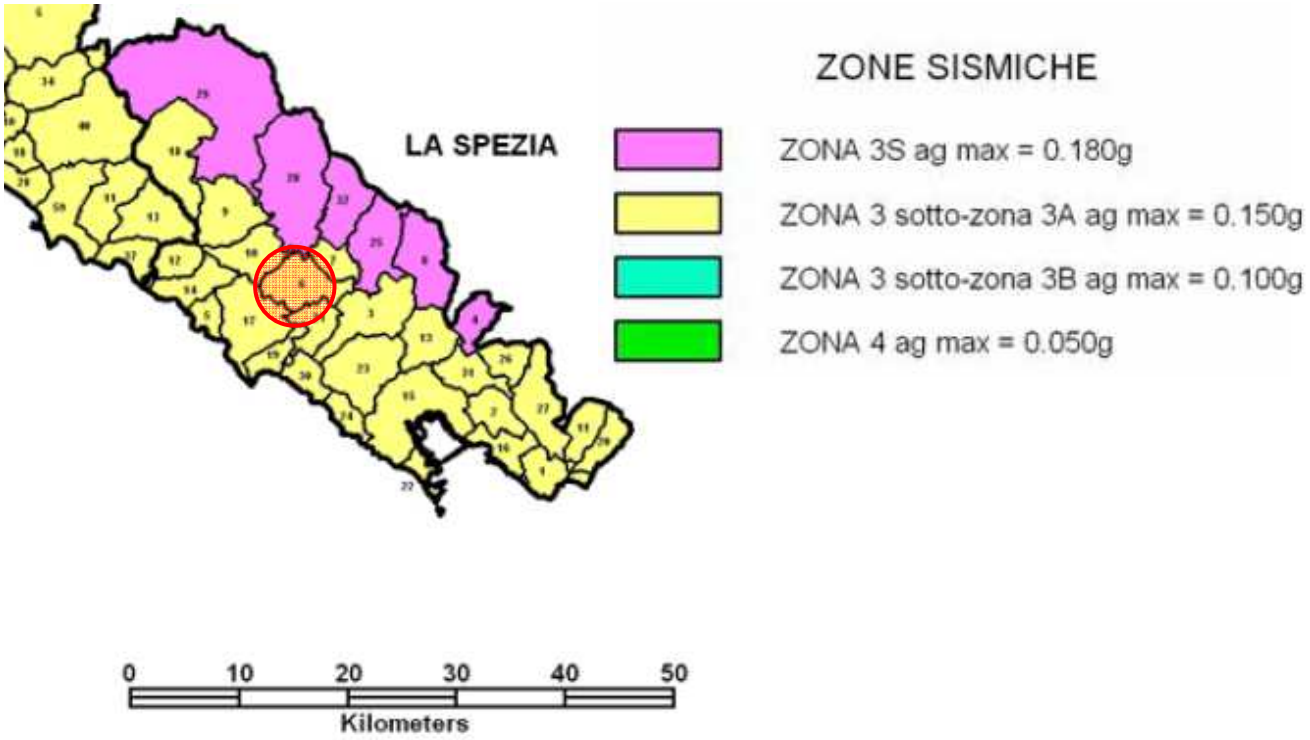


Fig. 6.2. Zonazione sismica regione Liguria (evidenziato il Comune di Borghetto Vara)

Considerazioni a vasta scala, collocano l'area della valle del Vara tra una fascia ad alta sismicità che va dalla Garfagnana alla Lunigiana ed all'alta Val di Taro ed una zona a macrosismicità praticamente assente che comprende tutto il margine tirrenico dell'Appennino ligure tra Lerici e Portofino. L'area risulta interessata dagli effetti dei terremoti della Lunigiana e della Garfagnana.

La stima della pericolosità legata ai terremoti ed alla fagliazione superficiale è un tema interessante ed attuale, specialmente in aree densamente popolate ed industrializzate come il territorio italiano. Di conseguenza la conoscenza approfondita e la corretta collocazione delle *faglie capaci*, ossia le faglie potenzialmente sismo-genetiche, assume un ruolo chiave per la mitigazione del rischio.

A questo scopo, il Servizio Geologico d'Italia - ISPRA ha sviluppato il progetto ITHACA (ITaly HAzard from CApable faults) che raccoglie i dati sulle faglie capaci del territorio italiano. Si riporta di seguito una breve descrizione del progetto.

L'Italia è una delle zone più attive del Mediterraneo, in termini di tettonica attiva e sismicità. Molti terremoti storici hanno avuto effetti catastrofici (e.g., i terremoti del 1693 in Sicilia orientale, 1783 in Calabria, 1805 a Bojano, 1908 a Messina e 1915 nel Fucino) raggiungendo intensità MCS di XI grado (Magnitudo circa o leggermente superiore a 7). Studi paleosismologici hanno consentito di caratterizzare le faglie responsabili di molti di questi terremoti, dimostrando che le dislocazioni tardo pleistoceniche-oloceniche hanno interessato molte strutture prima considerate silenti.

ITHACA è un database creato per la raccolta e la facile consultazione di tutte le informazioni disponibili riguardo le strutture tettoniche attive in Italia, con particolare attenzione ai processi tettonici che potrebbero generare rischi naturali. Il progetto si occupa in modo particolare delle faglie capaci, definite come faglie che potenzialmente possono creare deformazione in superficie.

