

**POLITECNICO DI TORINO**

Collegio di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio**

Tesi di Laurea Magistrale

**Sperimentazione metodologica con traccianti  
artificiali in acquiferi porosi**



**Relatore:**

prof. Bartolomeo Vigna

**Correlatori:**

Prof.ssa Glenda Taddia

**Candidato:**

Alessandro GUGLIELMETTO

S265500

Anno accademico 2020/2021

## Sommario

<b>Capitolo 1</b> .....	4
<b>Capitolo 2</b> .....	5
2.1 Caratteristiche generali dei traccianti .....	5
2.3 Tipologie di tracciante .....	6
2.3.1 Temperatura .....	6
2.3.2 Virus .....	6
2.3.3 Lieviti .....	7
2.3.4 Batteri .....	7
2.3.5 Spore .....	8
2.3.6 Gas .....	8
2.3.7 Coloranti .....	9
2.3.8 Composti ionici .....	15
2.3.9 Isotopi .....	16
<b>Capitolo 3</b> .....	17
3.1 Mezzo poroso .....	17
3.2 Legge di Darcy .....	18
3.3 Direzione di flusso .....	20
3.4 Tempo di percorrenza .....	20
<b>Capitolo 4</b> .....	21
4.1 Inquadramento geografico e geologico .....	21
4.2 Inquadramento idrogeologico .....	24
4.3 Assetto litostratigrafico .....	25
4.3.1 Sondaggi geotecnici OGR .....	25
4.3.2 Pozzi e piezometri impianto geotermico del Politecnico di Torino .....	25
4.3.3 Sondaggi geotecnici grattacielo Intesa Sanpaolo .....	26
4.3.4 Assetto litostratigrafico locale .....	27
4.4 Inquadramento dell'acquifero .....	27
4.5 Inquadramento climatologico .....	28
<b>Capitolo 5</b> .....	30
5.1 Dati pregressi .....	30
5.1.1 Dati prove di pozzo .....	30
5.1.2 Dati sonde fisse .....	32
5.2 Prove di tracciamento a diluizione .....	32
5.2.1 Relazione di Mosetti .....	33
5.3 Prova di tracciamento multiplo .....	36

5.4	Bianco ambientale .....	38
5.5	Tipologia e quantitativo di colorante .....	38
5.6	Luogo di realizzazione dei test.....	39
5.7	Strumentazione .....	40
<b>Capitolo 6</b>	.....	<b>44</b>
6.1	Cronoprogramma .....	44
6.2	Tracciamento a diluizione in continuo .....	44
6.2.1	Posizionamento sonde fisse .....	44
6.2.2	Risultati test di diluizione in continuo .....	46
6.3	Tracciamento a diluizione puntuale .....	54
6.4	Tracciamento multiplo .....	60
<b>Capitolo 7</b>	.....	<b>64</b>
<b>Allegati</b>	.....	<b>67</b>
<b>Bibliografia</b>	.....	<b>80</b>

# Capitolo 1

## Introduzione

La finalità di questa tesi è quella di introdurre i traccianti valutandone la possibilità di applicazione in un ambiente poroso come l'acquifero superficiale presente sotto la città di Torino e successivamente, con l'utilizzo di coloranti artificiali, di effettuare una serie di analisi di dettaglio alla scala locale dello stesso acquifero, in un'area circoscritta all'interno del Politecnico di Torino, per approfondire le conoscenze sulle sue caratteristiche idrauliche e idrologiche.

Alla base di questo elaborato c'è la volontà di fornire una robusta alternativa alle prove di pozzo per lo studio di ambienti porosi e, allo stesso tempo, di studiare e approfondire più in dettaglio la conducibilità idraulica dell'acquifero libero valutandone l'eterogeneità in funzione della quota e della stratigrafia.

Lo studio si è svolto attraverso le seguenti fasi:

- Studio della bibliografia e dei documenti disponibili sui traccianti e sull'area di interesse.
- Scelta della tipologia di colorante e delle analisi da effettuare in campo.
- Realizzazione dei test e raccolta dei dati delle concentrazioni presso il sito all'interno del Politecnico di Torino con l'aiuto dell'ingegnere Fabrizio Bianco.
- Discussione delle analisi effettuate con il prof.re Vigna e la prof.ssa Taddia.
- Elaborazione e confronto tra i risultati ottenuti e quelli già presenti in letteratura
- Redazione del documento di sintesi

# Capitolo 2

## I traccianti

### 2.1 Caratteristiche generali dei traccianti

Un tracciante è una sostanza utilizzata in ambito idrogeologico che viene immessa in soluzione nell'acqua in movimento; l'analisi della sua concentrazione nel tempo in un determinato punto, definito a priori, permette di ricavare informazioni riguardo ai parametri fondamentali del flusso idrico come la direzione e la velocità (DAVIS *et al.*, 1985; MOSER, 1995). Con un elevato numero di questi dati è altresì possibile calcolare altri parametri idrogeologici tra i quali la conducibilità idraulica, la porosità e la dispersività.

Indipendentemente dalla composizione, i traccianti devono possedere un ampio range di caratteristiche chimiche, fisiche e biologiche che permettano di raggiungere lo scopo fissato senza essere dannosi per l'ambiente e per le persone (DAVIS *et al.*, 1985, SHH, 2002). È importante quindi che la sostanza rispetti questi parametri:

- Non interagisca con la frazione solida attraversata dal flusso idrico
- Non sia tossica, anche a basse concentrazioni, per la fauna, la flora e gli esseri umani
- Abbia un basso limite di detenzione e quindi sia facilmente rilevabile
- Non sia inquinante
- Abbia una buona solubilità in acqua
- Sia stabile chimicamente
- Abbia un costo contenuto

Purtroppo, al giorno d'oggi, non esiste la sostanza perfetta o il tracciante ideale che rispetti tutti questi vincoli ed è necessario quindi valutare la situazione idrogeologica e idrologica del luogo analizzato per scegliere il tracciante più idoneo da applicare.

### 2.3 Tipologie di tracciante

I traccianti, per uso idrogeologico, possono essere suddivisi tra sostanze naturali, composti presenti naturalmente nelle falde, o sostanze artificiali (DAVIS et al., 1985).

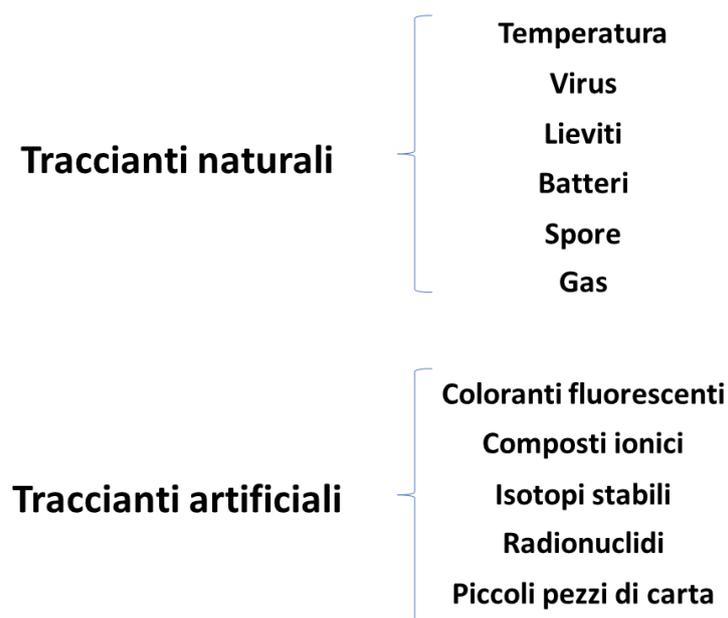


Figura 1: Classificazione dei traccianti (DAVIS et al. 1985; Moser, 1995)

#### 2.3.1 Temperatura

La temperatura dell'acqua può essere utilizzata come tracciante naturale in quanto essa varia lungo il percorso del flusso nel sottosuolo in modo spontaneo. Queste mutazioni implicano variazioni di densità e viscosità che portano a possibili alterazioni della velocità del flusso; un comune utilizzo dei traccianti termici è quindi la valutazione della velocità del flusso idrico nelle differenti zone campionate tenendo sempre in considerazione la differenza di velocità tra le misurazioni di temperatura e quella dell'acqua (DAVIS et al., 1985). Altro utilizzo importante è la determinazione idrologica tra fiume e falda dovuta alle differenti fluttuazioni stagionali della temperatura.

#### 2.3.2 Virus

I virus sono traccianti naturali che hanno riscontrato qualche uso sporadico a partire dal 1972 (Wipenny et al. 1972). A causa della possibile patogenicità per l'uomo della maggior parte dei

virus, solo i batteriofagi (virus batterici) sono stati considerati sicuri e utilizzabili per tracciamenti in campo.

I primi utilizzi di batteriofagi hanno dimostrato il loro potenziale come traccianti sotterranei per delineare i flussi lungo distanze considerevoli. Per esempio, il colifago T4 venne usato per studiare le acque sotterranee che attraversano un terreno carsico per 1.6 km nel sud del Missouri in USA (Fletcher and Myers 1974); similmente, utilizzando un differente batteriofago, venne studiato il flusso di acqua sotterranea in un mezzo poroso nel sud del Galles per la lunghezza di 600 metri (Martin and Thomas 1974). Altri vantaggi dovuti all'impiego di questi traccianti sono legati alla buona capacità di sopravvivenza in acque sotterranee, alla possibilità di analisi di grandi volumi di acqua con piccole iniezioni, alla loro piccola dimensione e all'opportunità di mixare differenti tipologie di batteriofagi nella stessa indagine poiché ogni virus ha uno specifico batterio ospite (20-100 nm).

### 2.3.3 Lieviti

L'uso di lieviti come traccianti idrologici è stato limitato principalmente a causa delle dimensioni e della probabilità di sopravvivenza. I pochi studi effettuati si sono basati sull'utilizzo del lievito da birra (*Saccharomyces cerevisiae*) come tracciante in acquiferi sabbiosi e rocciosi parzialmente cementati con calcio carbonato e intervallati da argilla. Lo scopo di queste ricerche miravano a studiare il movimento di batteri e protisti nelle acque sotterranee. (Wood and Ehrlich, 1978; Harvey et al., 1985)

### 2.3.4 Batteri

I batteri vengono utilizzati in molti studi come traccianti per i flussi sotterranei grazie alla loro facilità di rilevamento e di crescita. I primi e più usati sono stati i coliformi fecali e altri batteri specifici (*E. coli*, *Streptococcus faecalis*, *Salmonella typhi*) che si trovano nell'intestino dell'uomo; sono principalmente impiegati come indicatori per valutare la contaminazione e il movimento delle acque sotterranee (Hagedorn et al. 1978; Harvey 1997).

Altri studi hanno fatto uso del patogeno umano *Serratia Marcescens* iniettandolo come tracciante in un acquifero carsico tedesco (Batsche et al. 1970) e in un fiume inquinato (Wimpenny et al., 1972); Allen e Morrison (1993) hanno utilizzato il *Bacillus stearothermophilis* per tracciare i flussi sotterranei in roccia cristallina fratturata.

### 2.3.5 Spore

Tra tutte le spore presenti in natura, quelle di Licopodio risultano essere le migliori per poter essere usate come traccianti in acque sotterranee che presentano interconnessione tra pori di grandi dimensioni. (Atkinson et alii 1973)

Caratterizzate da una forma sferica con diametro relativamente piccolo, queste spore, presentano una moltitudine di vantaggi quali:

- L'impossibilità di essere assorbite dall'argilla o dal limo e influenzate dalla chimica delle acque
- La concentrazione d'iniezione può essere elevata
- Nessuna minaccia per la salute
- Facile rilevabilità al microscopio

Gli svantaggi sono legati principalmente ai problemi di filtraggio, se il flusso non risulta essere abbastanza turbolento, e all'elevato tempo di preparazione e analisi delle spore.

### 2.3.6 Gas

I gas, allo stato libero o disciolti nell'acqua, hanno possibili applicazioni in idrologia come traccianti per le acque sotterranee; la maggior parte di questi risultano essere già presenti nella circolazione sotterranea, grazie a processi naturali, mentre altri possono essere iniettati artificialmente.

Una elevata percentuale dei gas disciolti in acqua mostra un comportamento strettamente legato alla variazione di temperatura, di pressione e della salinità. (DAVIS et al., 1985)

Le principali categorie di gas usati in studi idrogeologici sono:

- Gas inerti radioattivi: chimicamente inerti ma radioattivi come  $^{133}\text{Xe}$  e  $^{85}\text{Kr}$  sono stati utilizzati per molteplici applicazioni, tra cui la valutazione della zona non satura (Robertson, 1969) e i tempi di permanenza in acquifero delle acque (Kralik, 2015; Makoto et al. 2017). Il principale isotopo del Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) è utilizzato per l'analisi dell'infiltrazione delle acque superficiali all'interno dell'acquifero (Schubert et al. 2006; Corbett, 2000) grazie alla sua presenza naturale nelle acque sotterranee e alla quasi totale assenza nelle acque superficiali. A causa della loro radioattività risultano essere pericolosi per l'uomo.

- Gas inerti naturali: in questa categoria troviamo i gas nobili come l'elio, il neon, l'argon e lo xenon che, grazie alle loro caratteristiche non tossiche e non reattive, hanno un eccellente potenziale come traccianti conservativi per lo studio delle dinamiche dei flussi sotterranei e l'origine delle acque nel sottosuolo. (Althaus, 2009; Sanford, 1996; Castro et al. 1998)  
Le basse concentrazioni di questi gas in natura permettono anche che vengano utilizzati per determinare le velocità dell'acqua in acquiferi regionali o come indicatori per le temperature superficiali durante i periodi d'infiltrazione. (Aeschbach-Hertig, 2013)
- Fluorocarburi: i clorofluorocarburi (CFC) sono una tipologia di gas antropogenici creati artificialmente che presentano basso rischio biologico, lunga stabilità e reazione chimica nulla con altri materiali; queste caratteristiche permettono di utilizzarli come traccianti ambientali, con utilizzi simili a quelli del trizio, o come traccianti iniettati (Thompson, Hayes and Davis, 1974). Avendo scoperto ad inizio anni '80 la correlazione tra la distruzione dello strato di ozono stratosferico e i clorofluorocarburi, viene sconsigliato l'uso dei CFCs come traccianti idrologici.

### 2.3.7 Coloranti

I coloranti organici, grazie al loro costo contenuto, all'efficacia e alla semplicità di utilizzo, vengono usati in modo massiccio come traccianti per le acque superficiali e sotterranee dal 1960 (Davis et al. 1970).

Sono classificabili come coloranti fluorescenti e non fluorescenti, ma, grazie ad un'elevatissima rilevabilità a basse concentrazioni, viene preferita la prima categoria per utilizzi di tracciamento in ambito idrologico. Per questo motivo in questa discussione verranno trattati solamente i coloranti fluorescenti più utilizzati, tralasciando gli altri.

La suddivisione viene fatta generalmente in funzione del colore, come riportato in tabella 1, affiancando anche le rispettive lunghezze d'onda dello spettro utili per valutare la possibilità di utilizzare simultaneamente più traccianti nello stesso test.

I coloranti fluorescenti usati come agenti traccianti in acqua devono possedere molteplici proprietà: essere facilmente solubili in acqua, conservativi e stabili nel tempo senza che deteriorino venendo a contatto con il mezzo investigato, facilmente misurabili e individuabili a

basse concentrazioni e, infine, presentare bassa tossicità senza mettere in pericolo l'ambiente o la salute ed essere poco costosi. (Field et al. 1995, Davis et al. 1985)

Colore in acqua	Nome	Nome alternativo	Eccitazione massima [nm]	Emissione massima [nm]
Blu	Amino G acido	Acido 7-Amino 1.3 Naftalen disulfonico	355	455
	Fotina CU	C1 fluorescente	345	435
	Tinopal CBS-X	Candeggiante	364	434
Verde	Fluoresceina	C1 acido giallo 73 Uranina	491	512.5
	Lissamina FF	C1 acido giallo 8G Brilliant sulpho flavine FF	420	515
	Piranina	C1 solvente verde 7	463.5	512.5
Arancio	Rodamina B	C1 basico violetto 10	553.5	576
	Rodamina WT	-	555	580
	Sulforodamina	C1 acido rosso 52 Acido rodamina B	565	590

Tabella 1: Lista dei coloranti fluorescenti utilizzati come traccianti in idrologia

Nella tabella 1 vengono riportati i coloranti più usati in funzione del colore associati alle rispettive lunghezze d'onda dello spettro.

I coloranti fluorescenti presentano molteplici proprietà ideali di un tracciante che possono essere riassunte in un'elevata rilevabilità, rapida analisi in campo, basso costo e bassa tossicità. Tutte queste caratteristiche variano da tracciante a tracciante e sono influenzate dalla temperatura, dal pH, dalla salinità, dall'assorbimento e dai decadimenti chimici e biologici del sito in esame.

### Fluoresceina

La fluoresceina, chiamata anche con il nome di uranina o di fluoresceina sodica, è molto conosciuta e utilizzata in ambito medico, idrologico e nella valutazione delle acque sotterranee; è ritenuta uno dei traccianti più utilizzati a livello mondiale. Forma cristalli rossi (Figura 2) e si

presenta sotto forma di polvere; essendo solubile in acqua, se viene immersa nel liquido e irradiata dalla luce (Figura 3), emette una luminosa fluorescenza verde-giallastra (Käss, 1998).



Figura 2: Fluoresceina in polvere



Figura 3: Fluoresceina durante un'applicazione in campo (Vigna)

L'intensità della fluorescenza dell'uranina dipende fortemente dalla concentrazione di ioni idrogeno presenti nell'acqua (Figura 4); con valori di pH superiori a 8.5 la fluorescenza è massima mentre all'aumentare dell'acidità tende a ridursi drasticamente (Käss, 1998).

Nel caso delle acque sotterranee, ad eccezione di quelle di miniera, ci ritroviamo comunemente nel range tra pH 6 e 8.5 ottenendo una fluorescenza intermedia nel caso di test.

La fluoresceina viene distrutta anche dagli agenti ossidanti, come gli agenti chimici utilizzati per la purificazione dell'acqua (ozono e cloro) e dall'esposizione alla luce per tempi lunghi (Reznek

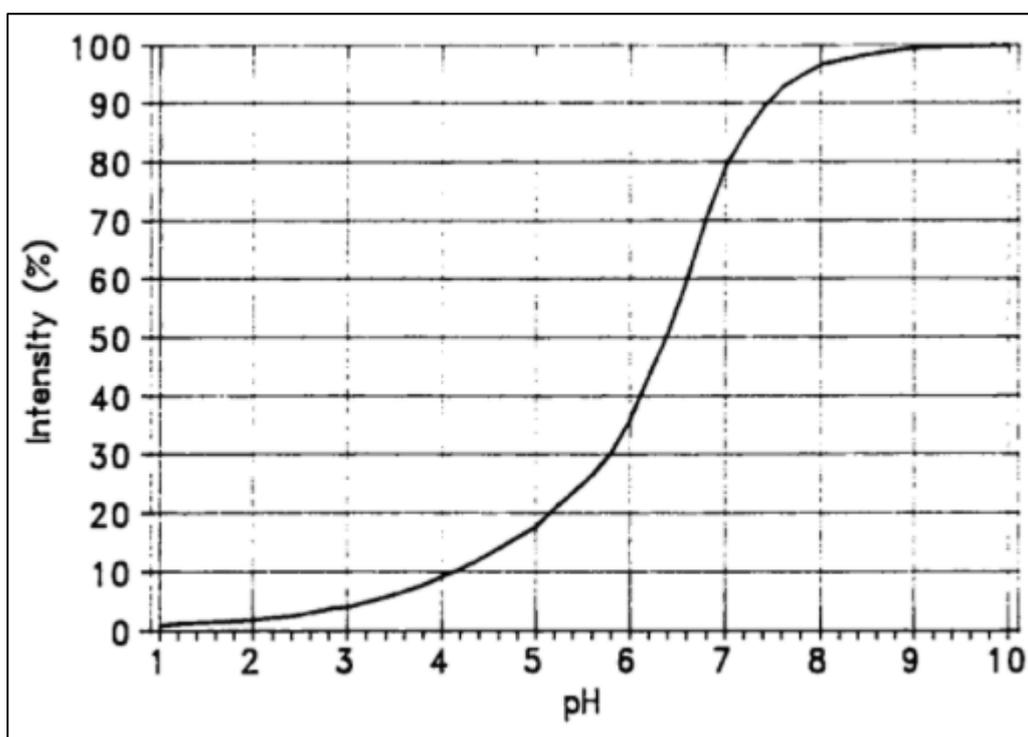


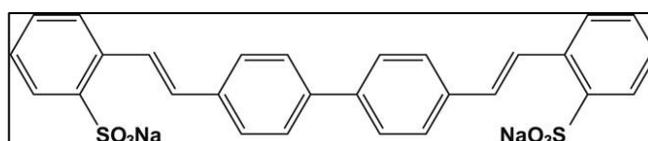
Figura 4: Correlazione tra l'intensità della fluorescenza della fluoresceina e i valori di pH dell'acqua (Davis et al., 1980)

et al. 1979, Käss, 1998). Non sono stati rilevati processi di assorbimento da parte delle argille nei confronti di questo colorante.

