



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
PADOVA

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Scienze della Terra

Direttore Prof.ssa Cristina Stefani

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

INTERPRETAZIONE DI PROVE DI DILUIZIONE
ATTRAVERSO MODELLAZIONE NUMERICA
NELL'AREA DELLE RISORGIVE DEL SILE (TV)

Relatore: Dott. Leonardo Piccinini

Laureando: Stefano Brugnaro

ANNO ACCADEMICO 2013 / 2014

Sommario

1	introduzione.....	7
2	Inquadramento.....	9
2.1	Inquadramento geografico	9
2.2	inquadramento geologico e geomorfologico	10
2.3	la torbiera	14
2.4	inquadramento idrogeologico	16
3	tecniche per la caratterizzazione idrogeologica	20
3.1	piezometri	20
3.2	Freatimetro.....	23
3.3	Data-Logger.....	24
3.4	Trasporto nei mezzi porosi saturi.....	25
3.4.1	Advezione	26
3.4.2	Dispersione meccanica.....	28
3.4.3	Diffusione molecolare.....	30
3.4.4	Dispersione idrodinamica.....	31
3.4.5	Fattori ritardanti	33
3.5	Traccianti	33
3.5.1	Tipologie di traccianti	34
3.6	Prove di diluizione (single well).....	37
3.7	Prove di tracciamento (multiwell)	41
3.8	Prove eseguite sul campo.....	43
3.8.1	prove di diluizione senza packers	45
3.8.2	Prove di diluizione/tracciamento senza packers	48
3.8.3	Prove di diluizione/tracciamento con packers.....	49

3.9	MODELLI.....	52
3.9.1	SURFER 8.0.....	53
3.9.2	STANMOD.....	56
3.9.3	MODFLOW E MT3DMS.....	58
4	risultati.....	67
4.1	piezometrie ed interpolazione.....	67
4.2	interpretazione delle prove di diluizione senza packers.....	70
4.3	interpretazione delle prove di diluizione/tracciamento senza packers.....	73
4.4	interpretazione delle prove di diluizione/tracciamento con packers.....	75
4.5	risultati ottenuti con la modellazione numerica.....	77
4.5.1	Simulazione della prova di diluizione/tracciamento del 06/06/2013....	78
4.5.2	simulazione della prova di diluizione/tracciamento del 01/08/2013....	82
4.5.3	simulazione della prova di diluizione/tracciamento del 27/09/2013....	85
4.6	Riepilogo dei risultati ottenuti dalle prove di diluizione (singlewell).....	89
4.7	Riepilogo dei risultati ottenuti dalle prove di tracciamento (multiwell)...	90
4.8	confronto tra i risultati analitici e quelli numerici.....	91
4.8.1	prova di diluizione/tracciamento del 06/06/2013.....	91
4.8.2	prova di diluizione/tracciamento del 27/09/2013.....	92
4.8.3	prova di diluzione/tracciamento del 01/08/2013.....	92
5	Conclusioni.....	94
	Bibliografia.....	101
	Allegato 1 - Stratigrafie.....	104
	allegato 2: - piezometri.....	108
	allegato 3: - prove di diluizione e tracciamento.....	116
	prova di diluizione del 01/07/2013 in S1.....	116

prova di diluizione del 01/07/2013 in S2A	117
prova di diluizione del 04/07/2013 in S2B	118
prova di diluizione del 06/06/2013 in S3A	119
prova di diluizione del 14/07/2013 in S3B	120
prova di diluizione del 25/06/2013 in S5	121
prova di diluizione del 14/07/2013 in S6	122
prova di diluizione del 28/06/2013 in S8	123
prova di diluizione del 16/07/2013 in S3A con packer	124
prova di diluizione del 05/09/2013 in S3A con packer	125
prova di diluizione del 27/09/2013 in S3A con packer	126
allegato 4: - risultati ottenuti con stanmod	127
grafici di stanmod	127
prova di tracciamento del 06/06/2013 in S3B con stanmod	127
prova di tracciamento con packer del 16/07/2013 con stanmod	128
prova di tracciamento con packer del 05/09/2013 con stanmod	129
prova di tracciamento con packer del 27/09/2013 con stanmod	130
tabelle riassuntive di stanmod	131
prova di tracciamento del 06/06/2013 in S3B	131
prova del 16/07/2013 in S3B, con packers	131
prova del 05/09/2013 in S3B con packers	131
prova del 27/09/2013 in S3B con packers	132
Ringraziamenti	133

1 INTRODUZIONE

Le risorgive del Fiume Sile si trovano in un'area protetta di notevole pregio ambientale, in cui la naturale emergenza delle acque sotterranee ha condizionato il paesaggio e la sua evoluzione. L'area, infatti, si trova lungo la fascia delle risorgive tra Castelfranco Veneto e Treviso, nella Media Pianura Veneta.

Questo elaborato di tesi si prefigge l'obiettivo di caratterizzare dal punto di vista idrogeologico l'area del Parco Naturale del Sile, determinando la velocità di flusso delle acque sotterranee attraverso prove di diluizione.

Le prove di diluizione sono delle prove di pozzo economiche, rapide e di facile realizzazione che permettono, in determinate condizioni, la stima della velocità di flusso orizzontale delle acque sotterranee. Il test consiste nella iniezione ed omogeneizzazione di un tracciante entro un pozzo o un piezometro, o in un tratto di esso, ed il successivo monitoraggio della sua progressiva diminuzione per effetto della diluizione del flusso in ingresso. In particolare l'impiego di un tracciante salino rende ancora più semplice la realizzazione di tali prove, sia per l'economicità e la solubilità del tracciante e sia per la facilità di monitoraggio, attraverso le variazioni di conducibilità elettrica che esso induce. Tipicamente le prove di diluizione sono interpretate attraverso una semplice relazione analitica che permette la determinazione di una velocità apparente proporzionale alla velocità da Darcy.

Per la stima delle velocità di flusso delle acque sotterranee sono state realizzate prove di diluizione con tracciante salino (cloruro di sodio) su tutti i piezometri presenti nell'area di studio. Durante la campagna di acquisizione sono state testate due modalità di iniezione del tracciante: la prima con omogeneizzazione su tutta la colonna d'acqua e la seconda attraverso l'utilizzo di packers per l'isolamento del tratto di prova. Per l'interpretazione, invece, oltre alla tradizionale soluzione analitica sono stati utilizzati due approcci numerici: uno monodimensionale analitico (codice CXTFIT con STANMOD) e l'altro tridimensionale alle differenze finite (MODFLOW ed MT3DMS). Inoltre, la presenza nell'area di due doppiette piezometriche ha permesso di realizzare prove combinate di diluizione e tracciamento, utilizzando la prova di diluizione nel piezometro di monte come iniezione per una prova di tracciamento a gradiente naturale sul piezometro di valle.

Le prove di diluzione sono state accompagnate dalla realizzazione di diversi rilievi freaticometrici per la determinazione della direzione prevalente del flusso delle acque sotterranee e la stima del gradiente piezometrico.

Infine, l'interpretazione e l'analisi di tutti i dati raccolti hanno permesso di caratterizzare il campo di moto della falda nell'area oggetto di studio, ma anche di ottenere alcune interessanti indicazioni metodologiche riguardanti la realizzazione delle prove di diluzione con tracciante salino, sia per quanto concerne l'esecuzione e sia per quanto riguarda l'interpretazione delle prove. In particolare la possibilità di confrontare i risultati della diluzione con quelli del tracciamento a gradiente naturale, attraverso la modellazione numerica, si è dimostrato uno strumento di efficacia formidabile per la caratterizzazione idrogeologica.

2 INQUADRAMENTO

2.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il Parco Naturale Regionale del Sile si estende per una superficie di 4152 ettari e si trova all'interno delle provincie di Padova, Treviso e Venezia. Nel dettaglio, le risorgive del Fiume Sile sono distribuite tra Casacorba di Vedelago (TV) e Torreselle di Piombino Dese (PD) [Fig. 2.1]. Quella considerata come la principale sorgente è il "Fontanasso dea Coa Longa", collocata all'interno dell'area di Torreselle.

Il Fiume Sile scorre con una certa sinuosità, da Ovest verso Est, e grazie ai suoi 90 km di lunghezza circa, è il più lungo fiume di risorgiva d'Italia [Tab. 2.1]. Un tempo la foce del fiume si trovava a Portegrandi di Quarto D'Altino, ma nel 1683, la Serenissima ne deviò il corso mediante il Taglio del Sile. Tale deviazione, ha convogliato le sue acque sul vecchio letto del Piave, che a sua volta era stato deviato più ad Est. Per questo motivo, l'ultimo tratto del Sile viene chiamato "Piave Vecchia". Infine, sfocia nel Mare Adriatico dividendo il Lido di Jesolo dal Litorale del Cavallino (porto Piave Vecchia). Il vecchio corso del Sile, è ancora attivo, in esso, vi scorre infatti il "Silone", che procede tra le paludi, arrivando fino al Porto del Lido.



Fig.2.1: Inquadramento geografico del Parco del Sile.

CARATTERISTICHE DEL SILE	
LUNGHEZZA	90,49 km
LARGHEZZA MAX	40 m
PORTATA (A MEDIO CORSO)	min 33 m ³ /s, med 55 m ³ /s, max 76 m ³ /s
VELOCITÀ	2 m/s
TEMPERATURA DELL'ACQUA	invernale + 11/12 °C, estiva + 14/15 °C
BACINO IDROGRAFICO	628 km
AFFLUENTI DI DESTRA	Piovega, Dosson, Bigonzo, Serva
AFFLUENTI DI SINISTRA	Corbetta, canale di Gronda, Cerca, Botteniga, Limbraga, Storga, Melma, Nerbon, Musestre

Tab.2.1: Caratteristiche del Fiume Sile.

2.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

L'assetto della Pianura Veneto-Friulana è legato all'evoluzione tardo Pleistocenica ed Olocenica che ha interessato i fiumi Isonzo, Tagliamento, Piave, Brenta ed Adige; i continui cambiamenti del percorso di questi fiumi, hanno portato al ricoprimiento alluvionale di vaste aree. In particolare essa è il risultato dei processi deposizionali di natura fluvioglaciale e/o alluvionale susseguitisi alla messa in posto di tre grandi conoidi fluviali (Megafan): il Megafan di Bassano, di Montebelluna e di Nervesa.

A causa di ciò, si sono formati sistemi sedimentari, allungati fino al mare, che presentano geometrie in pianta a ventaglio e che tridimensionalmente sono simili ad un cono appiattito. Questi sistemi che un tempo erano descritti come conoidi (ad es. Comela., 1955; Castiglioni & Pellegrini, 2001), vengono ora definiti come Megafan alluvionali (Fontana et al., 2004, 2008; Mozzi, 2005). In Figura 2.2 sono rappresentati i Megafan che caratterizzano la Pianura Veneto-Friulana.

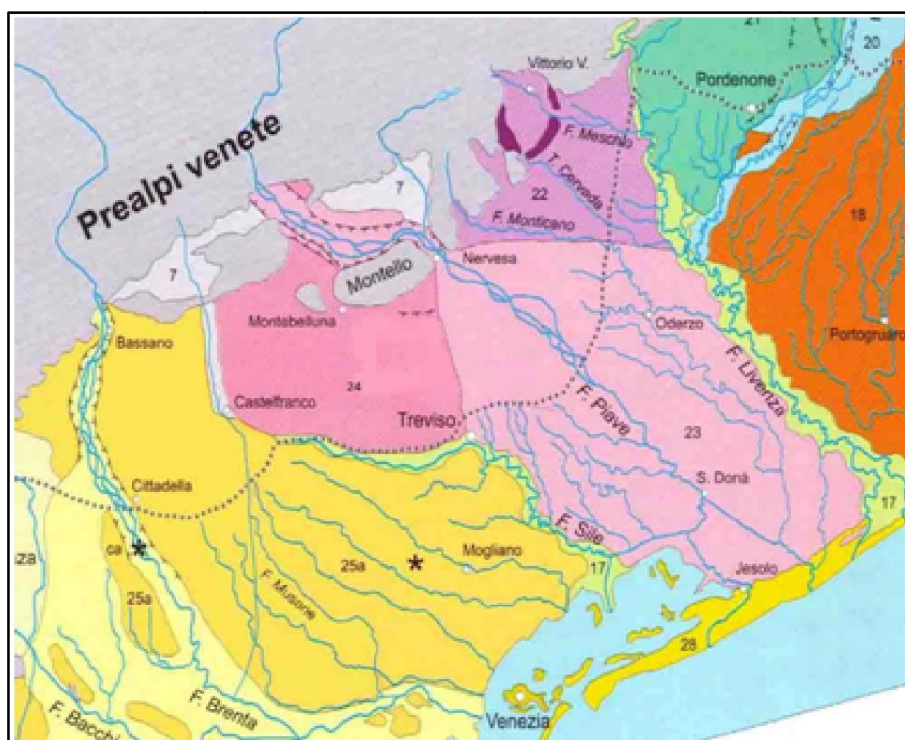


Fig.2.2: Sistema de posizionale della Pianura Veneto-Friulana, contrassegnati dai numeri: 23, il Megafan del Piave di Nervesa; 24, il Megafan del Piave di Montebelluna; 25, il sistema del Fiume Brenta.

La separazione tra i vari bacini, si basa su dati geomorfologici, stratigrafici, pedologici e mineralogici (Bondesan&Meneghel, 2004; Fontana et al., 2004; ARPAV, 2005). I Megafan alluvionali, presentano una certa continuità dallo sbocco vallivo fino alle aree costiere, sempre conservando una morfologia a ventaglio. Allo stesso modo, i Megafan alluvionali, presentano una differenziazione interna che si sviluppa in senso longitudinale ed in senso trasversale. Generalmente, le prime decine di chilometri, che sono quelle porzioni che partono dallo sbocco vallivo fino alla fascia delle risorgive, sono caratterizzate da pendenze variabili dal 7‰ fino al 2‰ e con le granulometrie più grossolane. Allontanandosi dallo sbocco alpino, il corso d'acqua diminuisce la sua energia, in termini di trasporto solido, pertanto i sedimenti che sono stati mobilizzati presentano generalmente una granulometria minore. Ne consegue quindi, che la dimensione granulometrica dei sedimenti che caratterizzano un Megafan è solitamente di dimensioni inversamente proporzionali rispetto alla distanza dallo sbocco vallivo del

fiume. Un'altra differenziazione, come già anticipato, è quella in senso trasversale, questo tipo di diversificazione, nasce perché un corso d'acqua non mantiene costantemente il suo percorso, quindi possono riscontrarsi marcate differenze stratigrafiche in senso trasversale.

Da quanto detto si possono distinguere tre settori diversi all'interno della pianura, una prima zona, di Alta Pianura, dove vi sono le granulometrie più grossolane, in particolare depositi ghiaiosi e ghiaioso-sabbiosi. Lo spessore di tale materasso ghiaioso, dedotto delle principali perforazioni di pozzi a scopo idropotabile, è stimabile in circa 200-300 metri.

Spostandosi verso valle, lo spessore del materasso ghiaioso si assottiglia progressivamente e compaiono gradatamente intercalazioni di depositi limoso-argillosi e talvolta sabbiosi. Questa transizione progressiva si compie in corrispondenza della fascia delle risorgive, in quella che è definita Media Pianura.

Spostandosi ulteriormente a valle, si entra in nella Bassa Pianura, in cui le ghiaie sono quasi ovunque sostituite da depositi sabbiosi intercalati da livelli fini di natura argilloso-limosa.

Questo tipo di differenziazione all'interno dei sistemi deposizioni denominati Megafan, rende possibile l'esistenza di settori talvolta adiacenti, che presentano caratteristiche geologiche e geomorfologiche molto diverse.

L'area del Parco del Sile, si colloca geomorfologicamente nella Media Pianura, quindi in quella fascia di transizione tra l'Alta Pianura e la Bassa Pianura.

Dai dieci sondaggi a carotaggio continuo eseguiti all'interno dell'area del Parco del Sile, le due stratigrafie reperite dal Piano di Assetto Territoriale (PAT) della Provincia di Treviso ed alcune stratigrafie reperite presso il dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Padova è stato possibile costruire un profilo geologico, che si estende per circa 6000 m in direzione N-SE [Fig. 2.3], da cui è possibile ricostruire la natura del substrato entro i primi 30 metri di profondità.

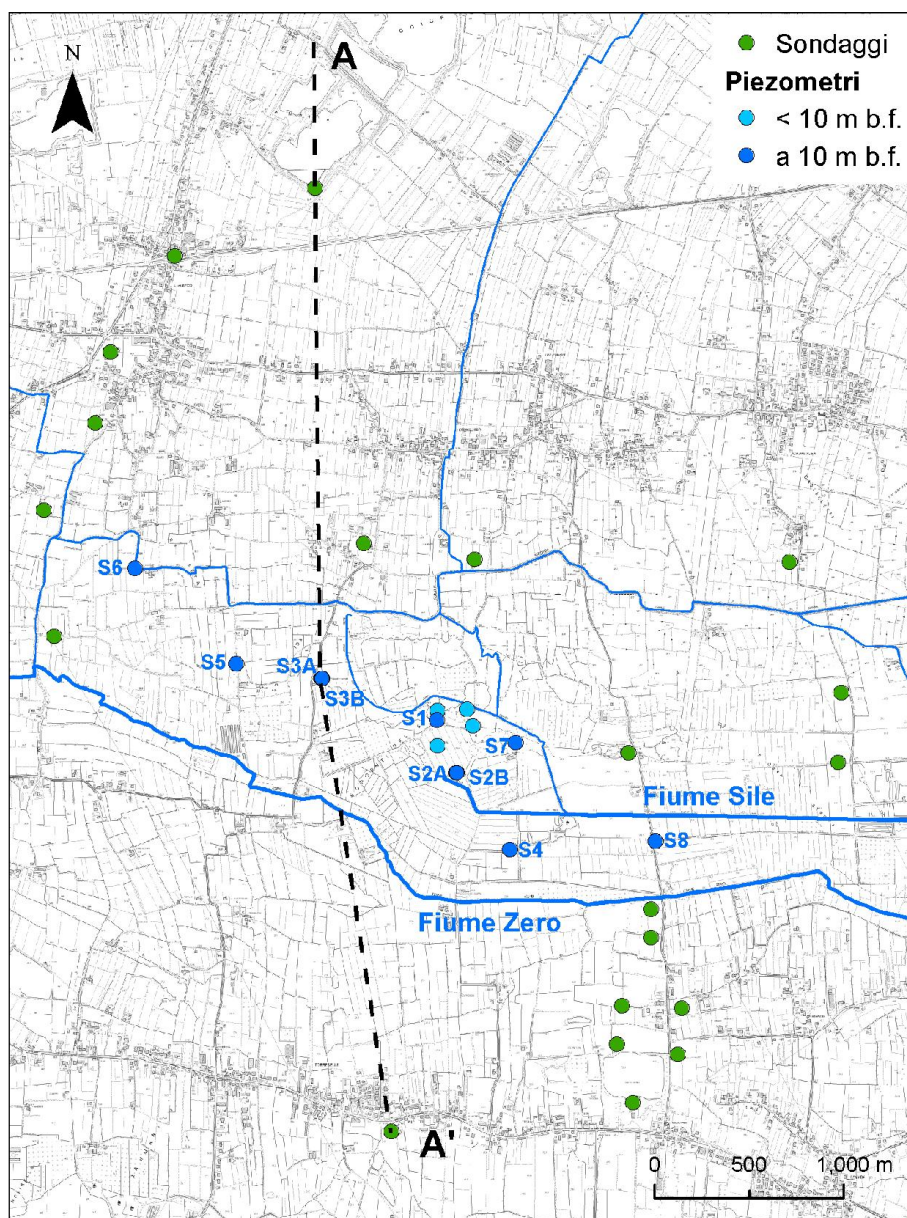


Fig. 2.3: Ubicazione dei piezometri all'interno dell'area del Gran Bosco dei Fontanassi e traccia del profilo A-A'.

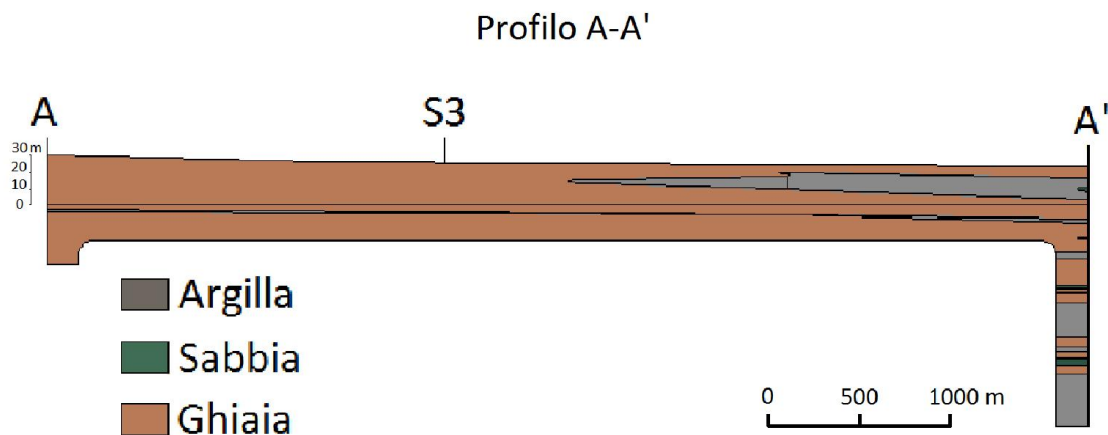


Fig. 2.4: Ricostruzione del profilo geologico A-A'.

Il sottosuolo dell'area di studio, entro i primi 4 m di profondità da piano campagna (p.c.), è costituito da materiali prevalentemente fini di natura limoso-argillosa con frequenti intercalazioni di sabbia. Oltre i 4 m da p.c. si rinvencono le ghiaie alluvionali affioranti più a monte nell'Alta Pianura e deposte con buona probabilità dal Paleo-Piave. Questo potente deposito grossolano indifferenziato è intercalato a circa 30 m di profondità da un livello argilloso-limoso di spessore compreso tra 1 e 2 m, che presenta una buona continuità su tutta l'area di studio.

2.3 LA TORBIERA

La presenza di torbiere è una delle peculiarità ambientali dell'area delle risorgive del Sile; la torbiera rappresenta una tappa intermedia nell'evoluzione di una palude.

Le torbiere sono degli ambienti caratterizzati da una grande quantità di acqua che si muove lentamente. La vegetazione che si forma è prevalentemente di tipo erbaceo, ma può essere composta anche da graminacee. Sono gli ambienti naturali dove si viene a formare la torba, un materiale di origine vegetale prevalentemente organico. In Figura 2.5 si può vedere l'estensione della torbiera presente nel Parco del Sile.

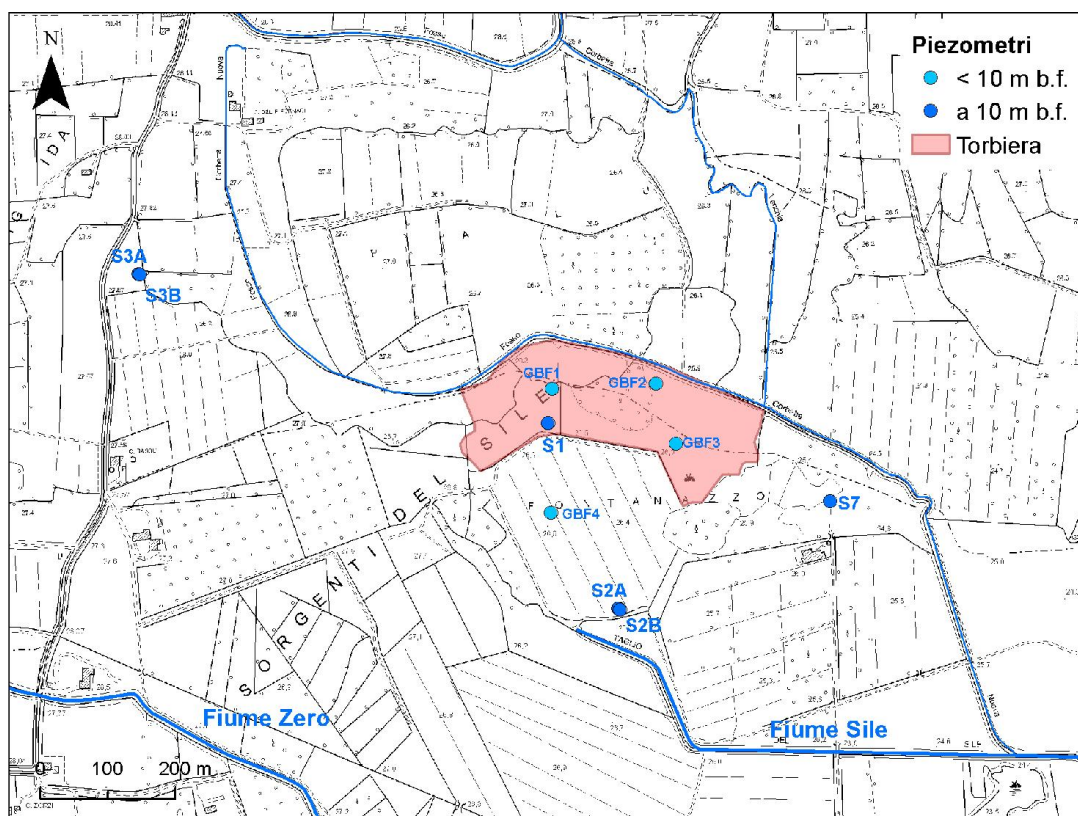


Fig. 2.5: Gran Bosco dei Fontanassi, si può vedere l'estensione della Torbiera.

Le torbiere generalmente si formano nelle zone più umide e fredde della Terra, favorite da basse temperature e condizionate dal rapporto tra precipitazione ed evaporazione. Le regioni favorite per il loro sviluppo, sono quelle delle più alte latitudini e/o altitudini.

In Italia le torbiere sono relativamente rare (circa 100000 ettari dell'intero territorio nazionale) e si trovano prevalentemente nelle vallate alpine chiuse, dove l'acqua non ha la possibilità di fluire in tempi molto rapidi, mentre si rinvengono con una frequenza progressivamente minore alle basse altitudini e nelle aree più calde. Per questa ragione la torbiera presente nell'area del Gran Bosco dei Fontanassi presenta caratteristiche ambientali di particolare pregio naturalistico.

Il processo che porta alla formazione di una torbiera inizia con l'interramento di uno specchio d'acqua od in alternativa con l'impaludamento di una zona asciutta. In entrambi i casi si ha uno strato di acqua libera arricchita con sostanza organica che proviene prevalentemente dal ciclo biologico degli organismi viventi. Con il passare del

tempo, si ha l'incremento della massa torbosa a causa del continuo deposito di sostanza organica. L'aumento del materiale organico genera una stratificazione nella quale gli strati sottostanti sono pressati da quelli sovrastanti. La particolare struttura della torba, fa sì che vi siano dei cuscinetti che hanno la caratteristica di trattenere l'acqua meteorica e favorire la risalita della falda. Una torbiera si definisce attiva fin tanto che è in grado di accumulare materiale organico.

Le torbiere si possono suddividere in tre diverse tipologie:

- **TORBIERE ALTE:** si definiscono alte quelle torbiere che tendono a formare dei cuscinetti i quali si innalzano rispetto al livello della falda. Sono prevalentemente alimentate dalle precipitazioni meteoriche, che essendo povere di nutrienti permettono l'adattamento unicamente ai muschi.
- **TORBIERE BASSE:** le torbiere basse, hanno un profilo orizzontale e sono alimentate dall'acqua che proviene dal suolo in seguito ad uno scorrimento superficiale o profondo nel caso si parli di torbiere sviluppatesi in pendenza, oppure in seguito ad una risalita della falda freatica qualora ci si trovi in depressioni.
- **TORBIERE DI TRANSIZIONE:** sono delle torbiere che presentano alcune caratteristiche delle torbiere alte ed altre delle torbiere basse, con la predominanza di una delle due tipologie a seconda dell'apporto idrico presente.

2.4 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

L'idrogeologia generale della Pianura Veneta è nota grazie agli studi svolti da parte del CNR (Gruppo di Studio sulle Falde Acquifere Profonde della Pianura Padana, 1979-1981).

In Figura 2.6 è presentato il modello concettuale della circolazioni idrica sotterranea della Alta e Media Pianura Veneta.

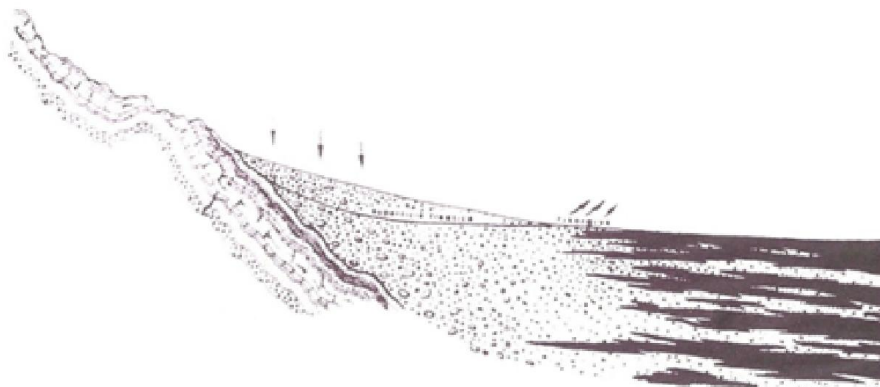


Fig. 2.6: Modello idrogeologico dell'alta Pianura Veneta.

Tale modello concettuale deriva dall'interpretazione idrogeologica delle conoscenze stratigrafiche descritte nell'inquadramento geologico/geomorfologico, nonché dai dati idrogeologici disponibili.

Con riferimento alla classica differenziazione della Pianura Veneta in Alta, Media e Bassa, si possono distinguere tre diversi sistemi idrogeologici, le cui caratteristiche di permeabilità sono riportate in Tabella. 2.2.

GRADO DI PERMEABILITA' RELATIVA	K	LITOLOGIA
ALTO	$1.00 \times 10^{-2} - 1.00 \times 10^{-4}$	GHIAIA
MEDIO	$1.00 \times 10^{-4} - 1.00 \times 10^{-5}$	SABBIA
BASSO	$1.00 \times 10^{-5} - 1.00 \times 10^{-8}$	SABBIA FINE E SILTS
IMPERMEABILE	$1.00 \times 10^{-8} - 1.00 \times 10^{-9}$	ARGILLE

Tab. 2.2: Classi e valori di permeabilità [K in m/s] in funzione della litologia.

- **ACQUIFERO FREATICO DI ALTA PIANURA:** questo acquifero si trova a ridosso dei rilievi montuosi, ha un'estensione di qualche decina di chilometri ed è, come già detto, caratterizzato da una litologia prevalentemente ghiaiosa o ghiaioso-sabbiosa di origine essenzialmente fluviale e fluvio-glaciale. E' contraddistinto da una notevole continuità laterale, un grande spessore e da valori di permeabilità (K) da alti a medio-alti. L'acquifero freatico indifferenziato è la parte di pianura dove avviene la massima infiltrazione superficiale e per questo viene definita "Area di ricarica degli acquiferi".

- **ZONA DI TRANSIZIONE DI MEDIA PIANURA:** spostandosi verso Sud, le ghiaie dell'acquifero freatico indifferenziato diminuiscono progressivamente suddividendosi in livelli sub-orizzontali, separati da letti di materiali fini limoso argillosi. Questa transizione avviene nella Media Pianura, una fascia continua, di spessore compreso tra 5 ed 8 km, che borda tutta l'Alta Pianura in cui, a causa del progressivo assottigliamento delle ghiaie, si registra una progressiva diminuzione della soggiacenza e la conseguente emergenza della tavola d'acqua, che da luogo a fontanili e risorgive naturali. Proprio in quest'area nascono i cosiddetti "Fiumi di Risorgiva". La Media Pianura è caratterizzata da valori di K molto variabili e compresi tra quelli alti e medio alti delle ghiaie a quelli bassi dei livelli fini limoso argillosi.
- **SISTEMA MULTIFALDA DI BASSA PIANURA:** è costituito da un'alternanza di livelli sabbioso ghiaiosi alternati da livelli fini argilloso limosi a comportamento acquitardo e/o acquiclude [Fig. 2.7]. Il sistema multi falda della bassa pianura si estende tra la fascia delle risorgive (zona di transizione in Media Pianura) sino alla costa. Dal punto di vista idrogeologico è caratterizzato da materiali con permeabilità da media a bassa.

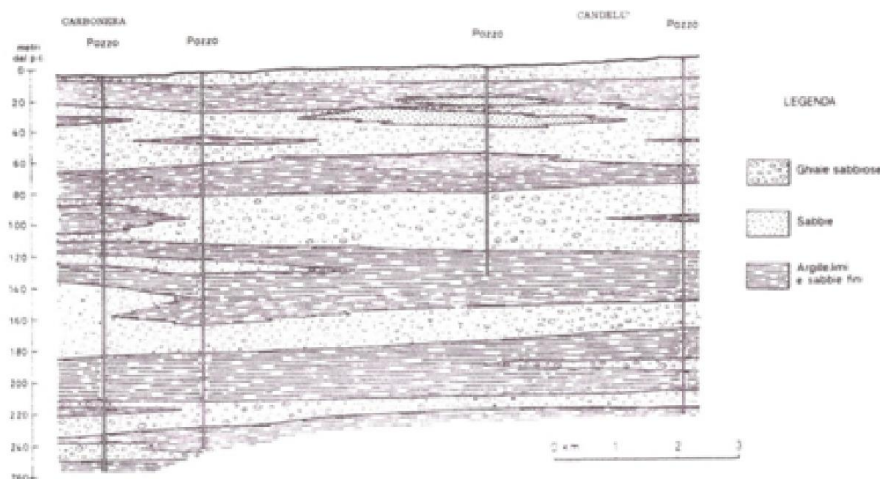


Fig. 2.7: Ricostruzione litostratigrafica di una zona della bassa pianura (da Bullo P & Dal Prà, 1992).

La circolazione delle acque sotterranee è condizionata dall'alimentazione, che avviene prevalentemente nella fascia dell'Alta Pianura. Tra gli apporti che provvedono all'alimentazione dell'acquifero freatico indifferenziato, si devono innanzitutto citare le precipitazioni atmosferiche, che sono particolarmente abbondanti, specialmente nelle zone montane e pedemontane e permettono un'alimentazione sia diretta che indiretta.

Un altro apporto che contribuisce alla ricarica dell'acquifero freatico indifferenziato è dato dall'irrigazione. Come accade nella maggior parte della Pianura Padana l'effetto dell'irrigazione influenza il regime idrodinamico degli acquiferi, che per questa ragione solitamente raggiungono il massimo in estate ed il minimo in inverno.

Un'ultima ed importante fonte di alimentazione dell'intero sistema idrogeologico è legata alle dispersioni entro l'alveo dei corsi d'acqua lungo il tratto settentrionale del loro percorso di pianura, dove il letto fluviale si trova inciso entro il materasso ghiaioso. Alcuni studi (D'Alpaos & Dal Prà, 1978; Zanin & Battagion, 1999) identificano questo fenomeno come la principale fonte di alimentazione dell'acquifero freatico indifferenziato.

L'area di studio si colloca, come già detto, nella fascia di Media Pianura, quindi è litologicamente costituita da depositi ghiaiosi con intercalazioni argillose ed argilloso limose, talvolta con presenza di sabbia. Nello specifico l'assottigliamento del materasso ghiaioso e la progressiva comparsa dei livelli fini comportano una progressiva risalita della tavola d'acqua, come dimostrato dai bassi valori di soggiacenza registrati, che si attestano tra i 30 ed i 120 cm, e talvolta nell'area più ad Est, dalla presenza di Pozzi Artesiani.

Dal profilo geologico realizzato [Fig. 2.4], si può notare come l'area di studio sia caratterizzata dal punto di vista idrogeologico dalla presenza di un deposito di ghiaia spesso circa trenta metri, delimitato da due livelli, al letto ed al tetto, di materiale fine argilloso o argilloso limoso, a comportamento acquitardo o acquiclude. Per questa ragione è ipotizzabile che le ghiaie presenti nell'area di studio siano sede di una falda semiconfinata o libera in ragione dell'estensione e della continuità dei depositi fini presenti in superficie.