Il database delle faglie capaci è uno strumento fondamentale per: a) analisi di pericolosità ambientale e sismica, b) comprensione dell'evoluzione recente del paesaggio, c) pianificazione territoriale e d) gestione delle emergenze di Protezione Civile. Può essere inoltre di supporto alla ricerca scientifica nell'ambito dell'analisi dei processi geodinamici.

La prima versione del database ITHACA è stata presentata durante il 31° International Geological Congress di Rio de Janeiro nel 2000. Da allora è stato condotto un costante lavoro di implementazione del database del quale però ancora oggi non esiste una versione esauriente. Sono stati comunque cambiati ed aggiunti molti dati sia per l'Italia settentrionale che per quella meridionale. Molte faglie sono state analizzate nuovamente e, rispetto alla versione precedente del database, alcune strutture sono state eliminate ed altre aggiunte.

Questa nuova analisi ha riguardato l'Italia settentrionale ed in modo specifico le Alpi meridionali occidentali dove, anche se la sismicità storica è meno rilevante rispetto a quella di altre aree italiane, i risultati di nuovi studi suggeriscono che il rischio sismico non è trascurabile, particolarmente per l'alta vulnerabilità dell'area in termini di elevata densità di popolazione e di infrastrutture.

Un miglioramento significativo al database si ha anche per le regioni Calabria e Sicilia, per le quali sono state aggiunte alcune strutture a mare (Mar Ionio e Canale di Sicilia) che, nonostante le modeste conoscenze, sono certamente attive e capaci di produrre significativi effetti sulle aree costiere circostanti, compresi gli tsunami.
Il lavoro di revisione è tuttora in atto per le restanti parti d'Italia.

Nella mappa di figura 6.3 sono riportate le faglie capaci del catalogo ITHACA più prossime al sito di Mangina.

Si tratta di strutture con direzione appenninica; la più prossima all'area d'intervento di queste linee tettoniche collega l'abitato di Borghetto Vara con la frazione di Cornice (Comune di Sesta Godano) e dista circa 1 km dal sito di Mangina.

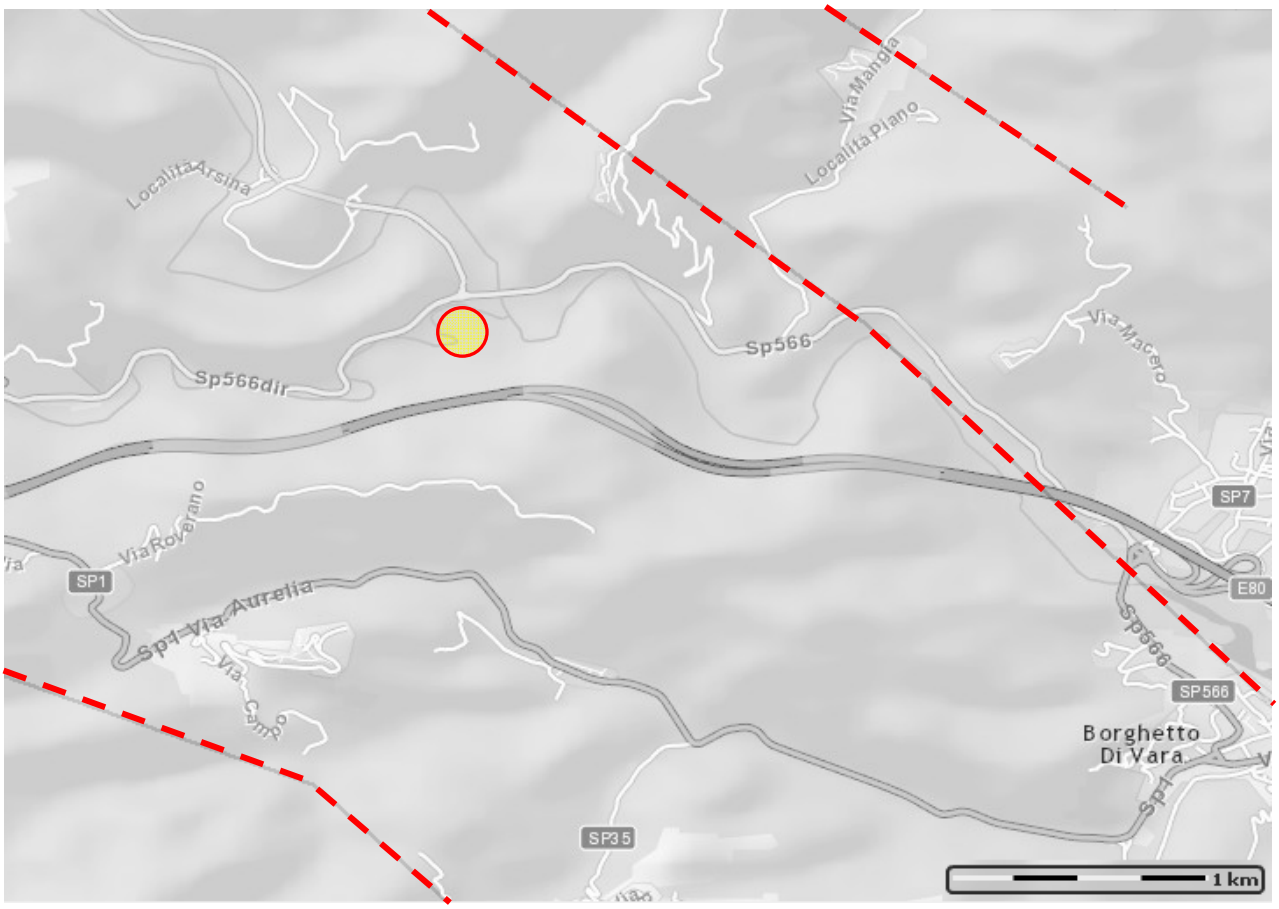


Fig. 6.3. Faglie capaci prossime all'area di intervento (cerchio giallo) da progetto ITHACA.