La fluoresceina deve essere sempre presa in considerazione come possibile tracciante per le acque sotterranee; grazie al suo basso livello di rilevamento e di interazione con l'acquifero e al basso prezzo, questo colorante presenta maggiori vantaggi rispetto a molti altri traccianti utilizzabili per questi tipi di analisi.

### *Tinopal CBS-X*

Il tinopal CBS-X, derivato dal Distyryl biphenyl (Figura 5), appartiene al gruppo dei fluorescent whitening agents (FWAs). Grazie alle sue caratteristiche di non tossicità e mutagenicità è stato classificato, e viene utilizzato, come tracciante per le acque sotterranee anche in aree protette o sensibili (Field, 2005); inoltre, presentando una leggera fluorescenza blu (Figura 7), è altamente consigliato in situazioni in cui sia necessario evitare la colorazione visibile dell'acqua. È stato riscontrato che in prove di tracciamento nel sottosuolo il Tinopal non abbia un comportamento conservativo e presenti una perdita di massa tra il punto di immissione e di monitoraggio.



*Figura 5: Struttura della molecola di Tinopal CBS-X*

Il Tinopal CBS-X presenta tuttavia una serie di svantaggi quali: bassa solubilità, inizio della precipitazione e flocculazione con concentrazioni di 0.1 g/l (Uggeri e Vigna, 1997), basso recupero di massa in esperimenti in campo rispetto ad altri traccianti: ciò è dovuto all'interazione tra cationi di calcio, ferro e alluminio con la forma anionica deprotonata (Licha et



*Figura 6: Polvere di Tinopal CBS-X*



*Figura 7: Immissione di Tinopal CBS-X in torrente (Vigna)*

al. 2012) e, con l'aumentare dell'utilizzo di sbiancanti ottici per altri scopi, alla crescita di concentrazioni di fondo nell'ambiente (Poiger et al., 1998; Nödler et al. 2011). La somma di queste caratteristiche aumenta la complessità nel decidere la quantità di Tinopal CBS-X da immettere nel sistema per ottenere una concentrazione sufficiente nel punto di osservazione. Da sottolineare che è stato riscontrato anche un comportamento fortemente assorbente da parte dell'argilla nei confronti del Tinopal CBS-X.

### *Rodamina B*

La rodamina B è il primo dei coloranti arancioni ad essere scoperto (Ceresole, 1887) e successivamente utilizzato per il tracciamento delle acque. I suoi cristalli si presentano sotto forma di aghi con colorazione arancione scura mentre disciolti nell'acqua assumono un colore rosa.

Nonostante la rodamina B presenti una bassa sensibilità alla luce e una fluorescenza indipendente dal pH risulta essere il tracciante meno adatto per le acque sotterranee rispetto alla rodamina WT e la sulfurodamina; infatti presenta un elevato assorbimento quando viene a contatto con la maggior parte delle rocce presenti nel sottosuolo, siano esse carsiche, sabbiose, rocciose o argillose. È stato rilevato, inoltre, un buon assorbimento anche a contatto con piante acquatiche, plastiche o vetro (Hubbart et al. 1982, Käss, 1998).

Questa tipologia di rodamina presenta proprietà cancerogene e mutagene per l'uomo oltre ad essere tossico per l'ecosistema acquatico con concentrazioni superiori a 100 mg/l (Field et al. 1995). Il parametro LD50 valutato sui ratti è di 85 mg/kg (Roth e Daunderer, 1990).

### *Rodamina WT*

La rodamina WT (Figura 8) è un altro tipo di colorante arancione molto utilizzato in ambito idrologico fin dal secolo scorso (Davis et al. 1980). La facilità di utilizzo e lo sviluppo di tecniche sempre più sofisticate per campionare con elevata frequenza questo colorante ci permettono di avere una notevole mole



*Figura 8: Caratteristica colorazione rosa di un torrente a seguito dell'immissione di Rodamina WT nell'alveo.*

di dati sulle caratteristiche di questo tracciante nei vari ambiti di utilizzo.

Oltre ad avere una bassa soglia di rilevamento ed un decadimento biologico e fotochimico più basso rispetto ad altri coloranti (Lin et al. 2003), la rodamina WT presenta una buona conservatività in determinati ambienti.

Su questo ultimo aspetto si evidenzia come i risultati dei test effettuati in diversi ambiti idrologici abbiano portato ad avere valori opposti della reattività del tracciante; per esempio, in applicazioni su acque superficiali, la rodamina WT presenta una buona conservatività con basse tendenze ad essere assorbita (Hubbart et al. 1982; Wilson et al., 1986; Rowinski et al., 2008) mentre nei sistemi di acque sotterranee emerge una buona, a tratti elevata, tendenza ad interagire con il mezzo attraversato indicando come principale meccanismo di perdita di massa l'assorbimento (Lin et al., 2003; Richardson et al., 2004).

Questa variazione di conservatività in funzione del mezzo in cui viene applicata la rodamina WT consiglia un'attenta analisi dell'ambiente investigato prima di sceglierla come tracciante per la prova.

Ultimo aspetto da tenere in considerazione è la sua tossicità; anche se risulta essere meno tossica rispetto alla Rodamina B e alla sulforodamina viene comunque classificata come non biologicamente sicura come la fluoresceina (Aley and Fletcher, 1976).

#### *Sulforodamina B*

La sulforodamina B non ha mai avuto un uso troppo estensivo nel tracciamento delle acque sotterranee. Presenta una tossicità maggiore rispetto alla rodamina WT ed è più costosa in rapporto agli altri traccianti arancioni. La sua fluorescenza è modificata in ambiente ad elevata salinità e presenta basso assorbimento in presenza di solidi sospesi (Davis et al. 1980).

#### *Fotina CU e amino G acido*

Entrambi fanno parte dei coloranti blu e presentano un livello di fondo minore rispetto a quelli verdi e arancioni. La fotina CU è influenzata significativamente dalle variazioni di temperatura mentre l'amido G acido è abbastanza resistente all'assorbimento. Entrambi sono influenzati da valori di pH inferiori a 6 e presentano decadimento fotochimico simile alla fluoresceina (Davis et al., 1980).

### *Piranina*

La piranina è un colorante verde che presenta una forte fluorescenza, ai livelli della fluoresceina, che può essere utilizzato per tracciare i flussi d'acqua nel sottosuolo. Grazie alla sua stabilità, è consigliato il suo utilizzo in test su terreni acidi o sabbiosi e come sostanza per valutare i cambiamenti del pH delle acque (Nancy et al., 1981).

Presenta una buona resistenza all'assorbimento e alla decolorazione anche se risulta essere meno rilevabile rispetto alla fluoresceina (Drew and Smith, 1969); ha un alto livello di decadimento fotochimico.

### *Lissamina FF*

La Lissamina FF fa parte dei coloranti fluorescenti verdi e, a causa del suo elevato costo rispetto alla maggior parte dei coloranti, viene poco utilizzata come tracciante nonostante sia molto stabile, resistente all'assorbimento e meno dipendente dalle variazioni di temperatura (Davis, 1980; Ford, 1983).

### 2.3.8 Composti ionici

I composti ionici, di cui fa parte il comune sale da cucina, vengono usati in modo frequente per il tracciamento in falda. Questa categoria di traccianti racchiude tutti quei composti che a seguito di ionizzazione in acqua si scindono in elementi con carica positiva, cationi, e con carica negativa, anioni. Queste cariche differenti vanno a influenzare in modo significativo i molteplici meccanismi di trasporto all'interno dell'acquifero. I cationi, per esempio, tendono ad interagire frequentemente con i minerali argillosi attraverso processi di scambio cationico rendendoli meno utili per il tracciamento; gli anioni, viceversa, sono meno soggetti a processi di dissoluzione/precipitazione e scambio anionico all'interno della falda acquifera. (MATTSON, 1928)

Il principale vantaggio nell'utilizzare i composti ionici è dovuto alla loro capacità di non decomporsi mentre gli svantaggi sono molteplici ed è necessaria una serie di accortezze per evitare di danneggiare il sistema in cui vengono inseriti. Infatti, l'immissione di grandi quantità di tracciante in un ambiente già ricco di ioni della stessa specie porta ad avere segregazione e precipitazione naturale che vanno a modificare la permeabilità dell'acquifero, la qualità dell'acqua e danneggiare la componente biotica. (DAVIS *et al.*, 1985, UNITO DST, 2011)

Il cloruro di sodio (NaCl) è il tracciante ionico più utilizzato grazie al suo basso costo e alla facile reperibilità.

### 2.3.9 Isotopi

Gli isotopi si suddividono in stabili o radioattivi ed entrambe le forme possono essere utilizzate come traccianti in falda.

Gli isotopi stabili di molteplici elementi comuni sono stati usati come traccianti per i movimenti delle acque sotterranee; gli svantaggi dovuti però all'elevato costo, alla necessità di equipaggiamento specifico per l'analisi e la difficoltà insita nella preparazione delle soluzioni rendono rara l'iniezione artificiale di questi traccianti. (Davis et al, 1980)

In letteratura si riscontra l'utilizzo soprattutto del deuterio ( $^2\text{H}$ ) e gli isotopi dell'ossigeno ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) per valutare lo spostamento di acqua all'interno di grandi porzioni di suolo e riconoscere le possibili aree di ricarica (Kendall and McDonnell, 1998).

L'utilizzo di isotopi radioattivi è limitato in ambiti di produzione petrolifera o negli esperimenti di laboratorio a causa degli effetti nocivi che possono avere sull'uomo.

# Capitolo 3

## Il mezzo poroso

### 3.1 Mezzo poroso

Si definisce mezzo poroso un volume spaziale costituito da una matrice solida con interstizi riempiti da uno o più fluidi. Una schematica suddivisione di un mezzo poroso può essere fatta da un volume unitario di terreno naturale, costituito dalla frazione volumetrica solida  $V_s$  e dalla complementare frazione volumetrica dei vuoti interstiziali  $V_v$ , che a sua volta si divide nelle due parti  $V_w$  e  $V_a$ , rispettivamente la quota parte di volume d'acqua e d'aria che riempiono i pori.

Valgono le seguenti relazioni:

$$V_v + V_a + V_w = V_{totale} = 1$$

$$V_v = V_a + V_w$$

Brevemente si riportano alcune definizioni fondamentali.

**Porosità:** 
$$n = \frac{V_v}{V_{totale}}$$

**Indice dei vuoti:** 
$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

È importante che, in una matrice porosa, si tenga conto anche della possibile presenza di pori chiusi non interconnessi con gli altri; questa condizione implica che non vi possa essere circolazione di fluido in essi. Viene quindi definita la porosità che tiene conto dei soli vuoti interconnessi come effettiva ed è descritta dalla formula:

$$n_e = \frac{V_{v_{int}}}{V_{totale}}$$

Un acquifero può essere definito come una formazione geologica in grado di immagazzinare acqua all'interno dei suoi pori o delle sue fessure e di consentirne la circolazione (o il flusso) con portate economicamente utilizzabili dall'uomo (Di Molfetta e Sethi, 2012). Possono essere distinti tre tipologie di acquifero:

- Confinato: se la falda idrica è confinata da due acquicludi (formazioni geologiche a bassa permeabilità che non consente la circolazione dell'acqua)
- Semiconfinato: se è delimitata da un acquicludo e un aquitardo (formazione geologica satura d'acqua a ridotta permeabilità che non esclude il flusso se sollecitato da carico idraulico).
- Non confinato: se la superficie libera dell'acqua contenuta nell'acquifero si trova a pressione atmosferica.

L'acquifero non confinato si può dividere in quattro zone: una fascia superiore insatura che parte dal piano campagna e termina sulla superficie libera; la zona di risalita capillare; la superficie freatica (contraddistinta da pressione relativa nulla) e il limite inferiore costituito da uno strato di suolo impermeabile o a bassa permeabilità che generalmente affiora nelle zone di ricarica.

### 3.2 Legge di Darcy

La legge di Darcy è un'equazione empirica, valida in regime stazionario, che dimostra che la portata  $Q$  passante attraverso una sezione  $A$ , è proporzionale al gradiente idraulico  $i$  e alla conducibilità idraulica  $K$  (Figura 9).

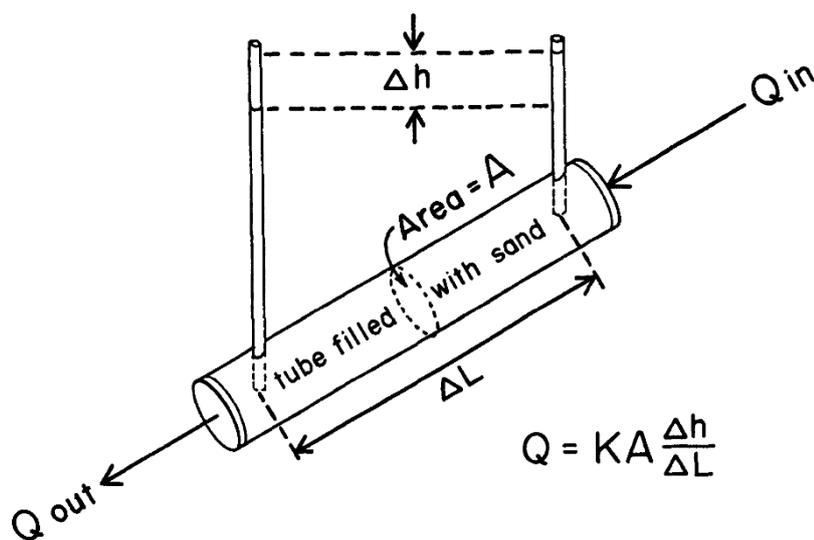


Figura 9: Illustrazione della legge di Darcy attraverso un tubo riempito di sabbia. (Davis, 1980)

$$Q = K A \frac{\Delta h}{L} = K A i$$

La conducibilità idraulica  $K$  è una misura complessa che tiene conto della natura del mezzo poroso e del liquido; ha le dimensioni di una velocità e nel S.I. si misura in m/s (Di Molfetta e Sethi, 2012; Davis et al., 1980). In letteratura, a volte, è definita erroneamente anche permeabilità idraulica; è importante tuttavia ricordare che la permeabilità assoluta è una proprietà intrinseca ed esclusiva del mezzo poroso mentre la conducibilità idraulica, come riportato in precedenza, tiene in considerazione anche le proprietà del fluido.

Dalla legge di Darcy si ricava la velocità apparente (o velocità Darcyana o di filtrazione) con cui si muove l'acqua in un acquifero:

$$v = \frac{Q}{A} = K i$$

che di fatto rappresenta la portata specifica per unità di sezione del filtro.

La reale velocità media di avanzamento del fluido è chiamata *velocità effettiva* e si ottiene dividendo la medesima portata per la sezione netta utile di filtraggio:

$$v_e = \frac{v}{n_e} = \frac{Q}{n_e \cdot A} = \frac{K i}{n_e}$$

Quando si vuole estendere il concetto appena esposto ad una geometria tridimensionale, bisogna introdurre innanzitutto la nozione di carico idraulico intesa come il rapporto tra la perdita di carico infinitesima  $dH$ , conseguente al movimento infinitesimo del fluido secondo la direzione del moto  $ds$ :  $-\frac{dH}{ds}$ .

Un'altra generalizzazione deve essere fatta in riferimento alla tipologia del mezzo poroso; a causa della natura dei processi deposizionali non isotropi, la conducibilità idraulica assume valori dipendenti dalla direzione e diviene un tensore del terzo ordine simmetrico:

$$K = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix}$$

Ne consegue che la legge di Darcy in termini vettoriali si scrive:

$$v = -K \nabla h$$

### 3.3 Direzione di flusso

Nei test con tracciante effettuati usando due o più pozzi e con l'acqua sotterranea che scorre seguendo il gradiente naturale, deve essere conosciuta la direzione di flusso delle acque sotterranee. In prima approssimazione l'acqua scorre nella direzione di maggiore pendenza del

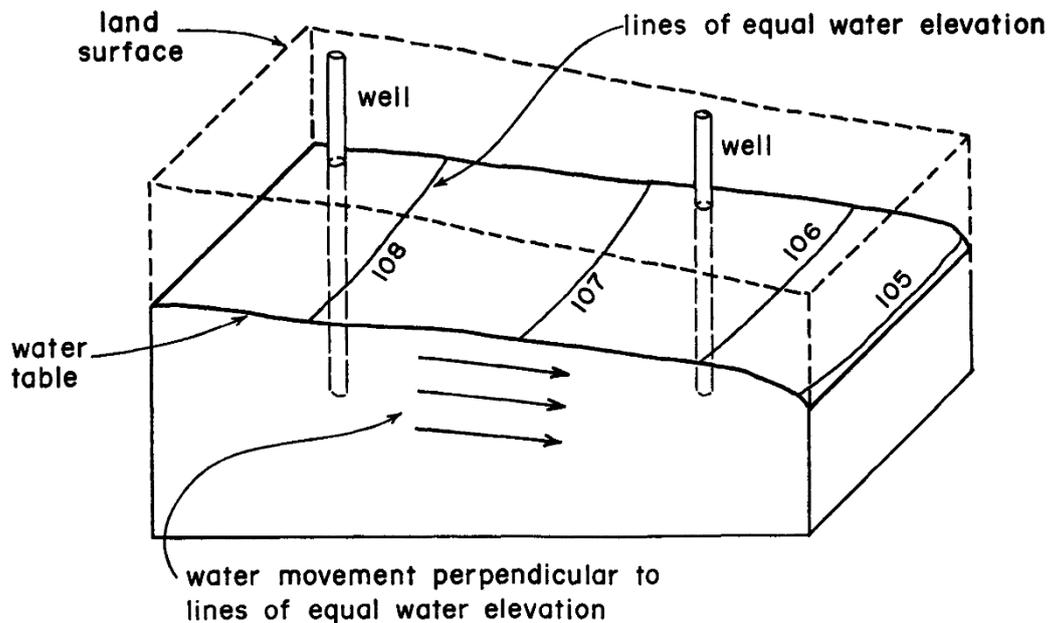


Figura 10: Schema riferito alla direzione del flusso di un acquifero

gradiente idraulico che risulta essere quella perpendicolare alle linee di uguale profondità dell'acquifero (Figura 10); purtroppo esistono disturbi nella direzione del flusso locale a causa delle differenze, puntuali o a piccola scala, della conduttività idraulica. Questo aspetto porta ad avere situazioni in cui non si è in grado di intercettare il plume di tracciante all'interno del pozzo e obbliga l'operatore ad un'attenta analisi prima di scegliere il luogo del test.

### 3.4 Tempo di percorrenza

L'equazione per stimare il tempo di percorrenza, che l'acqua ci impiega per trasferirsi da un punto all'altro, si ricava sostituendo al termine di velocità effettiva  $v_e$  il tempo  $\Delta t$  impiegato da una particella media d'acqua per passare attraverso la distanza  $\Delta L$ .

$$t = \frac{n_e(\Delta L)^2}{K\Delta h}$$

Uno degli errori comuni che vengono fatti in un test di tracciamento è quello di considerare distanze da ispezionare troppo lontane tra loro. Infatti, dalla formula si può vedere come il tempo di percorrenza previsto per una determinata caduta di carico sia funzione della distanza al quadrato, aumenta quindi molto rapidamente con la distanza.

# Capitolo 4

## Inquadramento area di studio

### 4.1 Inquadramento geografico e geologico

L'area oggetto di studio è collocata sul territorio comunale di Torino, all'interno del Politecnico di Torino, in Corso Duca degli Abruzzi, ad una quota di circa 246 m s.l.m (Figura 11). Il comune ha un'area che si estende per gran parte su una superficie semi-pianeggiante con debole pendenza in direzione Ovest-Est e altitudine che varia da 260-270 m s.l.m. a circa 220 m s.l.m.