3 TECNICHE PER LA CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA

3.1 PIEZOMETRI

Un piezometro è un dispositivo in grado di rilevare l'altezza piezometrica di un liquido, nella fattispecie l'acqua. Può essere generalmente di tre diverse tipologie, in base al tipo di situazione idrogeologica, si potrà preferirne una specifica tipologia:

- **TUBO APERTO:** viene utilizzato in quelle situazioni dove la permeabilità del materiale geologico è indicativamente maggiore di 1.00×10^{-5} m/s. Per la realizzazione di un piezometro a tubo aperto occorre procedere con una trivellazione del terreno, nella quale verrà inserito un tubo in PVC, fenestrato, ovvero fessurato per una certa lunghezza; la fessurazione è in grado di permettere la circolazione delle acque sotterranee e nel contempo di bloccare l'eventuale ingresso di matrice fine. Nell'intorno del tubo viene depositato uno spessore di ghiaia, che ha la funzione di filtro. La lettura della quota piezometrica viene fatta con un freatimetro, ossia uno strumento costituito da un cavo contenente un circuito elettrico che emette un segnale luminoso od acustico quando si chiude a contatto con l'acqua. I filtri, possono essere:
 - **FILTRI A LOSANGA E FILTRI A PONTE:** sono caratterizzati da una fenestrazione non continua lungo il tubo [Fig. 3.1]. La dimensione del tratto fenestrato è dimensionata in base alla curva granulometrica specifica del terreno, in quanto non devono presentarsi problemi di ostruzione. La collocazione dei fori non permette una distribuzione vettoriale omogenea dei filetti idrici, che subiranno quindi una deviazione verso le aperture.

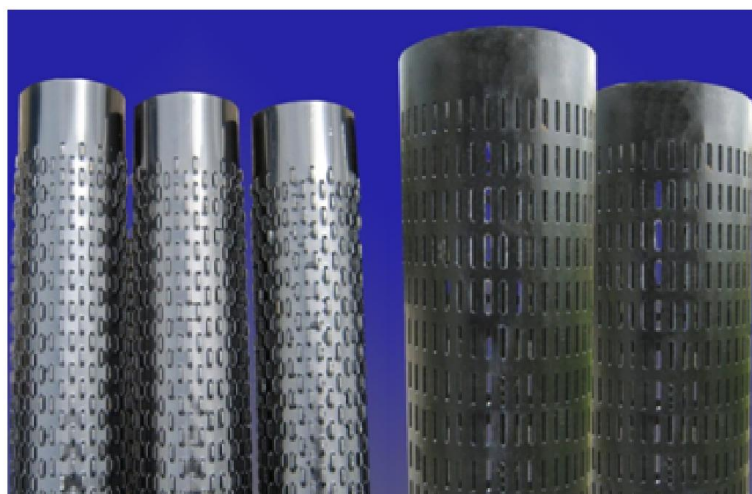


Fig.3.1: Da sinistra verso destra, filtri a ponte e filtri a losanga.

- FILTRO A SIPRALE, TIPO JOHNSON: viene considerato il migliore tra tutti, infatti i filetti idrici non vengono deformati durante la filtrazione, mantenendo una distribuzione lineare. I filtri Johnson, inoltre, subiscono una minore perdita di carico dovuta alla turbolenza.
- FILTRO MICRO FESSURATO IN PVC: si tratta di realizzazioni meno elaborate rispetto ai filtri a losanga, a ponte e Johnson, e sono rappresentati in Figura 3.2. Le fessure, sono analoghe a quelle realizzate nei filtri a Losanga ed a Ponte.



Fig.3.2: Filtro micro fessurato in PVC.

- CASAGRANDE: il piezometro Casagrande è costituito da un cilindro collegato ad un tubo aperto. La rilevazione viene effettuata misurando il livello di acqua nel tubo. Il tempo di risposta è abbastanza lungo (dell'ordine di qualche ora) e tende ad aumentare al diminuire della permeabilità del terreno; viene utilizzato per monitorare le pressioni neutre dei terreni che hanno una permeabilità indicativamente compresa tra valori di 1.00×10^{-5} m/s e 1.00×10^{-8} m/s.
- BAT: il piezometro BAT è una attrezzatura che permette il prelievo di campioni indisturbati di acque e gas presenti nel terreno, il calcolo della pressione dei pori e della permeabilità. La strumentazione BAT consiste in una semplice cella dotata di filtro poroso in plastica o ceramica e chiusa superiormente da una membrana di gomma rigida e resiliente. Viene utilizzato per il monitoraggio delle pressioni neutre quando il terreno ha una permeabilità inferiore a 1.00×10^{-8} m/s.

Nell'area oggetto di studio, nel 2013, sono stati realizzati 10 piezometri a tubo aperto profondi 10 metri, le cui caratteristiche sono riassunte in Tabella 3.1. Per la realizzazione dei piezometri è stato utilizzato un tubo micro fessurato in PVC del

diametro di 3". Nel seguito sono riportate le schede identificative dei piezometri realizzati, contenenti l'ubicazione e le principali caratteristiche di ciascuno di essi (All. 2), mentre la localizzazione dei piezometri è presentata in Figura 2.3.

ID	X [m]	Y [m]	L [mb.f.]	Z [m s.l.m.]
S1	1736113.37	5059391.46	1-10	26.27
S2A	1736218.04	5059116.13	1-10	25.773
S2B	1736220.01	5059114.72	1-10	25.833
S3A	1735507.08	5059612.37	1-10	27.29
S3B	1735508.64	5059610.88	1-10	27.31
S4	1736500.21	5058707.58	1-10	25.307
S5	1735055.96	5059689.92	1-10	27.91
S6	1734520.16	5060194.51	1-10	28.352
S7	1736531.67	5059275.25	1-10	24.86
S8	1737268.32	5058752.67	1-10	24.114

Tab. 3.1: Riassunto delle principali caratteristiche dei piezometri; X ed Y sono la rispettivamente la latitudine e la longitudine nel sistema di riferimento Gauss-Boaga, Roma 1940, Fuso Ovest; L è la profondità da boccaforo (b.f.) dall'inizio alla fine del filtro; Z è la quota del boccaforo.

Sono stati realizzati, oltre a quelli già descritti, anche altri quattro piezometri, indicati con la sigla GBF e collocati nell'area del Gran Bosco dei Fontanassi.

3.2 FREATIMETRO

Il freatimetro è uno strumento che viene utilizzato per la misurazione della soggiacenza, cioè la profondità alla quale si trova la tavola d'acqua rispetto al piano campagna o un punto di riferimento all'interno di un piezometro (Fig 3.3). Il freatimetro è costituito da cordella metrica, con una sensibilità generalmente di 0.01 m, ed un sensore in punta, che a contatto con l'acqua chiude un circuito elettrico, provocando l'emissione un segnale acustico o luminoso.



Fig. 3.3:Freatimetro con cordella metrica calato durante una misurazione della soggiacenza.

3.3 DATA-LOGGER

I sensori utilizzati per la registrazione dei parametri durante le prove di diluizione e tracciamento sono dei CTD-DIVER realizzati da Schlumberger Water Service. Si tratta di sonde in cui il data-logger per la registrazione dei dati, la batteria per l'alimentazione ed i sensori per la misura dei parametri sono alloggiati in un cilindro metallico immergibile di dimensioni estremamente contenute. Con i CTD-DIVER è possibile registrare la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), la conducibilità elettrica specifica a 25°C (SpCE in mS/cm) e la pressione esercitata dalla colonna d'acqua che sovrasta la sonda (in cm) secondo un tempo di acquisizione definibile dall'utente a partire da 1 secondo. Le principali caratteristiche dei CTD-DIVER sono riassunte in Tabella 3.2, mentre in Figura 3.4 è possibile apprezzare la compattezza di tale sensore.

MISURE	18-22 x 135 mm
MEMORIA	48000 MISURE PER CANALE(NON VOLATILE)
FREQUENZA DI CAMPIONAMENTO	da 1 sec a 99 ore
MATERIALE	CERAMICO (ZrO ₂)
SENSORE	CERAMICO (Al ₂ O ₃)
SENSORE DI CONDUCIBILITA'	PLATINO E CERAMICA
BATTERIA	MASSIMO 10 anni
PESO	95 g
TEMPERATURA	DA -20 a 80°C
ACCURATEZZA NELLA MISURA DI TEMPERATURA	±0.1 °C
RISOLUZIONE NELLA MISURA DI TEMPERATURA	0.01 °C
COMPENSATO	da 0 a 50 °C
CONDUCIBILITA'	da 10 uS/cm a 120 mS/cm
ACCURATEZZA NELLA MISURA DI CONDUCIBILITA'	± 1% DELLA LETTURA
RISOLUZIONE NELLA MISURA DI CONDUCIBILITA'	± 0.1% DELLA LETTURA

Tab. 3.2: Principali caratteristiche del CTD-DIVER.



Fig.3.4: Data-Logger CTD-DIVER utilizzato per l'acquisizione durante le prove di diluizione e tracciamento.

3.4 TRASPORTO NEI MEZZI POROSI SATURI

Prima di descrivere le prove di diluizione e tracciamento è necessario introdurre quali sono i principi che regolano il trasporto dei soluti nei mezzi porosi saturi.

Innanzitutto si può definire la velocità di filtrazione (o reale) che essendo derivata dalla legge di Darcy è data da:

$$v_f = K \times \frac{i}{n_e} \quad [1]$$

V_f = velocità della particella d' acqua all' interno del mezzo [m/s].

K = conducibilità idraulica [m/s].

i = gradiente idraulico, definito anche come $\partial h/\partial l$, dove h è il carico idraulico ed l è la distanza.

n_e = porosità efficace.

Diversi sono i processi che agiscono durante il trasporto dei soluti nei mezzi porosi saturi, in particolare è necessario citare:

- l'advezione;
- la dispersione idrodinamica, dovuta alla dispersione meccanica e alla diffusione molecolare;
- l'adsorbimento;
- la degradazione.

Nel seguito vengono brevemente descritti i principali processi che regolano la concentrazione di un soluto in un mezzo poroso saturo.

3.4.1 ADVEZIONE

L'advezione, o convezione è un fenomeno di trasporto passivo nel quale la particella di soluto si muove ad una velocità lineare pari a quella media di filtrazione della falda (v_f). Per effetto della sola componente advettiva la concentrazione C_0 del tracciante non muta nello spazio e nel tempo [Fig. 3.5 e Fig.3.6].

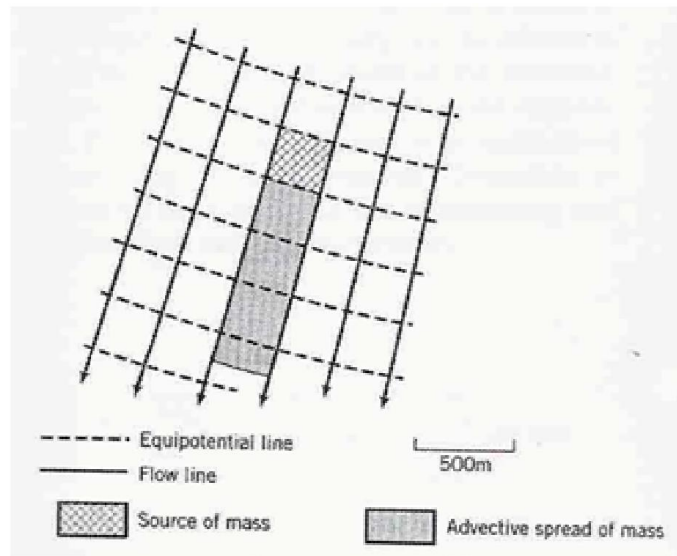


Fig.3.5: Rappresentazione del flusso in condizioni di trasporto advettivo, separazione netta tra soluto e solvente (Domenico & Schwartz, 1998).

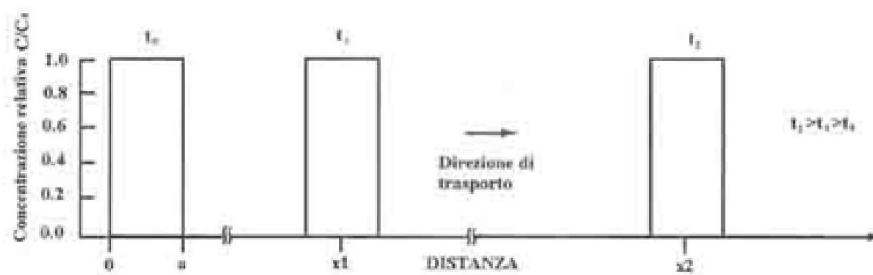


Fig.3.6: Rappresentazione della variazione di concentrazione C_0 in funzione della distanza, in condizione di trasporto advettivo, essa non varia (Domenico & Schwartz, 1998).

L'equazione generale del trasporto di un soluto per pura advezione, può essere ricavata dall'equazione di continuità:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v_x \times \frac{dC}{dx} \quad [2]$$

C = concentrazione [g/m^3].

v_f = velocità di filtrazione [m/s].

dC/dx = gradiente di concentrazione [g/m^4].

Il flusso advettivo F_x nel caso monodimensionale si può definire come il prodotto tra la quantità di acqua che fluisce nel tempo attraverso una superficie unitaria, moltiplicata per la concentrazione C_0 .

$$F_x = v_f \times n_e \times C_0 \quad [3]$$

La componente advettiva del trasporto è il principale vettore dei soluti nelle acque sotterranee.

3.4.2 DISPERSIONE MECCANICA

E' dovuta al fatto che le singole particelle di soluto, all'interno del mezzo poroso, si muovono con velocità e traiettorie diverse da quelle rappresentate dalla media; pertanto tale fenomeno è da attribuirsi ad una causa cinematica piuttosto che chimica.

Le cause che determinano la dispersione meccanica (D), sono da ricercare innanzitutto nelle diverse dimensioni dei pori, che determinano traiettorie differenti durante l'attraversamento del medesimo volume di mezzo poroso. In secondo luogo, le superfici dei grani sono caratterizzate da attrito, che provoca una diminuzione della velocità in corrispondenza della superficie di contatto e determina un gradiente tra il centro ed i bordi del poro. In ultimo la disposizione dei grani è un fattore di notevole importanza, in quanto il grado di impacchettamento delle particelle solide incide sulla tortuosità dei percorsi di flusso diminuendo la velocità [Fig. 3.7].

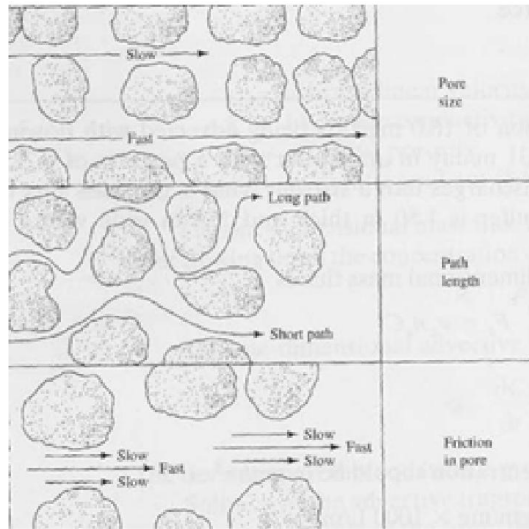


Fig. 3.7: Traiettorie percorse dal fluido attraverso un mezzo poroso (Fetter, 1993).

Trattandosi di un fenomeno cinematico, la dispersione meccanica avviene quando la velocità dell'acqua è maggiore di zero, in caso contrario il suo contributo è nullo.

In uno spazio bidimensionale è possibile scindere due componenti di D , una componente longitudinale, detta dispersione longitudinale D_L ed una componente trasversale detta dispersione trasversale D_T . Allo stesso modo, nelle 3 dimensioni, è possibile definire anche la componente verticale della dispersione (D_z).

La dispersione è funzione della velocità di filtrazione secondo le relazioni:

$$D_L = \alpha_L \times v_f \quad [4]$$

$$D_T = \alpha_T \times v_f \quad [5]$$

α_L = dispersività longitudinale [m].

α_T = dispersività trasversale [m].

v_f = velocità media lineare di filtrazione [m/s].

La dispersività è una proprietà legata alle caratteristiche intrinseche del mezzo ma non può essere considerata una costante in quanto è legata alla scala di osservazione del fenomeno. Nelle prove di laboratorio, infatti, il valore di α è solitamente dello stesso ordine di grandezza della dimensione dei granuli, mentre aumentando la scala spaziale

vi è un notevole incremento della dispersività, in quanto il soluto ha possibilità progressivamente maggiori di interagire con le eterogeneità del mezzo poroso.

Secondo Gelhar et al., 1985, per scale di sito molto grandi la dispersività può assumere valori asintotici [Fig. 3.8], secondo la relazione:

$$\alpha = 0.1 \times L_{SCALA} \quad [6]$$

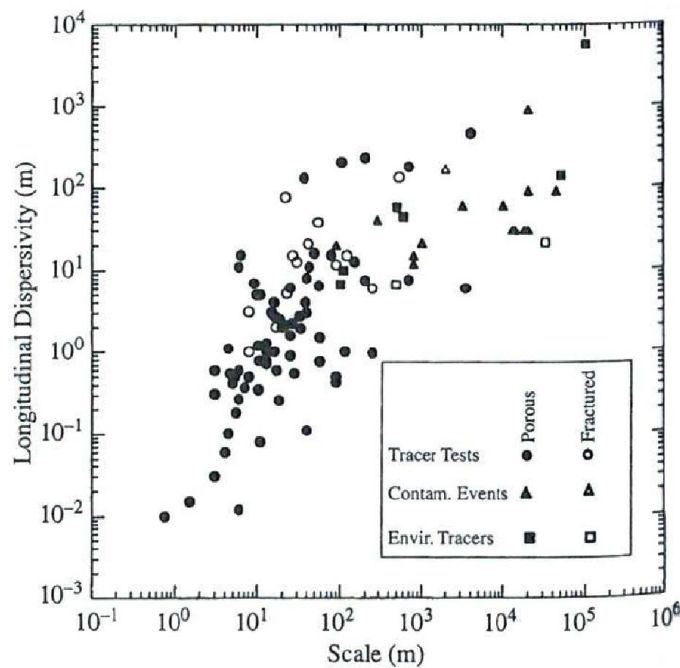


Fig. 3.8: Variazione della dispersività con l'aumento della scala (Gelhar et al., 1985).

3.4.3 DIFFUSIONE MOLECOLARE

Il fenomeno della diffusione molecolare, si viene a generare quando è presente un gradiente di concentrazione (Moto Browniano).

La legge che regola la diffusione molecolare è la Legge di Fick:

$$F = -D_m \times \frac{\partial C}{\partial x} \quad [7]$$

F = flusso di massa di soluto [g/m²s].

D_m = coefficiente di diffusione molecolare [m²/s].

$\partial C/\partial x$ = gradiente di concentrazione [g/m^4].

Il segno "-" indica che il flusso è diretto dalle zone a concentrazione maggiore verso quelle a concentrazione minore. La diffusione molecolare non è collegata alla velocità del fluido ma dipende unicamente dal gradiente di concentrazione.

In Figura 3.9 è mostrato il comportamento della diffusione in un caso di iniezione puntuale.

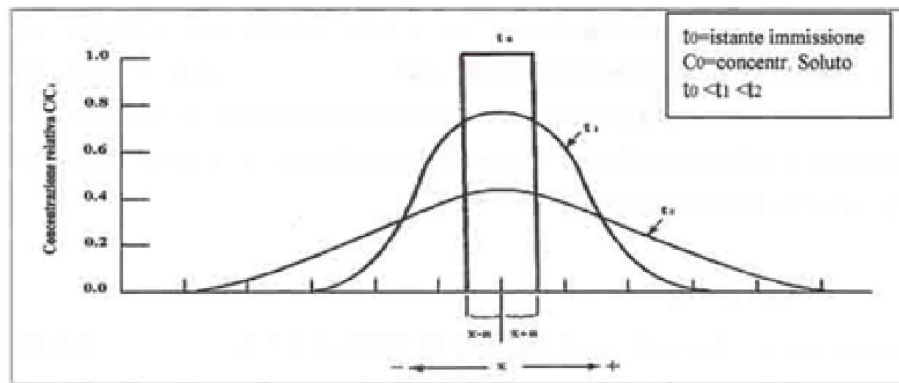


Fig. 3.9: Diffusione molecolare partendo da una concentrazione C_0 in un tempo t_0 . Con l'aumentare del tempo, la concentrazione diminuisce ed il soluto "diffonde" su una superficie maggiore rispetto a quella iniziale.

3.4.4 DISPERSIONE IDRODINAMICA

La dispersione idrodinamica (D_I), si può esprimere come la somma tra la diffusione molecolare (D_m) e la dispersione meccanica (D') ed analogamente alla dispersione meccanica, si possono distinguere una dispersione idrodinamica longitudinale ed una dispersione idrodinamica trasversale, espresse dalle relazioni:

$$D_{IL} = \alpha_L \times v_f + D_m \quad [8]$$

$$D_{IT} = \alpha_T \times v_f + D_m \quad [9]$$

D_{IL} = coefficiente di dispersione idrodinamica longitudinale [m^2/s].

D_{IT} = coefficiente di dispersione idrodinamica trasversale [m^2/s].

Il processo di dispersione idrodinamica agisce con l'advezione nel trasporto di una massa di soluto entro il mezzo poroso saturo.

La combinazione dei due fenomeni comporta una diminuzione delle concentrazioni di picco ed un aumento del volume coinvolto dalla presenza di soluto, rispetto al caso di trasporto esclusivamente advettivo [Fig. 3.10].

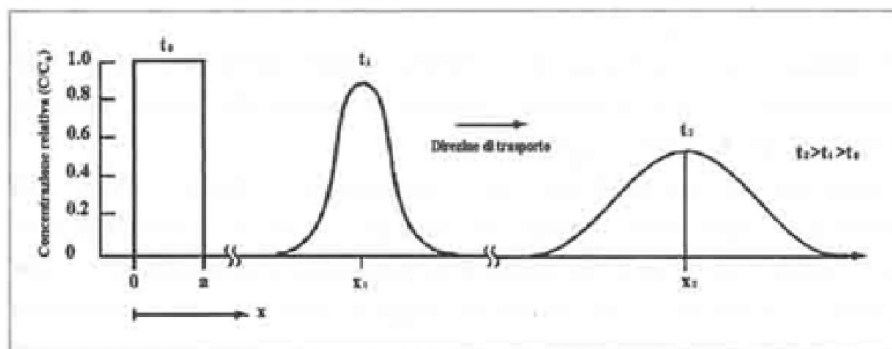


Fig. 3.10: Combinazione del moto advettivo e dispersivo idrodinamico (Fetter, 1993).

L'equazione del trasporto che tiene conto dei fenomeni advettivo e dispersivo, nel caso monodimensionale, è data da:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{IL} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad [10]$$

Il risultato finale è un'evoluzione della massa del soluto nello spazio e nel tempo [Fig.3.11].

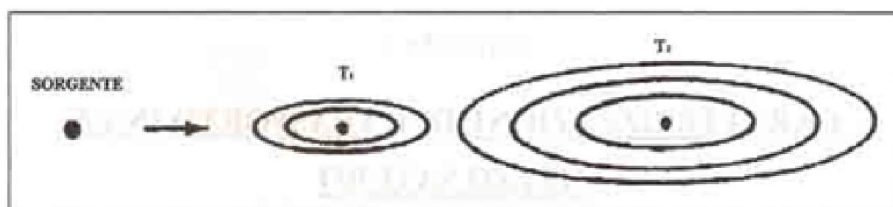


Fig.3.11: Rappresentazione del fenomeno di advezione e dispersione idrodinamica nello spazio bidimensionale e nel tempo a partire da una sorgente di tipo puntuale (Domenico & Schwartz,1998).

3.4.5 FATTORI RITARDANTI

Sono dei fenomeni che rallentano il movimento della sostanza immessa e possono appartenere a due categorie:

- Fenomeni di ritardo fisico: fenomeni di filtrazione e separazione fisica del soluto causati dalla struttura della matrice solida;
- Fenomeni di ritardo chimico-biologico: generati dall'interazione tra il soluto, la matrice solida ed eventuali sostanze in sospensione nell'acqua. Ne sono un esempio lo scambio ionico, la dissoluzione, le reazioni chimiche e biochimiche, il decadimento radioattivo e l'adsorbimento.

3.5 TRACCIANTI

Per tracciante si intende un soluto di origine naturale od artificiale che una volta immesso in falda permette di acquisire informazioni circa il percorso e la velocità entro il mezzo poroso. In funzione della tipologia di immissione e delle condizioni idrogeologiche attraverso l'uso dei traccianti possono essere stimati: la direzione di flusso, la velocità di filtrazione (v_f), la porosità efficace (n_e), la conducibilità idraulica (K) e la dispersività (α).

Questi parametri concorrono alla caratterizzazione idrogeologica del mezzo poroso i cui campi di applicazione spaziano attraverso tutti quei settori in cui la conoscenza del comportamento idrogeologico del sottosuolo è indispensabile: dalla bonifica ambientale, dove è opportuno stimare l'evoluzione di un plume al fine di identificare potenziali bersagli, attraverso la realizzazione di opere di prelievo per scopi idropotabili, fino alla realizzazione ed al collaudo di opere di drenaggio o di barriere impermeabili.

Nella scelta del tipo di tracciante, devono essere presi in considerazione i seguenti aspetti:

- litologia: a seconda del materiale geologico, ci saranno risposte differenti per quanto riguarda la mobilità del tracciante. Inoltre, strettamente collegata alla litologia è la porosità, esposta dalla formula:

$$n = \frac{v_{vuoti}}{v_{totale}} \quad [11]$$

con valori maggiori di porosità la velocità di flusso aumenta, per cui durante la progettazione di una prova di tracciamento bisogna tenere conto di questo aspetto;

- presenza di fondo del tracciante: se il tracciante è naturalmente presente in falda la sua concentrazione di fondo deve essere bassa al fine di evitare che la diluizione renda la sostanza non più rilevabile presso il punto di interesse;
- mobilità: un tracciante: per poter essere considerato conservativo dovrebbe essere stabile, solubile, avere densità e viscosità simili a quelli dell'acqua e non essere soggetto a precipitazione ed adsorbimento;
- tossicità: al fine di evitare la contaminazione della falda e le interferenze con gli utilizzi delle acque sotterranee, andrebbero utilizzati traccianti non tossici. Anche se una sostanza è tossica può, in taluni casi, essere utilizzata in concentrazioni inferiori ai limiti di legge.

3.5.1 TIPOLOGIE DI TRACCIANTI

I traccianti si possono distinguere in base alle loro caratteristiche chimiche, fisiche, biologiche ed in funzione dell'interazione con le proprietà idrogeologiche del mezzo.

Una prima distinzione può essere fatta tra i traccianti naturali ed artificiali:

- naturale: si tratta di tutte quelle sostanze che sono già naturalmente presenti nelle acque sotterranee;
- artificiale: si tratta di tutte le sostanze che non sono naturalmente presenti nelle acque sotterranee; durante il loro impiego devono essere rispettati i dettami del D.Lgs.152/2006.

I traccianti artificiali sono suddivisi in: radioattivi e stabili. Una sostanza è stabile quando è composta da elementi in cui il rapporto tra il numero dei neutroni e quello dei protoni è pari o prossimo all'unità, viceversa le sostanze radioattive sono composte da elementi in cui il rapporto tra il numero di neutroni e protoni è diverso da uno. Un tracciante stabile solitamente è meno rilevabile di un tracciante radioattivo, ma viene prediletto grazie ai costi minori, la non-radiotossicità e l'assenza di limitazioni al suo impiego.

Le caratteristiche che dovrebbe possedere un tracciante ideale sono:

- assente (o in basse concentrazioni) nell'acqua;
- non si degrada;
- non altera le proprietà dell'acqua;
- non altera le proprietà dell'acquifero;
- non essere tossico o nocivo per l'ambiente;
- alta solubilità;
- facile immissione e maneggiabilità;
- facile rilevabilità;
- economicità.

Tra i traccianti stabili possono esserne distinte due tipologie: traccianti fluorescenti e traccianti salini. I traccianti fluorescenti, sono sostanze organiche artificiali con un gruppo aromatico che ne determina la fluorescenza (proprietà di riemettere un fotone dopo aver assorbito luce visibile o ultravioletta). Essendo rarissimi i casi di fluorescenza naturale delle acque, si possono rilevare concentrazioni bassissime (fino a 10^{-3} $\mu\text{g/l}$). Gli aspetti positivi delle sostanze fluorescenti, sono:

- alta solubilità;
- visibili ad occhio nudo ad alte concentrazioni;
- relativamente economici (50-200 €/kg);
- non tossici a basse concentrazioni;
- facilmente rilevabili, occorre poca massa.

Gli aspetti negativi, sono invece:

- adsorbimento nelle argille;
- influenza del pH sulla fluorescenza;
- fotosensibilità;
- colorazione che rientri nel campo del visibile;
- analitica complessa e delicata.

I traccianti salini sono composti inorganici molto solubili in acqua e molto stabili (adsorbimento e degradazione sono trascurabili), tra i più importanti si citano: il cloruro di Sodio NaCl ed il cloruro di Litio LiCl. Un tracciante di natura salina può essere

rilevato in acqua in modo indiretto grazie ad all'aumento della conducibilità elettrica (CE). Gli aspetti positivi dell'utilizzo di traccianti salini sono:

- alta solubilità;
- conservatività;
- economicità;
- non tossici a basse concentrazioni;
- facile rilevabilità.

Gli aspetti negativi sono invece:

- presenza dello ione Cl^- anche in natura (background);
- ad alte concentrazioni i sali possono alterare la densità del sistema e quindi modificare la rete di flusso.

In Tabella 3.3 vengono riepilogati i principali traccianti naturali ed artificiali.

Traccianti naturali	Traccianti iniettati		
Isotopi stabili	Radioattivi	Attivi	Inattivi
Deuterio	Tritium	Bromuro-35	Sostanze ioniche
Ossigeno-18	Bromuro-32	Iodio-39	Sali di cloro
Carbonio-12	Cromo-51	Manganese-25	Sali di bromuro
Carbonio-13	Cobalto-58	Lantanio-57	Sali di iodio
Nitrogeno-14	Cobalto-60	Disprosio-68	Sostanze non ioniche
Nitrogeno-15	Oro-198		Difluorobenzoato
Stronzio-88	Iodio-131		Fluorobenzene
Solfuro-32	Krypton-85 (gas)		Solfuro esafluoruro
Solfuro-34	Fosforo-32		Coloranti fluorescenti
Solfuro-36	Sodio-24		Fluoresceina
Isotopi radioattivi	Xeno-133 (gas)		Rodamina WT
Tritium			Acido Rosso 87
Carbonio-14			Reagenti ottici
Silicio-32			Tinopal 5Bm6x
Cloruro-36			Giallo 96
Argon-37			Acido Giallo 7
Argon-39			Amidorodamina 6
Krypton-81			Gas
Krypton-85			Elio Argon
Bromuro-32			Neon
Radon-222			Krypton
Gas			Xenio
Fluorocarbonio			Monossido di carbonio
			Ossido nitroso

Tab. 3.3: Principali traccianti naturali ed artificiali.

3.6 PROVE DI DILUIZIONE (SINGLE WELL)

Le prove di diluizione single well prevedono l'utilizzo di un singolo piezometro. La tecnica consiste nell'iniettare in un pozzo o piezometro una determinata quantità di tracciante e di monitorare, nel medesimo punto, l'andamento della sua concentrazione nel tempo. Una volta iniettato il tracciante, infatti, subisce una progressiva diluizione da parte del flusso di falda che è legato alla velocità orizzontale delle acque sotterranee nell'intorno del punto di misura.

In Figura 3.12 è presentato il tipico decremento di conducibilità elettrica specifica a 25°C (SpCE) registrabile con una prova di diluizione con tracciante salino. Nello specifico si tratta della prova realizzata nel piezometro S1 in data 01/07/2013.

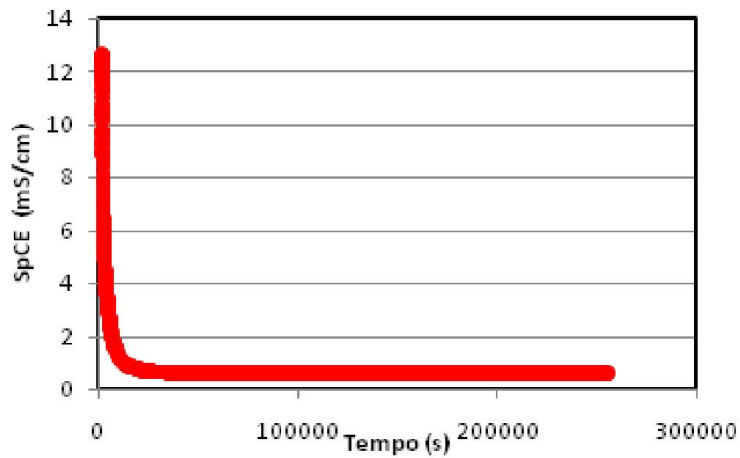


Fig.3.12: Esempio di prova di diluizione, andamento esponenziale t(s)vs SpCE(mS/cm) eseguita usando NaCl.

Lo sviluppo teorico della tecnica di diluizione single well prevede le seguenti ipotesi di base (Moser et al., 1957; Dal Prà & Sottani, 1995):

- regime stazionario e linee di flusso orizzontali;
- tracciante omogeneamente distribuito nel tratto di piezometro che si vuole indagare;
- flusso laminare.

L'equazione differenziale sviluppata da Ogilvi (1958) che permette di descrivere la variazione di concentrazione nel tempo durante una prova di diluizione è data da:

$$\frac{dC}{dt} = -Sv_a \frac{C}{V} \quad [12]$$

C = concentrazione [g/m^3].

T = tempo [s].

S = area della sezione ortogonale alle linee di flusso [m^2].

v_a = velocità apparente [m/s].

V = volume di fluido coinvolto nella diluizione [m^3].

Integrando l'equazione differenziale, si ottiene:

$$\int \frac{dc}{c} = -S \frac{v_a}{v} \int dt + c \quad [13]$$

e quindi la relazione:

$$\ln C = -\frac{Sv_a}{v} t + c \quad [14]$$

Per un'iniezione istantanea, le condizioni iniziali, saranno:

$$t = 0$$

$C = C_0$ e cioè la concentrazione iniziale al momento dell'immissione [g/m³].

Sostituendo tali condizioni alla [14], ottengo la relazione [15]:

$$c = \ln C_0 \quad [15]$$

che diventa:

$$\ln \frac{C}{C_0} = -\frac{Sv_a}{v} t \quad [16]$$

Si può tenere conto della presenza di una concentrazione di background C_b attraverso la relazione:

$$\ln \frac{C-C_b}{C_0-C_b} = -\frac{Sv_a}{v} t \quad [17]$$

I rapporti tra la concentrazione al tempo t e la concentrazione iniziale se plottati su un grafico logaritmico in funzione del tempo si dispongono lungo una retta, la cui pendenza è della proporzionale alla velocità apparente (v_a). Applicando le regole dei logaritmi posso riscrivere la [17] nella forma:

$$e^{\ln \frac{C-C_b}{C_0-C_b}} = e^{-\frac{Sv_a}{v} t} \quad [18]$$

Che semplificata diventa:

$$\frac{c-c_b}{c_0-c_b} = e^{-\frac{sv_a t}{V}} \quad [19]$$

Questa relazione descrive la variazione della concentrazione al variare del tempo. Si tratta di una funzione esponenziale che può essere risolta per v_a . La velocità apparente v_a , ricavata dalla formula [16] sarà quella espressa in:

$$v_a = -\frac{V}{st} \ln \frac{c-c_b}{c_0-c_b} \quad [20]$$

Nella realtà la velocità apparente dipende da diversi fattori (Drost et al., 1968), per cui la relazione generale è:

$$v_a = \alpha v_d + v_h + v_s + v_m + v_c \quad [21]$$

dove:

α = coefficiente di distorsione legato alle modificazioni della rete di flusso dovute al passaggio attraverso il tratto filtrato dei piezometr.

v_d = velocità di Darcy.

v_h = velocità apparente, indotta dalla convezione, dovuta alla diversa densità del tracciante.

v_s = velocità apparente, dovuta ai moti verticali all' interno del pozzo.

v_m = velocità apparente legata al mescolamento artificiale.

v_c = velocità apparente dovuta al fenomeno intrinseco di diffusione.