6.4.2 Liquefazione

Relativamente alla liquefazione dei terreni conseguente a scuotimenti sismici è noto che affinché possa aver origine tale fenomeno, caratterizzato da una brusca riduzione della resistenza al taglio causata dalle sovrapressioni interstiziali indotte dalla sollecitazione sismica, i terreni devono presentare particolari caratteristiche granulometriche ed idrogeologiche; è noto, infatti, che soggetti a liquefazione sono in particolare i depositi monogranulari fini, saturi, a bassa densità relativa.

Sulla base di dati sperimentali è stato definito un fuso granulometrico all'interno del quale i terreni sono potenzialmente soggetti a liquefazione e ulteriori studi hanno individuato nelle sabbie fini monogranulari la composizione dei terreni suscettibili a tale fenomeno.

Le NTC08 (punto 7 "*progettazione per azioni sismiche"*) stabiliscono che "*il sito presso il quale è ubicato il manufatto in progetto deve essere stabile nei confronti della liquefazione, intendendo con tale termine quei fenomeni associati alla perdita di resistenza al taglio o ad accumulo di deformazioni plastiche in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, sollecitati da azioni cicliche e dinamiche che agiscono in condizioni non drenate.*

Se il terreno risulta suscettibile di liquefazione e gli effetti conseguenti appaiono tali da influire sulle condizioni di stabilità di pendii o manufatti, occorre procedere ad interventi di consolidamento del terreno e/o trasferire il carico a strati di terreno non suscettibili di liquefazione.

In assenza di interventi di miglioramento del terreno, l'impiego di fondazioni profonde richiede comunque la valutazione della riduzione della capacità portante e degli incrementi delle sollecitazioni indotti nei pali.

La verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze (7.11.3.4.2 - Esclusione della verifica a liquefazione):

1. *eventi sismici attesi di magnitudo M inferiore a 5;*
2. *accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;*
3. *profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;*
4. *depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata (N1)60 > 30 oppure qc1N > 180 dove (N1)60 è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e qc1N è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;*
5. *distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 7.11.1(a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità Uc<3,5 ed in Figura 7.11.1(b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità Uc >3,5.*"

In relazione a queste norme si è dapprima verificato il punto 1. consultando la Mappa delle zone sismogenetiche basata sul database DISS per le zone sorgenti (*Database of Individual Seismogenic Sources*) che raccoglie le potenziali fonti per i terremoti di magnitudo superiore a 5,5 M in Italia e nelle aree circostanti (http://diss.rm.ingv.it/diss/, ©INGV2010 - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia).

L'approccio metodologico utilizzato è in sintesi:

a) per ogni zona sorgente (ZS) viene stimata la massima magnitudo attesa;

b) si determinano le distanze del sito di indagine da ciascuna zona sorgente;

c) attraverso un modello di attenuazione (relazione di attenuazione di Sabetta e Pugliese, applicabile a tutto il territorio Italiano, per terremoti con Magnitudo maggiori di 4.6 e minori di 6.8) si stima lo scuotimento del suolo dovuto alla sorgente sismica più prossima al sito di indagine.

L'applicazione del metodo ha portato ad individuare la zona sismo-genetica ITCS026 (Lunigiana) come la più prossima e pericolosa per il sito di intervento. Le caratteristiche di questa zona sono riassunte nelle figure 6.4 e 6.5.

DISS 3.1.1: Seismogenic Source ITCS026 - Lunigiana

Source Info Summary | Commentary | References | Pictures

General information

Code	ITCS026
Name	Lunigiana
Compiled By	Burrato, P., and G. Valensise
Latest Update	14/05/2010

Parametric information

	Parameter	Qual.	Evidence
Min Depth (km)	1	OD	Based on geological and seismological data from Solarino (2007).
Max Depth (km)	10	OD	Based on geological and seismological data from Solarino (2007).
Strike (deg)	310 - 330	OD	Based on geological data.
Dip (deg)	30 - 45	OD	Based on geological and seismological data from Solarino (2007).
Rake (deg)	260 - 280	EJ	Inferred from geological data.
Slip Rate (mm/y)	0.1 - 1	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
Max Magnitude (Mw)	6	EJ	Assumed from regional seismological data.

Q-keys: LD = Literature Data; OD = Original Data; ER = Empirical Relationship; AR = Analytical Relationship; EJ = Expert Judgement

Fig. 6.4. Caratteristiche della zona sismo-genetica ITCS026 (Lunigiana)