Figura 11: Territorio comunale di Torino con il sito d'interesse

Il territorio si è formato sulla base degli apporti del ghiacciaio, proveniente dalla val di Susa, che si sono susseguiti durante le fasi di espansione pleistocenica. Le conoidi alluvionali così create sono costituite da depositi di origine fluvioglaciale, successivamente rimodellati, almeno nei livelli più superficiali, dai corsi d'acqua che attraversano il territorio comunale (Po, Stura di Lanzo, Dora Riparia e Sangone) (Bonsignore et al. 1969). La parte non toccata dall'erosione fluviale presenta fenomeni di estesa alterazione superficiale, formando zone locali o pacchetti di limo sabbioso – argilloso, il cui spessore varia tra 1 e 2 m. La restante parte del territorio è costituita dai rilievi collinari posti a Est del fiume Po che raggiungono una quota di 660 m s.l.m. in corrispondenza della collina di Superga.

La rete idrografica è costituita dal fiume Po e dai suoi affluenti, Sangone, Stura di Lanzo e Dora Riparia.

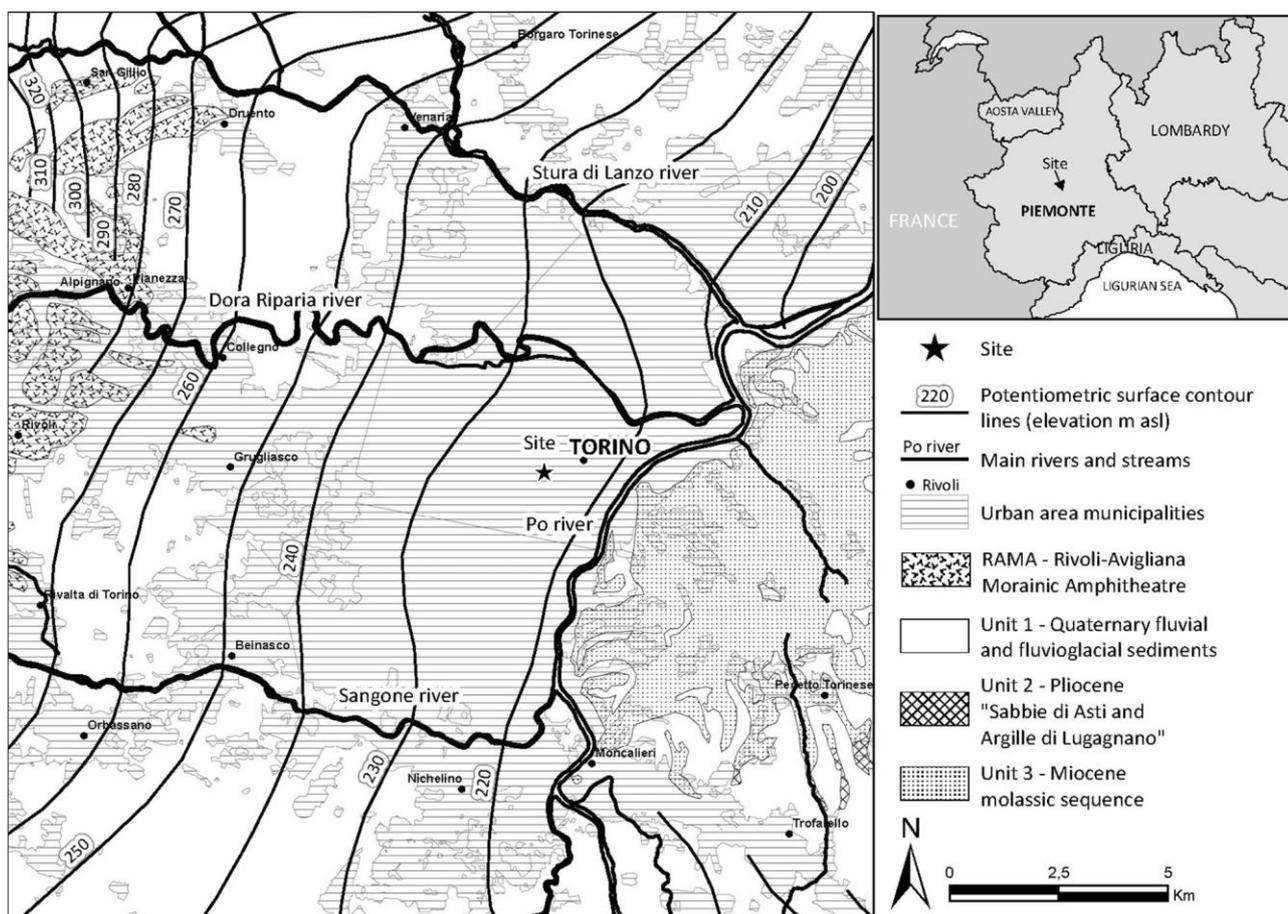


Figura 12: Mappa idrogeologica dell'area di Torino (Lo Russo e Taddia 2009)

L'assetto geologico generale, ricostruito dalle numerose indagini svolte nel sottosuolo torinese, è suddiviso, per i primi 150 metri circa, in tre complessi litostratigrafici in base al periodo di deposizione, alla composizione strutturale, alle caratteristiche litologico e idrogeologiche (Taddia,2018):

- **Unità 1** è quella più antica (Miocene) ed è costituita da conglomerati, arenarie e marne tipiche della sequenza terrigena appartenente al Bacino Terziario Piemontese (Carta Geologica d'Italia 1:50000, foglio 156-Torino Est). Questa unità la troviamo in corrispondenza della collina di Torino. Nell'area urbana è stratigraficamente sovrastata dall'Unità 2 o troncata dall'erosione superficiale quaternaria che la mettono in contatto direttamente con l'Unità 3.
- **Unità 2**, corrispondente al periodo del Pliocene, è costituita da depositi marini poco profondi rappresentati, nell'area di interesse, dalle argille Azzurre e dalle sabbie di Asti composta da un'alternanza di silt omogenei e sabbie fini fossilifere con intrusioni di arenarie medio-grossolane. Nel restante territorio di Torino si riscontrano sempre dei depositi marini caratterizzati da depositi Villafranchiani come il silt di San Martino e le sabbie di Ferrere composti da un'alternanza di silt e sabbie medie-grossolane con presenza di fossili. La parte superficiale di questa unità risulta essere erosa e coperta dai depositi alluvionali dell'Unità 3 e su tutta la superficie urbana è totalmente ricoperta da quest'ultima.
- **Unità 3**, Pleistocene medio-Olocene, è caratterizzata da una copertura alluvionale composta da ghiaie, ghiaie sabbiose e da sedimenti sabbiosi con intercalazioni di lenti argillose e silt/silt sabbiosi (Lo Russo et al., 2018; Carta geologica d'Italia 1:50000).

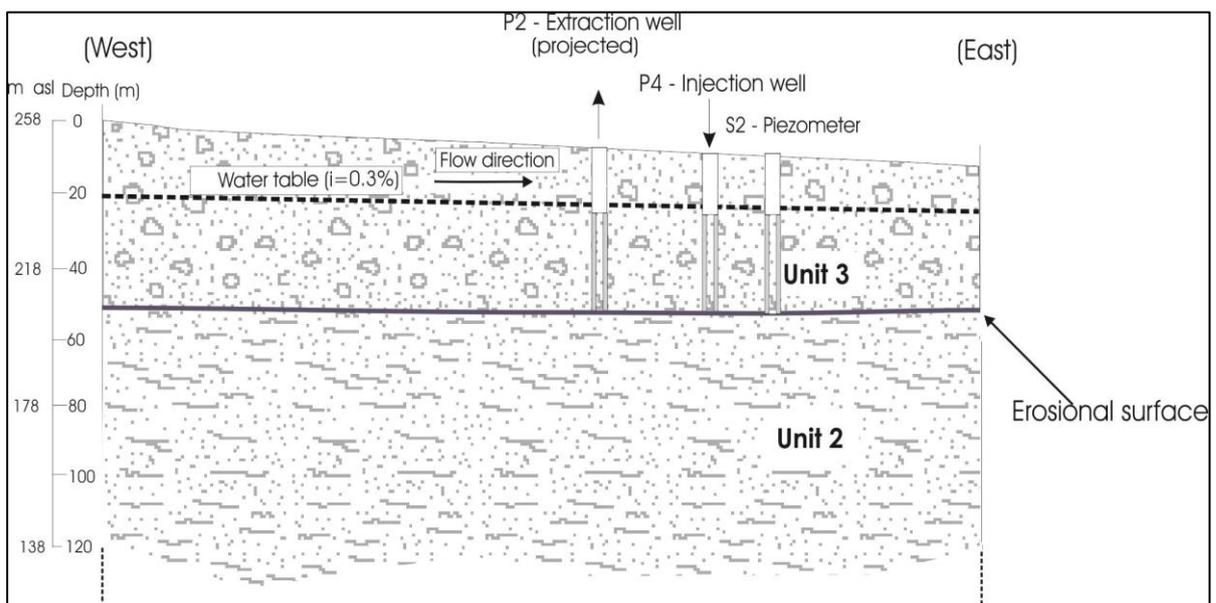


Figura 13: Sezione dell'impianto GWHP del Politecnico di Torino con relativa stratigrafia (Taddia, 2018)

Nell'area oggetto di studio (Figura 13), grazie alle analisi e alle perforazioni effettuate per la realizzazione dell'impianto geotermico del Politecnico, è stato riscontrato un primo strato più

superficiale di 47 metri caratterizzato dall'Unità 3 mentre seguono, fino oltre la profondità di 120 metri, i depositi marini (Civita e Lo Russo, 2010).

## 4.2 Inquadramento idrogeologico

Con riferimento al quadro geologico dell'area, si schematizza il seguente assetto idrogeologico:

- **Complesso superficiale:** composto da depositi fluviali olocenici e depositi fluviali e fluvioglaciali del Pleistocene medio-superiore. Risulta essere formato essenzialmente da ghiaia e sabbie con intercalazioni argillose e limose e presenta uno spessore del Complesso Superficiale molto variabile, mediamente compreso tra una quarantina e una cinquantina di metri. I depositi fluviali e fluvioglaciali, grazie alla loro elevata permeabilità, sono sede dell'acquifero libero principale. Al di sotto di tale complesso segue, come regola, la cosiddetta serie «Villafranchiana».
- **Complesso Villafranchiano:** caratterizzato da depositi fluvio-lacustri con età compresa tra il Pliocene superiore e il Pleistocene inferiore è formato da alternanze di sedimenti di ambiente fluviale (ghiaie e sabbie) e di ambiente lacustre-palustre (limi e argille con frequenti intercalazioni di livelli ricchi di sostanza organica di origine vegetale fino a torbosi). I depositi sono contraddistinti da alternanza di livelli più grossolani e molto permeabili di origine fluviale, dove sono contenute varie falde idriche in pressione, e livelli limoso-argillosi di origine palustre-lacustre, che funzionano da setti impermeabili. Le varie falde in pressione dell'Acquifero Villafranchiano sono, come dato generale, abbastanza ben separate tra loro e, soprattutto, dalla falda superficiale.
- **Complesso Pliocenico:** è un substrato marino variamente modellato dall'erosione e deformato dalla tettonica. I litotipi che caratterizzano il Complesso Pliocenico vanno dalle sabbie alle argille, con predominanza di depositi più grossolani verso i bordi alpino e collinare, e di depositi fini verso la zona assiale della pianura. Nel complesso dei depositi marini pliocenici vi è una certa alternanza tra sedimenti grossolani, essenzialmente sabbiosi (la cosiddetta facies Astiana), e depositi fini che consentono la presenza nei primi di falde idriche in pressione. Sono stati rilevati tre alti strutturali: il primo nel settore a nord della Dora Riparia che fa da rilevato ai depositi glaciali dell'Anfiteatro Morenico di Ivrea e prosegue verso sud fino a collegarsi alla struttura collinare nei pressi di Settimo. Il secondo alto strutturale è collocato all'incirca sulla verticale del corso della Dora Riparia e si estende dalla collina di Torino fino alla zona di Rivoli-Piossasco. A partire da Moncalieri fino ad oltre La

Loggia è riscontrabile il terzo alto strutturale, avente direzione N-S, che delimita due bacini di sedimentazione: uno occidentale, che si approfondisce verso sud e verso ovest fino al bordo alpino, ed uno orientale, che si approfondisce verso sud e verso est, al di sotto dell'Altopiano di Poirino.

#### 4.3 Assetto litostratigrafico

La ricostruzione dell'assetto litostratigrafico in corrispondenza e nell'intorno del sito è stata fatta attraverso i seguenti dati (Figura 14):

- Stratigrafie di sondaggi geotecnici realizzati presso le OGR (Officine Grandi Riparazioni) messe a disposizione dall'ARPA Piemonte;
- Stratigrafie pozzi e piezometri dell'impianto geotermico del Politecnico di Torino;
- Stratigrafie di sondaggi geotecnici effettuati per la realizzazione del grattacielo del Centro direzionale Intesa Sanpaolo collocato a 500 metri a N-NE del Politecnico di Torino.

##### 4.3.1 Sondaggi geotecnici OGR

È stata consultata una serie di stratigrafie di sondaggi presenti nell'intorno del Politecnico di Torino, in parte rese disponibili dall'ARPA Piemonte e in parte reperibili attraverso l'applicativo di consultazione online dei database sempre dell'ARPA Piemonte.

Si tratta di stratigrafie realizzate alla fine del 2010 che rientrano in una serie di indagini integrative di caratterizzazione del complesso con nome di 109.928, 109.929, 109.930, 109.931, 109.932, 109.933, 109.934. In generale la descrizione della successione litostratigrafica dei terreni risulta speditiva e di poco dettaglio ma è tuttavia utile a definire il quadro generale della successione e delle principali caratteristiche granulometriche dei depositi.

Tutte le stratigrafie consultate sono relative a perforazioni di profondità di 35 m da p.c.; tali perforazioni attraversano prevalentemente alternanze di depositi sabbioso-ghiaiosi di cementificazione variabile da bassa a media con livelli di conglomerato e orizzonti limoso-argillosi

##### 4.3.2 Pozzi e piezometri impianto geotermico del Politecnico di Torino

Le stratigrafie, effettuate per la costruzione dell'impianto geotermico del Politecnico di Torino, sono state realizzate in un arco temporale di 15 anni in contemporanea all'evoluzione e al miglioramento dell'impianto.

Le perforazioni raggiungono la profondità di 45-47 metri nel caso dei pozzi P1, P2, P3, P4, P7, P8 e del piezometro S4 mentre si fermano solo a 38 metri i restanti pozzi P5 e P6 e piezometri S1, S2 e S3.



Figura 14: Sondaggi geognostici nei pressi o all'interno del Politecnico di Torino (Dati ARPA Piemonte)

#### 4.3.3 Sondaggi geotecnici grattacielo Intesa Sanpaolo

In questo caso sono state consultate le stratigrafie di sondaggi reperibili attraverso l'applicativo di consultazione online dei database dell'ARPA Piemonte.

Queste perforazioni sono state eseguite nel periodo tra febbraio e marzo 2007 in numero di 5 con la denominazione BH1, BH1bis, BH1ter, BH2 e BH2bis. Il sondaggio BH1 è stato realizzato interamente a carotaggio continuo sino alla profondità di 80 m da p.c.. I restanti sondaggi sono stati realizzati a carotaggio continuo limitatamente ai primi 4 m – 6 m da p.c. (per il solo sondaggio BH1bis l'avanzamento a carotaggio continuo è stato utilizzato anche tra 40,6 m e 46,5 da p.c.), mentre la restante parte è stata realizzata con avanzamento a distruzione di nucleo sino a 80 m di profondità da p.c..

#### 4.3.4 Assetto litostratigrafico locale

In corrispondenza del Politecnico di Torino l'assetto litostratigrafico è caratterizzato dalla seguente successione di depositi (le profondità sono espresse in metri e sono riferite al p.c.):

**P.c. - 1,6** terreno di riporto (ghiaia e sabbia con ciottoli);

**1,6 - 15,0** ghiaia e ciottoli con sabbia medio-fine limosa e intercalazioni di sabbia sciolta e limo sabbioso con ghiaia;

**15,0 – 35,0** alternanza di livelli di sabbia limosa con ghiaia e ciottoli e livelli di ghiaia e ciottoli con sabbia limosa da sciolta a debolmente addensata con intercalazioni di sabbia sciolta e limo sabbioso con ghiaia.

**35,0 - 48** ghiaia e ciottoli con sabbia medio-grossa;

**48 - 53,0** argilla di colore nocciola con screziature ocra, molto consistente (localmente debolmente ghiaiosa);

**53,0 – 80,0** sabbia prevalentemente media di colore da grigio a marrone bruno con locali orizzonti debolmente ghiaiosi. All'interno dei depositi, tra 67 m e 79 m da p.c., è presente un livello discontinuo costituito da prevalente limo argilloso sabbioso di colore grigio azzurro molto consistente e con intercalati livelli di argilla debolmente limosa di colore grigio scuro.

#### 4.4 Inquadramento dell'acquifero

L'acquifero è situato all'interno della copertura alluvionale ed è di tipo non confinato con un'elevata produttività; risulta essere connesso idraulicamente con la rete principale di drenaggio delle acque superficiali rappresentata dai fiumi Po, Sangone, Dora Riparia e Stura di Lanzo.

Per quanto concerne le isopieze presentano un andamento generale parallelo al contorno del bordo alpino, con valori delle quote piezometriche via via decrescenti man mano che si va verso il corso del Fiume Po (Figura 15 e 57). Riguardo alla soggiacenza in generale si hanno dei valori elevati che nell'area del Politecnico assumono valori in media attorno ai 20 metri di profondità rispetto al piano campagna con variazioni stagionali dovute ad apporti idrici esterni; l'inclinazione dell'acquifero ha direzione NNW-SSE con un gradiente di 0.29-0.3% verso il Po (Civita et al., 2004).

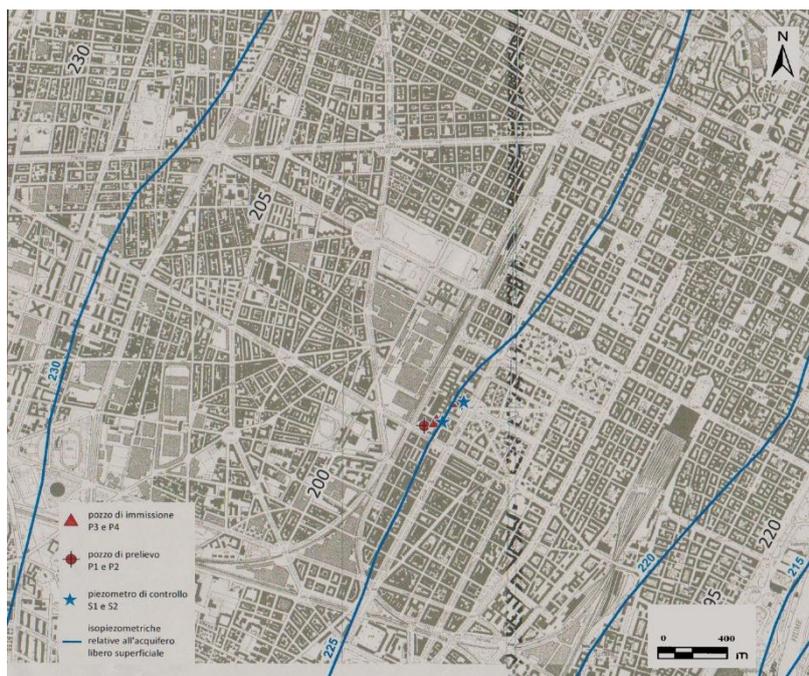


Figura 15: Mappa della soggiacenza della falda nell'area di studio (m s.l.m.)

La falda freatica principale risulta essere alimentata dagli apporti meteorici diretti mentre la ricarica delle altre falde idriche, più in profondità, della pianura è legata essenzialmente agli apporti meteorici che cadono sul bordo roccioso perialpino impermeabile e che vanno ad alimentare il materasso alluvionale grossolano indifferenziato a ridosso dello zoccolo alpino.

#### 4.5 Inquadramento climatologico

Il clima a Torino è di tipo sub-continentale con inverni freddi e umidi ed estati calde e afose. Le precipitazioni sono abbastanza abbondanti, con valori che raggiungono i 2.000 millimetri all'anno; i massimi sono localizzati nelle stagioni intermedie, risulta molto spiccato quello primaverile, e due minimi uno nell'inverno e uno nell'estate. I temporali, in media circa 20 per anno di cui 2 con grandine, si verificano quasi esclusivamente nei mesi da aprile ad ottobre e causano piogge meno durevoli ma molto intense. I valori di precipitazione giornaliera possono raggiungere picchi anche di 188.4 mm come nel caso del 23 giugno 2019 (Figura 16).