In condizioni ottimali la velocità apparente è pari al prodotto tra la velocità di Darcy ed un coefficiente di distorsione, secondo:

$$v_a = \alpha v_d \quad [22]$$

E pertanto sostituendo la formula[22] alla [20] ottengo:

$$v_d = -\frac{V}{St\alpha} \ln \frac{c-c_b}{c_0-c_b} \quad [23]$$

Infine, attraverso la porosità efficace (n_e) è possibile determinare la velocità reale o di filtrazione (v_f):

$$v_f = \frac{v_d}{n_e} \quad [24]$$

Il coefficiente α è un parametro, detto coefficiente di distorsione, che tiene conto del restringimento dei filetti idrici in corrispondenza dei filtri del piezometro. Secondo Gaspar (1987) tale parametro solitamente varia tra 0 ed 8, ma può essere anche stimato in modo sito-specifico usando la formula di Ogilvi (1958).

$$\alpha = \frac{4}{1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{K}{K_1} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]} \quad [25]$$

r_1 = raggio interno del pozzo [m].

r_2 = raggio esterno del pozzo [m].

K = permeabilità dell' acquifero [m/s].

K_1 = permeabilità del filtro [m/s].

I valori di permeabilità dei filtri sono stati tabulati da Klotz (1978) per le varie tipologie di filtri. Indagini sperimentali hanno permesso di affermare che quando $K_1 \gg K$, il valore α è pari a 2 (Gaspar, 1987).

3.7 PROVE DI TRACCIAMENTO (MULTIWELL)

Le prove di tracciamento multiwell sono delle prove che prevedono l'utilizzo di almeno due pozzi o piezometri, il primo per l'immissione del tracciante e gli altri, posti a valle, per il monitoraggio dell'andamento della concentrazione nel tempo [Fig. 3.13]. Si distinguono due differenti tipologie di prove, quelle a gradiente naturale, e quelle a gradiente forzato. Le prove a gradiente naturale, consistono nell'iniezione di un tracciante al piezometro di monte che si muoverà in falda influenzato dal gradiente

senza alcun intervento atto alla sua modificazione. Le prove a gradiente forzato, consistono invece nell'iniettare il tracciante al piezometro di monte ed estrarre con l'ausilio di pompe meccaniche acqua dal piezometro di valle, in modo da deprimere la tavola d'acqua ed aumentare il gradiente.

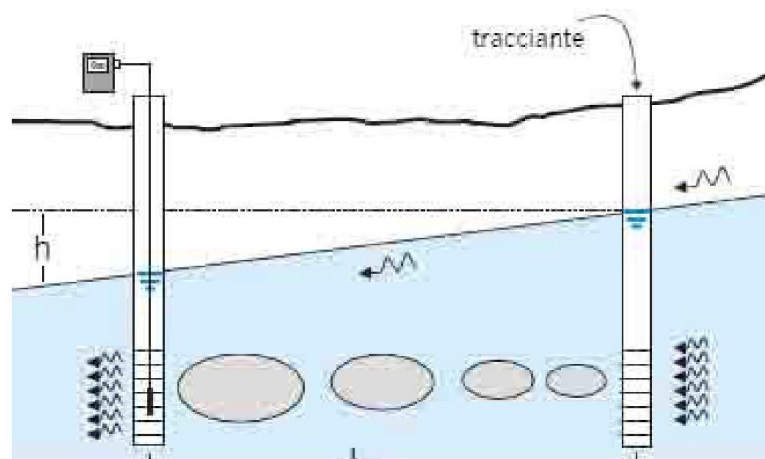


Fig. 3.13: Movimento del plume di soluto da destra verso sinistra, con immissione del tracciante dal punto più a monte.

Sono già stati introdotti i principi che regolano il trasporto dei soluti nei mezzi porosi saturi, si tratta degli stessi fenomeni che regolano la distribuzione spaziale del tracciante e l'andamento della sua concentrazione nel tempo (curva di restituzione o breakthrough curve). I parametri idrogeologici che si possono stimare da questo tipo di prove sono: la velocità reale media della falda (v_f), la dispersività (α) e la porosità efficace (n_e). I fenomeni di dispersione idrodinamica ed advezione concorrono alla variazione della concentrazione del tracciante nello spazio e nel tempo, regolando il tempo di arrivo. La curva che si ottiene dal/dai piezometro/i di valle durante una prova di tracciamento prende il nome di curva di curva di restituzione (breakthrough curve). A differenza della prova di diluizione su pozzo singolo, con cui si ricavano informazioni sull'intorno del pozzo o piezometro di prova, con la prova di tracciamento multiwell viene investigata la porzione di acquifero compresa tra i punti di iniezione ed arrivo.

Un tecnica per la stima della velocità media è il metodo dei momenti che prevede, per un'iniezione istantanea, la validità della seguente relazione:

$$v_m = \frac{\int_0^{\infty} \frac{x_s}{t} Q(t) C(t) dt}{\int_0^{\infty} Q(t) C(t) dt} \quad [26]$$

dove il parametro x_s si può esprimere secondo:

$$x_s = S_d x \quad [27]$$

Mentre nel caso di rilascio continuo, la formula che definisce la velocità di filtrazione media è data da:

$$v_m = \frac{x_s}{\int_0^{\infty} [1-F(t)] dt} \quad [28]$$

con:

v_m =velocità media [m/s].

S_d =parametro legato alla tortuosità e compreso tra 1 e 3.

Q =portata [l/s].

C =concentrazione [mg/l].

$F(t)$ = rapporto tra la concentrazione registrata in un determinato momento $C(t)$ e quella di picco C_p .

3.8 PROVE ESEGUITE SUL CAMPO

Nell'area di studio sono state realizzate due tipologie di diluzioni: (1) diluzioni senza l'ausilio di packers, in cui la soluzione salina è stata omogeneizzata su tutta la colonna d'acqua al momento dell'iniezione; (2) diluzioni con l'ausilio di packers, in cui la prova ha riguardato un tratto isolato di piezometro di lunghezza pari a circa 0.4 m. Laddove sono presenti doppiette, quindi due piezometri a distanza ravvicinata, assieme alle diluzioni sono state realizzate anche prove di tracciamento a gradiente naturale. Le prove combinate di diluzione/tracciamento hanno previsto l'iniezione della salamoia nel piezometro di monte (con o senza packers) ed il monitoraggio in continuo dell'andamento della concentrazione nello stesso piezometro (curva di scarico) e nel

piezometro di valle (curva di restituzione). Tutte le prove di diluizione con packers sono state realizzate in modo combinato.

Nel dettaglio sono state eseguite 4 prove di diluizione/tracciamento con l'utilizzo di packers al fine di isolare il tratto di iniezione, rendere più agevole l'omogeneizzazione della soluzione salina e prevenire l'insorgere di moti verticali entro il piezometro stesso. In Tabella 3.4 sono riassunte le principali caratteristiche di ciascuna prova.

DOPPIETTA	DATA	PROF.M. [m b.f.]	PROF.V. [m b.f.]	V H ₂ O [l]	NaCl [Kg]
S3A-S3B	16/07/2013	1.5	1.5 & 3.5	10.0	0.250
S3A-S3B	05/09/2013	3.5	3.5 & 5.5	5.1	0.175
S3A-S3B	27/09/2013	5.5	5.5 & 6.5	5.1	0.125
S3A-S3B	01/08/2013	7.5	7.5 & 9.5	5.1	0.125

Tab.3.4: Riepilogo delle prove di diluizione/tracciamento realizzate con l'ausilio di packers;

PROF. M. è la profondità in m da boccaforo[b.f.] a cui è stato posizionato il sensore per la registrazione della curva di scarico; PROF.V. è la profondità in m b.f. a cui è stato posizionato il sensore per la registrazione della curva di restituzione; V H₂O è la quantità(in l) di salamoia iniettata; NaCl è la massa (in Kg) di cloruro di sodio disciolta.

Inoltre sono state fatte due prove di diluizione senza l'utilizzo dei packers, le cui caratteristiche sono riassunte in Tabella 3.5.

DOPPIETTA	DATA	PROF. M [m b.f.]	PROF.V[m b.f.]	V H ₂ O [l]	NaCl [Kg]
S3A-S3B	06/06/2013	2.85	4.43	15	1.0
S2A-S2B	01/07/2013	5.22	5.22	20	1.5

Tab.3.5: Riepilogo delle prove di diluizione/tracciamento realizzati senza l'ausilio di packers;

PROF. M. è la profondità in m b.f. a cui è stato posizionato il sensore per la registrazione della curva di scarico; PROF.V. è la profondità in m b.f. a cui è stato posizionato il sensore per la registrazione della curva di restituzione; V H₂O è la quantità(in l) di salamoia iniettata; NaCl è la massa (in Kg) di cloruro di sodio disciolta.

Le caratteristiche con le quali sono stati impostati i Data-logger, invece, vengono riassunte in Tabella 3.6.

PIEZOMETRO	DATA	PACKERS	TRACCIAMENTO	TEMPO [s]
S1	01/07/2013	NO	NO	15
S2A	01/07/2013	NO	SI	15
S2B	04/07/2013	NO	NO	15
S3A	06/06/2013	NO	SI	15
S3B	14/07/2013	NO	NO	15
S4	04/07/2013	NO	NO	15
S5	27/06/2013	NO	NO	15
S6	14/07/2013	NO	NO	15
S8	28/06/2013	NO	NO	15
S3A	16/07/2013	SI	SI	10
S3A	05/09/2013	SI	SI	10
S3A	27/09/2013	SI	SI	10
S3A	01/08/2013	SI	SI	10

Tab. 3.6: Riepilogo delle prove di diluizione e diluizione/tracciamento realizzate e tempi di acquisizione utilizzati.

3.8.1 PROVE DI DILUIZIONE SENZA PACKERS

Le prove che sono state eseguite su campo hanno previsto la realizzazione di prove di diluizione in tutti i piezometri e di prove abbinate di diluizione/tracciamento in corrispondenza delle doppiette: S2A-S2B ed S3A-S3B. In quest'ultimo caso le prove di diluizione realizzate nei piezometri di monte (S2A ed S3A) sono servite come iniezione per altrettante prove di tracciamento a gradiente naturale, in cui la curva di restituzione è stata ricostruita nei piezometri di valle (S2B ed S3B).

La prova di diluizione, come già ampiamente spiegato, permette di ottenere risultati rappresentativi di un piccolo intorno del piezometro, mentre con la prova di tracciamento viene investigata la porzione di acquifero tra i due o più piezometri utilizzati.

Operativamente le prove di diluizione sono state eseguite in ogni piezometro usando come tracciante una soluzione di cloruro di sodio (NaCl). La quantità di NaCl è iniettata è stata ottimizzata in corso d'opera in funzione dei risultati delle prime prove realizzate.

Le fasi operative eseguite per l'esecuzione di ciascuna prova di diluizione possono essere riassunte in:

- emungimento di un volume di acqua, utilizzata per lo scioglimento del cloruro di sodio in un apposito contenitore. Per l'emungimento dell'acqua è stata utilizzata una pompa ad immersione alimentata da una batteria a 12V;
- scioglimento del cloruro di sodio in acqua fino all'ottenimento di una salamoia omogenea; per questa operazione occorre molta attenzione, infatti, se il cloruro di sodio non fosse completamente sciolto si otterrebbe lo svantaggio di iniettare in falda una soluzione la cui concentrazione non corrisponde a quella calcolata sulla base delle quantità note di soluto e solvente;
- utilizzo della pompa ad immersione e di un tubo con tratto fenestrato, per iniettare la salamoia all'interno del piezometro, cercando di omogeneizzare il più possibile la colonna d'acqua. L'omogeneizzazione si ottiene muovendo ripetutamente il tubo lungo la verticale, dal basso verso l'alto e viceversa, mantenendo una velocità di discesa/ascesa il più possibile costante. Al termine dell'iniezione, si esegue di un log di conducibilità elettrica specifica (SpCE) nel piezometro per verificare il grado di omogeneizzazione e quindi per valutarne la qualità. Per eseguire questa operazione, viene utilizzato il Data-Logger che successivamente sarà usato per il monitoraggio della curva di scarico entro il piezometro. L'intervallo di acquisizione durante il log di CE, ma anche successivamente durante il monitoraggio della curva di scarico, è di 15s;
- posizionamento del Data-Logger ad una profondità prestabilita;
- registrazione del decremento di SpCE/concentrazione (curva di scarico) per il tempo necessario al ripristino dei valori di fondo naturale;
- recupero del Data-Logger ed elaborazione dei dati.

La fase di elaborazione dei dati prevede innanzitutto la realizzazione di grafici con la conducibilità elettrica specifica a 25°C (SpCE in mS/cm) in ordinata ed il tempo (t) in ascissa. In Figura 3.12 è mostrato l'andamento di una curva di scarico realizzata nel piezometro S1 il 01/07/2013.

Successivamente, i dati di SpCE vengono trasformati in concentrazione di NaCl, attraverso la relazione sperimentale:

$$C_{NaCl} = a(SpCE)^2 \times bSpCE \quad [29]$$

C_{NaCl} = concentrazione di NaCl in g/l.

$SpCE$ = conducibilità elettrica a 25°C [mS/cm].

a = costante, il cui valore è 1.948183×10^{-3} .

b = costante, il cui valore è $5.39981221 \times 10^{-1}$.

Dall'andamento dei valori di concentrazione nel tempo, attraverso la relazione [29] è possibile a questo punto ricavare la retta dalla quale deriva la velocità apparente v_a .

Il coefficiente di distorsione scelto ha valore 8 in virtù dei risultati delle prove eseguite. Un valore così alto di α è giustificato dal fatto che in alcuni piezometri (S3A ed S3B) le prove con packers hanno messo in luce la presenza di skineffects dovuto con probabilità ad un cattivo completamento.

In Figura 3.14 è mostrata la strumentazione utilizzata per le prove di diluizione senza packers.



Fig.3.14: Strumentazione utilizzata per le prove di diluizione, 1: pompa ad immersione; 2: tubo con tratto fenestrato; 3: pila da 12V; 4:recipiente graduato in cui sono state preparate le soluzioni di acqua e cloruro di sodio.

Le quantità di cloruro di sodio e di acqua utilizzate per le varie diluizioni e le profondità alle quali sono stati posizionati i Data-Logger sono riportate in tabella 3.7.

PIEZOMETRO	DATA	PROF [m b.f.]	V H ₂ O [l]	NaCl [Kg]
S1	01/07/2013	4.80	15	1.0
S2A	01/07/2013	5.20	20	1.5
S2B	04/07/2013	5.22	15	1.0
S3A	06/06/2013	2.85	15	1.0
S3B	14/07/2013	5.00	15	1.0
S4	04/07/2013	5.10	15	1.0
S5	27/06/2013	5.00	15	1.0
S6	14/07/2013	5.00	25	2.0
S8	28/06/2013	4.60	15	1.0

Tab.3.7: Riepilogo delle prove di diluizione senza packers realizzate; PROF. è la profondità in m da boccaforo[b.f] a cui è stato posizionato il sensore per la registrazione della curva di scarico; V H₂O è il volume(in l), di salamoia iniettata; NaCl(in Kg) è la massa di cloruro di sodio disciolta.

3.8.2 PROVE DI DILUIZIONE/TRACCIAMENTO SENZA PACKERS

Sul campo la procedura è analoga a quella già descritta per le prove di diluizione non combinate, tranne per il fatto che queste prove hanno riguardato solamente le doppiette di piezometri (S2A-S2B e S3A-S3B), dove quindi, come già esposto, il piezometro di monte è stato destinato all'iniezione del tracciante ed al monitoraggio della curva di scarico, mentre il secondo piezometro, di valle, è stato utilizzato a scopo unicamente investigativo per il monitoraggio della curva di restituzione.

Nel caso della prova alla doppietta S3A-S3B, il Data-Logger è stato posizionato ad una profondità che coincide con un'alternanza di materiali prevalentemente fini (sabbie, limi ed argille; All.1) e quindi poco permeabili, per cui i tempi di scarico registrati sono stati maggiori rispetto a quelli della doppietta S2A-S2, dove il Data-Logger è stato posizionato in corrispondenza delle ghiaie (All.1).

Le quantità di cloruro di sodio e di acqua utilizzate per le prove sono esposte in Tabella 3.5, mentre i tempi di acquisizione impostati dei Data-Loggers sono in Tabella 3.6.

3.8.3 PROVE DI DILUIZIONE/TRACCIAMENTO CON PACKERS

Le prove di diluizione/tracciamento che prevedevano l'utilizzo dei packers sono state realizzate unicamente nella doppietta S3A-S3B a diverse profondità.

I packers sono strumenti utilizzati durante le prove sperimentali su campo per isolare un tratto di piezometro. Di fatto, la strumentazione è costituita da un tubo cilindrico di metallo, due inserti gommati alle estremità ed un tratto fenestrato centrale. Gli inserti gommati vengono gonfiati con acqua in pressione attraverso una pompa manuale fin tanto che non aderiscono al rivestimento del piezometro ed isolano il tratto centrale dal resto del piezometro, il tratto centrale può essere così utilizzato per l'iniezione della soluzione salina.

Operativamente una prova di tracciamento con packers prevede le seguenti fasi:

Preparazione della salamoia sulla base del calcolo del volume del sistema di iniezione (tubo e packers). Con riferimento alla Tabella 3.8, il volume del sistema di iniezione è stato calcolato attraverso la relazione:

$$V_T = V_F + V_{TI} + V_{TP} \quad [30]$$

V_T = volume totale [m^3].

V_F = volume del tratto fenestrato [m^3].

V_{TI} = volume del tubo per l'iniezione [m^3].

V_{TP} = volume tubaggio Packer [m^3].

Il risultato ottenuto dalla [30] è di $5.10 \times 10^{-3} m^3$, che equivalgono a 5.10 litri di H_2O . La concentrazione della soluzione iniettata, invece, è stata ottimizzata in corso d'opera sulla base dei risultati delle prime prove ed è variata tra 24.5 ed 34.3 g/l [Tab. 3.4].

Lunghezza totale packers [m]	1.69
Lunghezza primo tratto gonfiabile [m]	0.50
Lunghezza secondo tratto gonfiabile [m]	0.50
Lunghezza tratto fenestrato [m]	0.40
Diametro tratto fenestrato [m]	0.076
Lunghezza tubaggio packers [m]	0.93
Diametro tubaggio packers [m]	0.015
Lunghezza tubo di iniezione salamoia [m]	15.80
Diametro tubo di iniezione salamoia [m]	0.016

Tab.3.8: Parametri dimensionali del sistema packers-tubo.

Posizionamento dei packers, del sistema di iniezione e del sensore per il monitoraggio della curva di scarico nel piezometro in cui è realizzata la prova di diluizione. Questa fase prevede: (1) alloggiamento del data-logger nella finestra dei packers [Fig 3.15]; (2) calata del sistema di iniezione alla profondità e gonfiaggio dei packers sino all'isolamento del tratto di prova [Fig. 316]. In Figura 3.17 è rappresentato il sistema di iniezione.



Fig.3.15: Packers, i tratti gommati neri, con la pressione dell'acqua vengono gonfiati fino ad aderire alle pareti del piezometro, bloccando il flusso lungo la verticale.



Fig.3.16: Pompa utilizzata per il gonfiaggio deipackers.



Fig.3.17: Strumentazione utilizzata per le prove di diluizione/tracciamento; il sistema è costituito da packers (1), pompa per l'iniezione dell'acqua (2), tubaggio per il trasporto della salamoia all'interno deipackers fino al tratto fenestrato (3), pompa per l'iniezione della salamoia (4).

Posizionamento di due Data-Logger, a diversa profondità [Tab.3.4], nel piezometro di valle per la registrazione delle curve di restituzione (S3B). Il posizionamento di due sensori ha lo scopo di verificare la presenza di modificazioni della rete di flusso dovute alla differenza di densità tra la salamoia iniettata e le acque sotterranee.

Iniezione della soluzione salina, utilizzando una pompa manuale [Fig. 3.18] ed avendo cura di evitare alterazioni della rete di flusso.

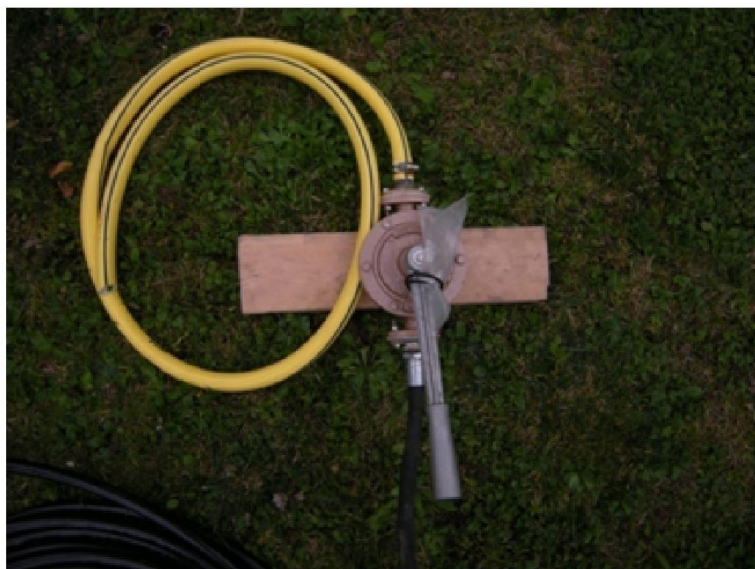


Fig.3.18: Pompa manuale utilizzata per l'iniezione della salamoia all'interno del tratto fenestrato.

Registrazione dell'andamento della concentrazione nel tempo sia nel piezometro di monte (prova di diluizione, curva di scarico) e sia nel piezometro di valle a diversa profondità (prova di tracciamento, curve di restituzione).

3.9 MODELLI

Secondo alcuni autori un modello può essere definite come:

- “Ogni rappresentazione di un sistema reale” (Fetter, 1988);
- “Qualsiasi dispositivo che rappresenta una semplificazione di una condizione reale” (Anderson & Woessner, 1992);
- “Un modello di flusso delle acque sotterranee è uno strumento progettato per fornire una rappresentazione semplificata del flusso di falda in un sito sperimentale” (Bedient et al., 1997).

I modelli, possono essere suddivisi in fisici oppure matematici. Un modello fisico è una rappresentazione mediante la realizzazione in laboratorio di un prototipo in scala, di quanto si vuole simulare. Un modello matematico, invece, simula il comportamento del

fenomeno che si vuole studiare mediante le equazioni che rappresentano i processi fisici che avvengono nel sistema stesso.

Un modello matematico può a sua volta essere:

- analitico, in cui mediante relazioni, che in generale richiedono delle assunzioni al fine di semplificare il problema, deriva una soluzione esatta;
- numerico, in questo caso viene operata una semplificazione algebrica di un sistema di equazioni;
- stocastico, la cui soluzione si basa sulla distribuzione di probabilità del fenomeno che si intende studiare.

3.9.1 SURFER 8.0

Surfer 8.0, della Golden Software, è un codice utilizzato per l'interpolazione bidimensionale. Il principio di funzionamento è basato sull'applicazione di determinati algoritmi di interpolazione a partire da dati puntuali a distribuzione spaziale disomogenea. Il risultato finale è una griglia di nodi equamente spaziatati su cui viene ricostruito il valore della variabile.

I metodi di interpolazione implementati in Surfer 8.0 possono essere classificati secondo:

- metodi esatti: sono in grado di onorare il valore misurato quando nodo della griglia e punto di misura coincidono;
- metodi approssimati: non sono in grado di onorare il valore misurato quando nodo della griglia e punto di misura coincidono;
- metodi locali: predicono un valore facendo uso di un insieme limitato di punti circostanti;
- metodi globali: fanno uso di tutti i punti campionati per predire ciascun valore;
- metodi deterministici: la stima avviene a partire dai punti misurati essenzialmente sulla base di un criterio di similarità. Le interpolazioni vengono condotte senza considerare l'errore che viene commesso;

- metodi geostatistici: considerano le proprietà statistiche dei punti misurati e si basano sulla misura dell'autocorrelazione spaziale. E' possibile ottenere una stima dell'errore commesso nell'interpolazione (Kriging e Cokriging).

Surfer 8.0 implementa undici algoritmi di interpolazione deterministici, che sono:

- triangolazione con interpolazione lineare (triangulation with linear interpolation);
- natural neighbor;
- nearest neighbor;
- media mobile (moving average);
- inverse distance to a power (IDW);
- polinomio locale (localpolynomial);
- regressione polinomiale (polynomialregression);
- metodo di Dhepard modificato (modifiedShepard'smethod);
- minima curvatura (minimum curvature);
- data metrics;
- funzione radiale di base (radialbasisfunction).

Inoltre implementa un solo algoritmo di interpolazione geostatistico: il Kriging.

Operativamente Surfer 8.0 è stato utilizzato per ricostruire le superfici freatiche a partire da valori puntuali che sono stati raccolti durante una serie di campagne piezometriche. L'interpolazione ha permesso di definire l'andamento delle linee isopotenziali e la principale direzione di flusso all'interno dell'area di studio.

L'algoritmo di interpolazione scelto è stato quello del Natural Neighbor e cioè un metodo esatto di tipo deterministico. Le principali fasi del processo di interpolazione possono essere riassunte in:

- scelta della directory dalla quale il codice legge i valori da interpolare [Fig. 3.19], attraverso il comando "Grid" e successivamente l'opzione "Data";

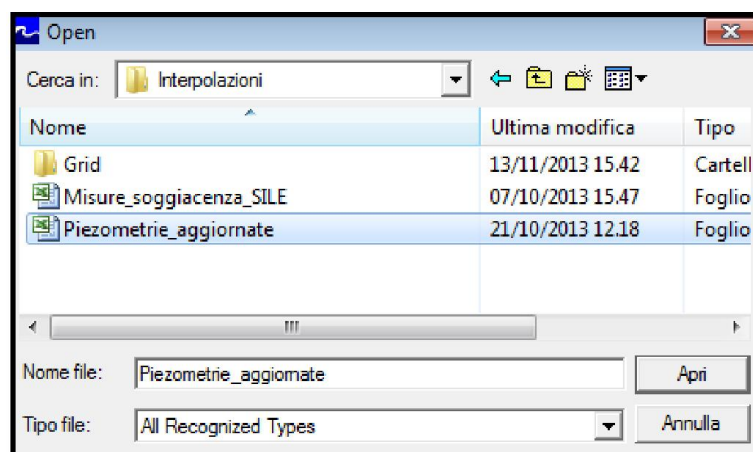


Fig. 3.19: Scelta della directory, nel caso specifico, i valori da interpolare sono all'interno del foglio Excel "Piezometrie".

- individuazione delle coordinate X, Y e dei valori da interpolare (Z);
- scelta dell'algoritmo di interpolazione e definizione della griglia. Per le interpolazione eseguite è stato scelto uno *spacing*, ossia una spaziatura tra una i nodi, pari a 10 m.

In Figura 3.20 è possibile osservare la finestra con i parametri già correttamente selezionati.

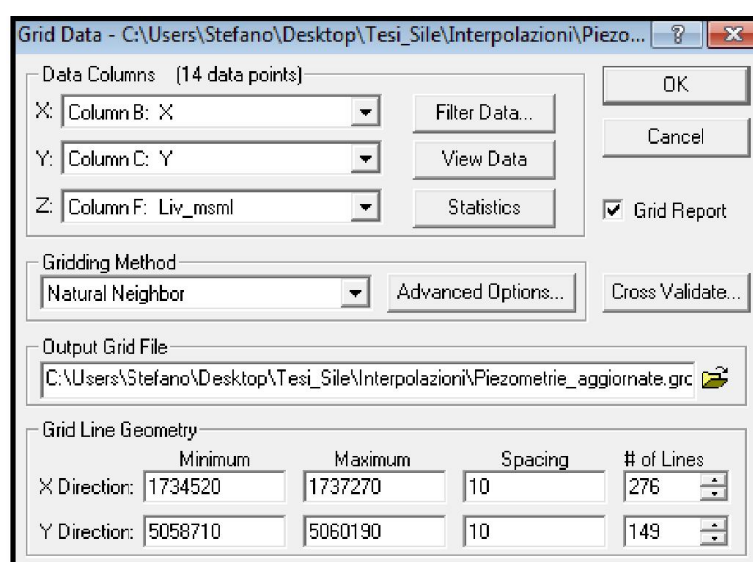


Fig.3.20: Finestra contenente le principali informazioni richieste per poter eseguire l'interpolazione.

Al termine delle operazioni di interpolazione, realizzando un contouring, è possibile visualizzare l'andamento delle linee isopotenziali e delle linee di flusso. In Figura 3.21 è mostrato l'andamento della superficie freatica ricostruita a partire dai rilievi realizzati il 15 aprile 2013.

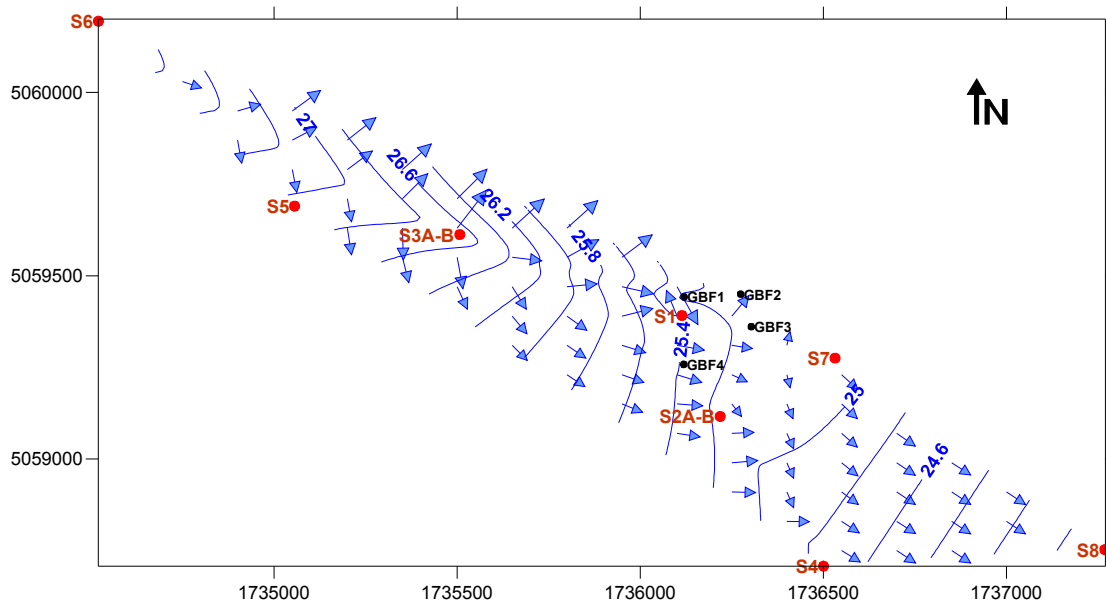


Fig.3.21: Contouring rappresentante le isopotenziali e le linee di flusso.

3.9.2 STANMOD

E' un software finalizzato alla simulazione del trasporto di soluti nel mezzo poroso saturo attraverso la soluzione analitica dell'equazione di advezione-dispersione.

STANMOD include 6 codici tra i quali una versione modificata ed aggiornata del codice CXTFIT (Code for EstimatingTransportParameters from Laboratory or Field TracerExperiments; Toride& van Genuchten, 1995) che si basa sulla soluzione analitica dell'equazione di advezione-dispersione espressa in termini monodimensionali.

CXTFIT è stato utilizzato per l'analisi delle curve di restituzione. Le modalità di analisi disponibili in CXTFIT sono le seguenti:

- problema inverso: a partire dai dati sperimentali e dalle caratteristiche del test è possibile determinare diversi parametri idrogeologici. La stima di questi avviene

tramite una procedura di best-fitting tra i punti sperimentali della curva di restituzione e la curva teorica calcolata dall'algoritmo;

- problema diretto: noti i parametri idrogeologici, il codice risolve l'equazione di advezione-dispersione e ricostruisce la curva di restituzione.

CXTFIT, inoltre, può operare secondo tre modelli distinti:

- equilibrio deterministico: si assume che il tracciante sia conservativo e non interagisca con il mezzo acquifero; l'approccio risolutivo è di tipo deterministico pertanto ad ogni parametro è associato un unico valore;
- disequilibrio deterministico: nel mezzo acquifero possono verificarsi dei processi chimico-fisici che interagiscono con il soluto, quali ad esempio l'adsorbimento o l'alterazione del regime di flusso (la falda attraversa due regioni con caratteristiche idrogeologiche molto diverse);
- equilibrio e disequilibrio stocastico: l'approccio è di tipo probabilistico e pertanto ad ogni parametro è associata una funzione di probabilità.

Il modello adottato per la stima dei parametri idrogeologici è quello dell'equilibrio deterministico in quanto il cloruro di sodio è un tracciante che può essere considerato estremamente conservativo, mentre per l'analisi è stata utilizzata la modalità inversa. I parametri stimati sono stati la velocità di filtrazione (v_f) e la dispersione longitudinale (D_L).

Nel dettaglio, l'equazione advettivo-dispersiva monodimensionale che CXTFIT risolve analiticamente è data da:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_f \frac{\partial C}{\partial x} - \mu C + \gamma(x) [31]$$

R =coefficiente di ritardo.

D_L =dispersione longitudinale [m^2/s].

v_f =velocità di filtrazione media [m/s].

μ =coefficiente di decadimento del primo ordine [$1/s$].

$\gamma(x)$ =termine di produzione di ordine zero [$g/m^3 s$].

Trattandosi di un tracciante conservativo μ può essere considerato pari a 0, mentre per l'analisi dei dati sono stati utilizzati i valori di concentrazione depurati del fondo naturale, per cui anche il termine di produzione y è stato fissato pari a 0.

Con le semplificazioni sopra riportate l'equazione advettivo-dispersiva del trasporto monodimensionale diventa:

$$R \frac{\partial c}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v_f \frac{\partial c}{\partial x} \quad [32]$$

Operativamente Stanmod richiede la definizione del tipo di problema, del modello e dei parametri necessari per la risoluzione dell'equazione [32].

Il risultato finale sono un grafico in cui vengono confrontati i valori misurati e calcolati ed una tabella con la stima dei valori di:

v_f = velocità di filtrazione media.

D_L = dispersione longitudinale.

Da questi due parametri è possibile stimare la dispersività longitudinale (α_L), espressa mediante la formula:

$$\alpha_L = \frac{D_L}{v_f} \quad [33]$$

3.9.3 MODFLOW E MT3DMS

Per la simulazione numerica delle prove di diluizione/tracciamento sono stati utilizzati i codici tridimensionali alle differenze finite MODFLOW 2005 (Harbaugh, 2005) ed MT3DMS (Zheng&Whang, 1999), attraverso l'interfaccia Visual Modflow 2011 (Schlumberger Water Service).

Il codice MODFLOW 2005 risolve tridimensionalmente l'equazione di flusso allo stato stazionario ed allo stato transitorio secondo il metodo di approssimazione delle differenze finite. Si tratta di un codice libero sviluppato dal Servizio Geologico degli Stati Uniti (USGS).

MT3DMS è un codice di trasporto che utilizza un approccio misto Euleriano-Lagrangiano per la soluzione dell'equazione tridimensionale di trasporto advettivo, dispersivo e reattivo a partire da un campo di velocità noto.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad [34]$$

Con K_x , K_y e K_z che rappresentano la conducibilità idraulica nelle 3 direzioni spaziali x , y e z , S_s è l'immagazzinamento specifico ed R^* sono le alimentazioni (+) o i prelievi (-).

I metodi di approssimazione numerica più diffusi nell'ambito dell'idrogeologia sono sicuramente: le differenze finite e gli elementi finiti. Altri metodi (ad es: integrated finite differences, boundaryintegralequationmethod e analyticelements) non sono altrettanto diffusi e trovano spazio solo in determinate applicazioni per lo più legate alla ricerca scientifica. La scelta tra le differenze finite e gli elementi finiti dipende dal tipo di problema che deve essere risolto e dalle preferenze dell'utente. In generale le differenze finite richiedono meno dati di input per la costruzione della griglia, mentre gli elementi finiti sono più adatti alla rappresentazione di domini e condizioni al contorno dalla forma irregolare. Esiste comunque una differenza fondamentale tra i due metodi: il metodo delle differenze finite permette di calcolare un valore di carico idraulico su ogni nodo della griglia di discretizzazione come media dei valori di carico idraulico calcolati sulle celle circostanti. Non vengono fatte assunzioni di alcun genere in merito alla variazione di carico idraulico tra i nodi della griglia. Gli elementi finiti, invece, definiscono la variazione del carico idraulico all'interno degli elementi attraverso una funzione di interpolazione. Il carico idraulico è calcolato ai nodi per convenienza ma viene ricostruito su tutto il dominio attraverso una funzione di base.

Il codice, di fatto, risolve un set di equazioni algebriche generate operando l'approssimazione dell'equazione di flusso/trasporto (equazione costitutiva, condizioni al contorno e condizioni iniziali) che formano il modello matematico. Le tecniche di approssimazione come le differenze finite o gli elementi finiti operano sull'equazione di flusso cambiando la forma in modo tale che possa essere risolta attraverso un computer

in maniera agevole. Le equazioni algebriche prodotte attraverso l'approssimazione possono essere espresse in forma matriciale e successivamente risolte attraverso tecniche di iterazione numerica (risolutori).