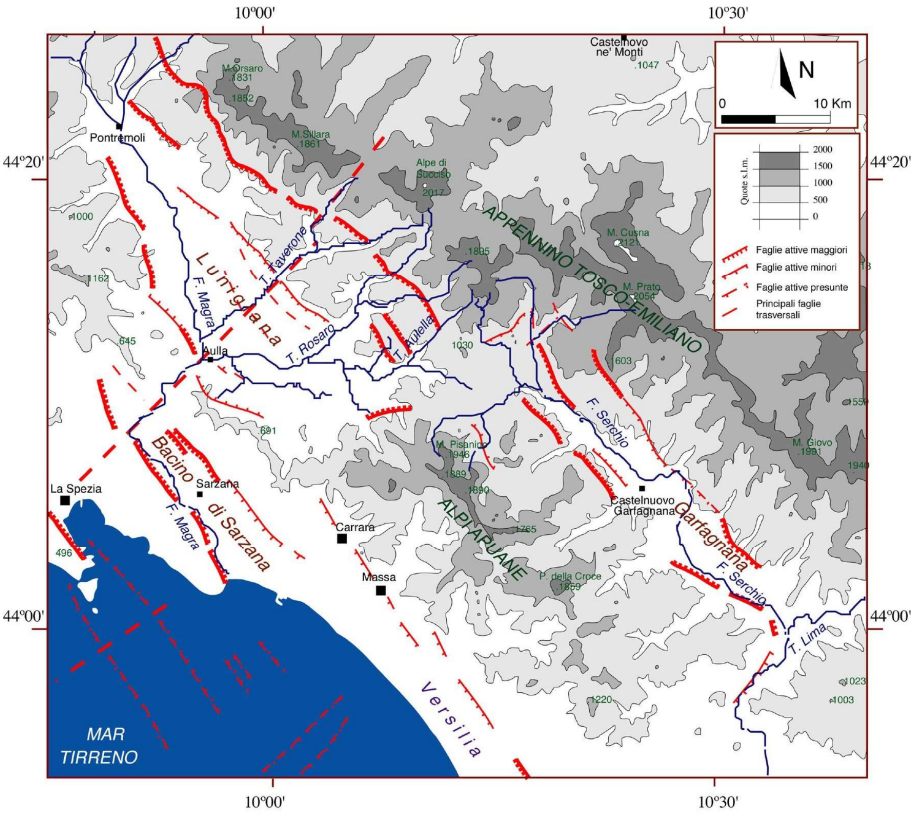


Fig. 6.5. Principali faglie attive in Garfagnana, Lunigiana and Sarzana (Corti, 1997 modificata da Vannucci , 1999).

La distanza dalla zona sismo-genetica dal sito di intervento è di circa 15 km. In base a questi parametri l'accelerazione massima attesa al piano campagna, in assenza di manufatti, è pari a circa 0.2g (fig. 6.6).

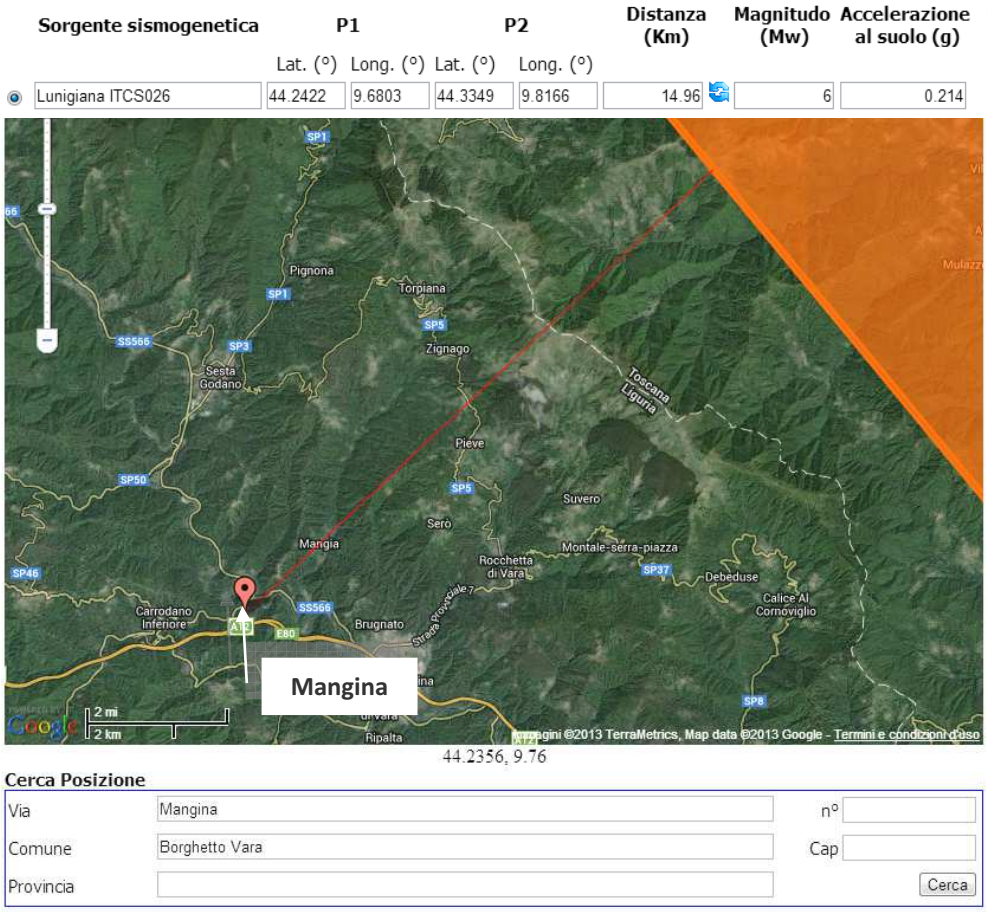


Fig. 6.6. localizzazione della zona sismo-genetica ITCS026 rispetto al sito di Mangina.