La temperatura media nell'area metropolitana di Torino varia da un minimo che si aggira sui 2.4 °C a gennaio fino ad un massimo nella stagione estiva con valori attorno ai 24.2 °C nei mesi di luglio e agosto (ARPA Piemonte, 2021).

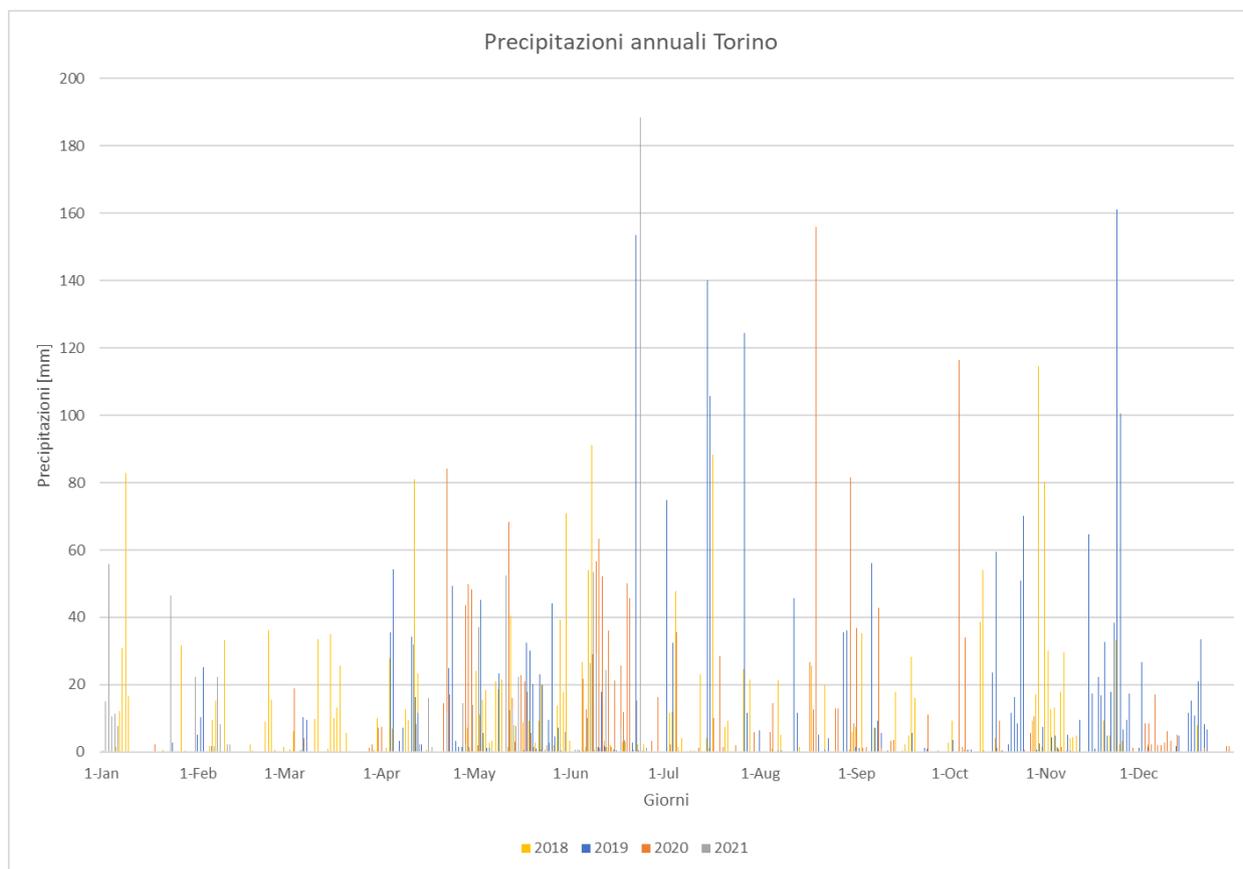


Figura 16: Precipitazioni annuali Torino (2018-2021)

# Capitolo 5

## Metodologia, materiale e analisi

### 5.1 Dati pregressi

Nell'ambito di questo lavoro sono stati acquisiti gli studi e i dati ricavati da analisi effettuate per la realizzazione e il monitoraggio dell'impianto geotermico del Politecnico nel corso degli ultimi quindici anni (Pizzo, 2006; Lo Russo e Taddia, 2010; Lo Russo et al., 2011; Lo Russo et al., 2012; Lo Russo et al., 2014; Taddia, 2018; Lo Russo et al., 2018). Questa mole di informazioni proviene da prove di pozzo, analisi delle stratigrafie, misurazione in continuo con sonde fisse dei valori di temperatura, conducibilità elettrica e del livello piezometrico.

I dati ricavati sono stati il punto di partenza per imbastire questo lavoro di tesi e, successivamente, la conferma dei valori idraulici ottenuti dalle singole prove di diluizione effettuate.

#### 5.1.1 Dati prove di pozzo

Le proprietà idrauliche dell'acquifero superficiale sono state ottenute attraverso prove a gradini di portata realizzate nei vari impianti geotermici del Politecnico, CF1-CF2-CF3.

Nell'impianto CF1 è stata realizzata una prova di pompaggio all'interno del pozzo di emungimento P1 nel 2006 (Pizzo, 2006).

I dati dell'impianto CF2 provengono dai test eseguiti nel pozzo di emungimento P2, anni 2011 e 2014, e nel pozzo di immissione P4, anno 2010 (Lo Russo e Taddia, 2010; Lo Russo et al., 2011; Lo Russo et al., 2012; Lo Russo et al., 2014; Taddia, 2018; Lo Russo et al., 2018).

Nell'impianto CF3 è stata eseguita un'ulteriore prova di pozzo nel 2015.

## **Impianto CF1**

### *Pozzo P1*

Tenendo in considerazione uno spessore saturo medio di 28 metri, sono stati ricavati:

- **Trammissività:**  $1,37 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$
- **Conducibilità idraulica orizzontale:**  $4,9 \times 10^{-3} \text{ m/s}$
- **Porosità:** 0.25
- **Coefficiente d'immagazzinamento:**  $6,53 \times 10^{-4}$

## **Impianto CF2**

### *Pozzo P2*

Tenendo in considerazione uno spessore saturo medio di 24 metri, nella prova del 2011 sono stati ottenuti i seguenti risultati:

- **Velocità di pompaggio costante:** 30 l/s
- **Trammissività:**  $3,60 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
- **Conducibilità idraulica orizzontale:**  $1,5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$
- **Coefficiente di immagazzinamento:** 0.104
- **Porosità:** 0.2

Nella prova del 2014 è stato considerato uno spessore saturo medio di 30 metri con valori pari a:

- **Trammissività:**  $7,5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
- **Conducibilità idraulica orizzontale:**  $2,5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$
- **Conducibilità idraulica verticale:**  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
- **Coefficiente di immagazzinamento:** 0.106
- **Porosità:** 0.2

#### Pozzo P4

La prova a gradini di portata effettuata nel 2010, considerando uno spessore saturo di 27 metri, ha fornito i seguenti risultati:

- **Tramissività:**  $1,55 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
- **Conducibilità idraulica orizzontale:**  $5,74 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
- **Porosità:** 0.12

#### Impianto CF3

La prova a gradini di portata effettuata nel 2015, assumendo uno spessore saturo di 30 metri, ha fornito i seguenti risultati:

- **Tramissività:**  $7.1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
- **Conducibilità idraulica orizzontale:**  $2,37 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

#### 5.1.2 Dati sonde fisse

Le sonde fisse della OTT (cfr 5.7) sono collocate in ogni pozzo o piezometro dell'impianto e sono situate ad una profondità media di 25 metri. I dati acquisiti variano a seconda della collocazione tra questi range:

- **Temperatura:** 14.1°C – 15.3°C
- **Soggiacenza:** 20.5 – 21 metri
- **Conducibilità elettrica:** 728 – 805  $\mu\text{S/m}$

Nei punti ispezionati dal sottoscritto la soggiacenza misurata manualmente coincide con i dati dalle sonde fisse in posto.

#### 5.2 Prove di tracciamento a diluizione

La tecnica utilizzata consiste nel monitorare, nel punto stesso di immissione, la diluizione di un tracciante operata dai filetti liquidi che attraversano il pozzo, fino alla sua completa sparizione. La variazione di concentrazione del tracciante nel tempo segue una legge di tipo esponenziale (Mosetti, 1961) ed è in relazione con la velocità orizzontale apparente del flusso idrico nel mezzo poroso.

### 5.2.1 Relazione di Mosetti

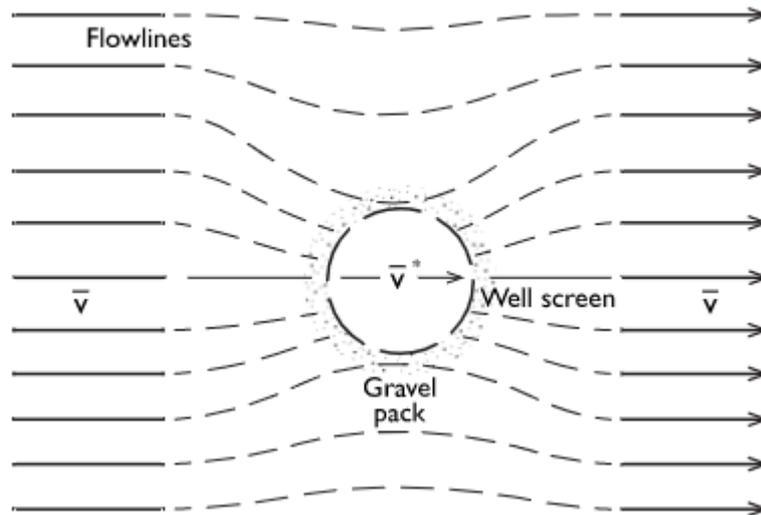


Figura 17: Disturbo del flusso dell'acquifero da parte del pozzo

Per poter scrivere la relazione di Mosetti bisogna tenere in considerazione l'effetto del foro del pozzo e della ghiaia che lo circonda in un regime di flusso laterale (Figura 17).

La velocità lineare media delle acque sotterranee nella formazione oltre la zona di disturbo è  $\bar{v}$ . La velocità media attraverso il centro del pozzo è indicata con  $\bar{v}^*$ . Si assumerà che il tracciante non sia reattivo e che venga introdotto istantaneamente alla concentrazione  $C_0$  nel segmento finestrato del pozzo. L'area della sezione verticale, trasversale al flusso che attraversa il tratto finestrato, è indicata come  $S$ . Il volume del pozzo è  $V$ . Al tempo  $t > 0$ , la concentrazione  $C$  nel pozzo diminuisce ad una velocità:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{S \cdot \bar{v}^* \cdot C}{V}$$

Che può essere riscritta:

$$\frac{dC}{C} = \frac{S \cdot \bar{v}^* \cdot dt}{V}$$

Integrando e inserendo le condizioni iniziali dove al tempo  $t = 0$  la concentrazione  $C = C_0$ :

$$\bar{v}^* = -\frac{V}{S \cdot t} \ln\left(\frac{C}{C_0}\right)$$

La velocità nel pozzo  $\bar{v}^*$  è legata alla velocità darcyana o di filtrazione  $\bar{v}$  da termini di flusso addizionali che tengono in considerazione la naturale distorsione del campo di flusso.

$$\bar{v}^* = \alpha \bar{v} + v_c + v_v + v_m + v_d$$

Dove in Drost et al. (1968):

$v_c$  = velocità di filtrazione apparente dall'effetto di densità (concentrazione, temperatura, etc.);

$v_v$  = velocità di filtrazione apparente causata dalle correnti verticali;

$v_m$  = velocità di filtrazione apparente causata da miscelamento artificiale;

$v_d$  = velocità di filtrazione apparente causata da diffusione molecolare del tracciante;

Il fattore di correzione  $\alpha$ , che tiene in considerazione la distorsione delle linee di flusso a causa della presenza del pozzo, è definito dal rapporto:

$$\alpha = \frac{Q_a}{Q_b}$$

Dove  $Q_a$  è il flusso orizzontale nel pozzo e  $Q_b$  è il flusso orizzontale nella stessa sezione senza la presenza del pozzo.

Nel nostro caso, assumendo l'assenza di tutte le tipologie di flusso eccetto quella orizzontale:

$$\bar{v}^* = \alpha \bar{v}$$

La relazione finale che lega la variazione di concentrazione del tracciante nel tempo  $C$  con la velocità apparente  $\bar{v}$  (o darcyana) è così espressa:

$$\bar{v} = -\frac{V}{\alpha S t} \ln \frac{C}{C_0} \quad (\text{Mosetti, 1961})$$

Dove:

$V$  = volume del piezometro;

$\alpha$  = coefficiente di correzione (Drost et al. 1968), che permette di considerare la distorsione del reticolo di flusso introdotta dalla struttura fisica del pozzo. In letteratura il coefficiente è stato tabulato da Klotz (1978) per differenti tipologie di tubi filtro: test di laboratorio e prove di campo hanno dimostrato che, nei casi in cui il coefficiente di permeabilità del filtro sia maggiore di quello dell'acquifero, il coefficiente di correzione tende ad assumere valori prossimi a 2 (Drost et al. 1968, Hall 1993, Novakowski and Lapcevic 1995, van Tonder et al. 2002, Riemann et al. 2002, Pitrak et al. 2007, Shafer et al. 2010);

$S$  = sezione ortogonale alle linee di flusso;

**C** = concentrazione nel pozzo al generico tempo **t**;

**C<sub>0</sub>** = concentrazione all'istante iniziale nel pozzo;

**t** = tempo di diluizione

Applicando la formula inversa della legge di Darcy, considerando la velocità apparente ottenuta dalla formula di Mosetti, si può ricavare la conducibilità idraulica:

$$K = \frac{\bar{v}}{i}$$

La velocità effettiva di deflusso nell'acquifero ( $\bar{v}_e$ ) si stima dividendo la velocità darcyana ( $\bar{v}$ ) per la porosità efficace ( $n_e$ ).

$$\bar{v}_e = \frac{\bar{v}}{n_e}$$

Utilizzando il metodo a diluizione sono state effettuate le misurazioni con due modalità differenti all'interno dei piezometri e pozzi all'interno dell'area del Politecnico.

La prima risulta essere quella in continuo a una o due profondità precise, all'interno del tubo, mentre l'altra è quella puntuale lungo tutta la lunghezza della cavità assumendo un passo costante.

#### *Campionamento in continuo*

Questa tipologia di test in campo sono stati eseguiti presso il piezometro denominato S1 e all'interno del pozzo di restituzione P8.

**Piezometro S1:** le prove sono state effettuate con una frequenza di quattro nell'arco di due mesi con il quantitativo di tracciante che è stato diversificato da test a test. Per il rilevamento della sparizione del colorante sono stati utilizzati due fluorimetri da campo collocati alla profondità di 27 metri e 40 metri al di sotto del piano campagna. La frequenza di misura impostata è di quattro minuti per entrambe le sonde e i parametri misurati sono la fluoresceina, la torbidità e la temperatura per la sonda più superficiale mentre solo la fluoresceina e la torbidità per lo strumento in profondità.

**Pozzo di restituzione P8:** è stato eseguito un singolo test in contemporanea alla realizzazione di quello puntuale ponendo lo strumento di misurazione alla quota di 27 metri e successivamente

a 24 metri. Anche in questo caso la frequenza di misura è stata impostata a quattro minuti ed è stata rilevata, oltre al colorante, anche la torbidità dell'acqua.

### *Campionamento puntuale*

Il campionamento puntuale è stato eseguito in tre pozzi di restituzione differenti (P8, P4, P6) per permettere la valutazione della variazione di conducibilità idraulica dell'acquifero superficiale lungo la verticale. Per la prova è stato utilizzato un solo spettrofluorimetro che è stato inserito molteplici volte nel foro campionando i dati ad una distanza di 2 metri all'interno della zona satura.

Questa tipologia di test deve essere svolta valutando attentamente le condizioni al contorno che possono inficiare la prova e i suoi risultati. È necessario quindi conoscere:

- se il pozzo è stato realizzato a regola d'arte poichè una cattiva realizzazione o uno spurgo malfatto possono ridurre notevolmente la velocità e la conducibilità idraulica nei dintorni del tubo;
- L'anno di installazione perché più tempo rimane in posto, più aumento il rischio di ostruzione della finestratura del tubo da parte del sedimento riducendo anche in questo caso i parametri idraulici locali e falsando la prova.

### 5.3 Prova di tracciamento multiplo

La prova di tracciamento consiste nella misura del tempo di filtrazione del tracciante lungo la distanza compresa tra il piezometro o pozzo di immissione e quello di recapito a valle del gradiente. La modalità di conduzione della prova comporta l'inserimento del fluorimetro all'interno del piezometro di recapito e del progressivo rinvenimento del tracciante, ovvero della misura della sua concentrazione nel tempo.

Nel nostro studio è stata inserita la fluoresceina nel pozzo di emungimento P1 ed è stata introdotta, ad una quota fissa, la sonda nel piezometro S1 collocato ad una distanza di circa 10 metri.

Il rinvenimento del tracciante è espresso da una curva di concentrazione nel tempo, anche detta curva di "breakthrough" o di restituzione. La forma della curva è funzione della dispersione idrodinamica che il tracciante subisce a livello microscopico nel tragitto di filtrazione. A causa dell'eterogeneità delle particelle, allontanandosi dal piezometro di immissione, il tracciante si espande nell'acquifero. Le variazioni di velocità si trasmettono diversamente tra i pori in

funzione della granulometria, orientamento delle particelle e tortuosità dei pori. A questo si aggiunge una componente di diffusione molecolare e di mescolamento idrodinamico durante il moto laminare.

I tempi di residenza idraulica del tracciante ricavabili dall'analisi della curva di restituzione (Figura 18) sono:

- Tempo di primo rinvenimento  $T_i$ ;
- Tempo al picco di concentrazione  $T_p$ ;
- Tempo al baricentro della curva  $T_b$ ;
- Tempo di arrivo della coda  $T_c$ .

Successivamente possono essere calcolate le corrispondenti velocità. La velocità massima  $v_M$  è definita con minor esattezza in quanto correlata al tempo di primo rinvenimento  $T_i$ :

$$v_M = \frac{L}{T_i}$$

dove  $L$  è la distanza tra il piezometro di immissione e quello di ricezione.

La velocità prevalente o modale  $v_p$  viene determinata in relazione al tempo al picco di concentrazione  $T_p$ :

$$v_p = \frac{L}{T_p}$$

La velocità effettiva  $v_e$  viene generalmente associata alla velocità prevalente, in particolare nel caso di curve di restituzione relativamente strette e con picco ben marcato.

Una volta ottenuta una stima della velocità effettiva può essere calcolata la conducibilità idraulica dell'acquifero con la relazione:

$$K = v_e * \frac{n_e}{i}$$

Lo scopo della prova è di stimare la velocità effettiva di filtrazione della falda e da essa, nota la porosità ricavata dalle prove di pompaggio, la conducibilità idraulica dell'acquifero.

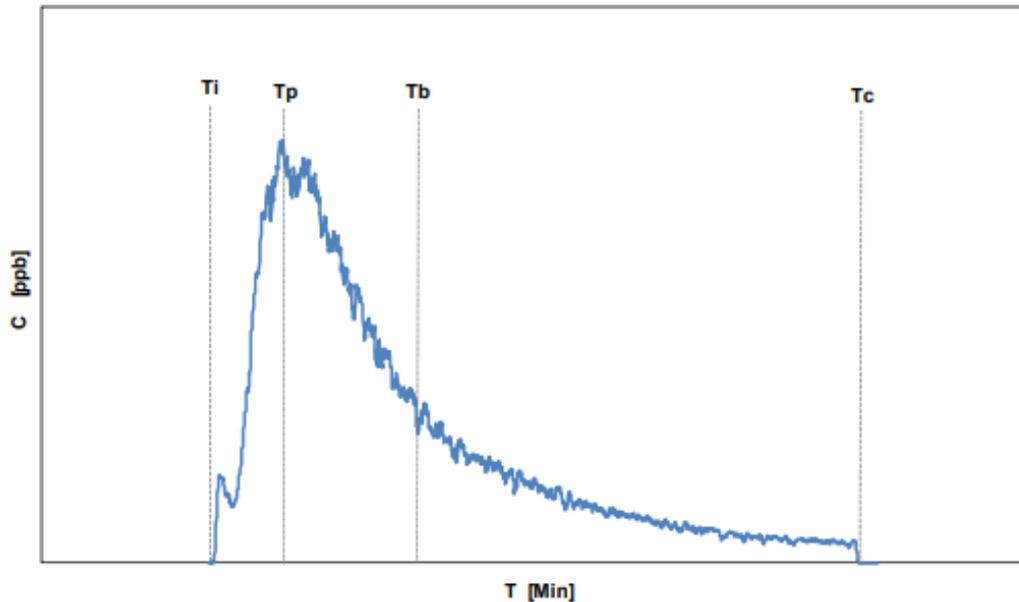


Figura 18: Esempio di curva di restituzione con i tempi di riferimento

#### 5.4 Bianco ambientale

Una prova di tracciamento con traccianti fluorescenti necessita della caratterizzazione del bianco ambientale poiché la tecnica analitica per la spettrofluorimetria è una tecnica indiretta che ricava la concentrazione delle sostanze dalla rilevazione di un segnale di fluorescenza.