Il processo di risoluzione di un modello numerico può essere sintetizzato in due fasi:

- applicazione dell'approssimazione alle differenze finite o agli elementi finiti al modello matematico;
- risoluzione delle equazioni algebriche in forma matriciale.

L'approssimazione alle differenze finite prevede la sostituzione del rapporto incrementale (derivata) con una differenza finita misurabile sui nodi della griglia di discretizzazione. Semplificando al caso monodimensionale, l'approssimazione alle differenze finite prevede la sostituzione della derivata con la relazione:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \frac{1}{\Delta x} \left[K_{xx} \frac{(h_3 - h_2)}{\Delta x} - K_{xx} \frac{(h_2 - h_1)}{\Delta x} \right] [35]$$

Le operazioni preliminari alla modellazione prevedono innanzitutto l'individuazione degli obiettivi di modellazione e la definizione di un modello idrogeologico concettuale. La definizione del modello concettuale passa attraverso la semplificazione del problema in oggetto e l'organizzazione/omogeneizzazione dei dati di campo disponibili, cosicché essi possano essere interpretati con maggiori incisività e dettaglio. Il tipo di modello idrogeologico concettuale influisce sulle dimensioni del dominio di modellazione e sulla sua discretizzazione. In teoria, più il modello concettuale è fedele alla realtà maggiore è l'accuratezza del modello numerico che ne deriva. Il modello concettuale deve essere una valida rappresentazione delle principali condizioni idrogeologiche. Il fallimento delle simulazioni previsionali, molto spesso, è attribuibile ad errori nella definizione del modello concettuale. Il primo *step* nella formulazione del modello concettuale è la definizione dell'area di interesse in modo da identificare le condizioni al contorno da utilizzare. Quando è possibile i limiti naturali del modello concettuale dovrebbero essere utilizzati come condizione al contorno del modello numerico. Anche nei casi in cui l'area di interesse non comprende i limiti naturali del

dominio di modellazione questi dovrebbero essere identificati comunque. Si possono individuare tre fasi principali nella definizione di un modello idrogeologico concettuale:

- definizione delle unità idrostratigrafiche;
- ricostruzione della rete di flusso;
- stima del bilancio di massa.

Una volta definito il modello idrogeologico concettuale di riferimento, si può procedere con l'implementazione del modello numerico e alla definizione delle simulazioni, secondo delle fasi di implementazione che prevedono:

- discretizzazione del dominio del modellazione;
- parametrizzazione delle unità idrogeologiche individuate;
- definizione delle condizioni al contorno (boundary);
- definizione delle condizioni iniziali.

Infine, solitamente segue una fase di calibrazione, ovvero quel processo che permette di dimostrare che il modello implementato è capace di riprodurre misure sperimentali di carico idraulico e/o flusso e/o concentrazione.

Per la riproduzione delle prove di diluizione/tracciamento realizzate nella doppietta piezometrica S3A-S3B, sia tracciando tutta la colonna d'acqua (1 prova) e sia isolando il tratto di diluizione/iniezione con i packers (2 prove), sono state implementate 3 simulazioni di flusso e trasporto con i codici MODFLOW 2005 e MT3DMS. Le simulazioni hanno previsto la riproduzione del flusso allo stato stazionario ed il trasporto allo stato transitorio durante ciascun periodo di prova. Operativamente, l'implementazione delle simulazioni ha previsto le seguenti fasi.

Identificazione di un dominio di modellazione di forma rettangolare di dimensioni 42 x 41 m e sua orientazione secondo la direzione prevalente di flusso stimata a partire dalle piezometrie disponibili (Par. 4.1);

Discretizzazione del dominio di modellazione attraverso una griglia a passo variabile con dimensioni da 1.80 a 0.07 m lungo l'asse delle x e delle y e centrata in corrispondenza della doppietta di piezometri. Il tasso di incremento della griglia di discretizzazione è stato fissato pari a 1.1 in entrambe le direzioni. La dimensione minima della griglia, corrisponde circa alla dimensione dei piezometri e tale scelta deriva dalla volontà di simulare in modo più realistico possibile la diluizione entro il

piezometro di iniezione. Una rappresentazione in pianta della griglia di discretizzazione è mostrata in Figura 3.22.

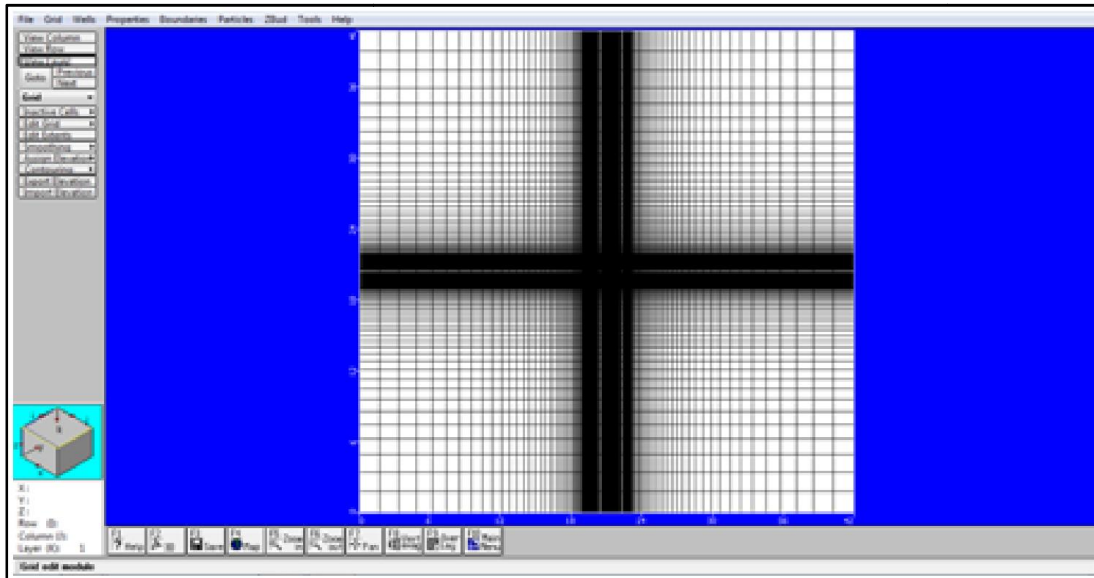


Fig. 3.22: Rappresentazione della griglia di discretizzazione sul piano orizzontale.

Per quanto riguarda la discretizzazione verticale del dominio di modellazione, lo spessore è stato fissato pari a 32 m grazie alla ricostruzione del profilo stratigrafico presentato in Figura 2.4. Sulla base della litologia e della necessità di riprodurre gli intervalli investigati con le prove di diluizione/tracciamento, lo spessore costante di 32 m è stato suddiviso in 50 layers di spessore variabile [Fig. 3.23]. In particolare il primo layer è compreso tra il piano campagna ed 1 m di profondità. Successivamente, fino a 10 m di profondità, sono stati individuati 45 layers di spessore costante e pari a 0.20 m, mentre gli ultimi 22 metri sono stati suddivisi in 4 layers di spessore costante pari a 5.5 m.

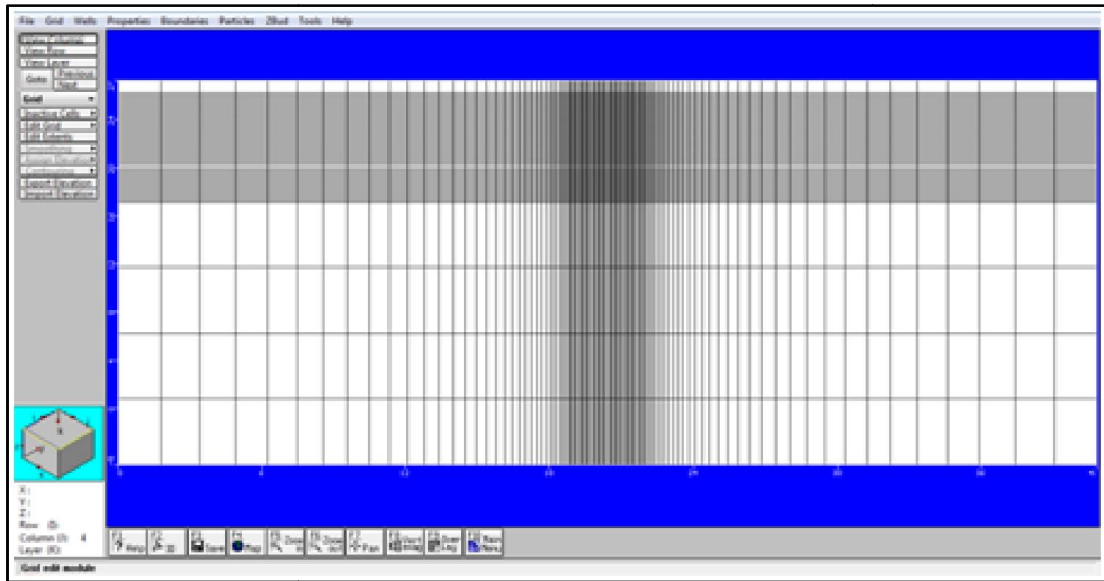


Fig.3.23: Rappresentazione della griglia di discretizzazione verticale.

Per quanto riguarda la parametrizzazione delle unità idrogeologiche, si sono distinte tre zone: due su base litologica e la terza in base alla necessità di rappresentare il vuoto entro i piezometri. La prima zona corrisponde alle alternanze di materiali prevalentemente fini presenti tra il piano campagna e 4 m di profondità (All. 1) e compresa tra i layers 1 e 16. La seconda zona corrisponde all'acquifero ghiaioso presente tra 4 e 32 m di profondità da p.c. La terza ed ultima zona è utilizzata per rappresentare il vuoto entro i piezometri ed è assegnata ai layer tra 1 e 46. Tutte le zone sono considerate omogenee ed isotrope per cui $K_x = K_y = K_z$.

La porosità efficace (n_e) è l'altro parametro necessario a MT3DMS per la simulazione del trasporto. Nello specifico si distinguono due aree a porosità efficace diversa: la prima è rappresentata dal vuoto all'interno dei piezometri e viene fissata pari al 100%, mentre al resto del dominio è assegnato un valore di n_e costante.

Anche la dispersività longitudinale (α_L) è stata differenziata in due zone, la prima per il vuoto dei piezometri con valore pari a 0 m e la seconda sul resto del dominio. Il rapporto tra dispersione longitudinale e dispersione trasversale (α_T/α_L) è fissato pari a 0.7. I valori di queste proprietà sono il risultato finale del processo di ottimizzazione realizzato attraverso la calibrazione dei dati derivati dalle prove di

diluzione/tracciamento e sono esposti nel capitolo successivo assieme ai risultati delle simulazioni.

Come condizioni al contorno per il flusso sono stati utilizzate due condizioni di carico idraulico specificato (o di 1° tipo o di Dirichlet), applicate sui limiti NE e SO del dominio di modellazione. Sui limiti NO, SE ed alla base del dominio, invece, sono applicate due condizioni di flusso specificato pari a 0 (o di 2° tipo o di Neumann; limite impermeabile). La ricarica zenitale sul top del dominio di modellazione è stata considerata trascurabile sulla base dei dati acquisiti durante le prove e quindi non è stata applicata. Anche i valori delle condizioni al contorno sono riportati nel seguente capitolo assieme ai risultati delle simulazioni.

La discretizzazione temporale prevede *time step* variabili a partire da 0.0001 minuti e progressivamente crescenti secondo un moltiplicatore di 1.05 fino al raggiungimento dell'intervallo massimo fissato pari ad 1 minuto [Fig. 3.24].

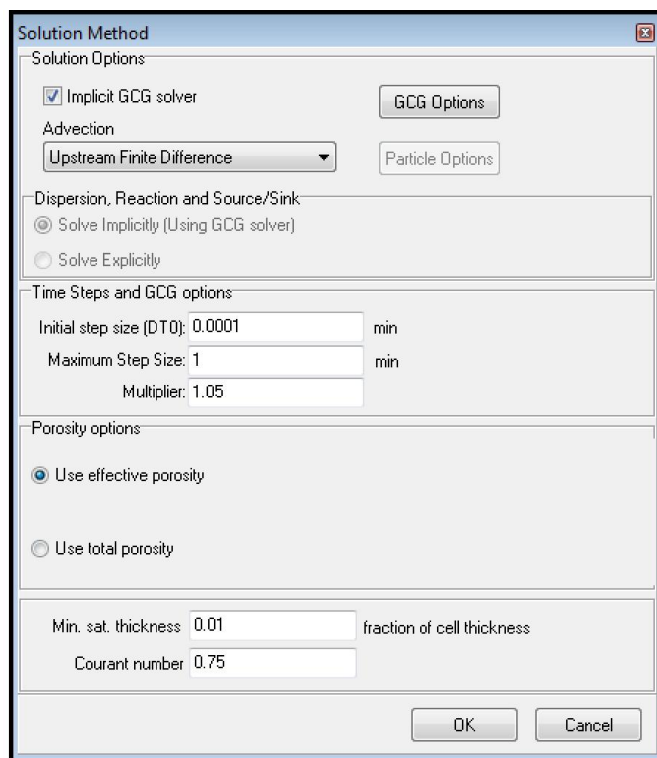


Fig. 3.24: Finestra relativa alla discretizzazione temporale scelta in Visual Modflow e parametri risolutivi impostati per MT3DMS.

Per quanto riguarda il trasporto non sono state utilizzate condizioni al contorno, ma si è fissata una concentrazione iniziale (initialconcentration) pari alla concentrazione del tratto di prova al termine dell'iniezione, nelle celle rappresentanti il piezometro di diluizione. Nella simulazione della prova di diluizione/tracciamento senza packers, la concentrazione iniziale è stata differenziata lungo il piezometro in base ai risultati di un log di conducibilità realizzato all'inizio della prova [Fig. 3.25]. Come si può vedere l'omogeneizzazione della colonna d'acqua è uno dei principali problemi. Nello specifico, all'interno del piezometro sono state ipotizzate tre zone a diversa concentrazione, secondo quanto riportato in Tabella 3.9.

CONC [mg/l]	LAYERS	QUOTA TETTO [m s.l.m.]	QUOTA LETTO [m s.l.m.]
13092	1-18	27.1	22.8
100000	18-27	22.8	21
500	27-46	21	17.2

Tab. 3.9: Riassunto delle concentrazioni iniziali per la simulazione della prova di diluizione/tracciamento senza packers del 06/06/2013.

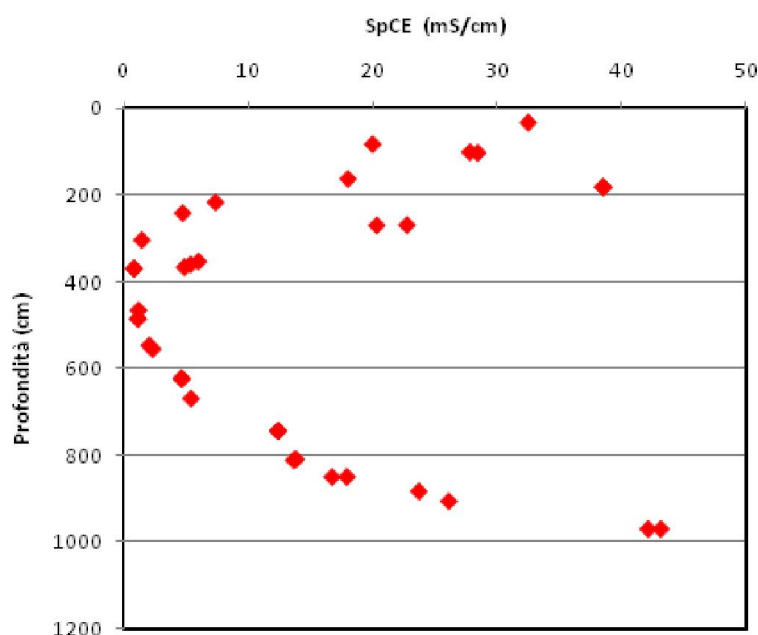


Fig. 3.25: Esempio di un Log di conducibilità che dimostra una scarsa omogeneizzazione della colonna d'acqua eseguito al piezometro S3A in data 06/06/2013.

Nella simulazione delle prove di diluizione con packers invece la concentrazione iniziale è stata variata solamente nei due layers coincidenti con la finestra di iniezione, assegnando un valore congruo con la SpCE misurata all'inizio di ciascuna prova [Tab. 3.10]. Per riprodurre l'effetto dei packers, inoltre, sono state disattivate (no-flow e no-transport) le celle soprastanti e sottostanti il tratto di iniezione per una lunghezza pari al tratto isolato (circa 0.6 m corrispondenti a 3 layers).

La riproduzione delle curve di scarico e restituzione è avvenuta attraverso un processo di ottimizzazione progressiva dei parametri i input, che è terminato quando i valori di concentrazione simulati hanno raggiunto un buon accordo con quelli misurati. Tale processo prende il nome di calibrazione e può essere di due tipi: qualitativa e quantitativa. La calibrazione qualitativa consiste nella semplice sovrapposizione tra concentrazione simulata e calcolata, mentre nel secondo caso si basa sull'elaborazione statistica dei residui (calcolato meno osservato) in punti omologhi rispetto allo spazio ed al tempo. I principali indicatori statistici utilizzati nella calibrazione quantitativa sono:

- residuo massimo, in mg/l;
- residuo minimo, in mg/l;
- media dei residui, in mg/l;
- valore assoluto della media dei residui, in ,g/l;
- errore standard della stima, in mg/l;
- scarto quadratico medio, in mg/l (RMS);
- scarto quadratico medio normalizzato, in percentile (nRMS);
- coefficiente di correlazione.

Lo scarto quadratico medio normalizzato (nRMS) è la statistica che meglio sintetizza il processo di calibrazione. Solitamente possono essere considerati calibrati i modelli che presentano valori di nRMS entro la soglia del 10%.

DATA	CONC [mg/l]	LAYERS	QUOTA TETTO [m s.l.m.]	QUOTA LETTO [m s.l.m.]
01/08/2013	17380	33-34	20	19.6
27/09/2013	19831	23-24	22	21.6

Tab. 3.10: Riassunto delle concentrazioni iniziali per le simulazioni delle prove di diluizione/tracciamento con packers.

4 RISULTATI

In questo capitolo vengono presentati i risultati ottenuti durante le *prove di diluizione e tracciamento eseguite in campo*, utilizzando metodi analitici e numerici, quindi con l'ausilio dei codici di calcolo precedentemente descritti. Nello specifico si tratta di: 9 prove di diluizione senza l'ausilio di packers realizzate nei piezometri: S1, S2A, S2B, S3A, S3B, S4, S5, S6ed S8.

- 2 prove di diluizione/tracciamento senza l'ausilio di packers nelle doppiette piezometriche: S2 ed S3.
- 4 prove di diluizione/tracciamento con l'ausilio di packers realizzate rispettivamente a profondità di: 1.5, 3.5, 5.5 e 7.5 m da b.f. nella doppietta piezometrica S3.

Vengono altresì presentati i risultati di alcune campagne piezometri realizzate prima e durante le realizzazione delle prove di diluizione.

4.1 PIEZOMETRIE ED INTERPOLAZIONE

Come anticipato, l'interpolazione dei dati puntuali acquisiti durante le campagne freaticometriche è stata realizzata con l'algoritmo del Natural Neighbor con il software Surfer 8.0. Le superfici isopotenziometriche ricostruite sono 8 e sono state rilevate nel periodo compreso tra febbraio e ottobre 2013. Attraverso esse è stato possibile ricostruire la direzione prevalente del flusso di falda, i gradienti e sono state utilizzate per la definizione del dominio di modellazione. Dalle ricostruzione isopotenziometriche si deduce che, molto probabilmente, il piezometro S3B non è ubicato a valle di S3A secondo le direzione di flusso prevalente, ma è un po' spostato verso sud rispetto ad essa.

In Figura 4.1 viene rappresentata la ricostruzione dell'andamento della tavola d'acqua in data 15/04/2013, mentre in Figura 4.2 viene rappresentata l'interpolazione della superficie isofreatica realizzata in data 10/07/2013.

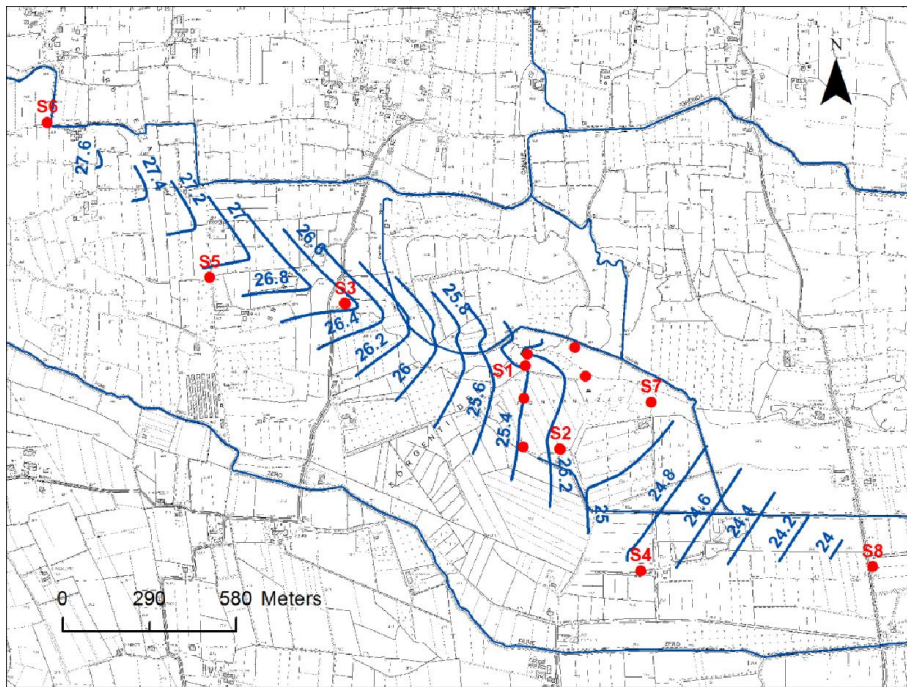


Fig. 4.1: Andamento della superficie freatica del 15/04/2013.

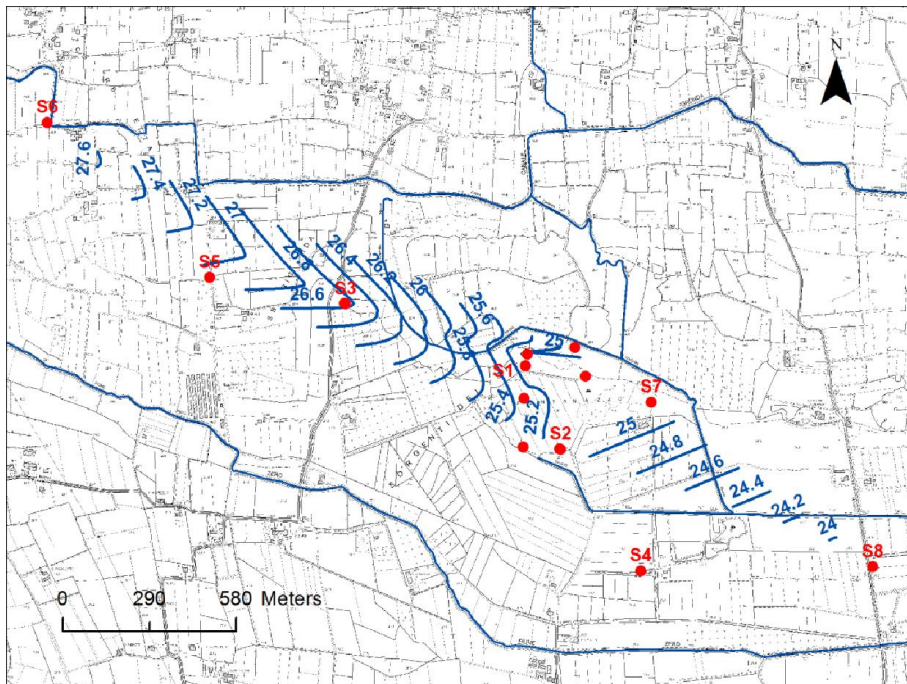


Fig. 4.2: Andamento della superficie freatica del 10/07/2013.

Le ricostruzioni delle superficiisofreatiche evidenziano un deflusso delle acque sotterranee con direzione da NO a SE, all'incirca parallelo all'andamento dei lineamenti

idrografici. Il gradiente piezometrico medio sull'area di interesse è pari a circa 0.17% [Tab. 4.1], con variazioni estremamente limitate e comprese tra 0.32% (S1) e 0.12% (S4 e S7). Il gradiente piezometrico si è mantenuto pressoché costante durante tutto il periodo di monitoraggio su gran parte dei piezometri, con escursioni modeste comprese tra 0.19% (S1) e 0.003% (S4).

DATA	S1	S2A-S2B	S3A-S3B	S4	S5	S6	S7
20/02/2013	0.69%	0.19%	0.19%	0.12%	0.15%		0.12%
28/02/2013	0.27%	0.18%	0.11%	0.13%	0.14%		0.13%
05/03/2013	0.18%	0.15%	0.09%	0.12%	0.15%		0.12%
22/03/2013	0.26%	0.14%	0.11%		0.14%		0.12%
08/04/2013			0.11%		0.15%		0.16%
15/04/2013	0.50%	0.20%	0.12%	0.12%	0.16%		
19/04/2013	0.15%	0.11%					
10/07/2013	0.32%	0.15%	0.11%		0.16%		0.07%
03/10/2013	0.16%	0.09%	0.18%	0.13%	0.15%		
MEDIA	0.32%	0.15%	0.13%	0.12%	0.15%		0.12%
DEVST	0.19%	0.04%	0.04%	0.003%	0.01%		0.03%

Tab. 4.1: gradienti idraulici determinati a partire dalle ricostruzioni delle superfici isofreatiche; MEDIA, è il valore medio del gradiente idraulico in corrispondenza dei piezometri; DEVST, è la deviazione standard del gradiente idraulico in corrispondenza dei piezometri.

Con le piezometrie realizzate è stato possibile ricavare il gradiente in corrispondenza della doppietta piezometrica S3A-S3B e successivamente la velocità di Darcy grazie all'omonima formula. Per la conducibilità idraulica (K) è stato utilizzato un valore di 5.00×10^{-4} derivato dalla realizzazione di diversi slug-test sui piezometri di interesse (Galante, 2013).

In tabella 4.2 sono riassunti i valori di gradiente e le velocità di Darcy calcolate.

DATA	i	K [m/s]	V _d [m/s]	V _d [m/g]
20/02/2013	1.92x10 ⁻³	5.00x10 ⁻⁴	9.60x10 ⁻⁷	0.083
28/02/2013	1.12x10 ⁻³	5.00x10 ⁻⁴	5.60x10 ⁻⁷	0.048
05/03/2013	9.06x10 ⁻⁴	5.00x10 ⁻⁴	4.53x10 ⁻⁷	0.039
22/03/2013	1.09x10 ⁻³	5.00x10 ⁻⁴	5.45x10 ⁻⁷	0.047
08/04/2013	1.08x10 ⁻³	5.00x10 ⁻⁴	5.40x10 ⁻⁷	0.047
15/04/2013	1.16x10 ⁻³	5.00x10 ⁻⁴	5.80x10 ⁻⁷	0.050
10/07/2013	1.13x10 ⁻³	5.00x10 ⁻⁴	5.65x10 ⁻⁷	0.049
03/10/2013	1.84x10 ⁻³	5.00x10 ⁻⁴	9.20x10 ⁻⁷	0.079

Tab. 4.2: Riassunto dei parametri ricavati dalle piezometrie, i è il gradiente, mentre v_d è la velocità di Darcy.

Dalla Tabella 4.2 si possono stimare un gradiente medio, che si afferma a 1.28×10^{-3} ed una velocità di Darcy media pari a 0.055 m/g .

4.2 INTERPRETAZIONE DELLE PROVE DI DILUIZIONE SENZA PACKERS

Le prove di diluizione sono utilizzate per stimare la velocità di Darcy delle acque sotterranee (v_d). Nel seguito, come esempio di interpretazione delle prove eseguita senza i packers, viene dettagliatamente descritta quella eseguita al piezometro S4 in data 04/07/2013, mentre una sintesi di tutti i risultati è presentata al termine del capitolo (Par. 4.3), ed in allegato 3.

La prima fase è consistita nella preparazione della salamoia di acqua e cloruro di sodio, come già descritto nel capitolo precedente, utilizzando 1 kg di NaCl e 15 l di H₂O.

Immediatamente dopo l'iniezione del tracciante e prima di iniziare il monitoraggio della SpCE è stato eseguito un log di conducibilità, al fine di verificare l'omogenizzazione della salamoia all'interno del piezometro. Si è utilizzato il medesimo data-logger successivamente impiegato per il monitoraggio, impostato con lo stesso tempo di acquisizione della prova, 15 secondi; il data-logger è stato calato fino a fondo foro e poi risollevato fino in superficie, acquisendo le misure sia in discesa che in risalita [Fig.4.3].

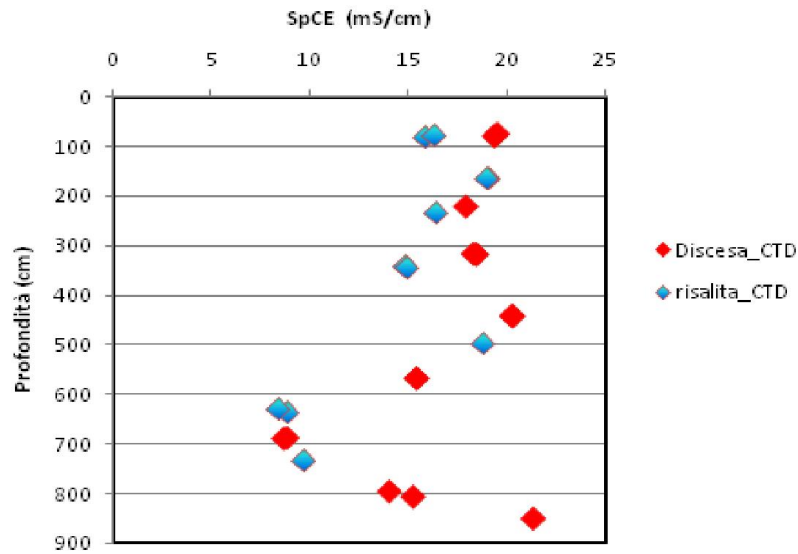


Fig. 4.3: Andamento della conducibilità elettrica specifica a 25°C (SpCE) registrata durante il log di conducibilità nel piezometro S4.

Dalla Figura 4.3 è possibile apprezzare l'andamento della conducibilità con la profondità, in particolare sono differenziati i valori acquisiti durante la discesa del sensore ed i valori acquisiti durante la risalita. Nel complesso la fase di omogeneizzazione risulta buona con valori di conducibilità che variano tra 15 e 25 mS/cm lungo l'intera colonna, con l'esclusione di un settore collocato tra 6 metri ed 8 metri di profondità, dove la conducibilità ha valori di circa 10 mS/cm. Completata questa prima operazione, è stato inserito il data-Logger (CTD DIVER) ad una profondità di 5.10 metri dal boccaforo (m b.f.); il sensore ha acquisito ad intervalli di tempo di 15 secondi i valori di conducibilità elettrica specifica a 25°C, pressione e temperatura ed è stato lasciato in loco fino alla fine della prova.

Plottando i valori di tempo (in s) in ascissa e di SpCE (in mS/cm) in ordinata, si ottiene la seguente curva di scarico [Fig.4.4].

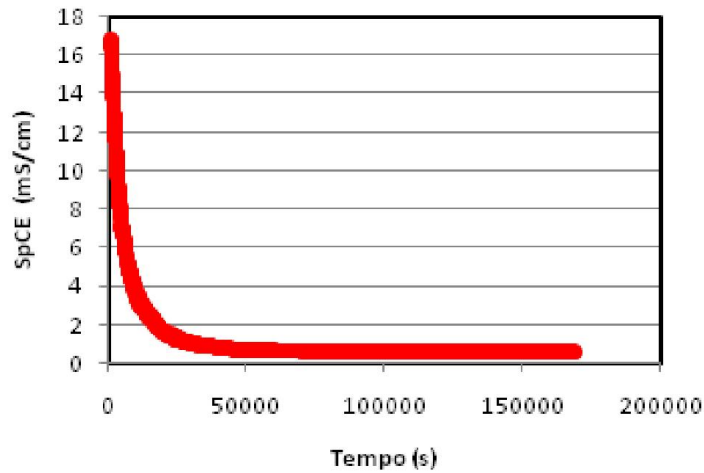


Fig. 4.4: Curva di scarico della soluzione salina all'interno del piezometro S4.

La curva ha un andamento esponenziale e per determinare la velocità, si procede calcolando la concentrazione in g/l corrispondente alla conducibilità misurata utilizzando la formula [29], descritta nel precedente capitolo.

Successivamente utilizzando la formula [23] si ricava la velocità di Darcy.

Le operazioni eseguite per giungere all'interpretazione della curva sono:

- viene individuata la parte rettilinea del grafico, questa operazione prevede lo scarto della porzione iniziale della curva, visibilmente non rettilinea, e probabilmente dovuta alla non perfetta omogeneizzazione durante l'iniezione;
- viene ricavata la funzione lineare che meglio approssima i punti, tale valutazione viene fatta sulla base del metodo dei minimi quadrati mediante il parametro statistico R^2 . Operativamente sono stati eliminati i punti del tratto iniziale fino al raggiungimento di una soglia minima di R^2 fissata a 0.98.

In ultimo, la formula che approssima la [23] sarà:

$$v_d = \frac{m\pi r}{2\alpha} \quad [36]$$

m = coefficiente angolare della retta.

r = raggio del piezometro [m].

α = coefficiente di distorsione legato alle modificazioni della rete di flusso dovute al passaggio attraverso il tratto filtrato dei piezometri.

Il risultato di queste operazioni, viene rappresentato in Figura 4.5.

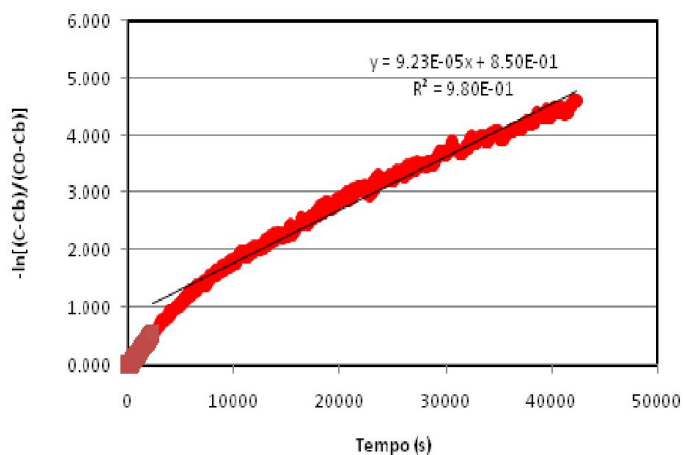


Fig. 4.5: Interpretazione della curva di scarico.

Il valore di α utilizzato è pari ad 8, sulla base delle considerazioni fatte al capitolo precedente (Par. 3.8.1). La velocità di Darcy ricavata utilizzando la [36] è di 7.75×10^{-6} m/s che corrisponde a circa 4.46 m/g.

In Tabella 4.3 riassunto sono riepilogate le principali caratteristiche della prova eseguita il 04/07/2013 nel piezometro S4.

PIEZOMETRO	DATA	PROF. [m]	NaCl [Kg]	V H ₂ O [l]	v _d [m/s]	v _d [m/g]
S4	04/07/2013	5.1	1	15	7.75×10^{-6}	4.46

Tab.4.3: Riassunto della prova del 04/07/2013 in S4, NaCl, rappresenta la quantità di cloruro di sodio utilizzato, V H₂O la quantità di salamoia, v_d è la velocità di Darcy.

4.3 INTERPRETAZIONE DELLE PROVE DI DILUIZIONE/TRACCIAMENTO SENZA PACKERS

Le prove di tracciamento a gradiente naturale realizzate in concomitanza delle prove di diluizione offrono una opportunità quasi unica di verifica dei risultati di queste ultime. Come esempio viene riportata la prova eseguita in S2B in data 01/07/2013,

tralasciando le modalità di interpretazione della prova di diluizione che sono le stesse descritte nel paragrafo precedente.