In sostanza quindi, in relazione a i punti delle 1. e 2. delle NTC, non si può escludere il rischio di liquefazione. Anche relativamente al punto 3. non si può escludere questo rischio visto che la falda è a profondità sicuramente inferiori a 15 m dal p.c.. In relazione al punto 4. non sono disponibili elementi sufficienti per un giudizio.

Riguardo infine al punto 5., relativo alla distribuzione granulometrica si è constatato che almeno per il campione S1c1, con coefficiente di uniformità Uc>3.5, il fuso granulometrico è sostanzialmente interno alle zone indicate nella figura 6.7 e quindi potenzialmente a rischio di liquefazione.

In conclusione per il sito in esame dovranno essere verificati ulteriormente i dati granulometrici disponibili e/o procedere a nuove indagini al fine di verificare la sussistenza o meno di rischio diffuso di liquefazione.

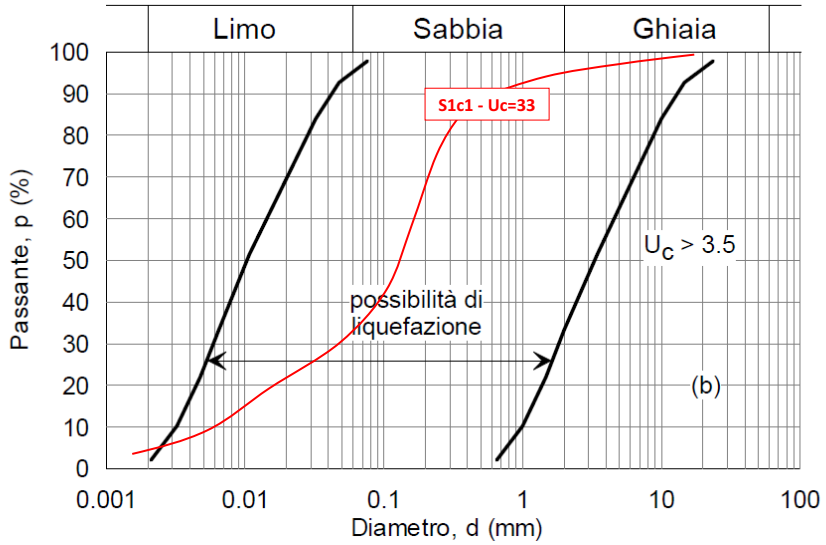


Fig. 6.7. Diagramma di figura 7.11.1(b) delle NTC con fuso granulometrico relativo al campione S1c1.

6.4.3 Prospezione sismica e prove down-hole

Con lo scopo di caratterizzare i terreni dal punto di vista sismo-stratigrafico, sono state eseguite n. 9 sezioni di sismica a rifrazione con onde di compressione P ed elaborazione tomografica, per un totale di 1550 m di rilievo. Gli esiti di questa indagine sono contenuti nel rapporto allegato alla documentazione progettuale (rif. 08562-006R03E01).

Sono state inoltre effettuate n. 3 prove sismiche tipo down-hole con onde P e SH all'interno dei sondaggi S4, S6 e S10, per un totale di 81 m. Lo scopo della prova sismica down-hole consiste nel determinare la velocità di propagazione delle onde di volume, di compressione (onde P) e di taglio (S), misurando il tempo che esse impiegano nel tragitto tra la sorgente, posta in superficie, e i ricevitori, posti all'interno di fori di sondaggio, considerando nota la distanza sorgente-ricevitori (fig. 6.8).

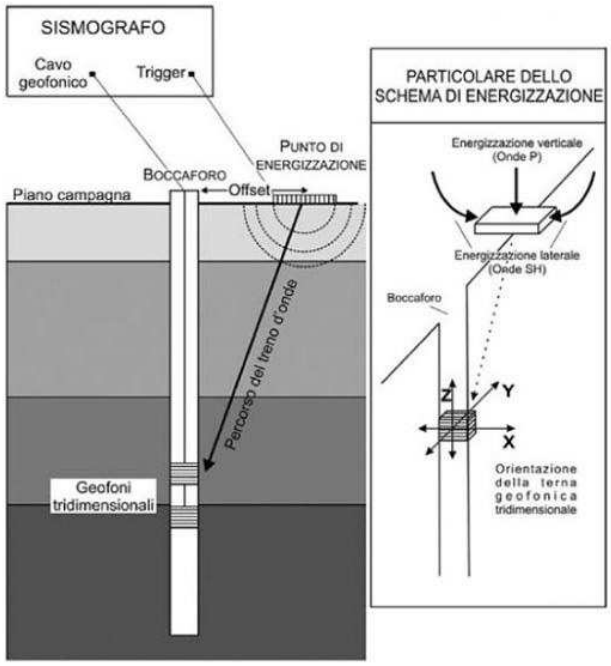


Fig. 6.8. Modalità d'indagine sismica down-hole.

Gli esiti di questa indagine sono riportati in allegato alla documentazione progettuale (rif. 08562-006R03E01) e nelle figure seguenti (figure 6.8, 6.9, 6.10).

I grafici attestano valori di Vs compresi approssimativamente tra 400 e 1000 m/s coerentemente con le litologie osservate.