È stato necessario quindi, prima dell'immissione del colorante, effettuare un monitoraggio preliminare all'interno del pozzo o piezometro per valutare il rumore di fondo che andrebbe a inficiare il test effettuato successivamente.

#### 5.5 Tipologia e quantitativo di colorante

A seguito di un'attenta analisi del sito in esame, è stato scelto come tracciante per lo studio la fluoresceina; infatti, grazie alle sue ottime proprietà (Cfr 2.3.7), all'interazione quasi nulla con il mezzo poroso e alle buone caratteristiche dell'acqua di falda (pH, conducibilità elettrica) risulta essere la sostanza più adatta per le analisi di diluizione effettuate.

La determinazione del quantitativo di tracciante da utilizzare per il test di diluizione è stata complessa; la vicinanza con l'impianto di emungimento, nel caso del piezometro, e la scarsa presenza di metodi affidabili in letteratura hanno reso necessarie alcune prove preliminari per determinare la quantità accettabile di colorante.

Il test di tracciamento multiplo ha richiesto una dose maggiore di colorante poiché deve attraversare la matrice porosa ed essere rilevato ad una distanza di 10 metri; per le prove a

diluizione le quantità di fluoresceina varia a seconda delle dimensioni del pozzo e sono riportate in dettaglio nei capitoli seguenti.

## 5.6 Luogo di realizzazione dei test

La scelta del luogo in cui eseguirle è stata dettata, durante l'estate, dall'impossibilità di sfruttare i pozzi di emungimento ed immissione a causa dell'attività dell'impianto geotermico, mentre, per l'autunno, dalla facilità di accesso e dalla presenza di strumentazione fissa che aumentava il rischio di danneggiare la sonda e il cavo di collegamento.

Si è optato quindi di utilizzare il piezometro S1, situato all'interno del cortile principale del Politecnico di Torino in Corso Duca degli Abruzzi (Figura 19), per le tre misurazioni di diluizione in continuo effettuate durante l'estate; le motivazioni sono da ricercarsi nella distanza maggiore rispetto agli altri piezometri dai pozzi, sia di emungimento che di restituzione, e dall'assenza di lavori in corso al di sopra del chiusino.

Per le misurazioni di sparizione a impianto spento sono stati scelti i pozzi d'immissione P8, P6 e P4 poiché non sono presenti all'interno del foro strumentazioni fisse che rischiano di danneggiare la sonda durante il test.

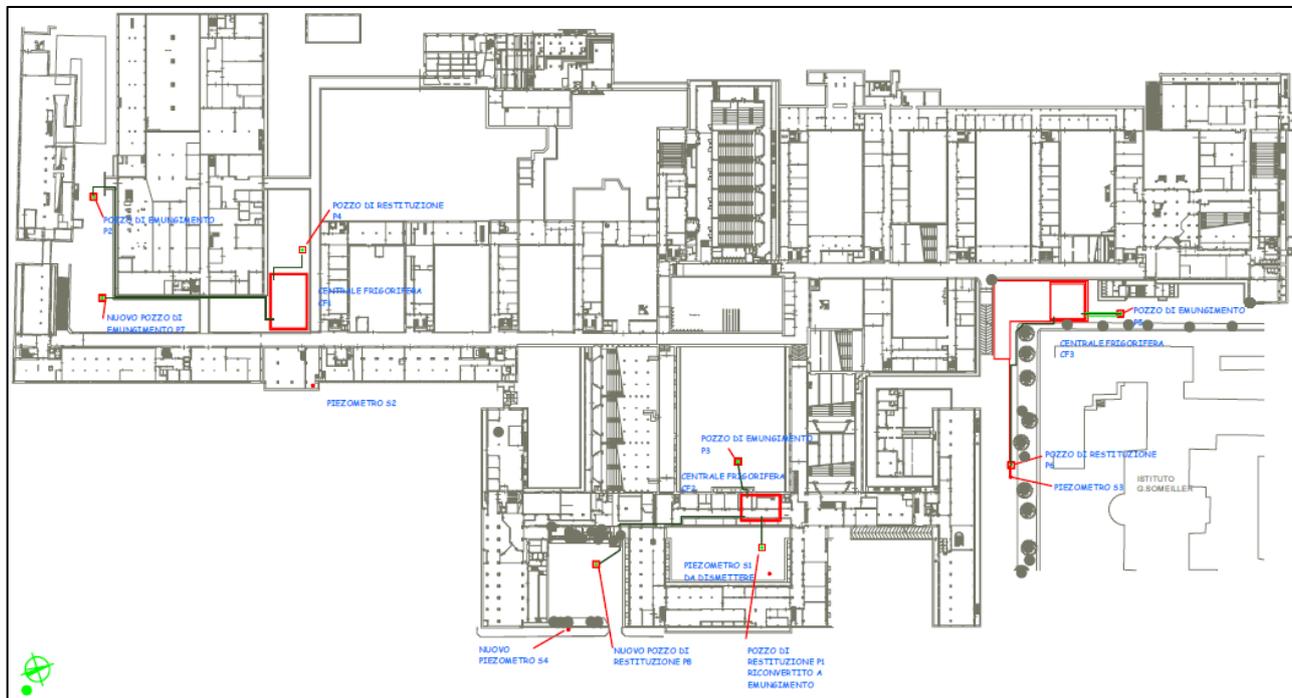


Figura 19: Planimetria impianto Geotermico del Politecnico con relativa ubicazione dei pozzi e dei piezometri

Il tracciamento multiplo è stato eseguito tra il pozzo di emungimento P1 e il piezometro S1, poiché la distanza tra i due punti non è troppo elevata e quindi i tempi di arrivo non risultano essere troppo dilatati nel tempo.

L'ultima misura di sparizione in continuo con impianto spento è stata svolta nel piezometro S1 per poter confrontare i risultati con quelli raccolti durante la stagione estiva.

Caratteristiche fisiche principali dei pozzi e dei piezometri utilizzati:

- **Piezometro S1:** diametro 90 mm, profondità 39 metri, distanza bocca foro-piano campagna 200 mm.
- **Pozzo di emungimento P1:** diametro 300 mm, profondità 48 metri, distanza bocca foro-piano campagna 4 metri.
- **Pozzo d'immissione P8:** diametro 800 mm, profondità 48 metri, distanza bocca foro-piano campagna 1.5 metri, anno di realizzazione 2020.
- **Pozzo d'immissione P6:** diametro 600 mm, profondità 38 metri, distanza bocca foro-piano campagna 2 metri, anno di realizzazione 2018.
- **Pozzo d'immissione P4:** diametro 355 mm, profondità 45 metri, distanza bocca foro-piano campagna 2 metri, anno di realizzazione 2007.

## 5.7 Strumentazione

### Fluorimetro

Il fluorimetro è uno strumento capace di rilevare il passaggio di diversi traccianti fluorescenti (ad



Figura 20: Componenti del fluorimetro: sonda immersa e cavo di collegamento

esempio Tinopal CBS-X e Fluoresceina) attraverso la misura della radiazione emessa dalle particelle di tali composti quando queste vengono colpite da particolari radiazioni incidenti. Questa valutazione viene fatta grazie ai sensori, chiamati lampade, posti su assi diversi; ogni asse è fornito di un sistema di rilevamento e di un sistema di eccitazione. Ogni lampada viene accesa a turno, in modo che le risposte dovute ai diversi traccianti e alla torbidità siano indipendenti. Essendo posizionate all'interno dello strumento, il contatto acqua-sensore è permesso grazie ai quattro fori collocati a distanza costante lungo la sua circonferenza e collegati fra di loro. Il loro

numero varia a seconda del modello e della marca del fluorimetro.

La sonda immersa in acqua (Figura 20) manda poi i segnali rilevati a un datalogger posto fuori flusso che consente di registrare i dati su una scheda di memoria da cui possono essere esportati per procedere all'elaborazione delle misure. Il datalogger è collegato a sua volta ad una batteria che permette il funzionamento dello stesso durante il periodo di campionamento.

Nel nostro caso i dispositivi utilizzati sono due e presentano differenti caratteristiche:

- Il modello TMRC-5 della Tetraedre, più recente, permette l'analisi in contemporanea di tre sostanze coloranti differenti (Fluoresceina, Tinopal CBS-X e Rodamina) e del livello di torbidità grazie alle sue quattro lampade. Possono essere misurate anche le caratteristiche della batteria, come il voltaggio, e la temperatura dell'acqua. Tutti questi valori possono essere impostati, tramite software, dal pc e permettono la personalizzazione a seconda del tipo di prova e di analisi che si vuole eseguire.
- Il secondo strumento, più vecchio, è composto da tre differenti lampade che permettono la misura in contemporanea della fluoresceina e del Tinopal CBS-X grazie alla taratura su lunghezze d'onda (di eccitazione e di emissione) adeguate al rilevamento delle due sostanze e della torbidità. Questo strumento presenta una personalizzazione minore rispetto al precedente. (Figura 21)



Figura 21: Fluorimetro più vecchio utilizzato per gli studi dell'acquifero (Vigna)

### *Calza per l'iniezione del tracciante*

Il tracciante fluorescente viene immesso nell'acquifero tramite l'utilizzo di una sacca in geotessuto (Figura 22) di dimensioni ridotte, lunghezza 20 centimetri e diametro 4 centimetri, che viene appesantita con dei ciottoli di piccole dimensioni per permettere l'affondamento della calza al di sotto della superficie libera dell'acquifero. Una volta inserita la quantità desiderata all'interno della sacca, questa viene chiusa all'estremità superiore e collegata con un nodo ad un cordino di lunghezza sufficiente per raggiungere le quote desiderate; dopodiché la si inserisce all'interno del piezometro e fatta scorrere lungo lo stesso, più volte, fino ad esaurimento del colorante.



*Figura 22: Calza di geotessuto dopo l'utilizzo. Da notare la colorazione arancione dovuta alla polvere di fluoresceina*

### *Freatimetro*

Il freatimetro o sonda elettrica viene principalmente utilizzato per il rilievo dei livelli in pozzi o tubi piezometrici (Figura 23).

Lo strumento, molto semplice ed economico, è composto da:

- Una sonda che porta due contatti in metallo pregiato, fra loro isolati da un dispositivo rompigoccia.
- Una testa aggiuntiva di appesantimento
- Un rullo avvolgitore che include i dispositivi per la rilevazione dell'avvenuto contatto con l'acqua della sonda
- Un cavo inestensibile di forma piatta o circolare e con riferimenti centimetrici o millimetrici, a seconda dei modelli



*Figura 23: Freatimetro*

È sufficiente introdurre la sonda nel pozzo o nel tubo piezometrico e calarla fino a che la testa non entri in contatto con l'acqua. Un segnalatore acustico indicherà l'avvenuto contatto e i riferimenti sul cavo segnaleranno il livello dell'acqua rilevato dalla testa del foro. Per avere una misura in m s.l.m. sarà necessario avere le coordinate topografiche della testa del foro in modo poi da poter ricavare il dato cercato.

### Sonda multiparametrica OTT Ecolog 800

La sonda multiparametrica OTT ecoLog 800 (Figura 24) è uno strumento autonomo per la misurazione del livello dell'acqua, della temperatura e della conduttività nell'ambito delle acque sotterranee e di superficie. Il sistema permette la registrazione in continuo dei dati e li trasmette via rete cellulare GSM.

La misura della soggiacenza viene determinata grazie ad una sonda di pressione collocata all'interno dello strumento che valuta la pressione idrostatica dell'acqua; una compensazione della pressione capillare nei cavi della sonda di pressione fornisce alle misure anche la pressione ambientale dell'aria in quell'istante, eliminando gli errori dovuti alle fluttuazioni.

La conducibilità elettrica è misurata tramite un sensore di conducibilità a quattro elettrodi con integrato un sensore di temperatura.

Nel nostro caso studio lo strumento risulta essere posizionato in tutti i pozzi e piezometri ispezionati e trasferisce i dati in tempo reale al computer presente nel dipartimento DIATI del Politecnico.

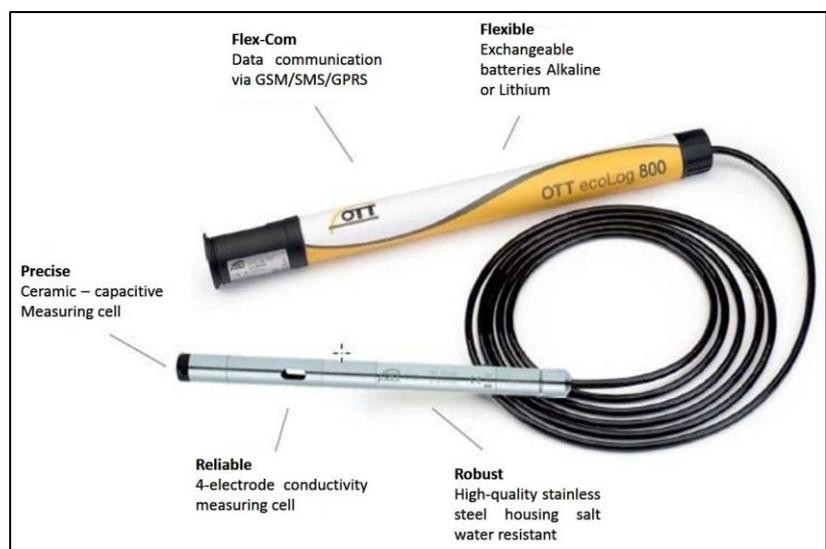


Figura 24: Sonda OTT ecolog 800 (Taddia 2018)

# Capitolo 6

## Risultati delle prove

### 6.1 Cronoprogramma

Le prove in campo con tracciante al Politecnico di Torino sono state condotte secondo il programma riportato in tabella 2 durante l'arco dell'estate e dell'autunno 2021.

Piezometro Pozzo	27 luglio --> 5 agosto	7 settembre --> 14 settembre	20 settembre -- > 27 settembre	5 ottobre --> 11 ottobre	11 ottobre --> 21 ottobre	25 ottobre --> 26 ottobre	28 ottobre	29 ottobre --> 3 novembre
Piezometro S1	Prova di diluizione continua	Prova di diluizione continua	Prova di diluizione continua	-	Prova di tracciamento multiplo	-		Prova di diluizione continua
Pozzo di emungimento P1	-	-	-		Prova di tracciamento multiplo	-		
Pozzo di restituzione P4	-	-	-	-		-	Prova di diluizione puntuale	
Pozzo di restituzione P6	-	-	-	-	-	Prova di diluizione puntuale		
Pozzo di restituzione P8				Prova di diluizione puntuale				

Tabella 2: Programma delle prove con tracciante

### 6.2 Tracciamento a diluizione in continuo

#### 6.2.1 Posizionamento sonde fisse

La prova di tracciamento a diluizione in continuo ha richiesto la scelta di due punti, all'interno del piezometro S1, che risultassero idonei e significativi per il calcolo delle caratteristiche idrologiche dell'acquifero. Per fare ciò sono stati confrontati ed elaborati i dati provenienti da differenti analisi quali:

- Stratigrafia del piezometro
- Soggiacenza della falda
- Caratteristiche fisiche spettrofluorimetro
- Posizione delle sonde già presenti in foro

### Stratigrafia del piezometro S1

I dati della stratigrafia provengono dalla realizzazione dei piezometri e dei pozzi per l'impianto geotermico. Nel nostro caso sono stati tenuti in considerazione i dati provenienti dal piezometro S1 e dal pozzo di emungimento P3; dalla stratigrafia è stato riscontrato un unico strato con uno spessore di 47 metri composto prevalentemente da sabbia o ghiaia alternata da lenti d'argilla (Figura 25) paragonabile allo strato di depositi alluvionali definito come unità 3 nell'inquadramento geologico.

### Soggiacenza della falda

Le misure di soggiacenza della falda provengono sia da misure automatiche effettuate dalla sonda parametrica posizionata all'interno del piezometro sia dalle misure manuali effettuate dal sottoscritto con il freatimetro in concomitanza dell'inizio e della fine dei test eseguiti in campo.

È stato riscontrato manualmente un livello costante della superficie libera nei campionamenti eseguiti i pomeriggi del 7, 14, 20, 27 settembre con valori di soggiacenza di 20,30 m da bocca foro che coincidono ai 20,60 metri dal piano campagna rilevati dallo strumento fisso. Per i valori di luglio invece si fa affidamento solo alle misure della sonda parametrica che riportano una soggiacenza di 20,90 m dal piano campagna.

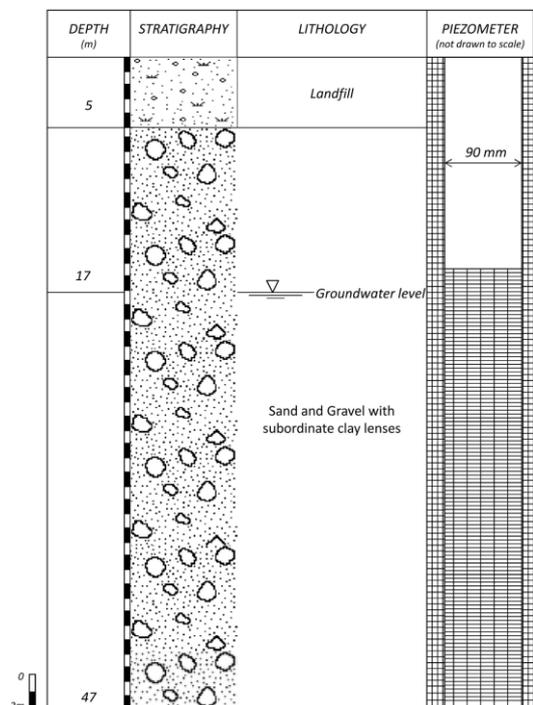


Figura 25: Stratigrafia piezometro S1

### Sonde in foro

All'interno del piezometro S1, lungo la parete alla profondità di circa 25 metri, è collocata la sonda multiparametrica OTT ecoLog 800 per il monitoraggio dell'impianto geotermico del Politecnico con dimensioni 318 x 22 millimetri.

## *Discussione*

Dopo una prima analisi della stratigrafia, riscontrando un'omogeneità dello strato sotto il livello piezometrico, si è scelto di posizionare i fluorimetri da campo in modo da analizzare in continuo un livello più superficiale e uno più profondo della falda acquifera. Tenendo in considerazione quindi la presenza della sonda multiparametrica e la lunghezza del cavo di collegamento dello strumento della Tetraedre che può raggiungere una profondità massima di 28 metri, si è deciso di posizionare la sonda a 27 metri di profondità mentre quella meno recente a 38 metri da bocca foro.

### 6.2.2 Risultati test di diluizione in continuo

#### *Test 27 luglio – 5 agosto 2021*

Il primo test effettuato aveva lo scopo di analizzare l'influenza dell'impianto di pompaggio per le future analisi e calcolare la quantità di colorante da immettere nel sistema; nel caso in cui la prima ipotesi fosse stata ininfluente e il tracciante immesso sufficiente, il test doveva servire per iniziare ad ottenere dei dati utili all'apprendimento delle caratteristiche dell'acquifero.

Dopo l'analisi degli esempi in letteratura e un attento confronto, si è scelto di inserire nel piezometro 75 grammi di fluoresceina sodica; l'iniezione è stata effettuata facendo scorrere, tra le due quote d'interesse, la calza in geotessuto con all'interno il colorante per un numero di volte sufficiente ad esaurirne il contenuto. Dopodiché sono state inserite le sonde alle quote prestabilite e lasciate a raccogliere i dati per nove giorni consecutivi. Nonostante le precipitazioni pomeridiane abbondanti durante il periodo di campionamento, non è stata riscontrata un'eccessiva influenza sulla velocità e sulla conducibilità della falda da parte delle acque d'infiltrazione. I risultati ottenuti sono riportati nei paragrafi seguenti.

#### **Fluorimetro collocato a 27 metri da bocca foro**

Dalla figura 26 si può vedere come le condizioni iniziali ispezionate, la quantità di tracciante e il disturbo dovuto al pompaggio, sono subito verificati e vanno a creare grossi problemi al campionamento.