Il tracciamento consiste nel rilevare, in un piezometro di valle, il transito del cloruro di sodio iniettato durante una prova di diluizione nel piezometro di monte. Si tratta di prove a gradiente naturale in quanto non vengono messi in atto emungimenti per forzare il richiamo del tracciante verso il piezometro di valle. L'intervallo di acquisizione è il medesimo utilizzato per le prove di diluizione (15 s), mentre il sensore è stato sempre posizionato alla stessa profondità del sensore utilizzato per la registrazione della curva di scarico nel piezometro della diluizione.

Per l'elaborazione di una curva di restituzione, ci si avvale del pacchetto STANMOD ed in particolare al codice monodimensionale CXTFIT.

Il risultato ottenuto mediante il codice ha permesso di riprodurre una curva di restituzione che approssima i valori sperimentali, calcolando automaticamente i valori di velocità reale (v_f), di dispersione longitudinale (D_L) e la massa (M) necessari al *fittaggio*. In Tabella 4.4 si riportano tali valori.

NAME	VALUE	LOWER	UPPER
v_f [m/s]	6.26x10 ⁻⁴	6.18x10 ⁻⁴	6.35x10 ⁻⁴
D_L [m ² /s]	2.84x10 ⁻⁴	2.66x10 ⁻⁴	3.02x10 ⁻⁴
M [Kg]	7.06x10 ²	6.90x10 ²	7.21x10 ²

Tab. 4.4: Valori elaborati dal codice CXTFIT, evidenziata in giallo, la velocità reale stimata; v_f rappresenta la velocità reale, D_L la dispersione ed M è la massa; le colonne Lower ed Upper, rappresentano i valori massimi e minimi ottenuti con il fittaggio.

Il codice CXTFIT, attraverso una procedura di best-fitting, riproduce anche una curva di restituzione, che nel caso della prova in S2B è rappresentata in Figura 4.6.

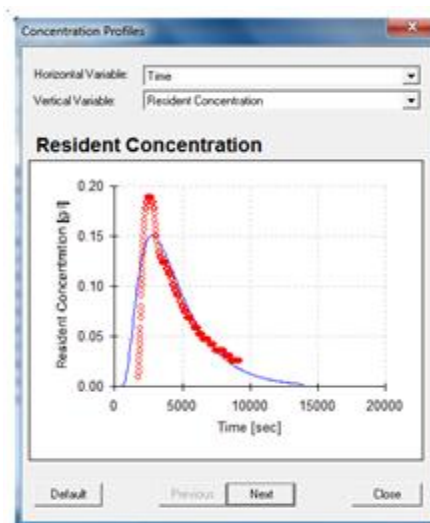


Fig. 4.6: Curva di restituzione calcolata a partire dai dati sperimentali; in rosso i dati sperimentali, mentre in blu la curva calcolata.

4.4 INTERPRETAZIONE DELLE PROVE DI DILUIZIONE/TRACCIAMENTO CON PACKERS

Le prove eseguite con i packers hanno permesso di isolare un tratto di piezometro di lunghezza pari a circa 0.4 m, e quindi di iniettare in condizioni ideali per quanto riguarda l'omogeneizzazione del tracciante.

Le prove eseguite sono complessivamente quattro, tutte nella doppietta S3A-S3B, indagando profondità diverse (1.5, 3.5, 5.5 e 7.5 m da b.f.), e posizionando ogni volta due sensori al piezometro di valle, uno alla stessa profondità dell'iniezione e l'altro 1 o 2 m più in basso.

La metodologia di elaborazione del dato è analoga a quanto già visto per le prove di diluizione e diluizione/tracciamento con e senza packers, pertanto viene determinata una velocità approssimabile a quella di Darcy dalle prove di diluizione ed una velocità reale dalle prove di tracciamento.

Come esempio nel seguito vengono riportati i dettagli della prova realizzata il 01/08/2013 a 7.5 m da b.f., utilizzando 0.125 kg di NaCl e 5.1 l di H₂O.

I risultati ottenuti per la diluizione mostrano una curva di scarico [Fig. 4.7] che in circa 6 ore non raggiunge i valori di background. Le curve di restituzione dei due tracciamenti registrano un comportamento diverso, con una variazione di concentrazione più marcata a 7.5 m da b.f. e meno spiccata a 9.5 m da b.f. [Fig. 4.9].

Tutto ciò lascia supporre che il movimento del plume di soluto è prevalentemente orizzontale e quindi non vi sarebbero moti verticali dovuti alla differenza di densità.

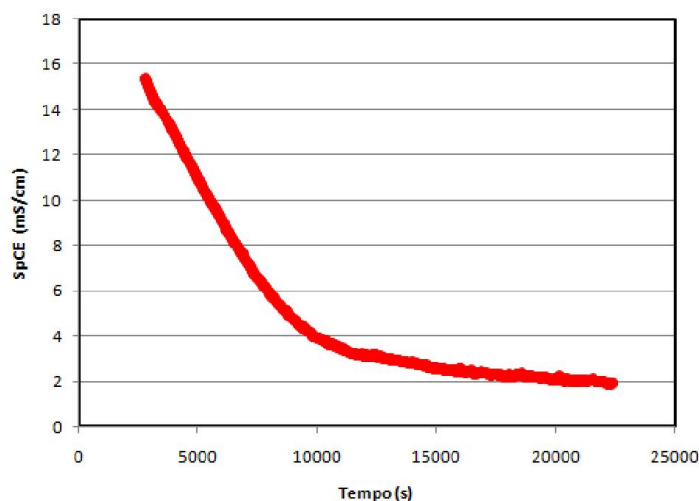


Fig. 4.7: Curva di scarico della soluzione salina all'interno del piezometro S3A.

Applicando le relazioni [29] e [36] è possibile dapprima determinare la concentrazione in g/l e successivamente determinare la velocità di Darcy attraverso la stessa procedura descritta a proposito della diluizione senza packers [Fig. 4.8].

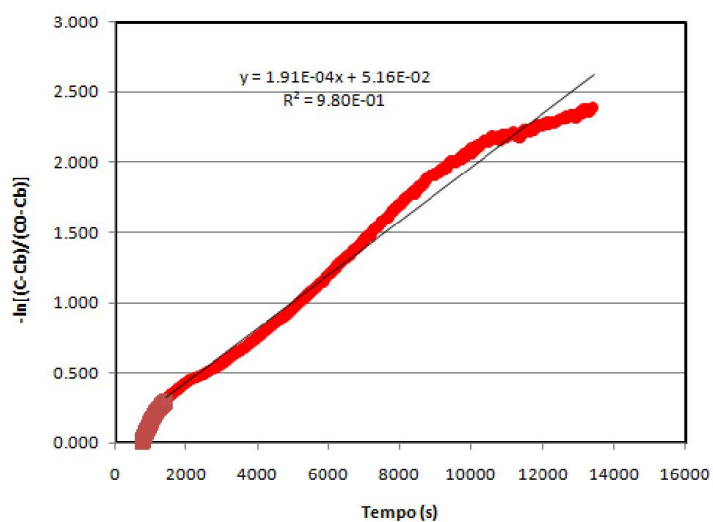


Fig. 4.8: Interpretazione della prova di diluizione in S3A.

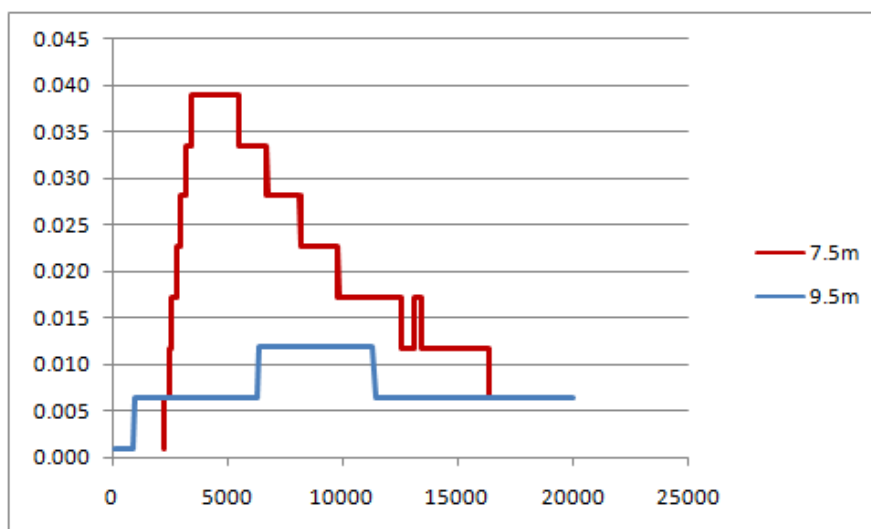


Fig. 4.9: Curve di restituzione registrate nel piezometro S3B durante le prova del 01/08/2013 con il sensore a 7.5 metri di profondità (valori in rosso) ed a 9.5 metri di profondità (valori in blu).

In figura 4.9 sono rappresentate le curve di restituzione che approssima i valori sperimentali, interpretate mediante il codice, ma riassunte in un unico grafico, che mostra l'impulso registrato dal sensore posizionato a 9.5 m molto inferiore rispetto a quello posizionato a 7.5 m.

In tabella 4.5 sono riportati i valori di velocità reale (v_f), di dispersione longitudinale (D_L) e la massa (M) necessari al *fittaggio* calcolati automaticamente.

NAME	VALUE	LOWER	UPPER
V_f [m/s]	2.86×10^{-4}	2.84×10^{-4}	2.88×10^{-4}
D_L [m ² /s]	1.44×10^{-4}	1.40×10^{-4}	1.47×10^{-4}
M [Kg]	3.61×10^2	3.57×10^2	3.64×10^2

Tab.4.5: Valori elaborati dal codice CXTFIT, evidenziata in giallo, la velocità reale stimata; v_f rappresenta la velocità reale, D_L la dispersione ed M è la massa; le colonne Lower ed Upper, rappresentano i valori massimi e minimi ottenuti con il fittaggio.

4.5 RISULTATI OTTENUTI CON LA MODELLAZIONE NUMERICA

Con i codici MODFLOW ed MT3DMS, sono state simulate tre prove di diluizione/tracciamento realizzate nella doppietta S3A-S3B:

- la prova senza packers eseguita in data 06/06/2013;
- la prova con i packers alla profondità di 5.5 metri in data 27/09/2013;
- la prova eseguita con i packers alla profondità di 7.5 metri in data 01/08/2013.

4.5.1 SIMULAZIONE DELLA PROVA DI DILUIZIONE/TRACCIAMENTO DEL 06/06/2013

La prova è stata eseguita utilizzando due data-Logger: il primo posizionato entro il piezometro di monte (S3A) alla profondità di 2.85 metri ed il secondo nel piezometro di valle (S3B) alla profondità di 4.55 metri, utilizzando 1 kg di cloruro di sodio e 15 l di acqua [Tab. 4.12]. In questa prova non sono stati utilizzati packers, per cui il tracciante salino è stato omogeneizzato lungo tutta la verticale del piezometro di monte.

Le curve di scarico (diluzione in S3A) e restituzione (tracciamento in S3B) sono state riprodotte attraverso una simulazione di flusso e trasporto con i codici MODFLOW ed MT3DMS. La simulazione di flusso riproduce allo stato stazionario: il carico idraulico registrato presso la doppietta ed il gradiente piezometrico registrati durante la prova. La simulazione di trasporto allo stato transitorio ha una durata di 1140 minuti e riproduce l'andamento della concentrazione di cloruro di sodio nel piezometro di osservazione ogni minuto. I parametri di input [Tab. 4.5] sono stati ottimizzati attraverso un processo di calibrazione manuale (Trial & Error) che ha permesso di riprodurre in maniera statisticamente significativa i dati sperimentali.

SIMULAZIONE	06/06/2013
PIEZOMETRO DILUIZIONE/INIEZIONE	S3A
PIEZOMETRO OSSERVAZIONE	S3B
COSTANT HEAD MONTE [m s.l.m.]	26.66
COSTANT HEAD VALLE [m s.l.m.]	26.64
POROSITA' EFFICACE [n_e]	4%
PERMEABILITA' ACQUIFERO [K in m/s]	4.00×10^{-4}
PERMEABILITA' ACQUITARDO [K in m/s]	4.00×10^{-5}
DISPERSIVITA' LONGITUDINALE [α_L in m]	100
RAPPORTO TRA DISPERSIVITA' TRASVERSALE E LONGITUDINALE [α/α_L]	0.7
DURATA SIMULAZIONE PROVA [min]	1140
PERMEABILITA' ENTRO IL PIEZOMETRO [m/s]	1
POROSITA' EFFICACE ENTRO IL PIEZOMETRO	100%

Tab. 4.5: Riassunto dei parametri usati per la simulazione della prova del 06/06/2013.

Il processo di calibrazione ha permesso di ottenere un buon accordo tra l'andamento dei valori di concentrazione di cloruro di sodio misurati e quelli calcolati sia al piezometro S3A [Fig. 4.10] e sia al piezometro S3B [Fig. 4.11].

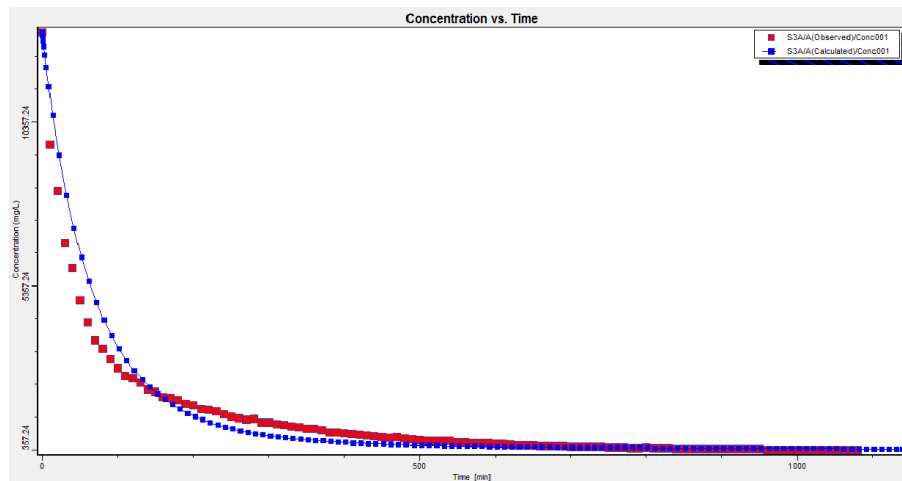


Fig. 4.10: Confronto tra la curva di scarico misurata (in rosso) e quella calcolata (in blu).

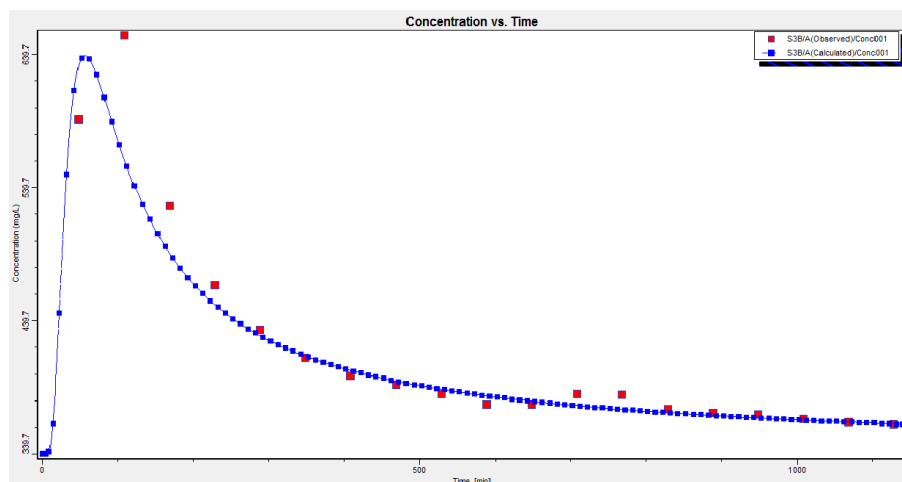


Fig. 4.11: Confronto tra la curva di restituzione misurata (in rosso) e quella calcolata (in blu).

Come si può notare come, dal punto di vista qualitativo, in entrambii casi vi è un buon accordo tra l'andamento della concentrazione calcolata e quella misurata. Per quanto concerne la calibrazione quantitativa in Figura 4.12 ed in Figura 4.13 sono

mostrati due scatter-plot con il confronto tra i dati calcolati e misurati ogni minuto rispettivamente per le curve di scarico e restituzione.

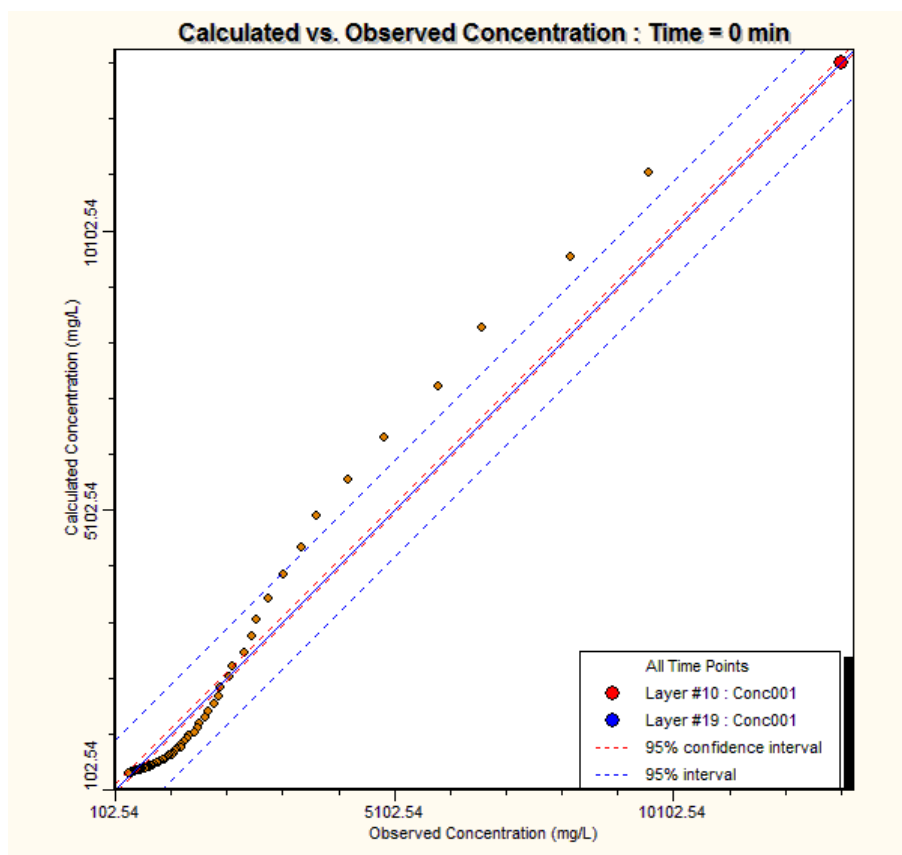


Fig. 4.12: Confronto tra i valori di concentrazione di cloruro di sodio misurati e calcolati ogni minuto nel piezometro S3A (curva di scarico della prova di diluizione).

I parametri statistici di calibrazione della prova di diluizione sono riassunti in Tabella 4.6. Come si può vedere il valore di RMS normalizzato risulta pari a 3.429%, ben al di sotto della soglia del 10% accettata come limite per la calibrazione di tipo quantitativo.

NUMERO DI PUNTI	109
RESIDUO MASSIMO[mg/l]	1710.007
RESIDUO MINIMO[mg/l]	0.08
MEDIA DEI RESIDUI[mg/l]	21.744
MEDIA DEI RESIDUI ASSOLUTA [mg/l]	244.252
ERRORE STANDARD STIMATO [mg/l]	41.966
RADICE QUADRATA DELLA MEDIA [mg/l]	436.662
RMS NORMALIZZATO[%]	3.429
COEFFICIENTE DI CORRELAZIONE	0.988

Tab. 4.6: Parametri statistici di calibrazione della prova di diluizione.

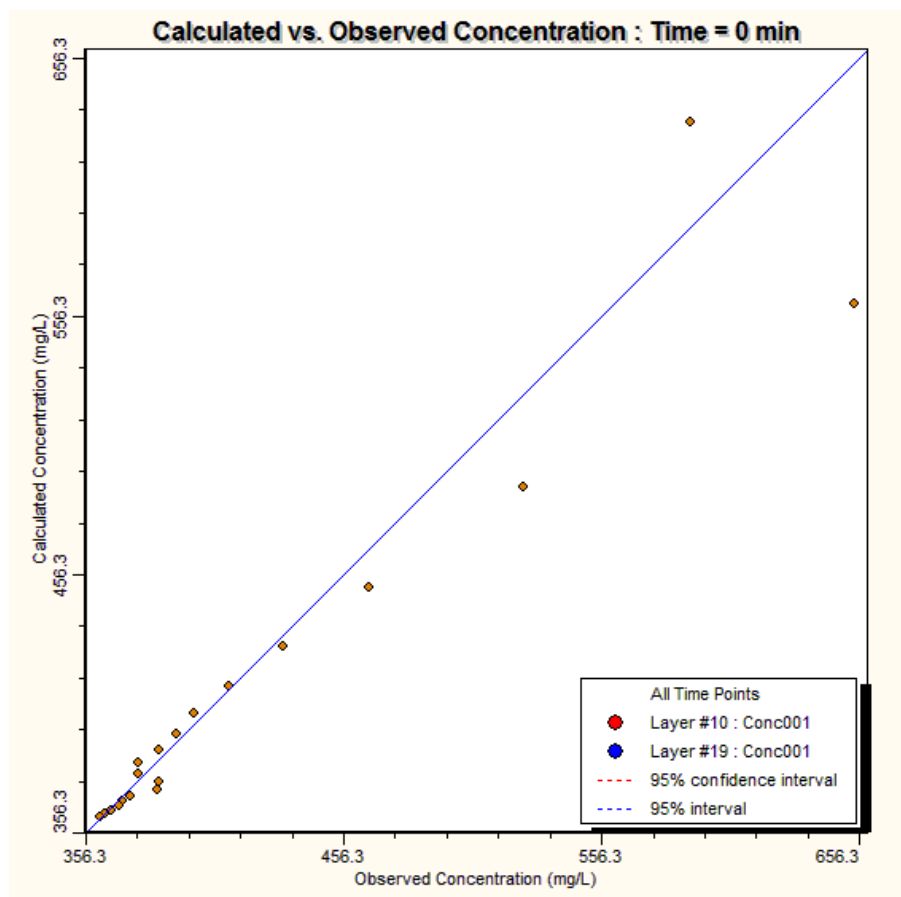


Fig. 4.13: Confronto tra i valori di concentrazione di cloruro di sodio misurati e calcolati ogni minuto nel piezometro S3B (curva di restituzione della prova di tracciamento).

Anche la calibrazione quantitativa della curva di restituzione ha fornito buoni risultati [Tab. 4.7] ed anche in questo caso l'RMS normalizzato, paria a 8.623%, si trova al di sotto della soglia del 10%.

NUMERO DI PUNTI	19
RESIDUO MASSIMO[mg/l]	-92.639
RESIDUO MINIMO[mg/l]	0.155
MEDIA DEI RESIDUI[mg/l]	-6.049
MEDIA DEI RESIDUI ASSOLUTA[mg/l]	12.437
ERRORE STANDARD STIMATO[mg/l]	5.76
RADICE QUADRATA DELLA MEDIA[mg/l]	25.174
RMS NORMALIZZATO[%]	8.623
COEFFICIENTE DI CORRELAZIONE	0.955

Tab. 4.7: Parametri statistici di calibrazione della prova di tracciamento.

4.5.2 SIMULAZIONE DELLA PROVA DI DILUIZIONE/TRACCIAMENTO DEL 01/08/2013

La prova è stata eseguita posizionando i packers all'interno del piezometro di iniezione (S3A) ed isolando un tratto di foro in corrispondenza della profondità di 7.5 metri. Nel piezometro di valle (S3B) sono stati posizionati due sensori uno alla stessa profondità del tratto di iniezione/diluzione ed un altro 2 metri più in basso (a circa 9.5 m da b.f.). A 9.5 m da b.f. non è stata registrata alcuna variazione di SpCE per cui si può assumere che il plume di soluto si sia mosso in direzione orizzontale e che la differenza di densità abbia avuto un effetto trascurabile sulla sua evoluzione. La simulazione prevede quindi un movimento del plume orizzontale e la riproduzione della variazione di concentrazione solamente a 5.5 m da b.f. Per la prova sono stati utilizzati 0.125 kg di cloruro di sodio e 5.10 l di acqua [Tab. 4.13].

Le modalità di simulazione di questa prova sono le medesime descritte nel paragrafo precedente (Par. 4.5.1). Una simulazione di flusso allo stato stazionario, con il codice MODFLOW, che riproduce il carico idraulico e il gradiente piezometrico registrati durante la prova ed una simulazione di trasporto, con il codice MT3DMS, che riproduce le curve di scarico e restituzione ai piezometri S3A ed S3B rispettivamente. La durata della simulazione in questo caso è stata di 420 min e i valori di concentrazione di cloruro di sodio sono stati calcolati ogni minuto. Questa simulazione è stata fatta per verificare la calibrazione della simulazione precedente per cui i parametri di input sono i medesimi; le condizioni al contorno sono state modificate, invece, per tenere conto delle differenti condizioni idrodinamiche dei due periodi di prova [Tab. 4.8].

SIMULAZIONE	01/08/2013
PIEZOMETRO DILUZIONE/INIEZIONE	S3A
PIEZOMETRO OSSERVAZIONE	S3B
COSTANT HEAD MONTE [m s.l.m.]	26.76
COSTANT HEAD VALLE [m s.l.m.]	26.74
POROSITA' EFFICACE [n_e]	4%
PERMEABILITA' ACQUIFERO [K in m/s]	4.00×10^{-4}
PERMEABILITA' ACQUITARDO [K in m/s]	4.00×10^{-5}
DISPERSIVITA' LONGITUDINALE [α_L in m]	100
RAPPORTO TRA DISPERSIVITA' TRASVERSALE E LONGITUDINALE [α/α_L]	0.7
DURATA SIMULAZIONE PROVA [min]	420
PERMEABILITA' ENTRO IL PIEZOMETRO [m/s]	1
POROSITA' EFFICACE ENTRO IL PIEZOMETRO	100%

Tab. 4.8: Riassunto dei parametri usati per la simulazione della prova del 01/08/2013.

Il modello permette di ottenere una curva di restituzione [Fig. 4.14], la linea continua rappresenta i valori calcolati, mentre i simboli di colore rosso sono i dati sperimentali.

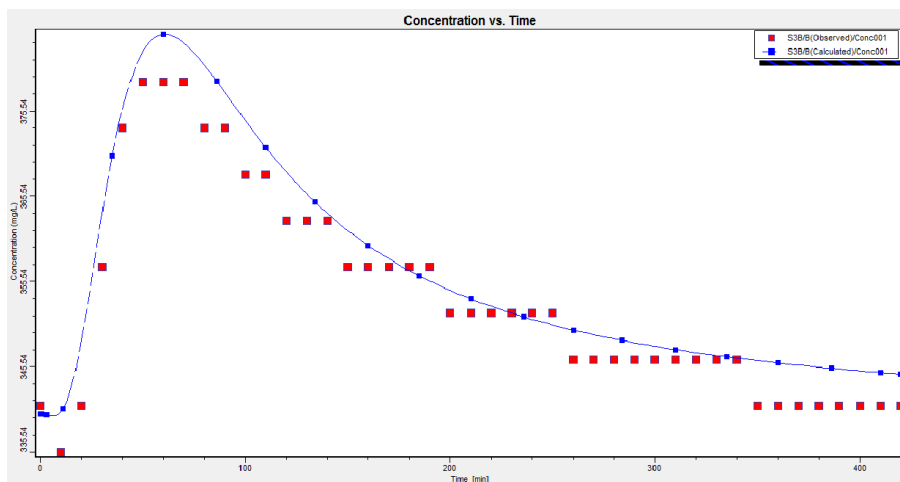


Fig. 4.14: Curva di restituzione della prova di tracciamento simulata (in blu) e misurata (in rosso).

In Figura 4.15 è mostrato lo scatter-plot con il confronto tra i dati calcolati e misurati ogni minuto per la curva di restituzione.

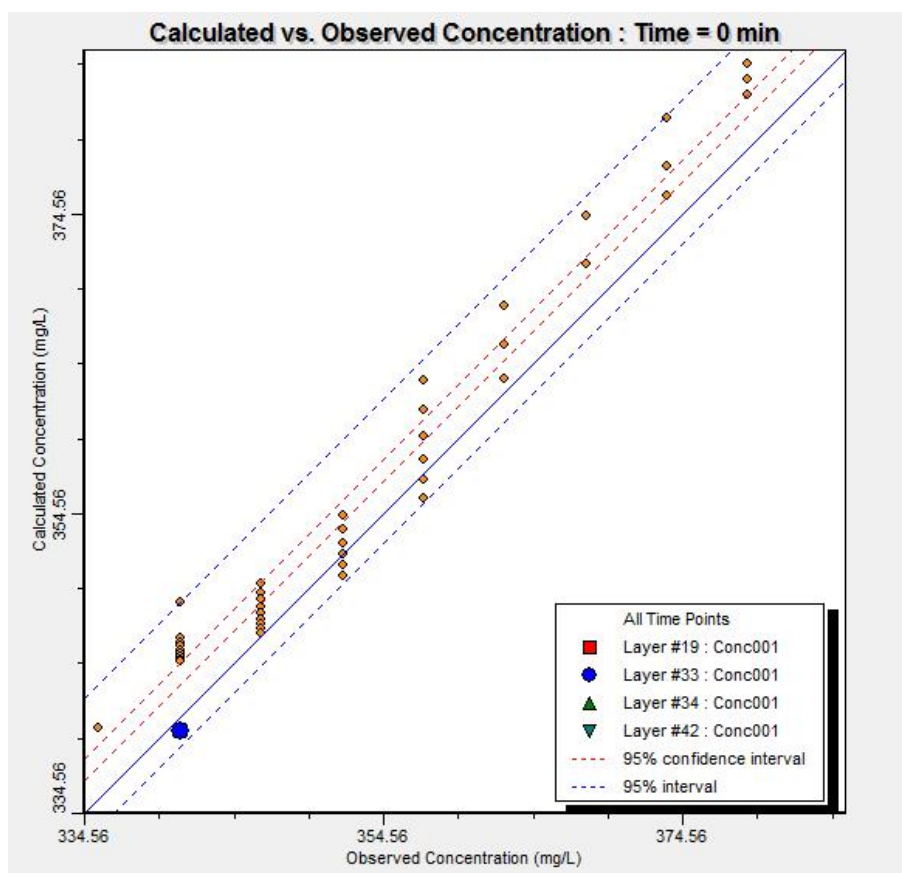


Fig. 4.15: Confronto tra i valori di concentrazione di cloruro di sodio misurati e calcolati ogni minuto nel piezometro S3B (curva di restituzione della prova di tracciamento).

I risultati forniti dalla calibrazione quantitativa della prova di tracciamento sono riassunti in Tabella 4.9. Il valore di normalized RMS è pari a 8.577%, pertanto al di sotto della soglia del 10%.

NUMERO DI PUNTI	43
RESIDUO MASSIMO[mg/l]	7.678
RESIDUO MINIMO[mg/l]	0.005
MEDIA DEI RESIDUI[mg/l]	2.883
MEDIA DEI RESIDUI ASSOLUTA[mg/l]	3.121
ERRORE STANDARD STIMATO[mg/l]	0.363
REDICE QUADRATA DELLA MEDIA [mg/l]	3.723
RMS NORMALIZZATO[%]	8.577
COEFFICIENTE DI CORRELAZIONE	0.983

Tab. 4.9: Parametri statistici della calibrazione per la prova di tracciamento.

Malgrado la prova di tracciamento abbia fornito un risultato più che soddisfacente, la prova di diluizione non ha riprodotto i risultati sperati [Fig.4.16]. La causa può essere collegata ad un non completamento del pozzo ed alcuni disturbi dei filetti idrici in corrispondenza dei filtri. Probabilmente, l'area attorno al pozzo è modificata dalla perforazione e non possiede più le stesse caratteristiche dell'acquifero, in particolare la sua conducibilità idraulica è ridotta; questa zona è chiamata "skin zone" ed caratterizzata da un suo proprio valore di K. In generale, si parla di "skineffect" per caratterizzare tutte quelle perdite di carico che si verificano nelle vicinanze del pozzo. Il termine si basa sul fatto che l'acquifero viene considerato omogeneo fino alla parete del pozzo, mentre tutte le perdite di carico si considerano concentrate in un sottile strato ad essa aderente.

I parametri utilizzati per questa simulazione sono gli stessi utilizzati per la prova del 06/06/2013 eseguita senza packers, il fatto che permettano anche di simulare la prova di tracciamento suggerisce siano del tutto realistici ed attendibili.

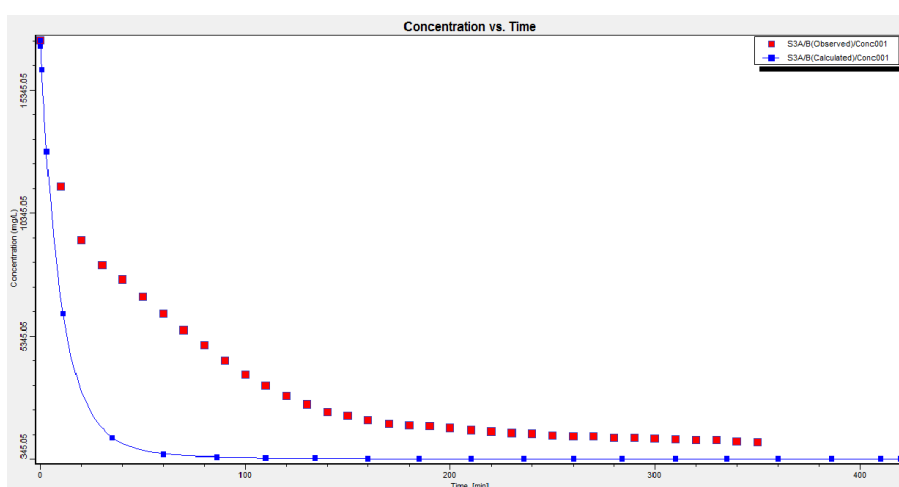


Fig. 4.16: Curva di scarico della prova di tracciamento simulata (in blu) e misurata (in rosso).

4.5.3 SIMULAZIONE DELLA PROVA DI DILUIZIONE/TRACCIAMENTO DEL 27/09/2013

La prova è stata eseguita posizionando i packers alla profondità di 5.5 metri nel piezometro S3A. Nel piezometro di valle sono stati posizionati 2 sensori per il monitoraggio delle curve di restituzione: uno alla stessa profondità dell'iniezione (5.5 m da b.f.) e l'altro 1 metro più in basso (6.5 m da b.f.). Per l'iniezione sono stati utilizzati 0.125 kg di cloruro di sodio e 5.10 l di acqua [Tab. 4.12]. I risultati della prova sono

ottimi per quanto concerne la diluizione e scarsi, al limite della rilevabilità, per le curve di restituzione. In particolare a 6.5 m di profondità non viene rilevata nessuna variazione di concentrazione di cloruro di sodio, mentre a 5.5 m il segnale è estremamente debole ed incerto. Probabilmente questa prova avrebbe richiesto l'iniezione di un maggiore quantitativo di massa. Nonostante ciò la curva di scarico del 27/09/2013 è stata simulata per verificare la capacità del modello di riprodurre la diluizione entro il piezometro di iniezione. Questa prova e quella del 01/08/2013 sono le uniche realizzate con i packers entro le ghiaie dell'acquifero freatico. Le modalità di simulazione sono sempre quelle descritte in precedenza e consistono nel riprodurre il carico idraulico e il gradiente piezometrico allo stato stazionario con MODFLOW e la variazione di concentrazione di cloruro di sodio allo stato transitorio con MT3DMS. La simulazione ha una durata di 420 min e i valori di concentrazione di NaCl sono calcolati ogni minuto.

I parametri di input sono i medesimi della simulazione di calibrazione, mentre le condizioni al contorno sono state variate in funzione delle condizioni idrodinamiche del periodo di prova. Dati di input e condizioni al contorno sono riassunti in Tabella 4.10.