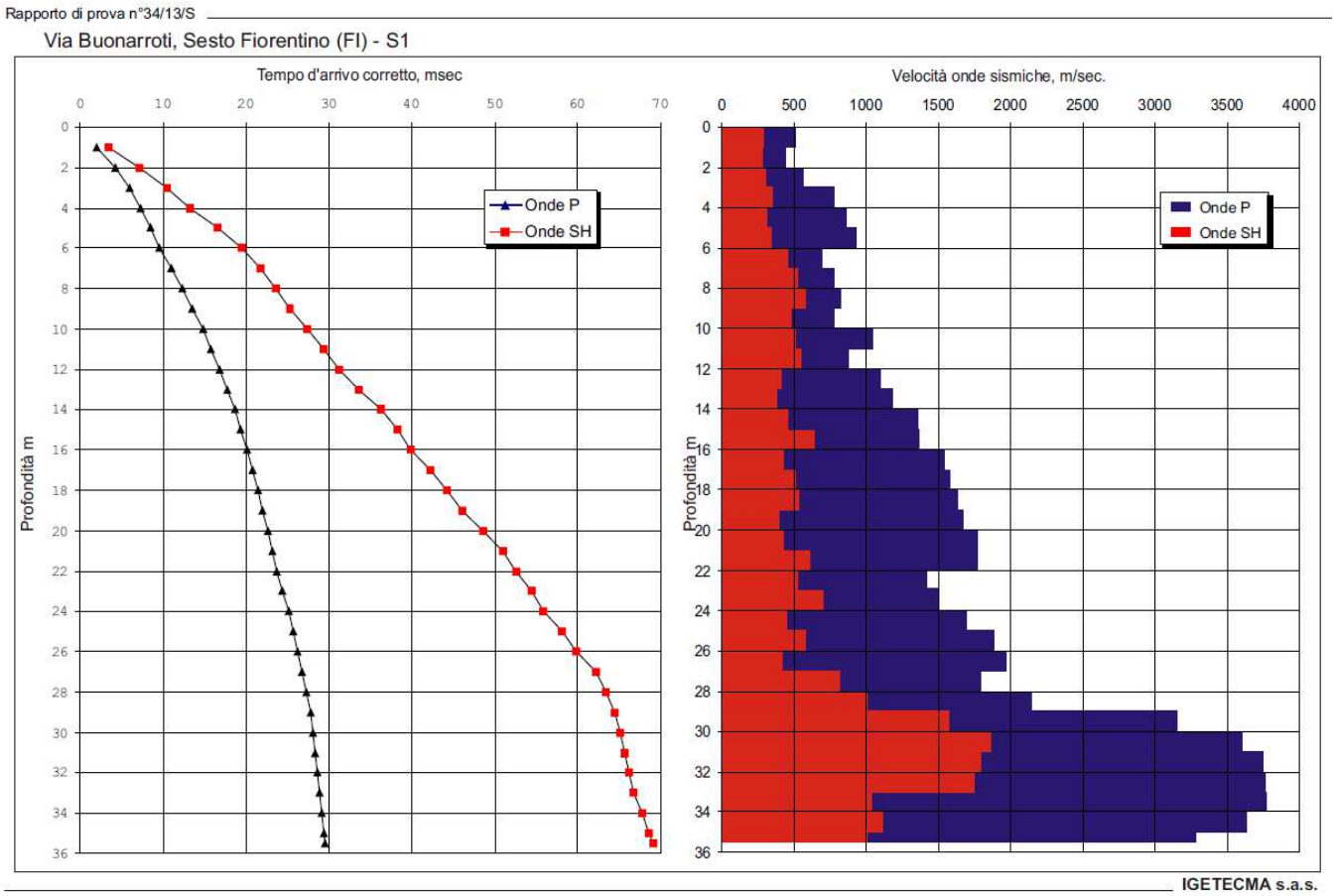


Fig. 6.8. Prova down-hole sondaggio S1.