La presenza di troppo colorante è riscontrabile già nei primi due giorni di campionamento quando la concentrazione rimane costante ad un valore prossimo ai 400 ppb; il motivo di ciò è imputabile ad un valore di soglia massimo impostato per la sonda oltre il quale non viene valutato il dato reale di concentrazione del tracciante ma viene riportato un valore fittizio di 400

ppb. A supporto di questa tesi, inoltre, vi è il superamento nella maggior parte dei giorni del valore di 200 ppb che da letteratura è il valore soglia al di sotto del quale il fluorimetro lavora in

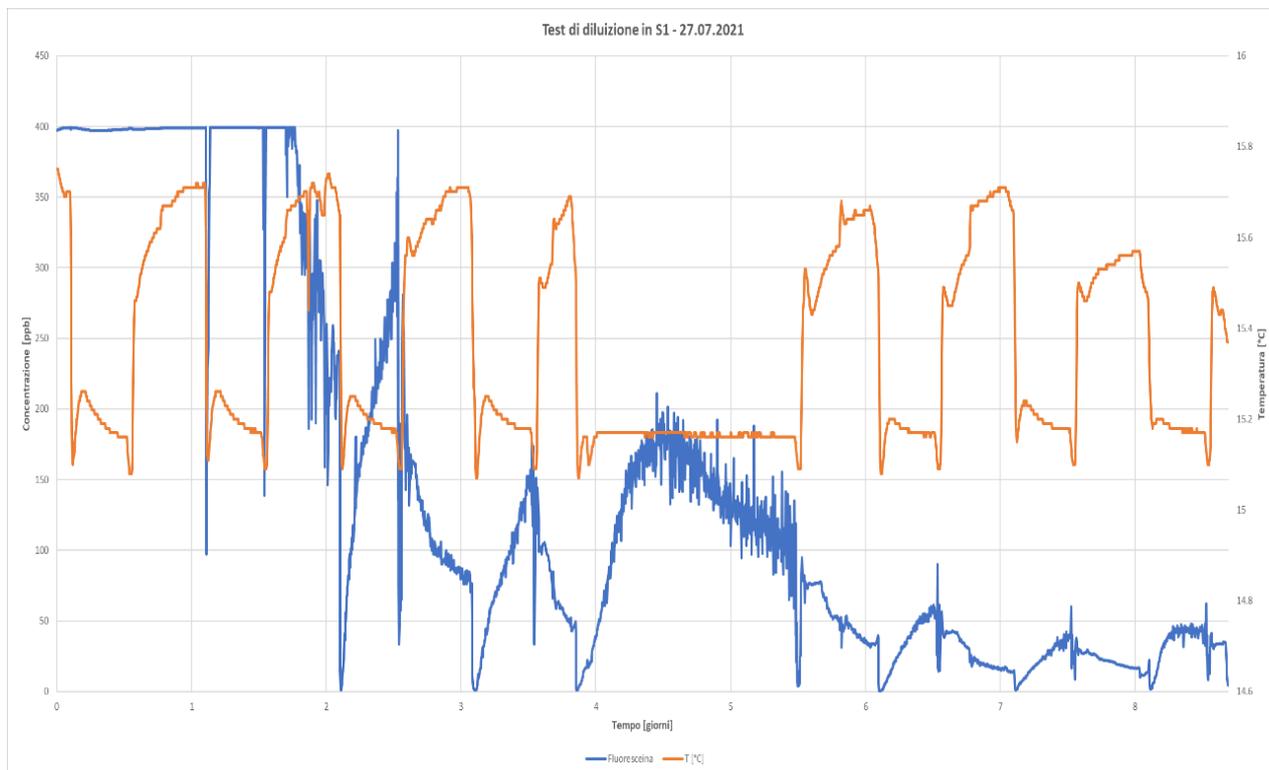


Figura 26: Diagramma concentrazione fluoresceina-temperatura-tempo del fluorimetro a 27 metri di profondità

condizioni ottimali e risulta essere più preciso.

L'influenza del pozzo di emungimento è ben visibile ed è dettata dai cicli di diminuzione e incremento della concentrazione di fluoresceina all'interno del piezometro; questa condizione è giustificata dal fatto che essendo il pozzo situato a monte si verifica una prima situazione, quando gli impianti sono attivi, in cui l'acqua carica di colorante è attratta dal foro di emungimento in direzione opposta al deflusso naturale della falda. Questo processo è ben identificato dal rapido decremento della fluoresceina presente attorno alla sonda. La seconda situazione si genera dopo aver spento l'impianto e ristabilito il flusso naturale dell'acqua di falda: in questo caso l'acqua contaminata da colorante intercetta di nuovo il piezometro e vi è un rapido incremento della concentrazione. Per valutare in modo più approfondito l'influenza del pozzo di emungimento è stata riportata anche la temperatura misurata dalla sonda. Si sono subito riscontrate delle variazioni di 0.5 °C tra i periodi di tempo in cui l'impianto è attivo e quando è spento, indice del fatto che l'effetto è molto pronunciato a questa quota; inoltre, si nota molto bene la coincidenza con i cicli di variazione di concentrazione del tracciante misurati.

### Fluorimetro collocato a 38 metri

Anche nel caso della sonda a maggiore profondità riscontriamo una concentrazione di tracciante eccessiva per poter assumere come attendibili i dati ottenuti. Come nella strumentazione superficiale la concentrazione, per i primi giorni, è sopra il livello massimo di misura del fluorimetro (850 ppb) e in questo caso la concentrazione addirittura non scende sotto i 100 ppb per quasi tutta la durata del campionamento.

L'emungimento, seppur in maniera minore, è riscontrabile anche in questo scenario ed è rappresentato dai picchi che fanno discostare i valori di concentrazione dalla curva di esaurimento e che al diminuire dei valori di ppb tendono ad essere meno visibili sul grafico di figura 27. Sovrapponendo i valori di temperatura a 27 metri con la concentrazione ai 38 metri è ben visibile la sovrapposizione delle anomalie con i cicli di variazione di temperatura causati dal funzionamento dell'impianto.

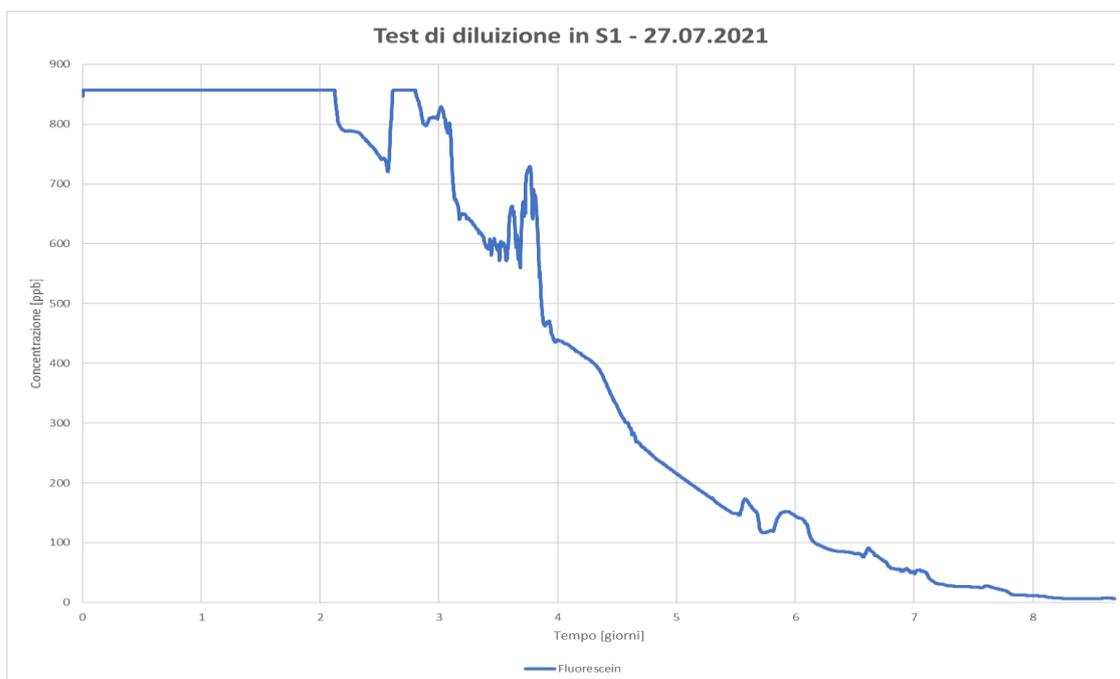


Figura 27: Diagramma concentrazione fluoresceina-tempo del fluorimetro a 38 metri di profondità

### Test 07 settembre– 14 settembre 2021

Il secondo test ha avuto luogo ad inizio settembre e, dopo aver ritenuto significativo valutare il comportamento sia durante il periodo di accensione dell'impianto (nei giorni lavorativi) sia quando risulta spento (giorni festivi), la sonda è stata lasciata in campo per la durata di sette giorni. Nel periodo precedente e coincidente allo studio non sono state rilevate precipitazioni sul territorio comunale di Torino. A causa di una sovrastima della soggiacenza dovuta al malfunzionamento della strumentazione, i dati acquisiti sono parziali e tutti provenienti

dall'unico strumento collocato in foro, cioè quello a maggiore profondità. La quantità di fluoresceina utilizzata è stata ridotta di  $\frac{3}{4}$  rispetto alla dose iniziale, immettendo quindi in piezometro 20 grammi di colorante.

### Fluorimetro collocato a 38 metri

Purtroppo, pur diminuendo la quantità di tracciante, la dose è risultata essere ancora troppo elevata per la maggior parte del campionamento; infatti, anche in questo caso si ha un superamento della soglia massima di rilevabilità dello strumento per la durata di mezza giornata (Figura 28). Dopodiché la curva di esaurimento del colorante ha una diminuzione abbastanza rapida di durata di due giorni fino a raggiungere la decina di ppb per poi rallentare e attestarsi attorno ad un ppb sul lungo periodo fino al termine della prova.

Si presuppone che anche in questo caso vi sia un'influenza da parte dell'impianto geotermico anche se è difficile riconoscere dal grafico l'influenza del pozzo di emungimento poiché la curva non ha variazioni di concentrazione nette rispetto all'andamento normale della curva di esaurimento.

Si è comunque scelto di considerare la coda della curva per ottenere i parametri dell'acquifero legati ad essa; verranno poi analizzati in seguito in modo approfondito.

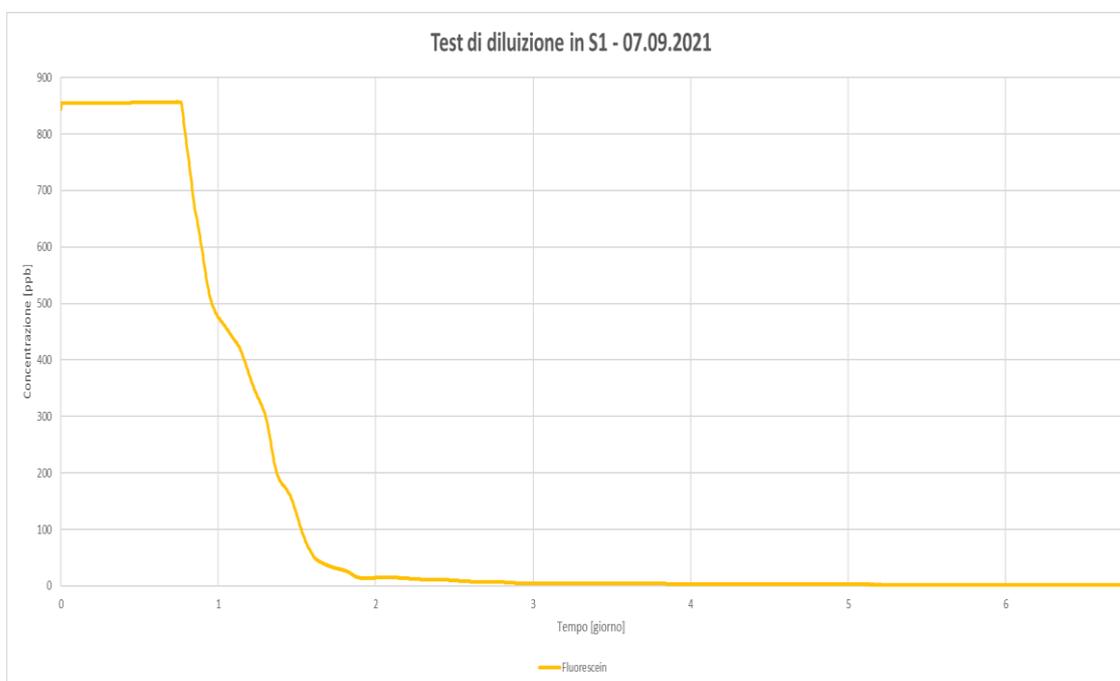


Figura 28: Diagramma concentrazione fluoresceina-tempo riferito al fluorimetro collocato a 38 metri di profondità

Test 20 settembre– 27 settembre 2021

Questo campionamento è l'ultimo durante il periodo di funzionamento dell'impianto ed è stato effettuato ispezionando entrambe le profondità determinate in precedenza. La quantità di fluoresceina è stata ancora ridotta a 3 grammi e, nonostante la concentrazione risulti leggermente alta in partenza, i risultati della sonda a 40 metri sembrano soddisfacenti e sufficienti per l'elaborazione successiva. Invece, com'era stato riscontrato nel primo test, la misurazione effettuata a 27 metri risente molto del pozzo di emungimento nelle vicinanze e i dati ottenuti da essa non possono essere presi in considerazione.

### Fluorimetro collocato a 27 metri

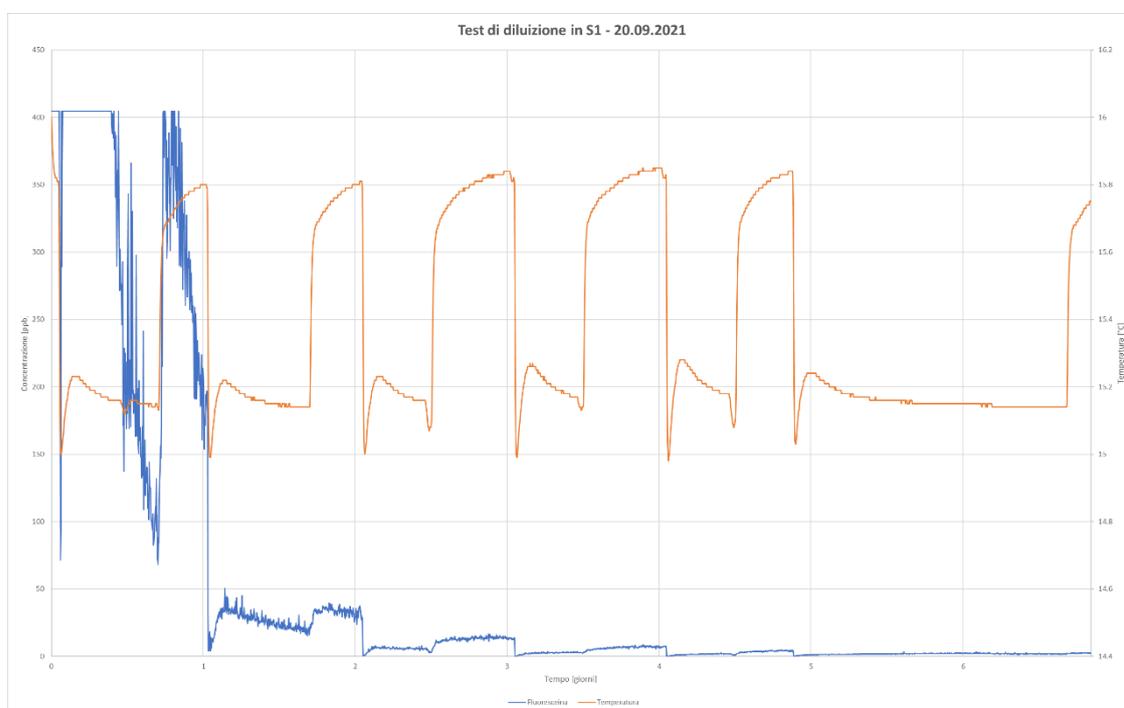


Figura 29: Diagramma concentrazione fluoresceina-tempo-temperatura del fluorimetro collocato a 27 metri

La curva di esaurimento del tracciante, anche in questo caso, risulta molto disturbata dall'emungimento sia ad alte che a basse concentrazioni. Nei grafici di figura 29 e 30 si può vedere la relazione tra gli orari di accensione dell'impianto, la temperatura e la concentrazione. Nella figura 30 è stato riportato l'asse delle ordinate in scala logaritmica per apprezzare meglio l'influenza del pozzo a concentrazioni inferiori di 10 ppb.

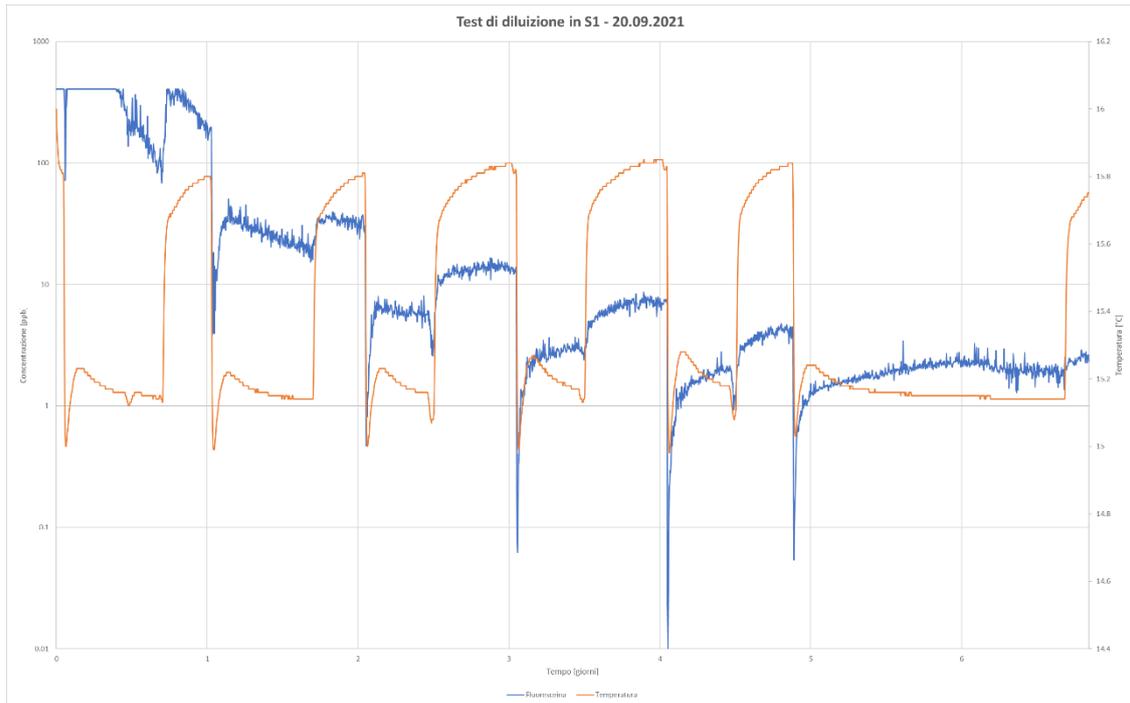


Figura 30: Diagramma log concentrazione fluoresceina-tempo-temperatura del fluorimetro a 27 metri

### Fluorimetro collocato a 38 metri

La curva (Figura 31) ottenuta raggiunge concentrazioni di fluoresceina accettabili (100 ppb) già nel giro delle prime ore di campionamento; viene quindi ritenuta attendibile per il calcolo della conducibilità e analizzata in seguito confrontandola con la curva ottenuta dal test precedente alla stessa quota.

L'influenza da parte del pozzo di emungimento risulta sempre esserci ma in modo blando e poco significativo con variazione dell'ordine dei 0.5 ppb nei periodi di attivazione.