SIMULAZIONE	DILUIZIONE
PIEZOMETRO DILUIZIONE/INIEZIONE	S3A
PIEZOMETRO OSSERVAZIONE	S3B
COSTANT HEAD MONTE [m s.l.m.]	26.69m
COSTANT HEAD VALLE [m s.l.m.]	26.67m
POROSITA' EFFICACE [n_e]	4%
PERMEABILITA' ACQUIFERO [K in m/s]	4.00×10^{-4}
PERMEABILITA' ACQUITARDO [K in m/s]	4.00×10^{-5}
DISPERSIVITA' LONGITUDINALE [α_L in m]	100
RAPPORTO TRA DISPERSIVITA' TRASVERSALE E LONGITUDINALE [α_T / α_L]	0.7
DURATA SIMULAZIONE PROVA [min]	420min
PERMEABILITA' ENTRO IL PIEZOMETRO [m/s]	1
POROSITA' EFFICACE ENTRO IL PIEZOMETRO	100%

Tab. 4.10: Riassunto dei parametri usati per la realizzazione del modello.

La simulazione permette di ottenere un buon accordo tra la curva di scarico simulata e quella misurata [Fig. 4.17].

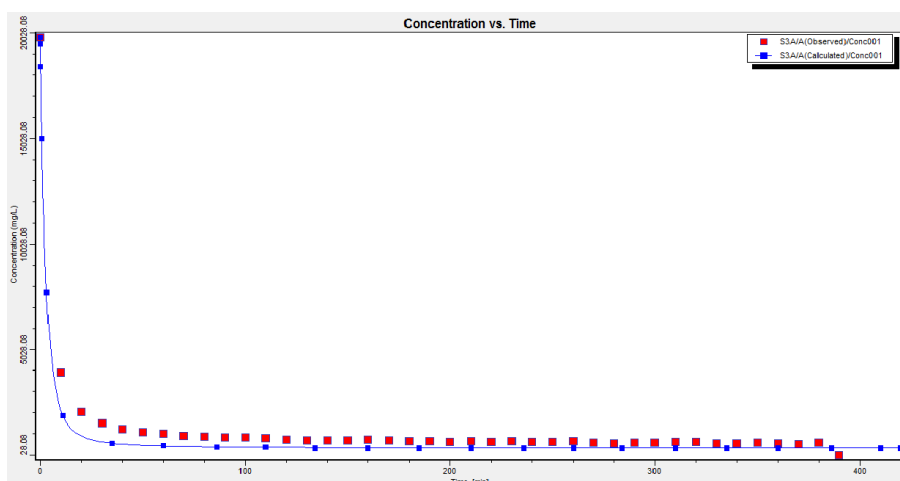


Fig. 4.17: Confronto tra la curva di scarico misurata (in rosso) e quella calcolata (in blu).

La calibrazione quantitativa del modello è rappresentata dallo scatter-plot di Figura 4.18, mentre i parametri statistici della calibrazione sono riportati in Tabella 4.11. Come si può vedere la calibrazione quantitativa della curva di scarico rilevata il 27/09/2013 raggiunge un ottimo livello con valori di nRMS del 2.55%, ben al disotto della soglia di accettabilità del 10%.

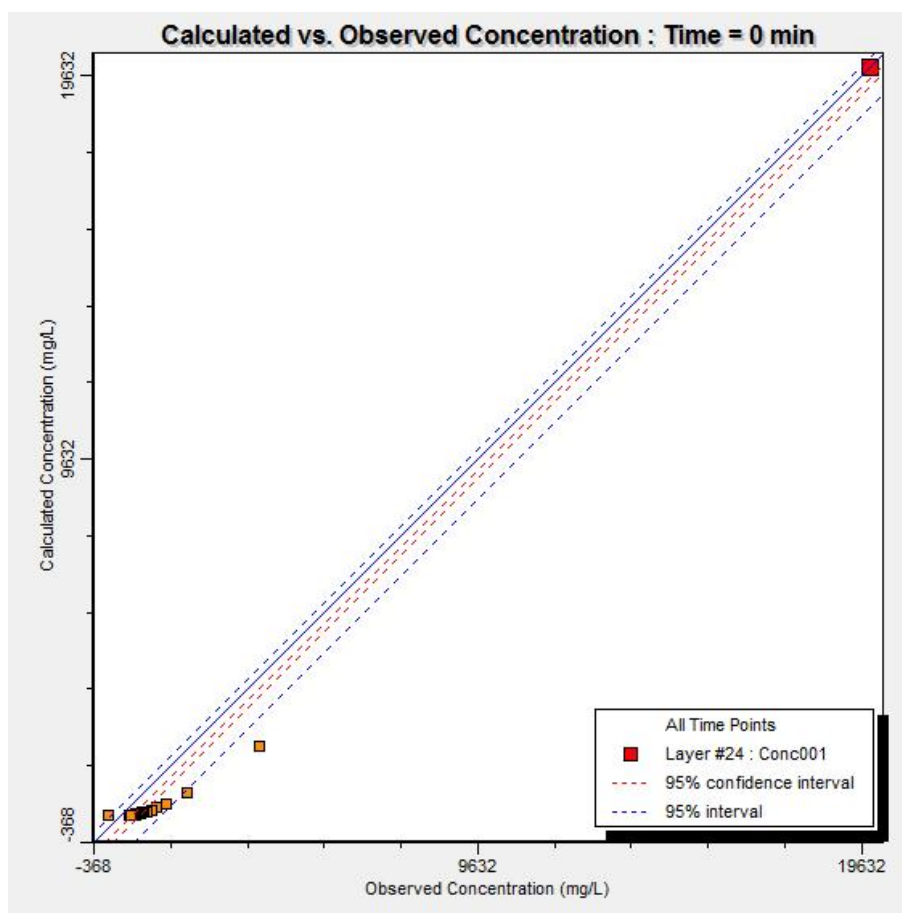


Fig. 4.18: Confronto tra i valori di concentrazione di cloruro di sodio misurati e calcolati ogni minuto nel piezometro S3A (curva di scarico della prova di diluizione).

NUMERO DI PUNTI	40
RESIDUO MASSIMO[mg/l]	-1796.06
RESIDUO MINIMO[mg/l]	-0.36
MEDIA DEI RESIDUI[mg/l]	-391.577
MEDIA DEI RESIDUI ASSOLUTA [mg/l]	407.499
ERROE STANDARD STIMATO[mg/l]	51.048
REDICE QUADRATA DELLA MEDIA [mg/l]	504.939
RMS NORMALIZZATO[%]	2.55
COEFFICIENTE DI CORRELAZIONE	0.994

Tab. 4.11: Parametri statistici di calibrazione della prova di diluizione.

4.6 RIEPILOGO DEI RISULTATI OTTENUTI DALLE PROVE DI DILUIZIONE (SINGLEWELL)

Le prove di diluizione senza packers sono state eseguite su tutti i piezometri con l'eccezione del piezometro S7, nel quale, essendo artesiano, non è stato possibile iniettare la salamoia. La diluizione nel piezometro S6 non ha dato invece risultati interpretabili.

In Tabella 4.12 vengono riportati tutti i risultati per le prove di diluizione eseguite senza packers, quindi con omogeneizzazione del tracciante lungo tutta la colonna d'acqua.

PIEZOMETRO	DATA	PROF. [m b.f.]	NaCl [Kg]	VH ₂ O [l]	v _d [m/s]	v _d [m/g]
S1	01/07/2013	4.8	1	15	2.26x10 ⁻⁶	0.23
S2A	01/07/2013	5.2	1.5	20	3.87x10 ⁻⁶	2.23
S2B	04/07/2013	5.22	1	15	1.06x10 ⁻⁵	0.92
S3A	06/06/2013	2.85	1	15	1.34x10 ⁻⁶	0.12
S3B	14/07/2013	5	1	15	2.33x10 ⁻⁶	0.20
S4	04/07/2013	5.1	1	15	3.87x10 ⁻⁶	2.23
S5	25/06/2013	5	1	15	7.48x10 ⁻⁷	0.06
S8	28/06/2013	4.6	1	15	1.05x10 ⁻⁶	0.09

Tab. 4.12: Risultati delle prove di diluizione senza i packers; PROF è la profondità di monitoraggio della curva di scarico; NaCl, quantità di cloruro di sodio utilizzata per la preparazione della salamoia; VH₂O, volume della salamoia; v_d, velocità di Darcy.

Le velocità rilevate mediante questo metodo, evidenziano dei massimi in corrispondenza dei piezometri S2A ed S4, con un valore di 2.23 m/g, mentre i minimi risultano essere in corrispondenza dei piezometri S5 ed S8, con valori rispettivamente di 0.06 m/g e 0.09m/g.

In Tabella 4.13 si riportano invece i risultati delle diluizioni con i packers.

PIEZOMETRO	DATA	PROF. [m b.f]	NaCl_Kg	V H2O_l	v _d _m/s	v _d _m/g
S3A	16/07/2013	1.5	0.25	10	1.72x10 ⁻⁶	0.15
S3A	01/08/2013	7.5	0.125	5.1	5.71x10 ⁻⁶	0.49
S3A	05/09/2013	3.5	0.175	5.1	3.20x10 ⁻⁶	0.28
S3A	27/09/2013	5.5	0.125	5.1	1.50x10 ⁻⁶	0.13

Tab. 4.13: Tabella riassuntiva delle prove di diluizione eseguite, NaCl è la quantità di tracciante utilizzato, V H₂O la quantità di salamoia, ed infine le velocità di Darcy(v_d) espresse in metri al secondo e metri al giorno.

Le prove eseguite dimostrano un range di velocità incluso tra i 0.13 ed i 0.49 m/g.

4.7 RIEPILOGO DEI RISULTATI OTTENUTI DALLE PROVE DI TRACCIAMENTO (MULTIWELL)

Le prove di tracciamento senza packers sono state eseguite sulle doppiette, quindi in S2A-S2B ed in S3A-S3B.

In Tabella 4.14 vengono riportati tutti i risultati delle prove di tracciamento senza packers, elaborate utilizzando il codice CXTFIT.

PIEZOMETRO	DATA	PROF [mb.f]	NaCl [Kg]	V H2O [l]	v _r [m/s]	v _r [m/g]
S2B	01/07/2013	5.22	1.5	20	6.26x10 ⁻⁴	54.12
S3B	06/06/2013	4.55	1	15	4.79x10 ⁻⁴	41.4

Tab. 4.14: Tabella riassuntiva delle prove di tracciamento eseguite, NaCl è la quantità di tracciante utilizzato, V H₂O è il volume di salamoia, le v_r è velocità reale espressa in metri al secondo ed in metri al giorno.

In Tabella 4.15 si riportano invece i risultati delle diluizioni con i packers, elaborate sempre utilizzando il codice CXTFIT.

PIEZOMETRO	DATA	PROF' [m b.f]	NaCl [Kg]	V H2O [l]	v _r [m/s]	v _r [m/g]
S3B	16/07/2013	1.5	0.25	10	5.89x10 ⁻⁴	50.85
S3B	01/08/2013	7.5	0.125	5.1	2.86x10 ⁻⁴	24.70
S3B	05/09/2013	3.5	0.175	5.1	1.21x10 ⁻⁴	10.49
S3B	27/09/2013	5.5	0.125	5.1	1.78x10 ⁻⁴	15.40

Tab. 4.15: Tabella riassuntiva delle prove di tracciamento eseguite, NaCl è la quantità di tracciante utilizzato, V H₂O è il volume di salamoia, v_r è la velocità reale espressa in metri al secondo ed in metri al giorno.

In entrambi i casi si tratta di valori molto elevati e compresi tra un minimo di 7.93 m/g, fino ad un massimo di 157.08 m/g.

4.8 CONFRONTO TRA I RISULTATI ANALITICI E QUELLI NUMERICI

4.8.1 PROVA DI DILUIZIONE/TRACCIAMENTO DEL 06/06/2013

In Tabella 4.16 sono confrontate le velocità della prova di diluizione eseguita in data 06/06/2013 stimate attraverso la soluzione analitica e calcolate con la relativa simulazione.

V_d MODFLOW-MT3DMS[m/s]	1.00×10^{-6}
v_d MODFLOW- MT3DMS[m/g]	0.047
v_d SOLUZIONE ANALITICA [m/g]	0.12

Tab. 4.16: Confronto tra i risultati analitici e quelli numerici.

I risultati ottenuti, evidenziano come le velocità ricavate da metodi numerici sono confrontabili con quelle calcolate dai metodi analitici.

In Tabella 4.17, vengono confrontati le velocità reali ricavate attraverso il codice monodimensionale CXTFIT e quelle derivate dalla modellazione numerica (MODFLOW-MT3DMS) per la prove del 06/06/2013. In questo caso, oltre ad un confronto tra le velocità reali, è possibile fare un confronto tra i valori di dispersività utilizzati per il fittaggio dei dati sperimentali.

v_r MODFLOW-MT3DMS[m/s]	4.99×10^{-6}
v_r MODFLOW-MT3DMS [m/g]	0.43
v_r STANMOD [m/g]	41.4
D MODFLOW-MT3DMS	100
DSTANMOD	0.33

Tab. 4.7: Confronto tra i parametri ricavati da MODFLOW- MT3DMS e STANMOD.

In questo caso il confronto tra le velocità ricavate con MODFLOW-MT3DMS non sono confrontabili con quelle ottenute dal codice STANMOD, avendo infatti due ordini di grandezza di differenza.

4.8.2 PROVA DI DILUIZIONE/TRACCIAMENTO DEL 27/09/2013

In Tabella 4.18 sono confrontate le velocità di Darcy calcolate con la soluzione analitica e con la modellazione numerica della per la prova di diluizione eseguita in data 27/09/2013.

v_d MODFLOW-MT3DMS[m/s]	5.00×10^{-6}
v_d MODFLOW ED MT3DMS [m/g]	0.017
v_d DILUIZIONE [m/g]	0.06

Tab. 4.18: Confronto tra i parametri analitici e quelli numerici, evidenziate le velocità calcolate mediante MODFLOW ed MT3DMS, e calcoli analitici.

Nella prova esaminata, non viene considerato il tracciamento. Questo da impulsi estremamente deboli che sono stati difficilmente rilevati dal sensore posizionato a monte.

4.8.3 PROVA DI DILUIZIONE/TRACCIAMENTO DEL 01/08/2013

In Tabella 4.19 vengono confrontati le velocità reali ricavate da STANMOD e dalla modellazione numerica relativamente alla prova del 01/08/2013. Sono anche confrontati i valori di dispersività utilizzati per la riproduzione delle curve di restituzione.

v_r MODFLOW-MT3DMS[m/s]	4.68×10^{-6}
v_r MODFLOW-MT3DMS[m/g]	0.404
v_r STANMOD [m/g]	24.7
D MODFLOW-MT3DMS	100
D STANMOD	0.244

Tab. 4.19: Confronto tra i parametri analitici e quelli numerici, evidenziate le velocità reali (v_r) calcolate mediante MODFLOW MT3DMSSTANMOD.

Nemmeno in questo caso le velocità ricavate con i due metodi sono confrontabili, avendo circa due ordini di grandezza di differenza.

La dispersività longitudinale è un altro fattore che viene stimato dal codice STANMOD e fissato nei codici MODFLOW-MT3DMS, nemmeno in questo caso i valori sono confrontabili avendo infatti quasi tre ordini di grandezza di differenza.

Se ne può concludere che l'approccio con il codice STANMOD non fornisce risultati attendibili e non confrontabili con quelli ottenuti con MODFLOW-MT3DMS e nemmeno con quelli della soluzione analitica delle prove di diluizione.

5 CONCLUSIONI

La Media Pianura Veneta è contraddistinta dalla presenza della fascia delle risorgive, un'area di larghezza compresa tra 5 ed 8 km caratterizzata dall'affioramento della superficie freatica secondo due diverse modalità: diffusa, in corrispondenza del reticolo idrografico (fiumi di risorgiva), o puntuale, in corrispondenza delle risorgive o fontanili. Uno degli esempi più caratteristici di questo contesto è rappresentato dall'area delle risorgive del Fiume Sile, tra gli abitati di Casacorba e Vedelago (TV). Quest'area da un punto di vista idrogeologico è caratterizzata dalla presenza di un corpo ghiaioso di spessore pari a circa 30 m sede di un acquifero freatico, che localmente diviene semiconfinato per la presenza in superficie di livelli fini di natura prevalentemente limosa (Par. 2).

In questo contesto una serie di campagne freatimetriche realizzate nei mesi tra febbraio e ottobre 2013 hanno permesso di individuare la direzione prevalentemente del flusso di falda, da NO verso SE, e di caratterizzare il gradiente piezometrico e le sue variazioni (Par. 4.1). L'area oggetto di studio presenta una superficie freatica a debole pendenza (gradiente piezometrico medio pari a 0.17%), molto prossima al piano campagna e con escursioni estremamente modeste durante l'anno idrologico. L'escursione del gradiente piezometrico, infatti, si attesta durante il periodo di monitoraggio tra lo 0.32% e lo 0.12%.

Secondo un approccio idrogeologico classico le velocità di flusso entro l'acquifero dovrebbero essere considerate pressoché costanti nello spazio e nel tempo, a parità di proprietà idrogeologiche [Fig. 5.1]. La realizzazione di 6 prove di diluizione e di 6 prove combinate di diluizione tracciamento evidenziano, invece, che localmente le velocità di filtrazione entro l'acquifero possono essere anche di un ordine di grandezza maggiori rispetto a quelle stimate con la legge di Darcy [Fig.5.2].

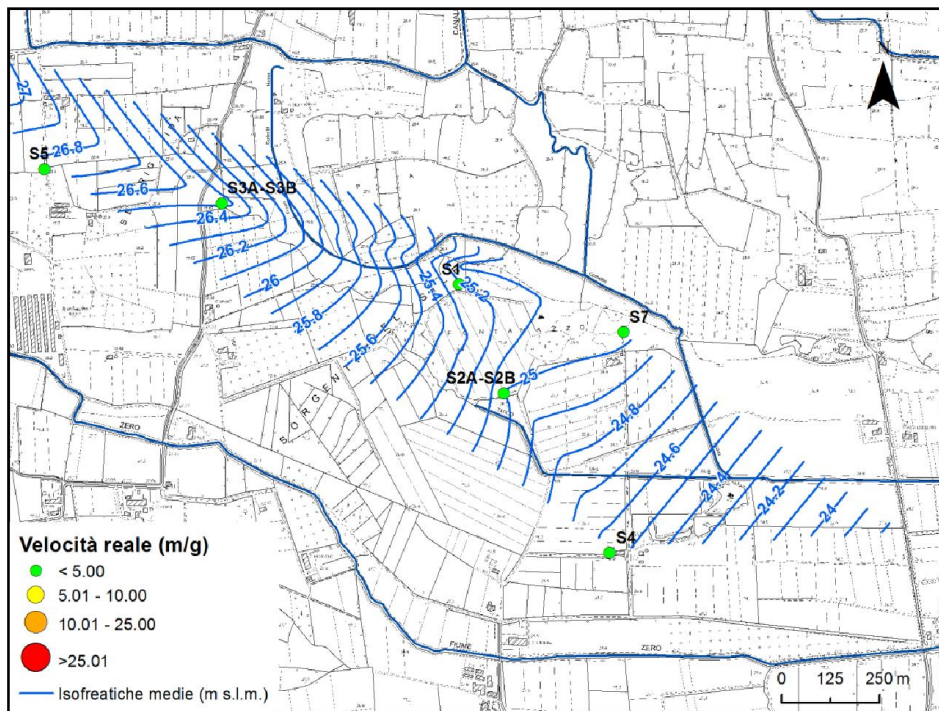


Fig. 5.1: superficie isofreatica media e velocità reali medie di flusso calcolate con la legge di Darcy, a partire da una permeabilità di 5.00×10^{-4} m/s ed una porosità efficace del 4%.

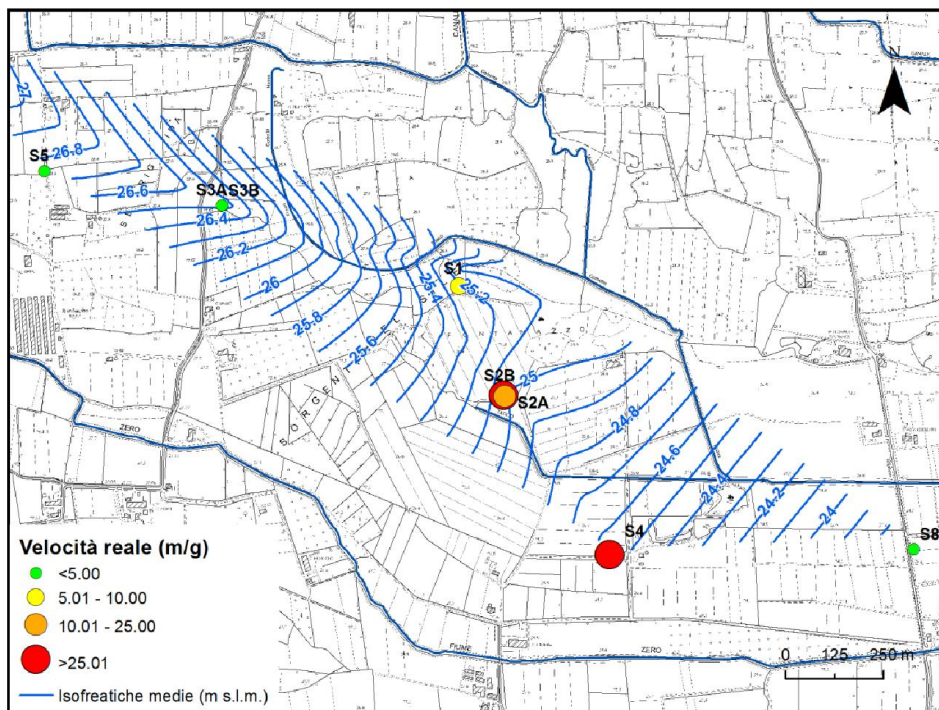


Fig. 5.2: superficie isofreatica media e velocità reali di flusso stimate con le prove di diluizione senza packers, utilizzando una porosità efficace del 4%.

Le prove di diluizione con tracciante salino sono prove di pozzo economiche, rapide e di facile realizzazione che permettono una stima puntuale della velocità di Darcy, limitatamente all'intorno del pozzo o piezometro in cui vengono realizzate. Nell'ambito del presente lavoro sono state testate due metodologie di iniezione: la prima omogeneizzando il tracciante sull'intera colonna d'acqua, la seconda isolando il tratto di prova del piezometro con l'ausilio di packers gonfiabili. Per quanto riguarda l'interpretazione delle prove di diluizione, sono stati confrontati due diversi approcci: quello analitico classico e la modellazione numerica tridimensionale alle differenze finite. La disponibilità di due doppiette piezometriche ha permesso inoltre la possibilità di effettuare prove di diluizione e tracciamento combinate che sono state interpretate attraverso modellazione numerica: monodimensionale analitica e tridimensionale alle differenze finite. Quest'ultima modalità ha permesso di estendere i risultati della diluizione puntuale a volumi più ampi di acquifero.

Le prove di diluizione/tracciamento mettono in luce che per i quantitativi di tracciante utilizzato (1500 - 125 g) non si generano modificazione della rete di flusso dovute alla differenza di densità. Il flusso proveniente da monte è tale da garantire una diluizione quasi immediata del tracciante ed il plume di soluto si muove secondo la direzione di flusso prevalente senza subire deviazione lungo la verticale. Per questa ragione le prove di diluizione realizzate con e senza i packers, nella doppietta S3A - S3B, non mostrano apprezzabili differenze nella stima della velocità di Darcy.

In Figura 5.3 sono mostrate, in funzione della profondità, le velocità di Darcy calcolate con i diversi metodi interpretativi; come si può vedere le prove di diluizione permettono di differenziare l'andamento della velocità lungo la verticale. Attraverso la classica soluzione analitica si stimano valori di velocità compresi tra 0.12 e 0.49 m/g, mentre con la modellazione numerica le velocità simulate scendono di circa un ordine di grandezza (0.02 - 0.04 m/g). Entrambe le soluzioni possono essere infine confrontate con un valore medio di velocità derivato dall'applicazione della legge di Darcy al gradiente piezometrico medio ed alla K utilizzata nella modellazione numerica (5.00×10^{-4} m/s). In questo caso la soluzione analitica è quella che si discosta maggiormente rispetto a quest'ultima stima con valori che la superano di oltre mezzo

ordine di grandezza, mentre la soluzione numerica sembra essere quella che meno si discosta da essa [Fig. 5.3].

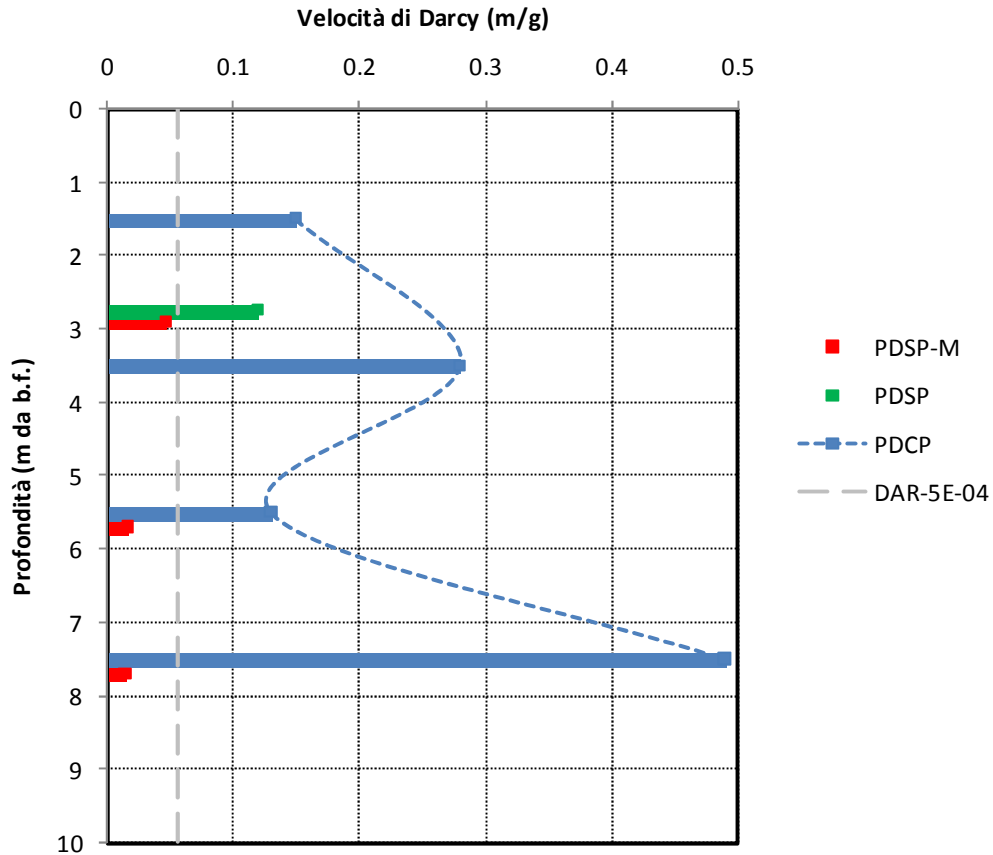


Fig. 5.3: velocità di Darcy (v_d) derivate dalle prove di diluizione e diluizione/tracciamento realizzate sul piezometro S3A; PDSP-M è v_d calcolata con la modellazione numerica tridimensionale sia per le prove con i packers che per quelle senza; PDSP è v_d calcolata con la soluzione analitica per la prova senza packers; PDCP è v_d calcolata con la soluzione analitica con packers; DAR-5E-04 è v_d calcolata con la legge di Darcy a partire da una K di 5.00×10^{-4} m/s ed il gradiente medio sul piezometro S3B.

L'interpretazione della prova di diluizione attraverso MODFLOW-MT3DMS presenta l'indubbio vantaggio di fornire oltre ai valori della velocità anche una stima significativa dei parametri di input necessari per arrivare a tale risultato. Nello specifico attraverso la modellazione è stato possibile stimare i valori di permeabilità, porosità efficace e dispersività caratteristici per la porzione di acquifero compresa tra i

piezometri S3A ed S3B (Par. 4.5). Tali valori risultano rispettivamente di 5.00×10^{-4} m/s per la K, del 4% per n_e e di 100 m per α_L , si tratta di parametri congrui con le caratteristiche litologiche dell'acquifero oggetto di studio.

Infine è possibile confrontare i valori di velocità di Darcy calcolati con la soluzione analitica della diluizione e le velocità reali stimate con il modello monodimensionale CXTFIT nel piezometro di valle. Facendo il rapporto v_d/v_r è possibile stimare la porosità efficace ammettendo che tra i piezometri di monte e valle non vi siano variazioni di rilievo di tale proprietà. In Figura 5.4 è visualizzato il profilo di porosità derivato da tale confronto per la doppietta S3A - S3B; si può vedere come la porosità efficace risulti sottostimata rispetto a quella utilizzata nella modellazione tridimensionale con valori che in alcuni casi scendono al di sotto dell'1% anche in corrispondenza delle litologie più grossolane. Tutto ciò è probabilmente dovuto al fatto che le velocità reali calcolate con CXTFIT risultano sovrastimate a causa del fatto che i piezometri di valle non si trovano lungo la direzione di flusso prevalente, ma sono in entrambi i casi leggermente ruotati.

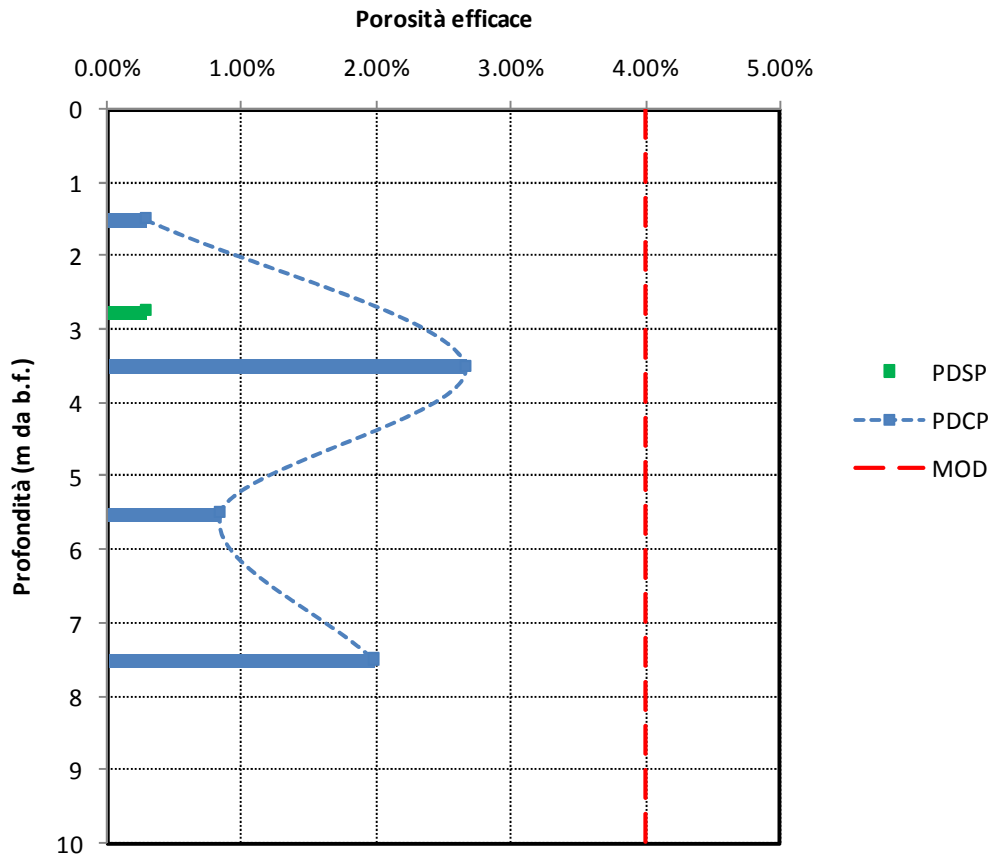


Fig. 5.4: Profilo di porosità efficace nel piezometro S3B; PDSP è v_d/v_r calcolato a partire dalla prova di diluizione/tracciamento senza packers; PDCP è v_d/v_r calcolato a partire dalle prove di diluizione/tracciamento con packers; MOD è la porosità efficace usata nella modellazione numerica tridimensionale.

La Figura 5.5 è uno scatter-plot con in ascissa i valori di velocità di Darcy ed in ordinata i valori di velocità reale stimati con le prove di diluizione/tracciamento realizzate con e senza packers. Come si può vedere i punti corrispondenti alle prove realizzate entro l'acquifero ghiaioso si dispongono lungo una retta in cui il reciproco della pendenza e proporzionale ad n_e ed è confrontabile con la pendenza del 4% usata nella modellazione numerica. Nello specifico n_e valido per entrambe le doppiette di piezometri è pari al 5.1%, mentre si discostano dalla retta i punti corrispondenti alle prove realizzate nei livelli superficiali più fini.

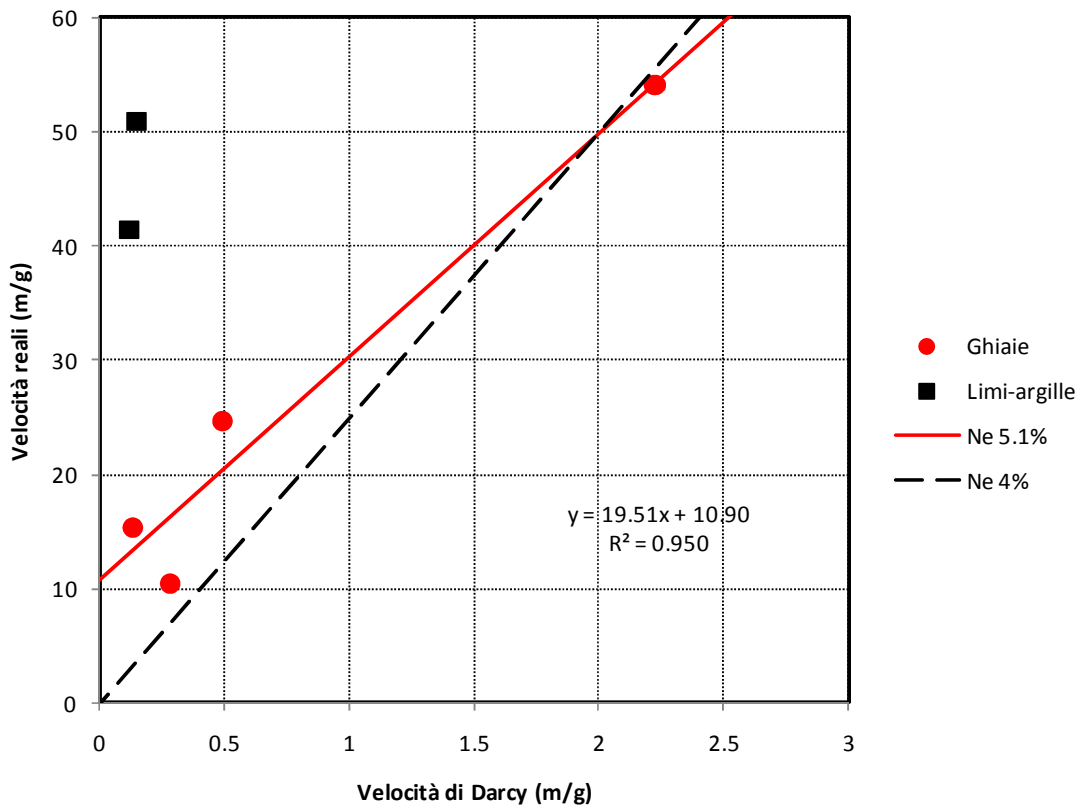


Fig. 5.5: Confronto tra le velocità di Darcy in ascissa e quella reale in ordinata derivate dalle prove di diluizione e tracciamento con e senza i packers. In rosso, la retta, la cui pendenza corrisponde al reciproco della porosità efficace delle ghiaie; in nero tratteggiato la porosità efficace utilizzata per calibrare le simulazioni con il modello tridimensionale.

L'approccio interpretativo attraverso la modellazione numerica tridimensionale con i codici MODFLOW ed MT3DMS è sicuramente efficace ed amplifica le possibilità di definizione delle caratteristiche idrogeologiche di un'area a partire dai risultati di una prova di diluizione. Di contro si tratta di un approccio di un approccio complesso, che richiede molto tempo e che in alcuni casi può risultare non indispensabile in confronto alla classica soluzione analitica.