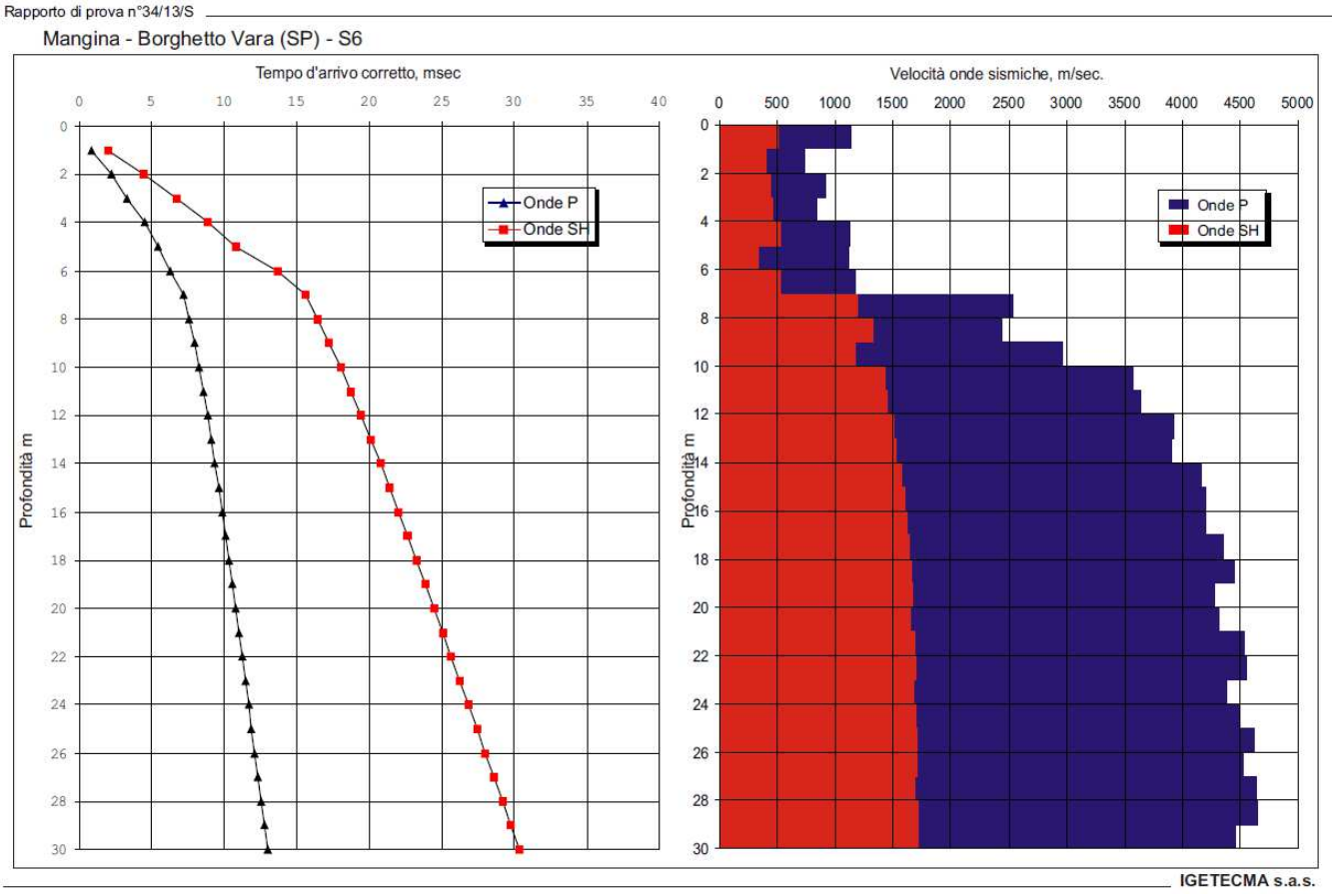


Fig. 6.9. Prova down-hole sondaggio S6.

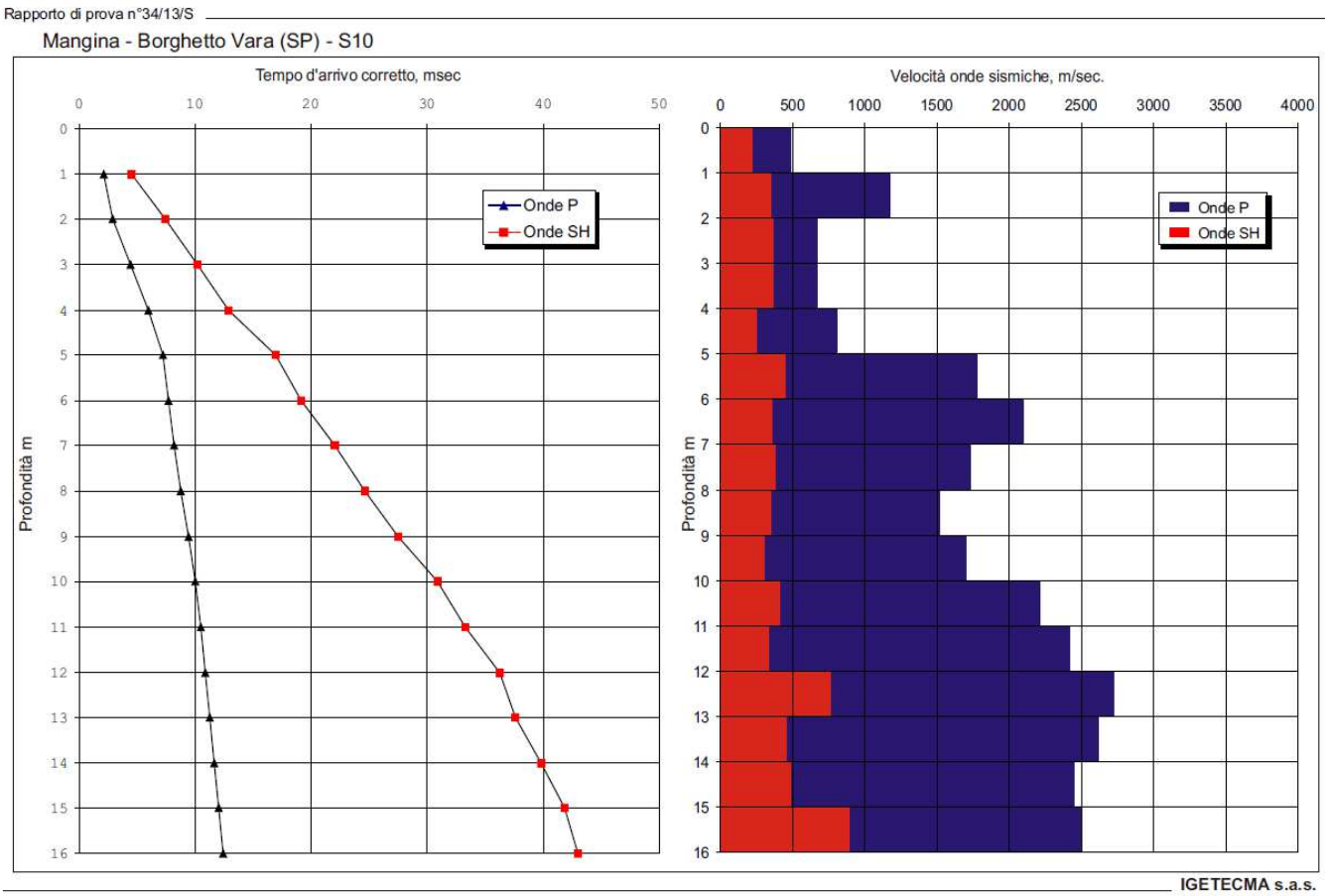


Fig. 6.10. Prova down-hole sondaggio S10.