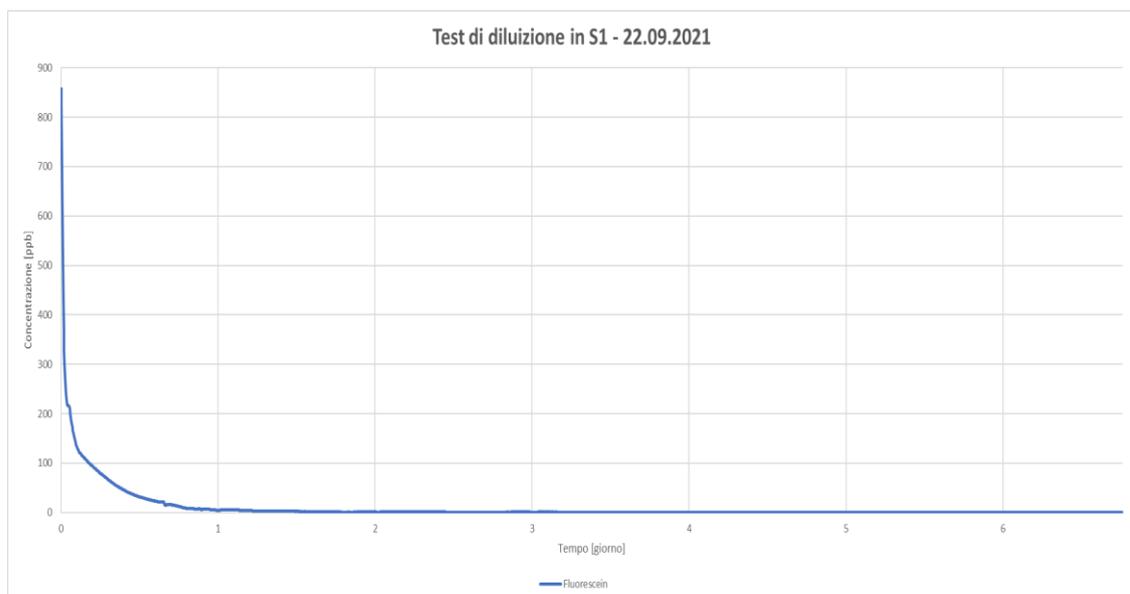


Figura 31: Diagramma concentrazione fluoresceina - tempo riferito al fluorimetro a 38 metri

#### Test 29 ottobre– 2 novembre 2021

L'ultimo test è stato realizzato in condizione di impianto spento per permettere una valutazione qualitativa dell'influenza del pozzo di emungimento. Sono state calcolate le caratteristiche idrauliche dell'acquifero alla sola profondità di 38 metri e confrontate in seguito.

La quantità di colorante immesso è pari a due grammi, diluiti in modo omogeneo lungo la verticale, ed è stato sufficiente lasciare la sonda in posto per sei giorni (Figura 31).



Figura 32: Curva concentrazione fluoresceina-tempo della prova ad impianto spento in S1 a 38 metri

#### Discussione dei dati

Nella prima fase dello studio si sono scelti i valori attendibili da elaborare successivamente. È stata scartata a priori la quota di 27 metri a causa dell'eccessiva influenza dell'emungimento nel vicino pozzo, mentre sono state valutate idonee le misure al di sotto dei 100 ppb effettuate nel campionamento del 7 e 20 settembre (Figura 33).

È stata analizzata la parte terminale della curva per determinare il valore di concentrazione a cui arrestare l'analisi; tenendo in considerazione il rumore di fondo ricavato dal test di bianco e l'influenza, seppur minima, sempre dell'impianto geotermico si è considerata la curva nel range dei valori riportati:

**7 settembre 2021:** da 101.42 a 2.97 ppb nel periodo di tempo di 71 ore.

**20 settembre 2021:** da 100.13 a 1.12 ppb nel periodo di tempo di 43 ore.

Nella seconda fase si è andati a ricavare la velocità apparente e, successivamente, la conducibilità idraulica dell'acquifero con l'utilizzo della formula di Mosetti (cfr 5.2).

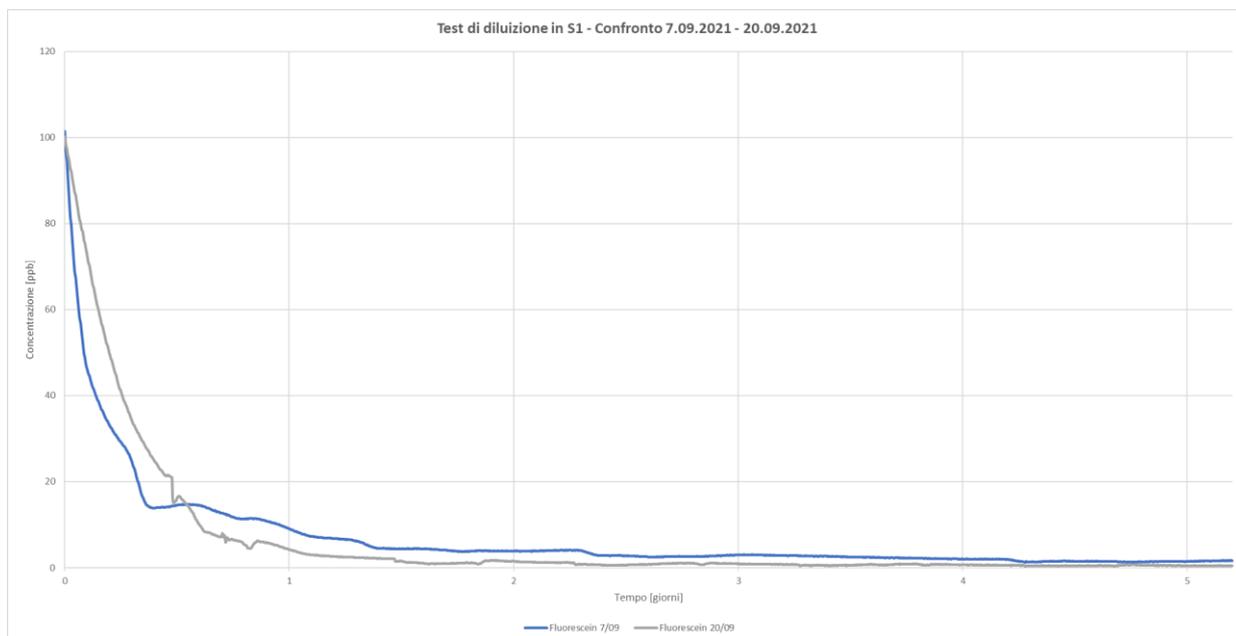


Figura 33: Confronto curve di esaurimento delle due prove ad impianto acceso alla profondità di 38 metri

Inserendo i parametri reali ottenuti dalle analisi si sono ricavati i valori di  $1.61 \times 10^{-4}$  m/s per il test d'inizio settembre e  $3.40 \times 10^{-4}$  m/s per quelli di fine settembre; l'ordine di grandezza dei valori è uguale ma varia la cifra sicuramente a causa dell'imprecisione del metodo dovuto alle condizioni al contorno di ogni test. La prova ad impianto spento di fine ottobre ha permesso di ottenere valori di velocità e conducibilità idraulica, alla quota di 38 metri, inferiori ai test precedenti. La conducibilità idraulica è uguale  $5,39 \times 10^{-3}$  m/s mentre la velocità apparente a  $1,62 \times 10^{-3}$  cm/s (Figura 34).

I valori di velocità apparente e conducibilità idraulica ottenuti ad impianto acceso e spento presentano un ordine di grandezza di differenza e inducono a pensare a variazioni delle condizioni idrauliche nel tempo. In realtà questi risultati ci dicono il contrario, cioè ci permettono di osservare come ad impianto acceso vi sia una notevole influenza da parte dell'emungimento nei confronti del flusso idrico dell'acquifero che induce ad una stima errata dei parametri idraulici con l'utilizzo di questa metodologia.

In tutto lo studio la porosità efficace è stata assunta pari a 0.2 grazie ai numerosi valori forniti dalle analisi effettuate precedentemente (Lo Russo e Taddia, 2010; Lo Russo et al., 2011; Lo Russo et al., 2012; Lo Russo et al., 2014; Taddia, 2018; Lo Russo et al., 2018).

Dati	7 settembre 2021	U.M.	20 ottobre 2021	U.M.	29 ottobre 2021	U.M.
Bianco ambientale	0.1	ppb	0.2	ppb	0.15	ppb
Concentrazione iniziale (C <sub>0</sub> )	101.42	ppb	100.13	ppb	28.59	ppb
Concentrazione finale (C)	2.97	ppb	1.12	ppb	1.64	ppb
Volume acqua nel piezometro (V)	114453	cm <sup>3</sup>	114453	cm <sup>3</sup>	114453	cm <sup>3</sup>
Sezione del pozzo (S)	16200	cm <sup>2</sup>	16200	cm <sup>2</sup>	16200	cm <sup>2</sup>
Tempo (t)	258480	s	155760	s	6240	s
α	2		2		2	
Gradiente idraulico (i)	0.003		0.003		0.003	
Velocità apparente (q)	4.83E-05	cm/s	1.02E-04	cm/s	1.62E-03	cm/s
Velocità apparente (q)	4.17E-02	m/day	8.80E-02	m/day	1.40	m/day
Porosità effettiva (n <sub>e</sub> )	0.2		0.2		0.2	
Velocità effettiva	0.208	m/day	0.440	m/day	6.990	m/day
Conducibilità idraulica (K)	1.61E-04	m/s	3.40E-04	m/s	5.39E-03	m/s

Figura 34: Tabella riassuntiva delle elaborazioni effettuate per ricavare la conducibilità idraulica

### 6.3 Tracciamento a diluizione puntuale

Le prove di tracciamento a diluizione puntuale sono state utilizzate per comprendere e caratterizzare la variazione di conducibilità idraulica dell'acquifero nei venti metri al di sotto del pelo libero; sono state effettuate tre prove in pozzi di restituzione differenti, il P8, il P6 e il P4, che risultano essere collocati in un'area di 0.2 Km<sup>2</sup> con distanze maggiori di 100 metri l'uno dall'altro.

#### Test 5 ottobre – 11 ottobre 2021

La prima prova, di questo periodo, è stata eseguita all'interno del pozzo P8; tra tutti quelli analizzati questo risulta essere il più nuovo ed il più affidabile e si è ritenuto che non vi siano compromissioni della prova da parte di possibili ostruzioni o mal realizzazione del foro.

Questo primo test ha avuto una durata di sei giorni complessivi, determinati dalla combinazione di un'eccessiva immissione di tracciante all'interno del sistema e una bassa conducibilità idraulica nei dintorni del foro.

Prima dell'analisi è stato eseguito un test del bianco ambientale lungo tutta la sezione rilevando concentrazioni di fondo variabili tra lo 0.02 e lo 0.5 ppb a seconda della quota. Dopodiché è stato impostato il fluorimetro in modalità continua, ossia con una misura di concentrazione e di torbidità ogni 10 secondi, ed è stato calato partendo dalla quota di 21 metri di profondità sino a raggiungere i 41 metri dal piano campagna; si è scelto di far stazionare la strumentazione per

due minuti ad ogni livello per avere un numero sufficiente di misure da confrontare tra loro e ottenere un valore medio della concentrazione dello strato più robusto.

I dodici valori di ogni strato sono stati successivamente mediati tra di loro non tenendo in considerazione i valori troppo discordanti rispetto alla maggior parte dei valori del livello.

Nelle ultime due misurazioni, giovedì 8/10/2021 e lunedì 11/10/2021, si è scelto di aggiungere alle analisi anche le quote di 24 e 26 metri per ispezionare meglio lo spessore che presentava un andamento anomalo con caratteristiche di conducibilità idraulica peggiori rispetto al resto del pozzo.

A supporto della prova, tra una misurazione e l'altra, si è lasciata in posto la sonda con frequenza di campionamento ogni quattro minuti per poter valutare i cambiamenti nel tempo alla profondità desiderata; inizialmente questo test è stato effettuato alla profondità di 27 metri ma, a causa dello spessore anomalo citato in precedenza, si è deciso di spostarla, gli ultimi tre giorni, a 25 metri per comprendere meglio il comportamento a quella determinata quota.

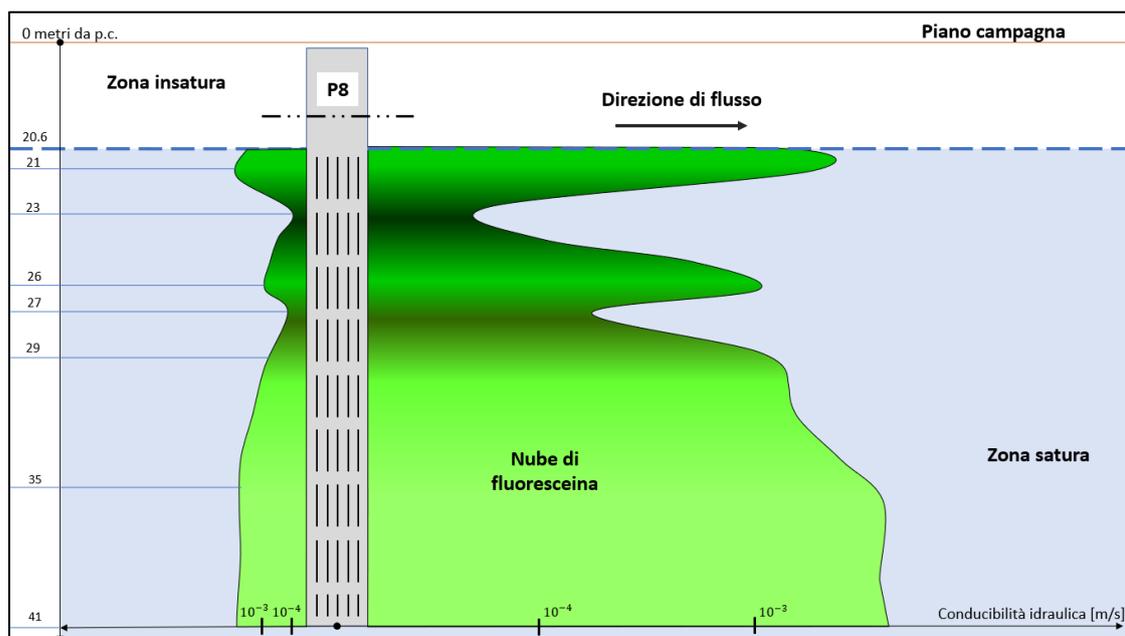


Figura 35: Esempio della distribuzione di fluoresceina in funzione della conducibilità idraulica e della profondità nel pozzo P8

I risultati della variazione di concentrazione all'interno del pozzo hanno permesso di suddividere la colonna in due macrocategorie (Figura 35):

- Strati più superficiali fino alla profondità di 29 metri.
- Gli strati più profondi dai 31 metri dal p.c. fino ai 41 metri

I primi si possono ancora suddividere in tre gruppi con caratteristiche simili: la quota di 21 metri vicino al pelo libero che presenta una conducibilità idraulica buona con valori attorno a  $10^{-3}$

m/s, la quota di 23 metri che risulta essere la meno conducibile con valori di  $10^{-5}$  m/s e le quote comprese tra 24 e 29 metri che assumono conducibilità con ordine di grandezza di  $10^{-4}$  m/s.

Gli strati più profondi invece presentano un andamento della concentrazione migliore rispetto a quelli superficiali con una variazione nel tempo molto simile tra tutti i livelli con conducibilità idraulica che si aggira su valori di  $10^{-3}$  m/s.

Dalla figura 52 si può notare anche come i valori campionati il mercoledì 6 ottobre alle 10.00 risultino disturbati e anomali rispetto all'andamento della curva discendente di sparizione; questo fatto è dato probabilmente da uno spostamento troppo rapido della sonda all'interno del pozzo che ha generato il mescolamento tra livelli adiacenti e compromesso i dati relativi a quella misura.

I valori di velocità apparente e conducibilità idraulica di ogni strato sono riportati nella tabella di figura 36.

<b>Profondità</b>	<b>Velocità apparente</b>	<b>Conducibilità</b>
<b>m</b>	<b>cm/s</b>	<b>m/s</b>
21	5.39E-04	1.80E-03
23	2.83E-05	9.42E-05
24	9.50E-05	3.17E-04
25	2.78E-04	9.28E-04
26	3.29E-04	1.10E-03
27	2.01E-04	6.69E-04
29	4.87E-04	1.62E-03
31	5.25E-04	1.75E-03
33	5.62E-04	1.87E-03
35	6.65E-04	2.22E-03
37	6.69E-04	2.23E-03
39	6.59E-04	2.20E-03
41	6.48E-04	2.16E-03

*Figura 36: Valori di velocità apparente e conducibilità idraulica ottenuti all'interno del pozzo P8*

#### *Test 25 ottobre – 26 ottobre 2021*

La seconda prova di diluizione ha avuto luogo nel pozzo P6 collocato ad una distanza di 140 metri in linea d'aria dal pozzo P8 in direzione N-NE. L'impianto, di cui il pozzo fa parte, è stato realizzato negli ultimi quattro anni e quindi, anche in questo caso, si è assunto che le caratteristiche del foro non compromettano in modo troppo eccessivo il risultato della prova.

Questo pozzo, nonostante sia d'immissione, è caratterizzato da diametro e lunghezza differenti dal P8, ed ha una soggiacenza di 20.50 metri dal piano campagna. Il test del bianco ambientale ha riportato un rumore di fondo variabile tra 0.07 e 0.17 ppb a seconda della profondità.

L'iter è iniziato dall'inserimento di due grammi di fluoresceina, utilizzando la calza, lungo tutta la sezione del pozzo ed è continuato seguendo una procedura identica a quella descritta nel test precedente, pozzo P8, per caratterizzare la conducibilità idraulica lungo la verticale. In questo caso bisogna però tenere in considerazione che, grazie al minor quantitativo di colorante immesso, sono stati sufficienti solo quattro campionamenti distribuiti su due giorni. Sono stati studiati più valori per ogni profondità ispezionata e successivamente mediati tra loro per ottenere un dato più robusto.

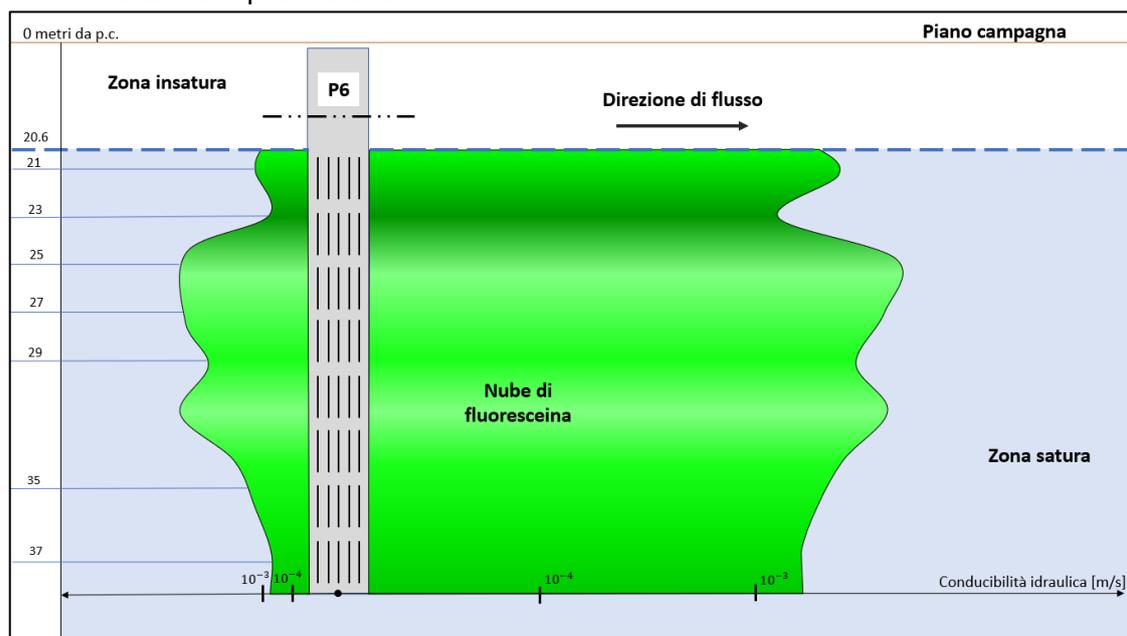


Figura 37: Esempio della distribuzione di fluoresceina in funzione della conducibilità idraulica e della profondità nel pozzo P6

Al termine della prima giornata di analisi, si è scelto di continuare il test passando a campionare in modalità continua, cioè con un delta t di quattro minuti alla quota fissa di 21 metri, poiché risultava essere l'unico strato con concentrazioni al di sopra della soglia massima di rilevabilità

Profondità	Velocità apparente	Conducibilità idraulica
m	cm/s	m/s
21	6.19E-04	2.06E-03
23	3.10E-04	1.03E-03
25	7.67E-04	2.56E-03
27	6.94E-04	2.31E-03
29	6.42E-04	2.14E-03
31	6.98E-04	2.33E-03
33	6.16E-04	2.05E-03
35	5.20E-04	1.73E-03
37	4.18E-04	1.39E-03

Figura 38: Valori di velocità apparente e conducibilità idraulica riferiti al test nel pozzo P6

dello strumento e quindi senza dati attendibili per la prova (vedi allegati Figura 58).