BIBLIOGRAFIA

- Anderson M.P., Woessner W.W. (1992) Applied Groundwater Modeling-Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, San Diego (USA), pp. 381.
- ARPAV (2005) Le acque sotterranee della pianura Veneta, I risultati del progetto SAMPAS.
- Bondesan A., Menghel M., et al (2004) Carta geomorfologica della provincia di Venezia, scala 1:50.000 (con edizione digitale alla scala 1:20.000). LAC, Firenze.
- Bedient, P.B., Rifai, H.S., Newell, C.J. (1997) Ground Water Contamination Transport and Remediation. Prentice Hall, NJ. pp230.
- Bullo P., Dal Prà A. (1992) Lo sfruttamento ad uso acquedottistico delle acque sotterranee dell'alta pianura alluvionale veneta. geologicaromana, vol. xxx, pp. 403-410, atti I conv. naz. giovani ricercatori in geol. appl. Viterbo 28-31 Ottobre 1992.
- Castiglioni G.B. E Pellegrini G.B., (a cura di), (2001). Supplementi di geografia fisica e dinamica quaternaria. Note illustrative della carta geomorfologica della pianura padana.
- Comel A. (1955) I terreni dell'alta pianura trevigiana compresi nel foglio Conegliano con note sui terreni del Montello e dei Colli di Conegliano. Annali della stazione Chimica Agraria Sperimentale di Udine (Italia), Vol. III, sez. III, pag. 216. Udine.
- D'Alpaos L., Dal Pra' A. (1978) Indagini sperimentali sull'alimentazione delle falde idriche nell'alta pianura alluvionale del Piave. Atti del XVI Convegno di Idraulica e Costruzioni idrauliche, Torino, Settembre 1978.
- Dal Prà A., Sottani A. (1995) Groundwater velocity measurements with the single point dilution method (SPDM) in a sample site of the high venetian plain (Galleria V.- Northern Italy). 2° I.M.Y.R.A.G. International Meeting for Young Researchers in Applied Geology. Peveragno (CN).
- Domenico P.A., Schwartz F.W. (1998) Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley & Sons. 2nd Ed. Chichester.

- Drost W., Klotz D., Koch A., Moser H., Neumaier F., Rauert W. (1968) Point dilution methods of investigating ground water flow by means of radioisotopes. *Water Resources Research*, vol.4, n.1. pag.125-146.
- Fetter C.W. (1993): *Contaminant hydrogeology*. Prentice Hall Inc. New Jersey.
- Fontana A., Mozzi P., Bondesan A. (2004) L'evoluzione geomorfologica della pianura Veneto-Friulana in Bondesan A. & Meneghel M. (eds) *Geomorfologia della pianura di Venezia*. 113-116. Esedra Editrice, Padova
- Galante G. (2013) *Caratterizzazione idrogeologica nell'area delle risorgive del Sile (TV)*. Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova, Tesi di Laurea Magistrale.
- Gaspar E. (1987) *Modern trends in tracer hydrology*. Vol. I e II. Boca Raton., Fla. CRC Press. Florida.
- Gelhar L.W., Montoglou A., Welty C., Rehefeldt K.R. (1985) *A review of field scale physical solute transport processes in saturated and unsaturated porous media*. Final Proj. Rep. EPRI EA-4190, Elec. Power Res. Inst Palo Alto, Calif.
- Gruppo di Studio sulle Falde Acquifere Profonde della Pianura Padana, (1979) *Lineamenti idrogeologici della pianura padana*. Quad. Ist. Ric. Acque 51 (2): 70 pp, 11 fig. Roma.
- Gruppo di Studio sulle Falde Acquifere Profonde della Pianura Padana, (1979-1981) *Contributi tematici per la conoscenza della idrogeologia padana*. Quad. Ist. Ric. Acque 51 (2): 70 pp, 11 fig. Roma
- Harbaugh, A.W., 2005, MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model -- the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, variously p.
- Moser H., Neumaier F., Rauert W. (1957) Die anwendung radioaktiver isotope in der hydrologie II. Einverfahren zur ermittlung der ergiebigkeit von grundwasserströmungen. *Atomkernenergie*, Vol.2, n.5, pag.225-231.
- Mozzi P. (2005) *Alluvial plain formation during the Late Quaternary between the Southern Alpine margin and the Lagoon of Venice (Northern Italy)*. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, Supl. VII, 219-229.


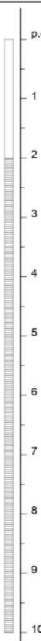
- Klotz D. (1978) a-werteausgebauterbohrungen. GSF-Bericht R 176, Inst. fur Radiohydrometrie, Munich.
- Ogilvi N.A. (1958) Electrical method for measurements of the filtration velocity of subterranean waters. Bull. Sci. Technol. News, Gosgeoltekhizdat. Moscow.
- Toride N., Leij FJ and Th. van Genuchten M.(1995) The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer. Version 2.0. U.S. Salinity Lab. Res. Rep. 137 Riverside, CA.
- Zanin A. & Battagion P.(1999) sperimentazione sui rapporti tra derivazioni e utilizzazioni nell'ambito dei fiumi Piave, Sile, Brenta e Laguna di Venezia. Giornata mondiale dell'acqua, Roma 29 Marzo 1999.
- Zheng & Whang, (1999) MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide, Contract Report SERDP-99-1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.


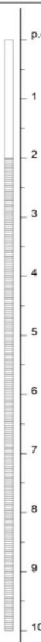
ALLEGATO 1: - STRATIGRAFIE

S1		Tipologia: carotaggio continuo		Ubicazione: Gran Bosco dei Fontanassi, presso le risorgive del settore nord		Coordinate Gauss-Boaga:	
Data: 6/2/13		Operatori: Geoservizi srl, Tiziano Abbà		Quota		Note	
Note alle manovre di carotaggio	Log	Descrizione stratigrafica	Campioni	Note	Foto	Piezometro	
0-0,4 m* 0,4-1,0 m* 1,0-2,0 m* 2,0-3,0 m* 3,0-4,0 m** 4,0-5,0 m** 5,0-6,0 m** 6,0-7,5 m** 7,5-9,0 m** 9,0-10,0 m** (matrice sabbiosa rifiuta nella parte alta del carotere e in parte diavata) *Eseguita direttamente con rivestimento da 152 mm; carota compressa durante l'estrazione. **Estrazione delle ghiaie per gravità, tenendo il più possibile in ordine i segmenti di carota.		0-2,10 m: Torba 2,1-3,0 m: Limo debolmente sabbioso finemente laminato 3,0-6,0 m: Ghiaia media (med. 1,5-2 cm, max 5-6 cm) 6,0-10,0 m: Ghiaia medio-grosolana (med. 3-3,5 cm, max 7-8 cm; ciottoli grossolani maggiormente concentrati fra 9 e 10 m.	4,3m: ghiaia 4,5m: ghiaia 6,0-6,5m: ghiaia 9-10m: ghiaia	0-4,8m: Unità del Brenta (Pleistocene Superiore, LGM) 4,8-10,0m: Unità del Pivve di Montebelluna			
S2		Tipologia: carotaggio continuo		Ubicazione: Gran Bosco dei Fontanassi, presso l'accesso da sud-est		Coordinate Gauss-Boaga:	
Data: 5/2/13		Operatori: Geoservizi srl, Tiziano Abbà		Quota		Note	
Note alle manovre di carotaggio	Log	Descrizione stratigrafica	Campioni	Note	Foto	Piezometro	
0-0,4 m* 0,4-0,6 m* 0,6-1,0 m* 1,0-1,3 m* 1,3-2,3 m 2,3-3,0 m 3,0-4,5 m (spezzone 3,6-4,5 rifiuto e ricamponato con manovra apposita) 4,5-6,0 m** 6,0-7,5 m** 7,5-8,2 m** 8,2-9,2 m** 9,2-10,0 m** *Eseguita direttamente con rivestimento da 152 mm; carota compressa durante l'estrazione. **Estrazione della ghiaia per gravità, tenendo il più possibile in ordine i segmenti di carota.		0-0,4 m: Arativo. Limo torboso. 0,4-0,85 m: Limo argilloso. Scretature 2,5Y 6/8. Sparse concrezioni carbonatiche sub-centimetriche 0,85-1,35 m: Limo argilloso finemente laminato grigio chiaro. Sottili intercalazioni di sabbia fine. 1,35-1,9 m: Limo sabbioso 2,5Y 6/0-6/4. Limite inferiore netto. 1,9-2,0 m: Limo argilloso grigio. Limite inferiore netto. 2,0-2,65 m: Sabbia da medio-fine a medio-grosolana (fining-up). Limite inferiore netto. 2,65-3,3 m: Ghiaia fine (med. 2-2,5 cm, max 4 cm) sabbiosa, matrice sabbiosa più abbondante in alto; tenerezza fining-up. Litologie: Carbonati dominanti, subordinati porfidi e metamorfiti. 3,3-3,62 m: Limo debolmente argilloso debolmente sabbioso. Intervallo 3,43-3,60 m limo organico, con livello debolmente torboso fra 3,43 e 3,47. 3,62-4,80 m: Sabbia fine con limo. Intervallo di limo sabbioso fra 4,5 e 4,7 m. Limite inferiore netto. 4,80-8,0 m: Ghiaia media (med. 3 cm) sabbiosa. Litologie: carbonati dominanti, subordinate vulcanoclastiti, metamorfiti e granitidi. 8,0-9,1 m: Ghiaia medio-fine sabbiosa 9,1-10,0 m: Ghiaia medio-grosolana (5-7 cm). Litologie: carbonati prevalenti, subordinati vulcanoclastiti e granitidi, rari porfidi.	2,6-2,8m: sabbia 2,8-3,2m: ghiaia 3,4m: limo organico 4,8-5,0m: ghiaia 5,0-5,1m: ghiaia 5,3-5,6m: ghiaia 5,6-6,0m: ghiaia 9,2-9,6m: ghiaia 9,6-10,0m: ghiaia	0-4,8m: Unità del Brenta (Pleistocene Superiore, LGM) 4,8-10,0m: Unità del Pivve di Montebelluna			

S3	Tipologia: carotaggio continuo	Ubicazione: via Santa Brigida, presso la sorgente storica del Sile	Coordinate Gauss-Boaga:			
Data: 15/2/13		Operatori: Geoservizi srl, Tiziano Abbà	Quota	Note		
Note alle manovre di carotaggio	Log	Descrizione stratigrafica	Campioni	Note	Foto	Piezometro
<p>*Eseguita direttamente con rivestimento da 152 mm, carota compressa durante l'estrazione.</p> <p>**Estrazione delle ghiaie per gravità, tenendo il più possibile in ordine i segmenti di carota.</p>		<p>0-0,40 m: Arallo. Limo argilloso.</p> <p>0,40-0,50 m: Limo argilloso. 2,5Y 6/4. Scrozzature 10YR 5/8 e 2,5Y 6/2. Diffusi noduli e patine di Fe/Mn. Resti vegetali attuali. Limite inferiore graduale.</p> <p>0,80-1,80 m: Limo argilloso con livelli sabbiosi centimetrici</p> <p>1,80-3,30 m: Alternanze di livelli sabbioso-limosi di 1-3 cm e livelli argillosi di 5 mm. Colore grigio fino a 2,35 m; poi diffuse scrozzature legate alla presenza di radici attuali o sub-attuali.</p> <p>3,30-3,50 m: Limo organico marrone blaugiastro scuro (3/10 Y) finemente laminato con intercalazioni limose chiare a resti vegetali carbonificati. Limite inferiore graduale per alteranze.</p> <p>3,50-3,85 m: Limo sabbioso finemente laminato con sottili intercalazioni limose. Intervallo limoso fra 3,6 e 3,7 m.</p> <p>3,85-6,0 m: Ghiaia media (med. 1,5-2 cm, max 5 cm). Litologie: carbonati dominanti, secondarie vulcanoclastiti e metamorfite (gneiss, filadi), rare magmatiti</p> <p>6,0-8,0 m: Ghiaia media (med. 2,5-3 cm, max 9 cm). Litologie: Carbonati dominanti; subordinate vulcanoclastiti, vulcaniti (profidi, vulcaniti basiche), metamorfite (gneiss, filadi), magmatiti (granitoidi)</p> <p>8,0-10,0 m: Ghiaia medio-grossolana (med. 3,5-5 cm, max 8-9 cm o più, alcuni ciottoli forse >10 cm levigati dal carotatore).</p>	<p>2,4m: resti vegetali</p> <p>3,3-3,5m: spezzione campionata integralmente</p> <p>3,9-4,2m: Ghiaia</p> <p>4,5-5,0m: Ghiaia</p> <p>5,0-6,0m: Ghiaia</p> <p>6,0-7,0m: Ghiaia</p> <p>7,0-8,0m: Ghiaia</p> <p>8,0-9,0m: Ghiaia</p> <p>9,0-9,5m: Ghiaia</p> <p>9,5-10 m: Ghiaia</p>	<p>0-3,85m: Unità del Brenta (Pleistocene Superiore, LGM)</p> <p>3,85-10,0m: Unità del Piave di Montebelluna</p>		

S4	Tipologia: carotaggio continuo	Ubicazione: via Casera	Coordinate Gauss-Boaga:			
Data: 11/2/13		Operatori: Geoservizi srl, Tiziano Abbà	Quota	Note		
Note alle manovre di carotaggio	Log	Descrizione stratigrafica	Campioni	Note	Foto	Piezometro
<p>*Eseguita direttamente con rivestimento da 152 mm, carota compressa durante l'estrazione.</p> <p>**Estrazione delle ghiaie per gravità, tenendo il più possibile in ordine i segmenti di carota.</p>		<p>0-1,00 m: Terreno di riporto</p> <p>1,00-1,20 m: Limo sabbioso finemente laminato</p> <p>1,20-1,55 m: Sabbia fine limosa, tendenza coarsening-up. Limite inferiore graduale.</p> <p>1,55-2,00 m: Limo sabbioso. Presenza di scrozzature verdastre (5Y) a 1,80 m.</p> <p>2,00-2,70 m: Sabbia fine limosa finemente laminata, tendenza coarsening-up. Resti vegetali al letto. Limite inferiore graduale (compattata).</p> <p>2,70-3,10 m: Limo sabbioso finemente laminato, sparsi resti vegetali.</p> <p>3,10-3,57 m: Sabbia fine limosa finemente laminata, tendenza coarsening-up fino a 3,2 m. Sparsi resti vegetali. Limite inferiore netto.</p> <p>3,57-4,00 m: Limo debolmente argilloso con sottili intercalazioni sabbiose e livelli centimetrici di limo organico con resti vegetali. Limite inferiore graduale.</p> <p>4,00-5,21 m: Limo argilloso con sparsi resti vegetali mal conservati. Alla base limo debolmente sabbioso.</p> <p>5,21-5,47 m: Sabbia fine limosa. Limite inferiore netto, debolmente erosivo.</p> <p>5,47-5,55 m: Limo argilloso debolmente organico con resti vegetali. Limite inferiore graduale.</p> <p>5,55-5,80 m: Limo argilloso con resti vegetali rari e mal conservati.</p> <p>5,80-6,17 m: Limo e sabbia fine fortemente scrozzate. Colore (2,5Y-10YR). Limite inferiore netto.</p> <p>6,17-6,31 m: Limo debolmente argilloso grigio. Limite inferiore netto.</p> <p>6,31-6,51 m: Limo e sabbia fine fortemente scrozzato (colore 2,5Y-10YR). Limite inferiore netto.</p> <p>6,51-10,00 m: Ghiaia media (med. 2-2,5 cm); abbondante matrice sabbiosa. Mancato campionamento fra 7,5 e 8,5 m.</p>	<p>2,75m: resti vegetali (RV)</p> <p>2,84m: RV</p> <p>3,75m: RV</p> <p>5,52m: RV</p>	<p>0-6,51m: Unità del Brenta (Pleistocene Superiore, LGM)</p> <p>6,51-10,0m: Unità del Piave di Montebelluna</p>		

S5		Tipologia: carotaggio continuo		Ubicazione: Santa Brigida, strada vicinale interpodereale		Coordinate Gauss-Boaga:							
Data: 18/2/13		Operatori: Geoservizi srl, Tiziano Abbà		Quota		Note							
Note alle manovre di carotaggio		Log		Descrizione stratigrafica		Campioni		Note		Foto		Piezometro	
0-0,6 m*		p.c.		0-0,4 m: Arativo. Limo sabbioso									
0,6-1 m*				0,4-0,55 m: Limo sabbioso. Colore, HCL (orizzonte Bw)									
1-3 m (Compattata nello spezzone sabbioso; recuperato materiale nella manovra successiva)				0,55-0,80 m: Limo argilloso deb. Sabbioso (orizzonte Bw2)									
3-3,5 m				0,80-1,05 m: Limo argilloso (orizzonte BC)		2-2,6m: Sabbia fine							
3,5-4,5 m**				1,05-1,35 m: Limo sabbioso con intercalazioni sabbiose		2,8-3,4m: Sabbia grossolana		0-3,5m: Unità del Brenta (Pleistocene Superiore, LGM)					
4,5-5,3 m**				1,40-1,55 m: Limo sabbioso argilloso con intercalazioni limoso-sabbiose		3,5-4,5m: Ghiaia							
5,3-6,3 m**				1,55-1,90 m: Sabbia fine limosa, tendenza fining-up. Limite inferiore graduale.		4,5-5,2m: Ghiaia							
6,3-7,8 m**				1,90-2,80 m: Sabbia medio-fine in alto, medio-grossolana in basso, tendenza fining-up. Limite inferiore graduale		5,2-6m: Ghiaia		3,5-10,0m: Unità del Piave di Montebelluna					
7,8-9,0 m**				2,80-3,50 m: Sabbia grossolana ghiaiosa (ciottoli di 1-2 cm). Limite inferiore coincidente con testa di manovra. Probabilmente debolmente erosivo.		6-7m: Ghiaia							
9,0-10,0 m**				3,90-4,00 m: Ghiaia media (ciottoli med. 2-3 cm, max 4,5 cm)									
*Eseguite direttamente con rivestimento da 152 mm; carota compressa durante l'estrazione.				4,00-5,00 m: Ghiaia media (ciottoli di 3-5 cm)									
**Estrazione delle ghiaie per gravità, tenendo il più possibile in ordine i segmenti di carota.				5,00-10,00 m: Ghiaia media (ciottoli med. 2-3 cm, max 7-8 cm)									

S6		Tipologia: carotaggio continuo		Ubicazione: via Corbetta, Albaredo		Coordinate Gauss-Boaga:							
Data: 18/2/13		Operatori: Geoservizi srl, Tiziano Abbà		Quota		Note							
Note alle manovre di carotaggio		Log		Descrizione stratigrafica		Campioni		Note		Foto		Piezometro	
0-0,6 m*		p.c.		0-2,5 m: Riporto per interramenti di un fossato									
0,6-1,5 m*				2,5-4,8 m: Ghiaia media (med. 2,5-3 cm)									
1,5-3,5 m				4,8-5,9 m: Ghiaia media (med. 1,5-2 cm, max 4 cm)									
3,5-4,5 m** (riflusso in carota di materiale del riporto superficiale)				5,9-10,0 m: Ghiaia medio-grossolana (med. 2-3 cm, max 7-8 cm)									
4,5-5 m**						3-3,5m: Ghiaia							
5-5,5 m**						3,5-4,5m: Ghiaia		2,5-10,0m: Unità del Piave di Montebelluna					
6,5-8 m**						4,5-5,0m: Ghiaia							
8-10 m**						5,0-5,5m: Ghiaia							
*Eseguite direttamente con rivestimento da 152 mm; carota compressa durante l'estrazione.						5,5-6,0m: Ghiaia							
**Estrazione delle ghiaie per gravità, tenendo il più possibile in ordine i segmenti di carota.						6,5-7,0m: Ghiaia							
						7,5-8,0m: Ghiaia							

ALLEGATO 2: - PIEZOMETRI

Codice S1

Coordinate geografiche
E 1339093,708
N 5693440,341
Quota 26.27m slm



LOCALITÀ	Gran Bosco dei Fontanassi, presso le risorgive del settore
Ø PIEZOMETRO	3 pollici (7.62 cm)
PROFONDITÀ	10 metri
MUNITO DI DIVER	si
MUNITO DI BAROMETRO	no
TRATTO FENESTRATO	9 metri (da 1m a 10m)

Codice S2A/S2B

Coordinate geografiche
E 1339295,245
N 5693108,781
Quote 25.773,25.833m slm,



LOCALITÀ	Gran Bosco dei Fontanassi, presso l'accesso da sud-est
Ø PIEZOMETRO	3 pollici (7.62 cm)
PROFONDITÀ PIEZOMETRO	10 metri
MUNITO DI DIVER	no
MUNITO DI BAROMETRO	no
TRATTO FENESTRATO	9 metri (da 1m a 10m)

Codice S3A/S3B

Coordinate geografiche

E 1338313,566

N 5693830,412

Quote 27.29,27.31m slm



LOCALITÀ	Via Santa Brigida, presso a sorgente storica del Sile
Ø PIEZOMETRO	3 pollici (7.62 cm)
PROFONDITÀ PIEZOMETRO	10 metri
MUNITO DI DIVER	si
MUNITO DI BAROMETRO	si
TRATTO FENESTRATO	9 metri (da 1 m a 10m)

Codice S4

Coordinate geografiche
E 1339665,812
N 5692491,168
Quota 25.307m slm



LOCALITÀ	Via Casera
Ø PIEZOMETRO	3 pollici (7.62 cm)
PROFONDITÀ PIEZOMETRO	10 metri
MUNITO DI DIVER	no
MUNITO DI BAROMETRO	no
TRATTO FENESTRATO	9 metri (da 1m a 10m)

Codice S5

Coordinate geografiche

E 1337663,448

N 5693973,438

Quota 27.91m slm



LOCALITÀ	Via Santa Brigida
Ø PIEZOMETRO	3 pollici (7.62 cm)
PROFONDITÀ PIEZOMETRO	10 metri
MUNITO DI DIVER	no
MUNITO DI BAROMETRO	no
TRATTO FENESTRATO	9 metri (da 1m a 10m)

Codice S6

Coordinate geografiche
E 1336935,316
N 5694740,577
Quota 28.352m slm



LOCALITÀ	Via Corbetta, Albaredo
Ø PIEZOMETRO	3 pollici (7.62 cm)
PROFONDITÀ PIEZOMETRO	10 metri
MUNITO DI DIVER	no
MUNITO DI BAROMETRO	no
TRATTO FENESTRATO	9 metri (da 1m a 10m)

Codice S7

Coordinate geografiche

E 1339776,332

N 5693245,306

Quota 24.86m slm



LOCALITÀ	Carrareccia per accesso di servizio all'area del Gran Bosco dei Fontanassi, comune di Piombino Dese
Ø PIEZOMETRO	3 pollici (7.62 cm)
PROFONDITÀ PIEZOMETRO	10 metri
MUNITO DI DIVER	no
MUNITO DI BAROMETRO	no
TRATTO FENESTRATO	9 metri (da 1m a 10m)

Codice S8

Coordinate geografiche
E 1340784,015
N 5692465,164
Quota 24.114m slm

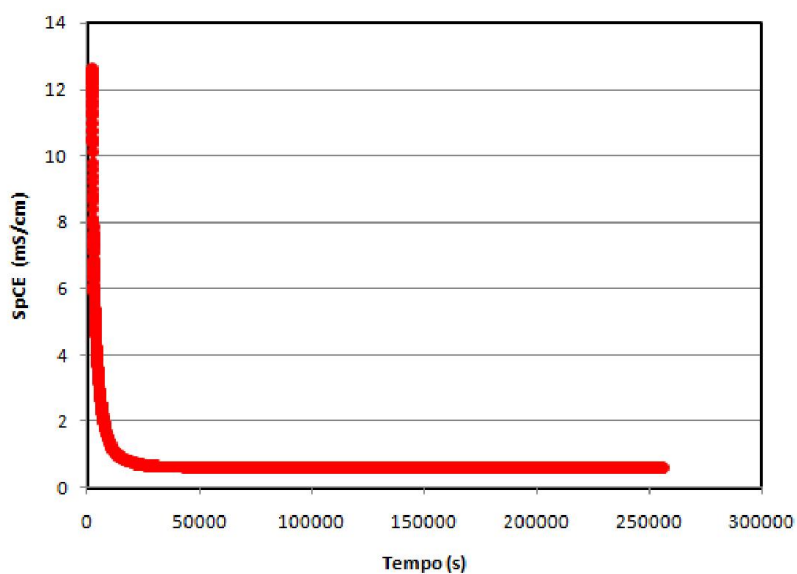


LOCALITÀ	Via Munaron, comune di Piombino Dese
Ø PIEZOMETRO	3 pollici (7.62 cm)
PROFONDITÀ PIEZOMETRO	10 metri
MUNITO DI DIVER	no
MUNITO DI BAROMETRO	no
TRATTO FENESTRATO	9 metri (da 1m a 10m)

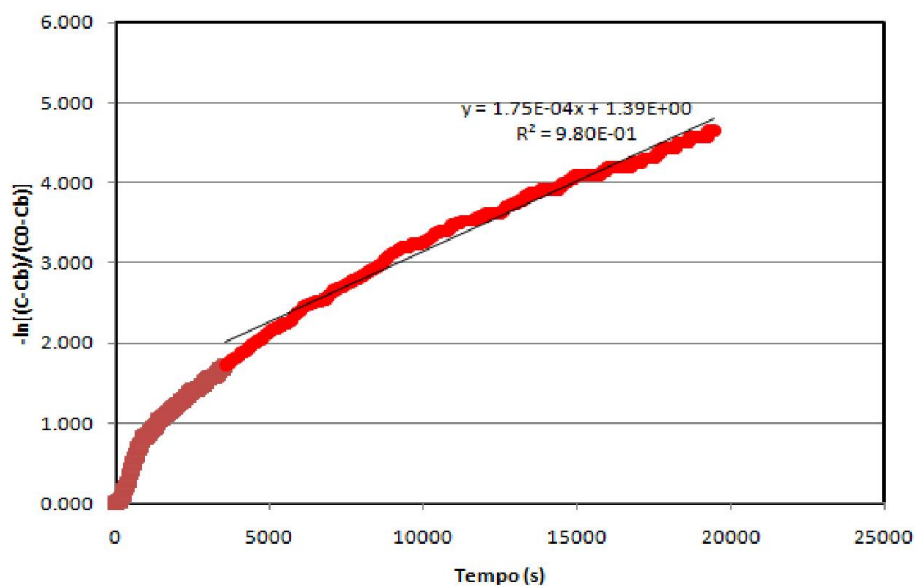
ALLEGATO 3: - PROVE DI DILUIZIONE E TRACCIAMENTO

PROVA DI DILUIZIONE DEL 01/07/2013 IN S1

Vengono di seguito riportati i grafici relativi alla curva di diluizione, ed all'interpretazione della curva stessa.



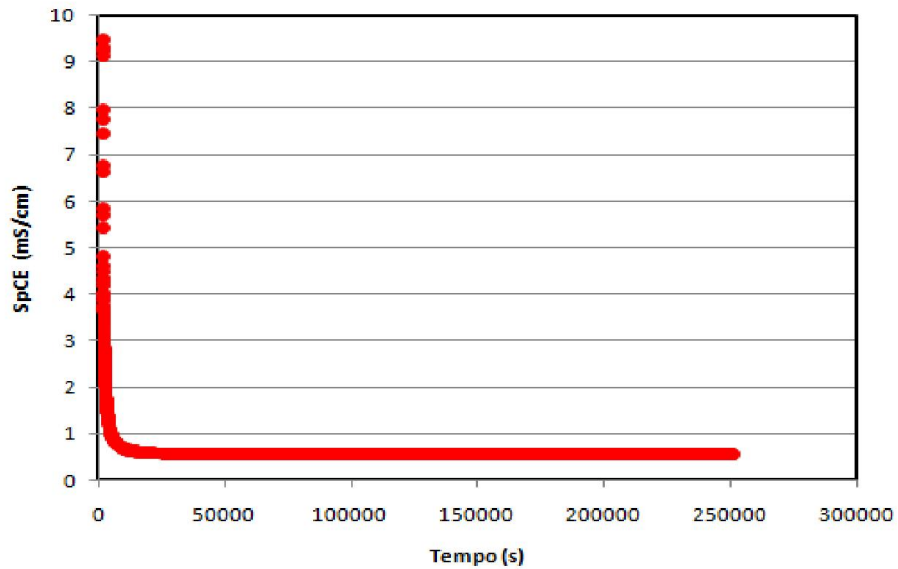
Curva di scarico della soluzione salina all'interno del piezometro S1.



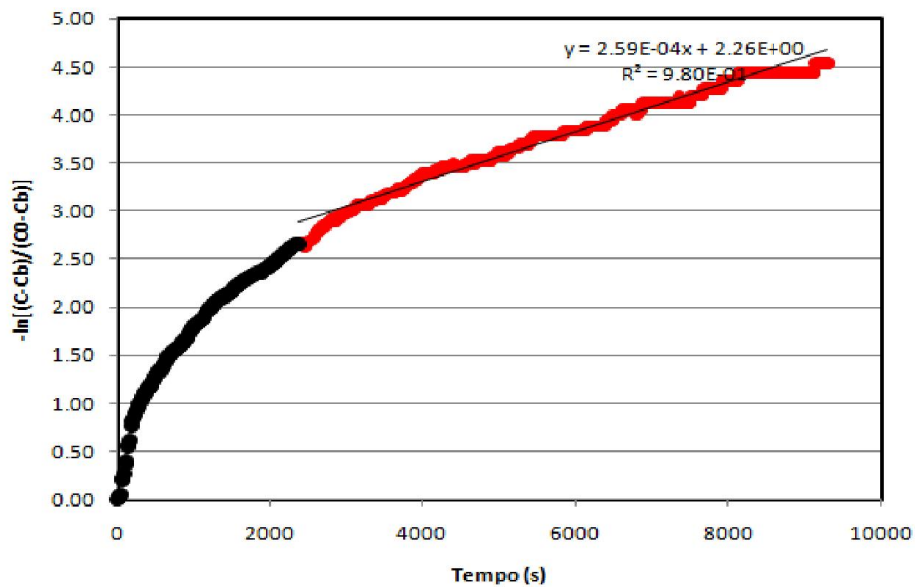
Interpretazione della prova di diluizione in S1.

PROVA DI DILUIZIONE DEL 01/07/2013 IN S2A

Vengono di seguito riportati i grafici relativi alla curva di diluizione, ed all'interpretazione della curva stessa.



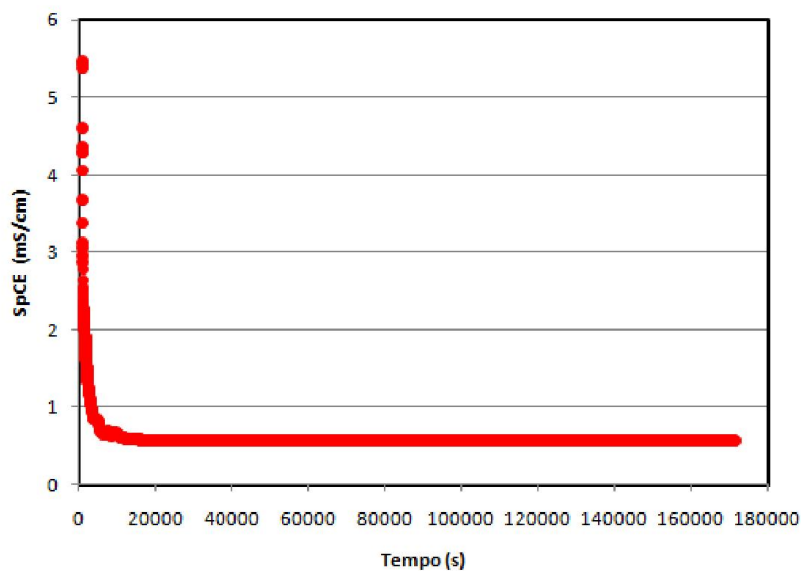
Curva di scarico della soluzione salina all'interno del piezometro S2A.



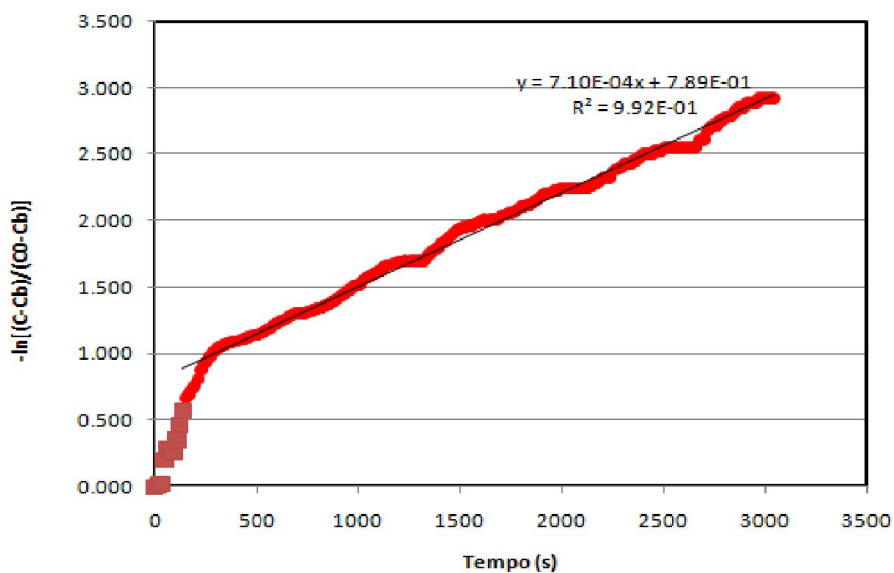
Interpretazione della prova di diluizione in S2A.

PROVA DI DILUIZIONE DEL 04/07/2013 IN S2B

Vengono di seguito riportati i grafici relativi alla curva di diluizione, ed all'interpretazione della curva stessa.



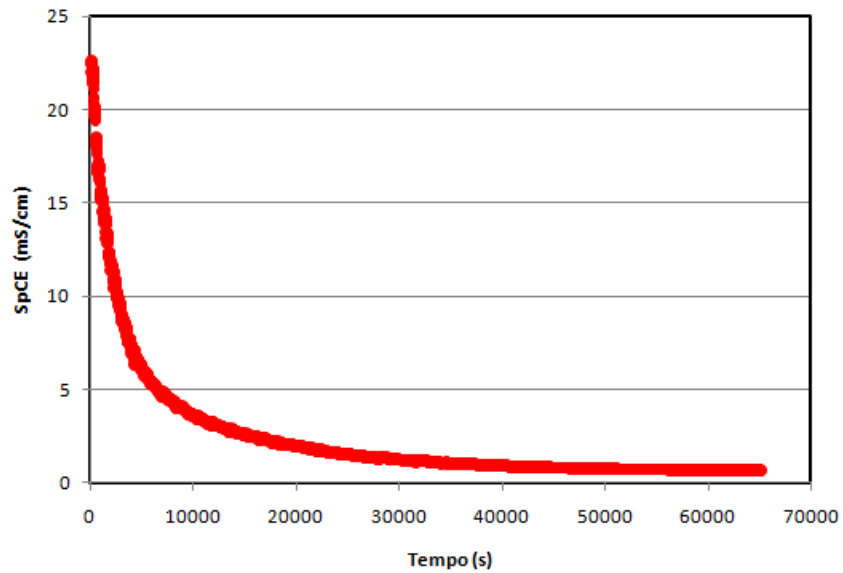
Curva di scarico della soluzione salina all'interno del piezometro S2B.



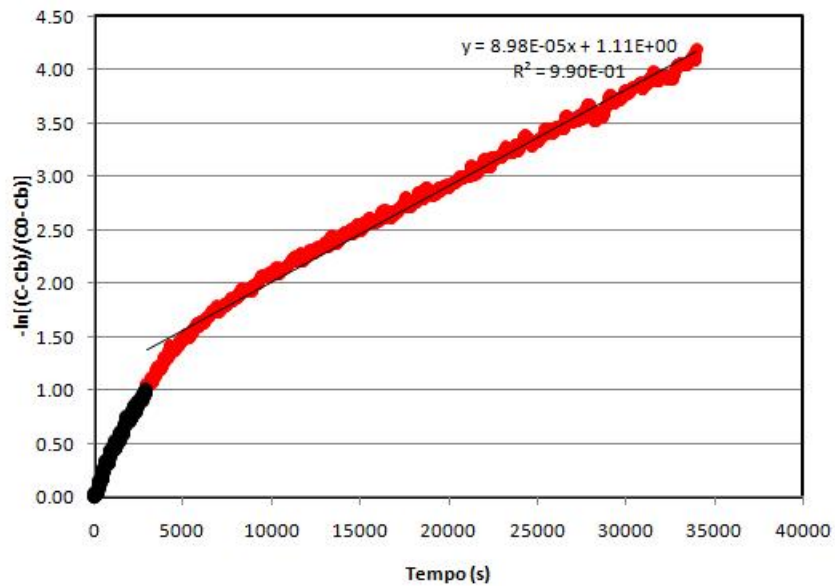
Interpretazione della prova di diluizione in S2B.