Con riferimento alla tabella allegata al D.M. 14/01/08 (figura 6.11), i dati di Vs ricavati dalle prove down-hole, attribuirebbero i terreni di fondazione alla categoria B; tale classificazione è tuttavia da verificare con ulteriori elaborazioni in relazione al rischio di liquefazione.

A - *Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi* caratterizzati da valori di V_{S30} superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 m.

B - *Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti*, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{S30} compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero resistenza penetrometrica $N_{SPT} > 50$, o coesione non drenata $c_u > 250$ kPa).

C - *Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza*, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di V_{S30} compresi tra 180 e 360 m/s ($15 < N_{SPT} < 50$, $70 < c_u < 250$ kPa).

D - *Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti* , caratterizzati da valori di $V_{S30} < 180$ m/s ($N_{SPT} < 15$, $c_u < 70$ kPa).

E - *Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali*, con valori di V_{S30} simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con $V_{S30} > 800$ m/s.

In aggiunta a queste categorie, per le quali nel punto 3.2 vengono definite le azioni sismiche da considerare nella progettazione, se ne definiscono altre due, per le quali sono richiesti studi speciali per la definizione dell'azione sismica da considerare:

S1 - Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10 m di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità (PI > 40) e contenuto di acqua, caratterizzati da valori di $V_{S30} < 100$ m/s ($10 < c_u < 20$ kPa)

S2 - Depositi di terreni soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti

Fig. 6.11. Tabella di classificazione dei terreni di fondazione in base alla Vs_{30}.

7. CONCLUSIONI

Le considerazioni che possono essere formulate allo stato attuale delle indagini, sono le seguenti.

- *Assetto geologico*: l'assetto geologico dell'areale di indagine è caratterizzato dalla presenza di un substrato roccioso di natura arenacea, localmente fratturato, estesamente ricoperto da depositi detritici e di natura alluvionale.
- *Assetto geomorfologico*: i versanti a Sud del sito di Mangina sono interessati da processi geomorfologici quiescenti e in atto; sono ricorrenti morfologie tipiche degli accumuli di paleofrana. Gli eventi alluvionali dell'ottobre 2011, che hanno colpito gravemente questo settore della Valle del Vara, hanno determinato diffuse rimobilizzazioni dei depositi detritici, particolarmente evidenti nei bacini immediatamente a monte del sito; tali fenomeni non sembrano aver raggiunto ancora uno stato di equilibrio. Nell'area in cui si intende realizzare la discarica non sono stati rilevati indizi di importanti movimenti gravitativi in atto. Un aspetto geomorfologico degno di nota riguarda la morfologia fluviale attuale del Torrente Malacqua che è caratterizzata da una zona in erosione attiva in sponda destra, nei pressi del limite Est dell'area di intervento.
- *Assetto idrogeologico*. E' stata accertata la presenza diffusa di acque sotterranee sia nei depositi di copertura che nel substrato roccioso arenaceo con livelli piezometrici prossimi al piano di campagna. In un settore localizzato sono state intercettate acque salienti in pressione con livello che si attesta a quote superiori di circa 1 m rispetto al piano di campagna.
- *Assetto idrochimico*. La caratterizzazione idrochimica delle acque sotterranee ha consentito di validare e confermare il modello idrogeologico ed evidenziare la presenza di acque sotterranee che scaturiscono ai piedi del rilevato INTERSTRADE (limite Sud dell'area di intervento) con sospetti indici di contaminazione antropica.
- *Caratteri geotecnici dei terreni*: i terreni di fondazione dell'area in cui si intende realizzare l'opera sono stati indagati mediante l'esecuzione di un congruo numero di sondaggi geognostici, prove in foro, analisi geotecniche di laboratorio, prospezioni geofisiche che hanno permesso di caratterizzare i terreni di fondazione, fornendo i parametri da utilizzare nella progettazione geotecnica.
- *Caratteri sismici dei terreni*. Le prove sismiche down-hole hanno consentito di classificare, in prima approssimazione, i terreni di fondazione nella categoria B a meno di verifiche in corso di completamento riguardo possibili rischi di liquefazione, accertati per almeno un campione di terreno.

Si consiglia infine, prima dell'eventuale fase esecutiva del progetto, di approfondire alcuni aspetti critici emersi in sede di indagine, attraverso le seguenti attività:

- esecuzione di prove di emungimento sui piezometri al fine di valutare, con ulteriore grado di approfondimento, i parametri idrogeologici degli acquiferi;
- elaborazione del bilancio idrogeologico dei bacini a monte del sito al fine di determinare l'aliquota di infiltrazione che alimenta il deflusso sotterraneo verso il sito di intervento.
- Determinazione dei parametri idraulici di svuotamento di sorgenti e corsi d'acqua.
- Caratterizzazione isotopica e geochimica, con profilo esteso ai principali elementi, in traccia delle acque sotterranee e superficiali, per definire nel dettaglio il modello idrogeologico del sito ed evidenziare eventuali fenomeni di contaminazione.

Il Geologo
Dott. Gianpiero Brozzo