PROVA DI DILUIZIONE DEL 06/06/2013 IN S3A

Vengono di seguito riportati i grafici relativi alla curva di diluizione, ed all'interpretazione della curva stessa.



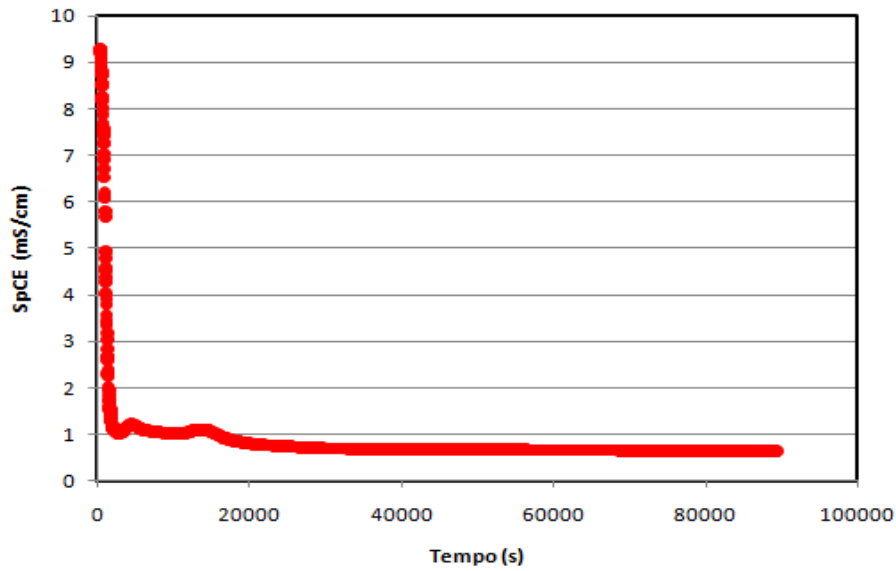
Curva di scarico della soluzione salina all'interno del piezometro S3A.



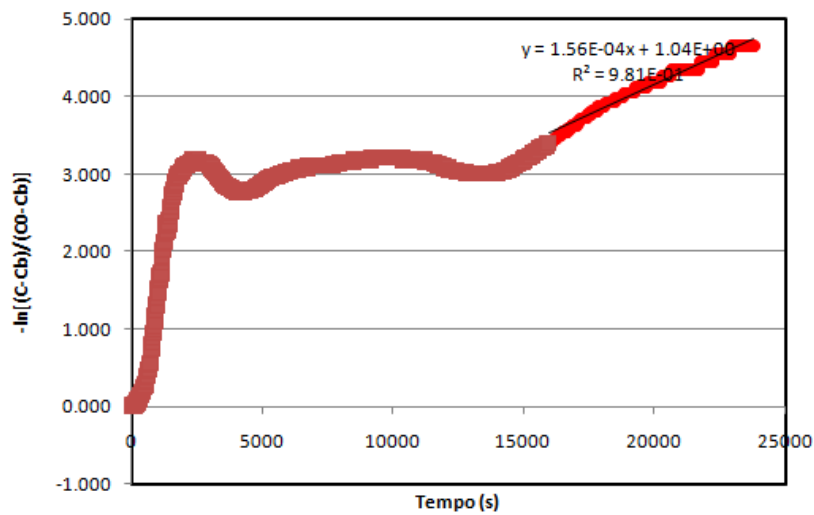
Interpretazione della prova di diluizione in S3A.

PROVA DI DILUIZIONE DEL 14/07/2013 IN S3B

Vengono di seguito riportati i grafici relativi alla curva di diluizione, ed all'interpretazione della curva stessa.



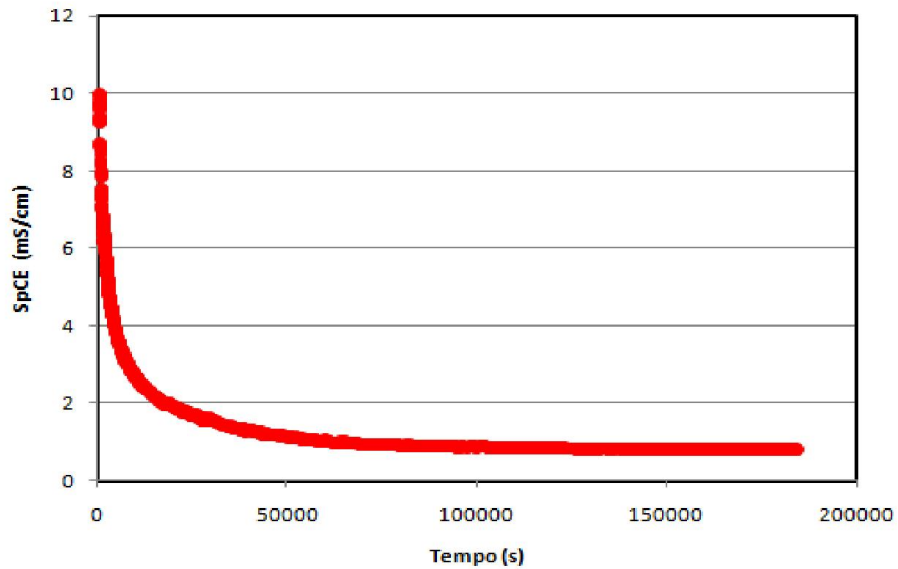
Curva di scarico della soluzione salina all'interno del piezometro S3B.



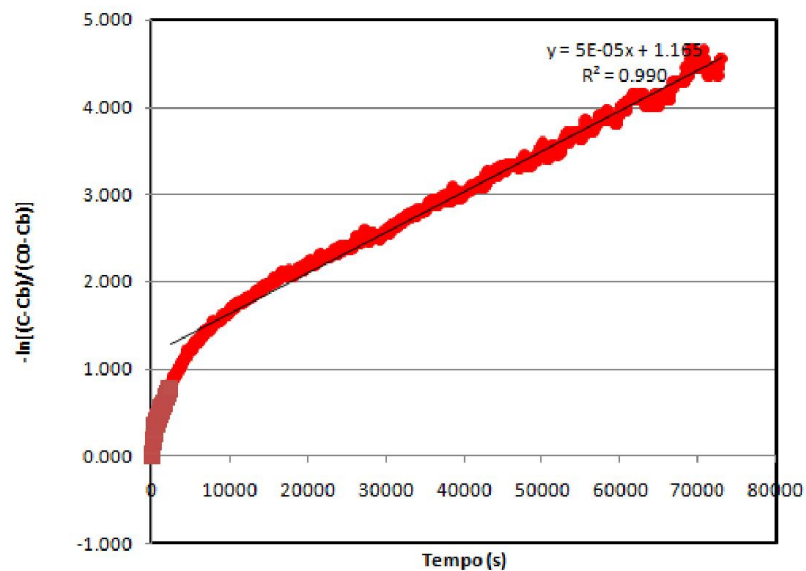
Interpretazione della prova di diluizione in S3B.

PROVA DI DILUIZIONE DEL 25/06/2013 IN S5

Vengono di seguito riportati i grafici relativi alla curva di diluizione, ed all'interpretazione della curva stessa.



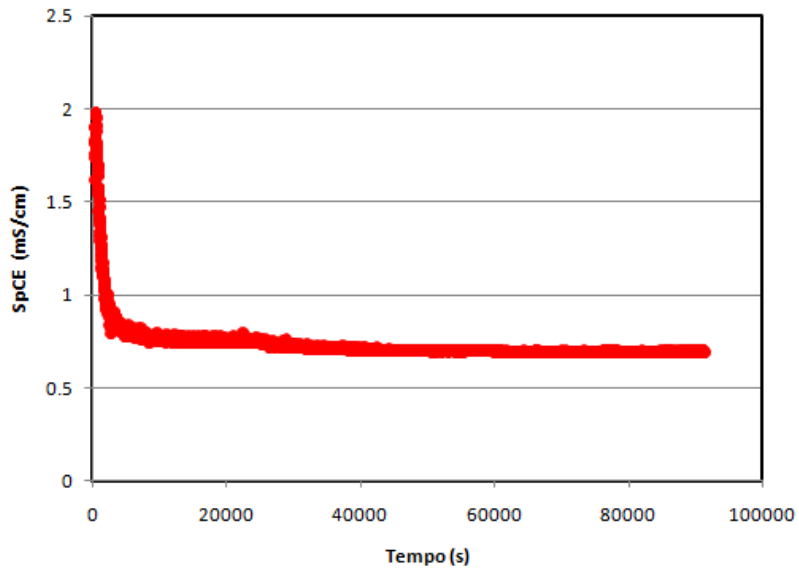
Curva di scarico della soluzione salina all'interno del piezometro S5.



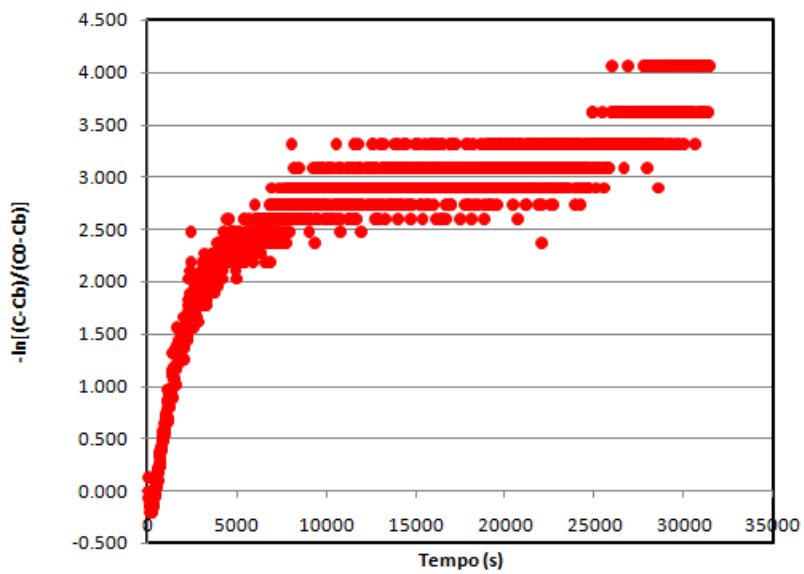
Interpretazione della prova di diluizione in S5.

PROVA DI DILUIZIONE DEL 14/07/2013 IN S6

Vengono di seguito riportati i grafici relativi alla curva di diluizione, ed all'interpretazione della curva stessa.



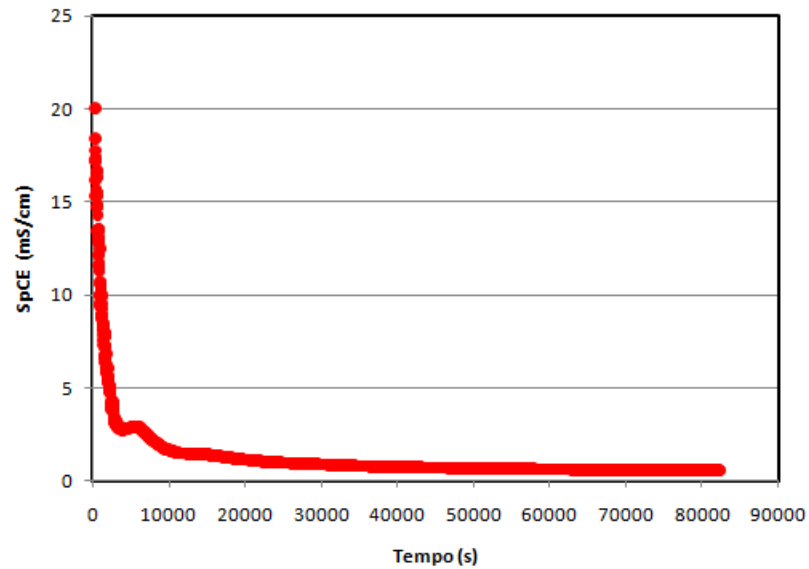
Curva di scarico della soluzione salina all'interno del piezometro S6.



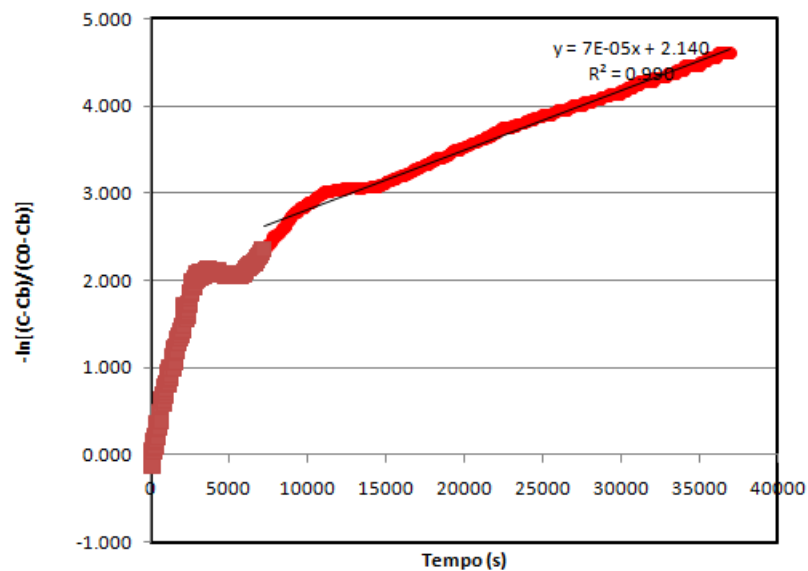
Interpretazione della prova di diluizione in S6.

PROVA DI DILUIZIONE DEL 28/06/2013 IN S8

Vengono di seguito riportati i grafici relativi alla curva di diluizione, ed all'interpretazione della curva stessa.



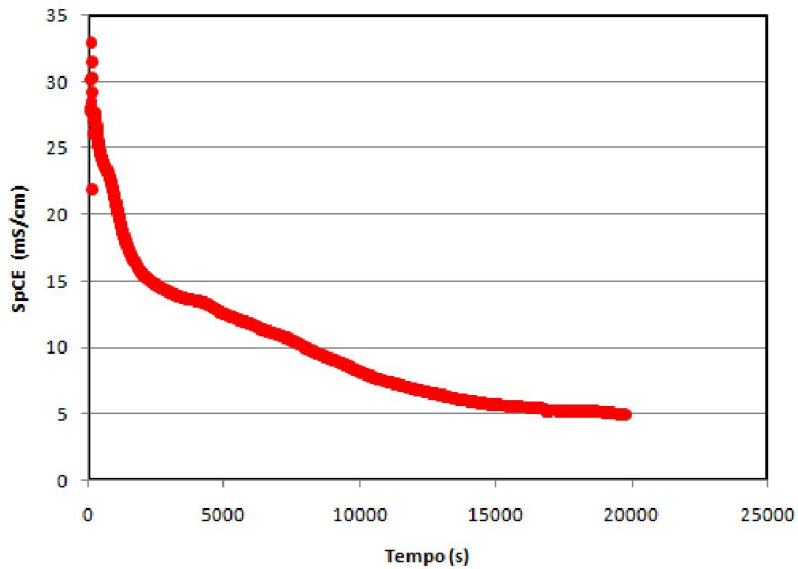
Curva di scarico della soluzione salina all'interno del piezometro S8.



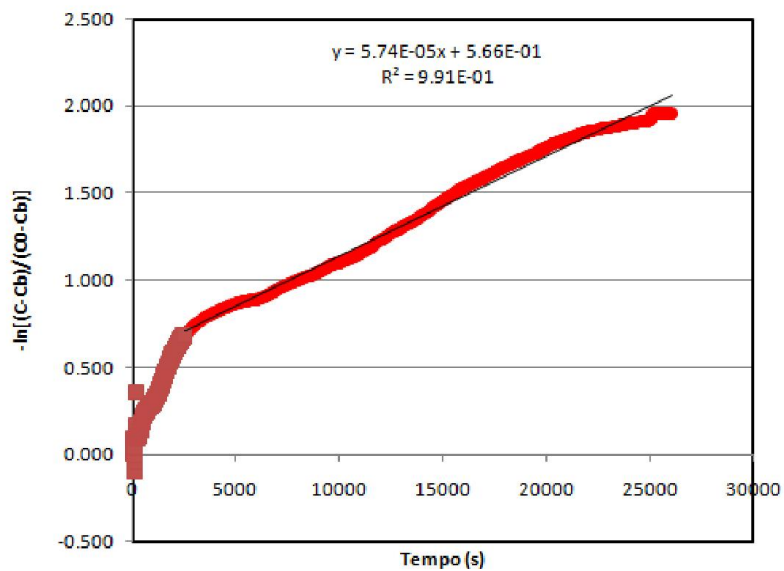
Interpretazione della prova di diluizione in S8.

PROVA DI DILUIZIONE DEL 16/07/2013 IN S3A CON PACKER

Vengono di seguito riportati i grafici relativi alla curva di diluizione, ed all'interpretazione della curva stessa.



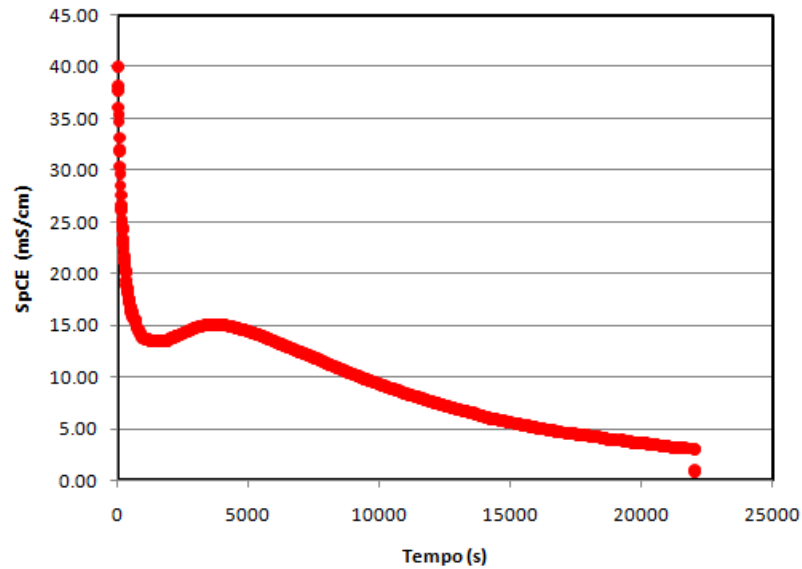
Curva di scarico della soluzione salina all'interno del piezometro S3A.



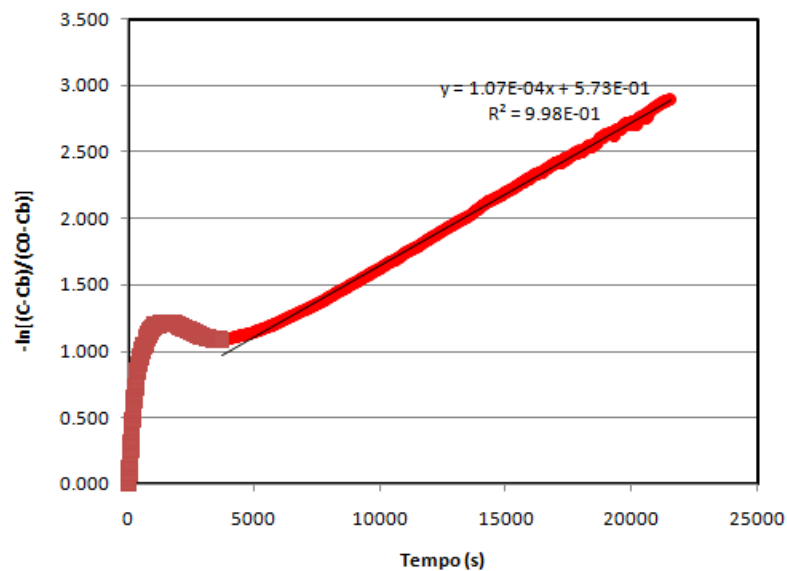
Interpretazione della prova di diluizione in S3A.

PROVA DI DILUIZIONE DEL 05/09/2013 IN S3A CON PACKER

Vengono di seguito riportati i grafici relativi alla curva di diluizione, ed all'interpretazione della curva stessa.



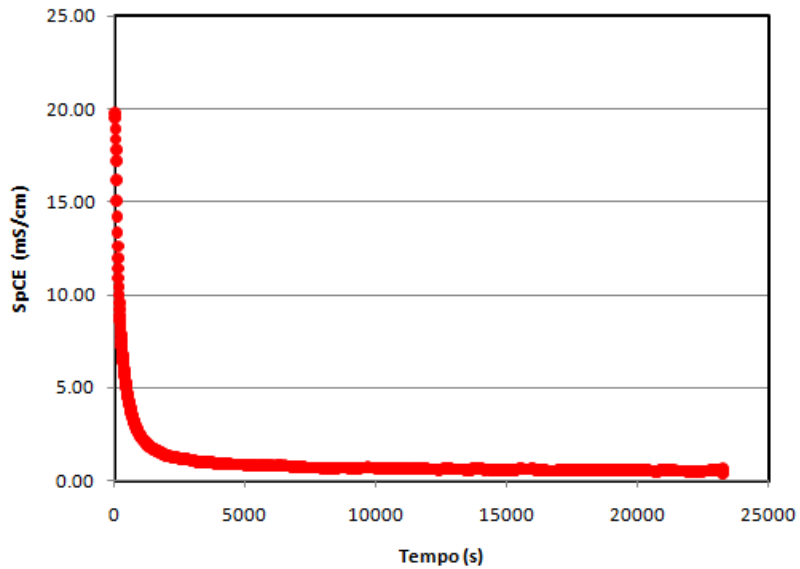
Curva di scarico della soluzione salina all'interno del piezometro S3A.



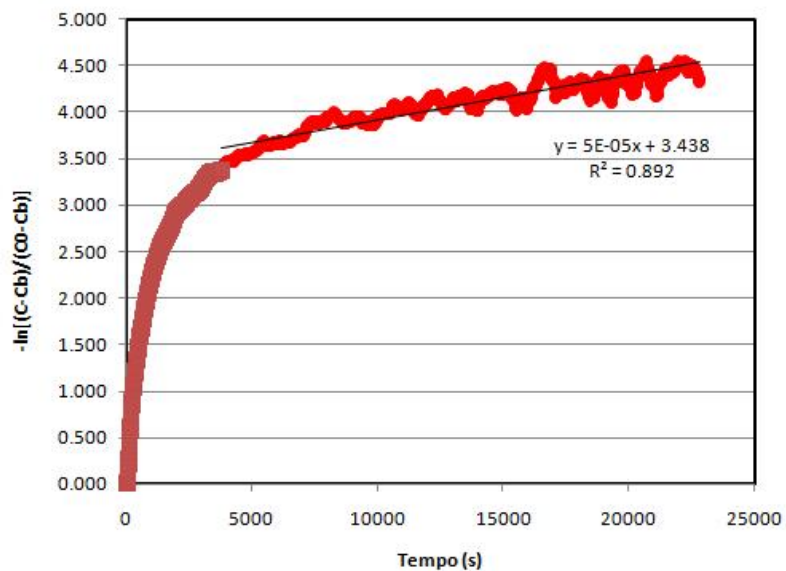
Interpretazione della prova di diluizione in S3A.

PROVA DI DILUIZIONE DEL 27/09/2013 IN S3A CON PACKER

Vengono di seguito riportati i grafici relativi alla curva di diluizione, ed all'interpretazione della curva stessa.



Curva di scarico della soluzione salina all'interno del piezometro S3A.



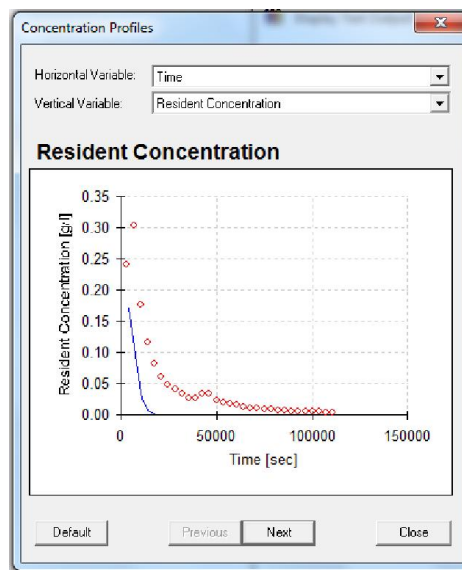
Interpretazione della prova di diluizione in S3A.

ALLEGATO 4: - RISULTATI OTTENUTI CON STANMOD

GRAFICI DI STANMOD

PROVA DI TRACCIAMENTO DEL 06/06/2013 IN S3B CON STANMOD

Vengono di seguito riportati i grafici relativi alla curva di restituzione del tracciamento.

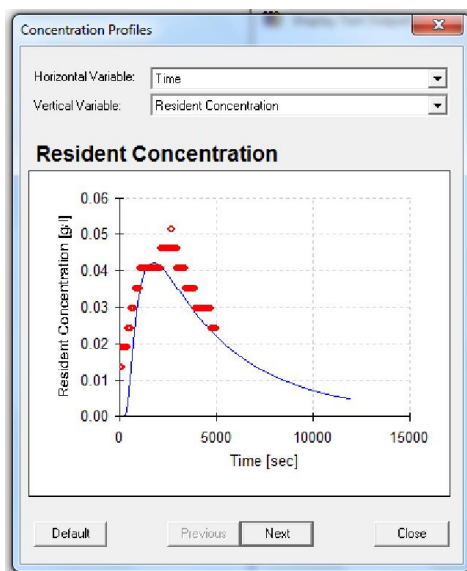


Curva di restituzione calcolata a partire dai dati sperimentali per il tracciamento del 06/06/2013.

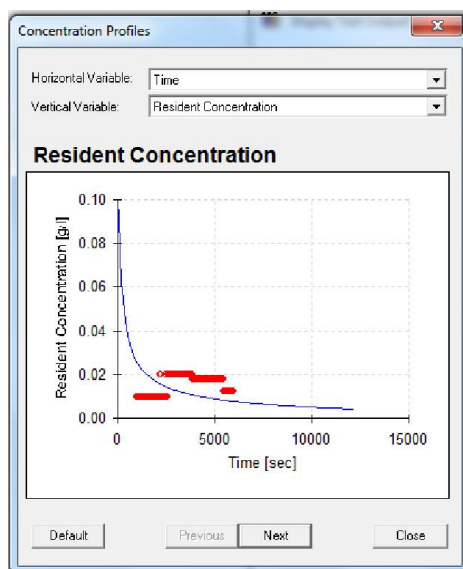
In rosso i dati sperimentali, mentre in blu la curva calcolata.

PROVA DI TRACCIAMENTO CON PACKER DEL 16/07/2013 CON STANMOD

Vengono di seguito riportati i grafici relativi alla curva di restituzione del tracciamento a 1.5 metri, e di quello a 3.5 metri.



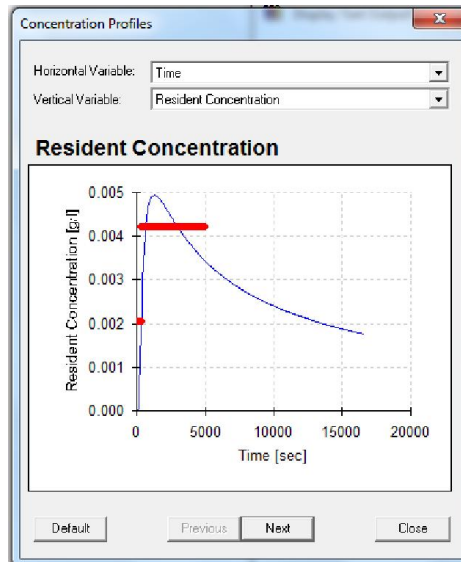
Curva di restituzione calcolata a partire dai dati sperimentali per il tracciamento del 16/07/2013 a 1.5 metri di profondità. In rosso i dati sperimentali, mentre in blu la curva calcolata.



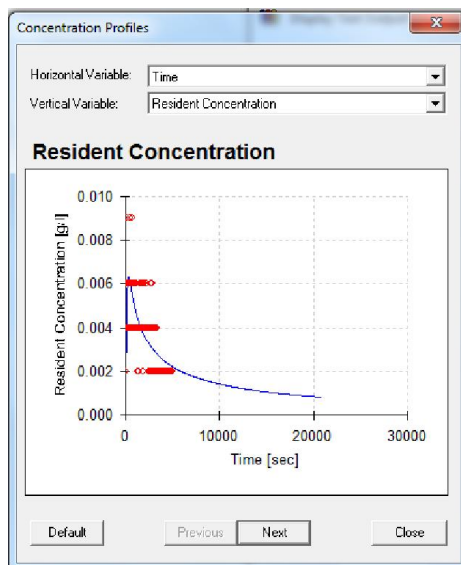
Curva di restituzione calcolata a partire dai dati sperimentali per il tracciamento del 16/07/2013 a 3.5 metri di profondità. In rosso i dati sperimentali, mentre in blu la curva calcolata.

PROVA DI TRACCIAMENTO CON PACKER DEL 05/09/2013 CON STANMOD

Vengono di seguito riportati i grafici relativi alla curva di restituzione del tracciamento a 3.5 metri, e di quello a 5.5 metri.



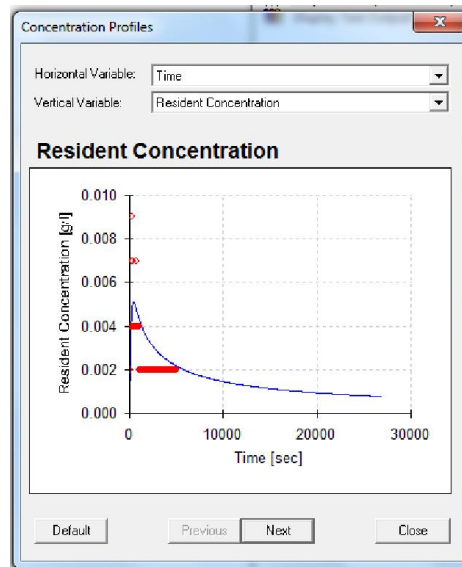
Curva di restituzione calcolata a partire dai dati sperimentali per il tracciamento del 05/09/2013 a 3.5 metri di profondità. In rosso i dati sperimentali, mentre in blu la curva calcolata.



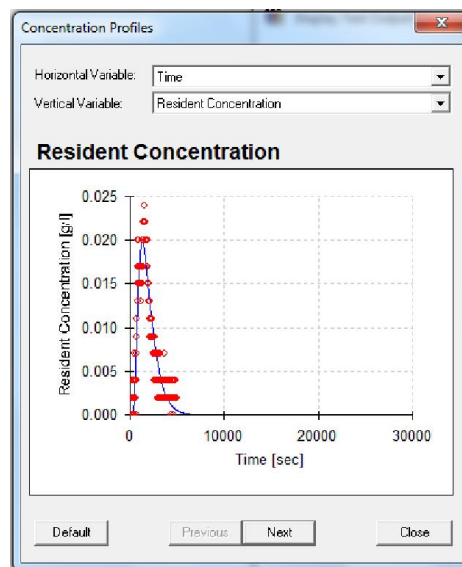
Curva di restituzione calcolata a partire dai dati sperimentali per il tracciamento del 05/09/2013 a 5.5 metri di profondità. In rosso i dati sperimentali, mentre in blu la curva calcolata.

PROVA DI TRACCIAMENTO CON PACKER DEL 27/09/2013 CON STANMOD

Vengono di seguito riportati i grafici relativi alla curva di restituzione del tracciamento a 5.5 metri, e di quello a 6.5 metri.



Curva di restituzione calcolata a partire dai dati sperimentali per il tracciamento del 27/09/2013 a 5.5 metri di profondità. In rosso i dati sperimentali, mentre in blu la curva calcolata.



Curva di restituzione calcolata a partire dai dati sperimentali per il tracciamento del 27/09/2013 a 6.5 metri di profondità. In rosso i dati sperimentali, mentre in blu la curva calcolata.

TABELLE RIASSUNTIVE DI STANMOD

PROVA DI TRACCIAMENTO DEL 06/06/2013 IN S3B

Parametri stimati da Stanmod

Name	Value	Lower	Upper
V [m/s]	4.79E-04	3.03E-04	0.00
D [m ² /s]	1.59E-04	-4.76E-04	7.95E-04
MASS [Kg]	1.00E+03	2.40E+02	1.76E+03

Riassunto dei parametri calcolati da Stanmod

PROVA DEL 16/07/2013 IN S3B, CON PACKERS

Parametri stimati da Stanmod, per la prova a 1.5 metri di profondità da boccaforo.

NAME	VALUE	LOWER	UPPER
V [m/s]	5.89E-04	5.73E-04	6.04E-04
D [m ² /s]	7.24E-04	6.84E-04	7.63E-04
MASS [Kg]	2.50E+02	2.43E+02	2.57E+02

Riassunto dei parametri calcolati da Stanmod a 1.5 metri di profondità da boccaforo.

Parametri stimati da Stanmod, per la prova a 3.5 metri di profondità da boccaforo.

NAME	VALUE	LOWER	UPPER
V [m/s]	1.82E-03	1.08E-02	1.45E-02
D [m ² /s]	7.50E-02	-1.04E+00	1.19E+00

Riassunto dei parametri calcolati da Stanmod a 3.5 metri di profondità da boccaforo.

PROVA DEL 05/09/2013 IN S3B CON PACKERS

Parametri stimati da Stanmod, per la prova a 3.5 metri di profondità da boccaforo.

NAME	VALUE	LOWER	UPPER
V [m/s]	1.21E-04	1.03E-04	1.39E+00
D [m ² /s]	1.69E-03	1.61E-03	1.76E-03
MASS [Kg]	1.75E+02	1.49E+02	2.01E+02

Riassunto dei parametri calcolati da Stanmod a 3.5 metri di profondità da boccaforo.

Parametri stimati da Stanmod, per la prova a 5.5 metri di profondità da boccaforo.

NAME	VALUE	LOWER	UPPER
V [m/s]	3.23E-04	2.71E-04	3.75E-04
D [m ² /s]	6.64E-03	5.99E-03	7.28E-03
MASS [Kg].	8.52E+01	7.18E+01	9.85E+01

Riassunto dei parametri calcolati da Stanmod a 5.5 metri di profondità da boccaforo.

PROVA DEL 27/09/2013 IN S3B CON PACKERS

Parametri stimati da Stanmod, per la prova a 5.5 metri di profondità da boccaforo.

NAME	VALUE	LOWER	UPPER
V [m/s]	1.78E-04	1.36E-04	2.20E-04
D [m ² /s]	5.10E-03	4.59E-03	5.61E-03
MASS [Kg].	1.25E+02	9.61E+01	1.54E+02

Riassunto dei parametri calcolati da Stanmod a 5.5 metri di profondità da boccaforo.

Parametri stimati da Stanmod, per la prova a 6.5 metri di profondità da boccaforo.

NAME	VALUE	LOWER	UPPER
V [m/s]	4.24E-04	3.94E-04	4.53E-04
D [m ² /s]	1.33E-03	1.21E-03	1.45E-03
MASS [Kg].	1.25E+02	1.17E+02	1.34E+02

Riassunto dei parametri calcolati da Stanmod a 6.5 metri di profondità da boccaforo.

RINGRAZIAMENTI

Innanzitutto ci tengo molto a ringraziare il Dott. Piccinini ed il Prof. Fabbri, per il costante aiuto ed i preziosi insegnamenti che mi hanno dato. In particolar modo ringrazio il Dott. Piccinini per avermi aiutato a realizzare questo elaborato dalle prime prove fino alla stesura della tesi.

Ringrazio la mia famiglia sia per il sostegno economico che per quello morale, per aver creduto in me in ogni momento, per avermi insegnato i veri valori della vita e per incitarmi a fare sempre le scelta giusta.

Ringrazio i miei zii ed i miei cugini, per i momenti passati insieme. Un caldo saluto a Beatrice, il fato non ti ha permesso di essere più qui con noi, ma ti ricorderemo per sempre.

Un sentito grazie ai miei nonni, fonte di ispirazione e di sostegno morale.

Ringrazio i miei fantastici amici Max e Pippo, sempre presenti e sempre sinceri.

Tantissimi ringraziamenti a tutti i miei amici, per i momenti passati finora insieme e per quelli che passeremo.

Ringrazio i miei compagni di corso, con voi questo percorso è stato veramente indimenticabile.

Infine ringrazio anche le molte persone che non sono riuscito a citare esplicitamente.

Vorrei infine dedicare questa tesi ai miei genitori, se non fosse per voi, non avrei mai potuto raggiungere questo e molti altri fantastici traguardi.