I risultati ottenuti dalla prova ci permettono di osservare un andamento piuttosto omogeneo lungo i 16 metri ispezionati (Figura 37 e 38); sia gli strati più vicini alla superficie libera che quelli più profondi presentano una conducibilità idraulica con ordine di grandezza costante di  $10^{-3}$ . Questi dati ci consentono di ipotizzare che in quest'area non vi sia la lente di materiale a bassa conducibilità che è stata riscontrata nel test precedente.

#### *Test 28 ottobre 2021*

L'ultimo test di sparizione effettuato ha avuto luogo presso il pozzo d'immissione P4. Questo foro, a differenza degli altri due, risulta essere il più vecchio e presenta una condizione di ostruzione dei filtri maggiore. Nonostante ciò, la velocità di filtrazione ottenuta risulta comunque superiore alla media degli altri pozzi.

L'iter procedurale svolto è simile a quello applicato nelle altre due prove ad eccezione del colorante immesso. La fluoresceina è stata ulteriormente ridotta a causa della diminuzione delle dimensioni del pozzo, introducendo un grammo di colorante lungo tutta la sezione con la calza in geotessuto. La soggiacenza misurata dal p.c. è posizionata leggermente più in basso rispetto agli altri pozzi a quota 21 metri; questo valore ha reso necessario iniziare l'analisi dalla quota di 22 metri per evitare che, applicando lo stesso processo di misurazione degli altri test, lo strumento rimanesse al di sopra della superficie libera durante la prima misurazione.

Il test del bianco ambientale ha riportato un rumore di fondo quasi nullo lungo l'intera lunghezza del tubo con valori tra 0.00 e 0.12 ppb a seconda della posizione.

Anche in questo caso non si è riuscito a rendere omogenea la distribuzione del tracciante lungo il pozzo, ma si sono ottenute delle concentrazioni decrescenti in funzione dell'approfondimento. Le elaborazioni effettuate nei dintorni del pozzo P4 hanno riportato un andamento del sistema acquifero molto rapido in rapporto agli altri risultati; si può comunque notare un peggioramento delle condizioni idrauliche verso il fondo del pozzo.

In funzione dei risultati è possibile suddividere il pozzo in due macrozone (Figura 39): la prima corrisponde ad un'ampia fascia piuttosto omogenea caratterizzata da conducibilità idraulica

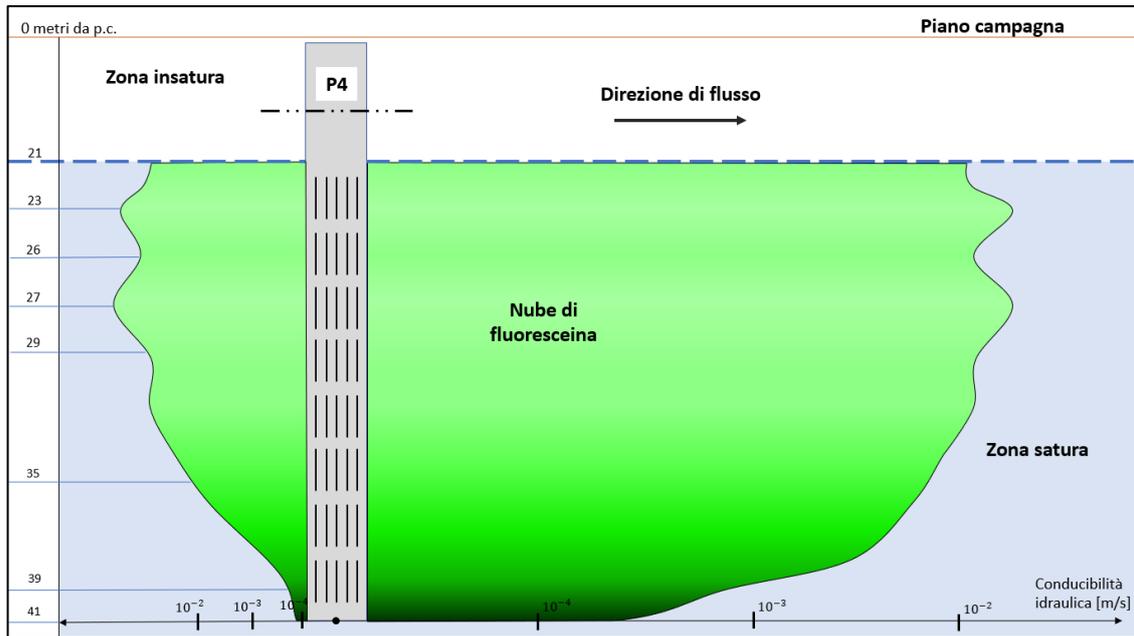


Figura 39: Esempio della distribuzione di fluoresceina in funzione della conducibilità idraulica e della profondità nel pozzo P4

dell'ordine del  $10^{-2}$  m/s, probabilmente composta da materiali più grossolani e con buona permeabilità, mentre la seconda dagli ultimi metri (37-39 m) che mostrano caratteristiche idrauliche più scadenti, con valori prossimi al  $10^{-4}$  (Figura 40). Questa suddivisione ci permette di ipotizzare che il flusso possa essere concentrato nella parte meno profonda dell'acquifero superficiale.

Profondità	Velocità apparente	Conducibilità idraulica
m	cm/s	m/s
22	6.03E-03	2.01E-02
23	1.22E-02	4.06E-02
25	7.81E-03	2.60E-02
27	1.29E-02	4.31E-02
29	6.98E-03	2.33E-02
31	7.22E-03	2.41E-02
33	5.53E-03	1.84E-02
35	4.05E-03	1.35E-02
37	2.43E-03	8.10E-03
39	7.80E-05	2.60E-04

Figura 40: Risultati dei test di diluizione effettuati nel pozzo P4

#### Discussione

La realizzazione di tre differenti prove di sparizione ha permesso di riscontrare un'eterogeneità dei valori di velocità apparente e conducibilità idraulica sia lungo la verticale dei pozzi che tra

fori differenti (Figura 41). Questo aspetto, nonostante i sondaggi riportino un sistema omogeneo, è indice di un acquifero superficiale eterogeneo e vario con flussi principali collocati a differenti profondità.

Analizzando i risultati dei due pozzi più recenti, P8 e P6, sono stati rilevati strati di potenza notevole con conducibilità idrauliche simili che si aggirano su valori medi di  $1,9/2,0 \times 10^{-3}$  m/s in cui si ipotizza sia concentrato il flusso principale dell'acquifero; nel pozzo P8, lo strato di notevole spessore con bassa conducibilità, merita sicuramente un approfondimento in futuro per una determinazione più precisa dello spessore complessivo e in funzione di una possibile analisi con catena termometrica per valutare la dissipazione del plume termico proveniente dall'impianto geotermico all'interno di questo strato.

L'ultimo pozzo, il P4, si discosta dalle analisi precedenti di un ordine di grandezza e si può ipotizzare che il flusso sia concentrato negli strati più superficiali della falda che presentano valori molto elevati (in media  $2,5 \times 10^{-2}$  m/s).

<b>Profondità</b>	<b>Pozzo P8</b>	<b>Pozzo P6</b>	<b>Pozzo P4</b>
m	m/s	m/s	m/s
21	1.80E-03	2.06E-03	-
22	9.42E-05	-	2.01E-02
23	3.17E-04	1.03E-03	4.06E-02
24	9.28E-04	-	-
25	1.10E-03	2.56E-03	2.60E-02
26	6.69E-04	-	-
27	1.62E-03	2.31E-03	4.31E-02
29	1.75E-03	2.14E-03	2.33E-02
31	1.87E-03	2.33E-03	2.41E-02
33	2.22E-03	2.05E-03	1.84E-02
35	2.23E-03	1.73E-03	1.35E-02
37	2.20E-03	1.39E-03	8.10E-03
39	2.16E-03	-	2.60E-04
41	1.39E-03	-	-

Figura 41: Valori di conducibilità idraulica delle prove di diluizione sui tre pozzi di immissione P4, P6 e P8

## 6.4 Tracciamento multiplo

*Test 11 ottobre – 21 ottobre 2021*

Il test di tracciamento multiplo ha avuto luogo tra il pozzo di emungimento P3 e il piezometro a valle S1. Con questa prova si è cercato di valutare la conducibilità idraulica dell'acquifero alla quota di 38 metri dal piano campagna e confrontarla nello stesso punto con i dati ottenuti in condizioni disturbate durante i cicli di lavoro dell'impianto geotermico del Politecnico.

Anche in questo caso è stata effettuata un'analisi di bianco ambientale all'interno del piezometro prima dell'immissione del tracciante a monte; sono stati ricavati valori che oscillano lungo la sezione tra 0.1 e 2.5 ppb con un rumore di fondo di 0.1 ppb alla quota di 38 metri.



Figura 42: Pozzo di emungimento P3

Successivamente è stato piazzato lo strumento nel

piezometro alla profondità ispezionata con una frequenza di campionamento di 4 minuti ed è stato avviato alle 11.48 di lunedì 11 ottobre.

Alle 12.30 dello stesso giorno sono stati inseriti 8 grammi di fluoresceina, con il metodo della calza, lungo tutta la sezione del pozzo di emungimento (Figura 42). Purtroppo, a causa dell'interazione tra suolo - tracciante, dopo quattordici giorni il colorante non è stata rilevata alcuna traccia di colorante nel piezometro a valle.

Per sopperire a questa mancanza sono stati recuperati ed elaborati i dati di una prova simile effettuata il 23.10.2008 tra lo stesso pozzo e il piezometro dove è stato utilizzato come tracciante il Tinopal CBS-X al posto della fluoresceina.

#### *Test 23 ottobre – 1° novembre 2008*

Questa prova è stata effettuata nell'ambito delle analisi per l'ampliamento del complesso geotermico e, all'epoca, la futura costruzione dell'impianto CF2. Anche in questo test è stato assunto, come punto d'immissione, il pozzo P1 e come punto di arrivo il piezometro S1. A differenza della prova effettuata dallo scrivente, in questo caso è stato usato il Tinopal CBS-X al posto della fluoresceina.

La profondità di posizionamento della sonda è circa 26 metri dal piano campagna all'interno del piezometro.

I risultati ottenuti riportano una curva di breakthrough distribuita su 7 giorni con valori di concentrazione massima rilevata che raggiungono i 119 ppb dopo due giorni e mezzo dal posizionamento del fluorimetro (Figura 43). Il gradino di concentrazione visibile sul grafico, in

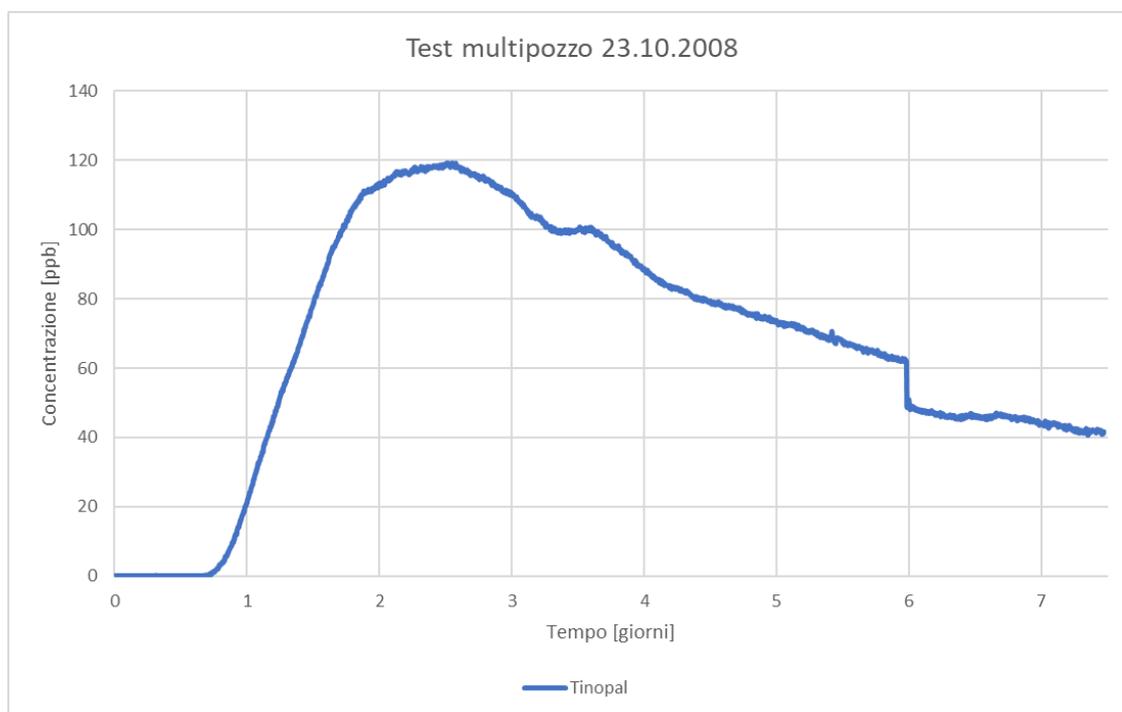


Figura 43: Curva di breakthrough del test con Tinopal nel piezometro S1

prossimità del sesto giorno, è dovuto ad un'interruzione del campionamento a causa dello scaricamento dei dati.

Nonostante il periodo di campionamento sia piuttosto lungo, la prova è stata interrotta prima del raggiungimento del tempo di arrivo della coda cioè quando la concentrazione ritorna attorno a valori prossimi allo zero.

Sono stati ottenuti due dati di conducibilità idraulica prendendo in considerazione sia la velocità prevalente, cioè quella raggiunta al picco della concentrazione, sia la velocità massima e andandole ad associare alla velocità effettiva, cioè quella usata nella formula di Darcy.

Dopo attenta analisi, si è ritenuto più rappresentativo considerare la conducibilità idraulica ricavata dalla velocità massima, o velocità di primo, arrivo rispetto al secondo valore.

La porosità efficace è stata assunta pari a 0.2 come da studi precedenti (Lo Russo e Taddia, 2010; Lo Russo et al., 2011; Lo Russo et al., 2012; Lo Russo et al., 2014; Taddia, 2018; Lo Russo et al., 2018).

Sono stati ricavati i seguenti valori:

- **Velocità prevalente:**  $1,14 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
- **Velocità massima:**  $4,15 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
- **Conducibilità idraulica con velocità prevalente:**  $7,57 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
- **Conducibilità idraulica con velocità massima:**  $2,77 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

Si può notare come, nonostante il test sia stato effettuato ad una profondità differente rispetto alle prove effettuate dallo scrivente, il valore di conducibilità idraulica sia simile a tutte le altre prove realizzate nel piezometro/pozzo in considerazione.

# Capitolo 7

## Conclusioni

Riassumendo le informazioni raccolte nel corso delle precedenti campagne di indagine e delle recenti prove con tracciante si possono trarre le seguenti conclusioni:

- In merito alle prove con tracciante, si riporta in seguito una sintesi dei principali parametri ottenuti (Tabella 3); lo spessore dei depositi superficiali indagato con i traccianti, ovvero da circa 20 metri fino a 40 metri dal piano campagna, mostra una permeabilità piuttosto eterogenea all'interno dell'acquifero con valori che oscillano da  $2 \times 10^{-2}$  m/s a  $2 \times 10^{-3}$  m/s a seconda del punto campionato.

Come constatato dalla letteratura e riscontrato in campo, all'interno dei depositi sono osservabili strati ghiaiosi-limosi a parziale cementazione che presentano minore permeabilità con valori dell'ordine di  $5 \times 10^{-4}$  m/s con spessori di circa 5 metri.

- Il confronto tra le misure di conducibilità idraulica ottenute dalle prove con tracciante e le stime ricavate dall'interpretazione delle prove di pompaggio, condotte precedentemente al lavoro di tesi svolto, mostrano in alcuni casi risultati con differenze di circa un ordine di grandezza (i test con tracciante hanno, in alcuni casi, valori maggiori delle prove di pozzo).

È importante sottolineare che questa differenza ricade nel campo di variabilità della conducibilità idraulica che tipicamente accompagna le formazioni di depositi alluvionali e detritici, come quelli nell'area di Torino, nel quale coesistono lenti con maggiore percentuale di fini e livelli con prevalenza di materiali medi.

Una possibile spiegazione potrebbe essere ricavata considerando che le prove di pompaggio hanno in effetti permesso di ricavare una stima della trasmissività

dell'acquifero, mentre il calcolo della permeabilità è derivato in funzione dello spessore di acquifero attivamente coinvolto. Questa definizione può aver portato ad una stima per difetto della conducibilità idraulica nelle prove di pompaggio.

- Per quanto riguarda le prove con traccianti eseguite è importante sottolineare come questa tipologia di analisi possa essere una valida alternativa alle classiche prove di pozzo. Le differenze rispetto alle prove di pompaggio sono molteplici e in alcuni casi più vantaggiose. Vengono riportati di seguito i principali aspetti:
  - Consentono una valutazione puntuale della conducibilità idraulica permettendo lo studio del suo andamento lungo la verticale del pozzo;
  - A discapito di un'intensa colorazione dell'acqua di falda, non viene disturbato il flusso naturale dell'acquifero durante la prova;
  - Con permeabilità non troppo basse del sottosuolo, si riescono ad ottenere risultati significativi in tempi brevi (uno o due giorni);
  - I parametri ottenuti non sono valori medi riferiti a tutto lo spessore della falda idrica, ma corrispondono a precisi punti all'interno dell'acquifero;
  - È possibile effettuare misurazioni anche all'interno dei piezometri.

Tutte queste caratteristiche necessitano in tutti i casi di un pozzo realizzato a regola d'arte per evitare errori di stima della conducibilità idraulica.

Nonostante gli aspetti positivi è sempre importante, ove possibile, applicare entrambe le tipologie di prove per poter effettuare dei confronti e ottenere delle caratterizzazioni dell'acquifero più robuste.

- In acquiferi con conducibilità basse, nell'ordine di  $10^{-3} \div 10^{-4}$  m/s, come nel nostro caso, è consigliata l'applicazione del metodo di tracciamento a sparizione in un singolo pozzo. Infatti, è stata riscontrata che l'applicazione di quest'ultimo metodo porti a ridurre le incertezze del risultato che si generano utilizzando metodi multi-pozzo causate dall'interazione tra la matrice solida e il colorante e dai tempi lunghi dovuti alle basse velocità di spostamento.
- Il sottosuolo di Torino nell'area d'indagine è caratterizzato da una diversità genetica e litologica di riempimenti. I depositi più superficiali, composti da depositi alluvionali e

interessati dallo studio, presentano una matrice prevalente a granulometria medio-fine, in alcuni casi in condizioni di parziale cementazione, e localmente possono presentare delle intercalazioni di lenti di argilla o materiale a scarsa permeabilità. Questa variabilità è riscontrabile anche in profondità. I depositi in superficie poggiano su uno strato argilloso, di potenza variabile, che suddivide i depositi fluviali e fluvioglaciali da quelli Villafranchiani sottostanti. Quest'ultimo complesso risulta essere caratterizzato da livelli grossolani e molto permeabili alternati da livelli limosi-argillosi a scarsa permeabilità.

- Nei depositi alluvionali superficiali è presente una falda idrica sotterranea a superficie libera. La soggiacenza della falda varia tra i 20 e i 21 metri al di sotto del piano campagna a seconda dell'area ispezionata e presenta uno spessore variabile tra i 20 e i 30 metri. L'acquifero è caratterizzato da un flusso principale che scorre in direzione NO-SE verso il fiume Po.

La pendenza del pelo libero della falda è costante in tutta l'area oggetto di studio e presenta un gradiente pari a 0.3%.

Sono presenti falde idriche in pressione all'interno del complesso Villafranchiano ma non sono state analizzate in questo studio.

## Allegati



Figura 44: Pozzo di restituzione P8; si può notare la sonda OTT appesa sulla destra e la tubazione dell'impianto di restituzione a gravità



Figura 45: 27 luglio immissione tracciante nel piezometro S1



**PROVINCIA DI TORINO**  
AREA AMBIENTE, PARCHI, RISORSE IDRICHE E TUTELA DELLA FAUNA  
Direttore: F. Pavone  
Servizio Gestione Risorse Idriche  
P. Faliero, C. Ferrero, V. Latagliata, G. Massazza

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI TORINO**  
DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA  
G. Bortolami, D.A. De Luca, L. Masciocco,  
A. Morelli di Popolo e Ticineto



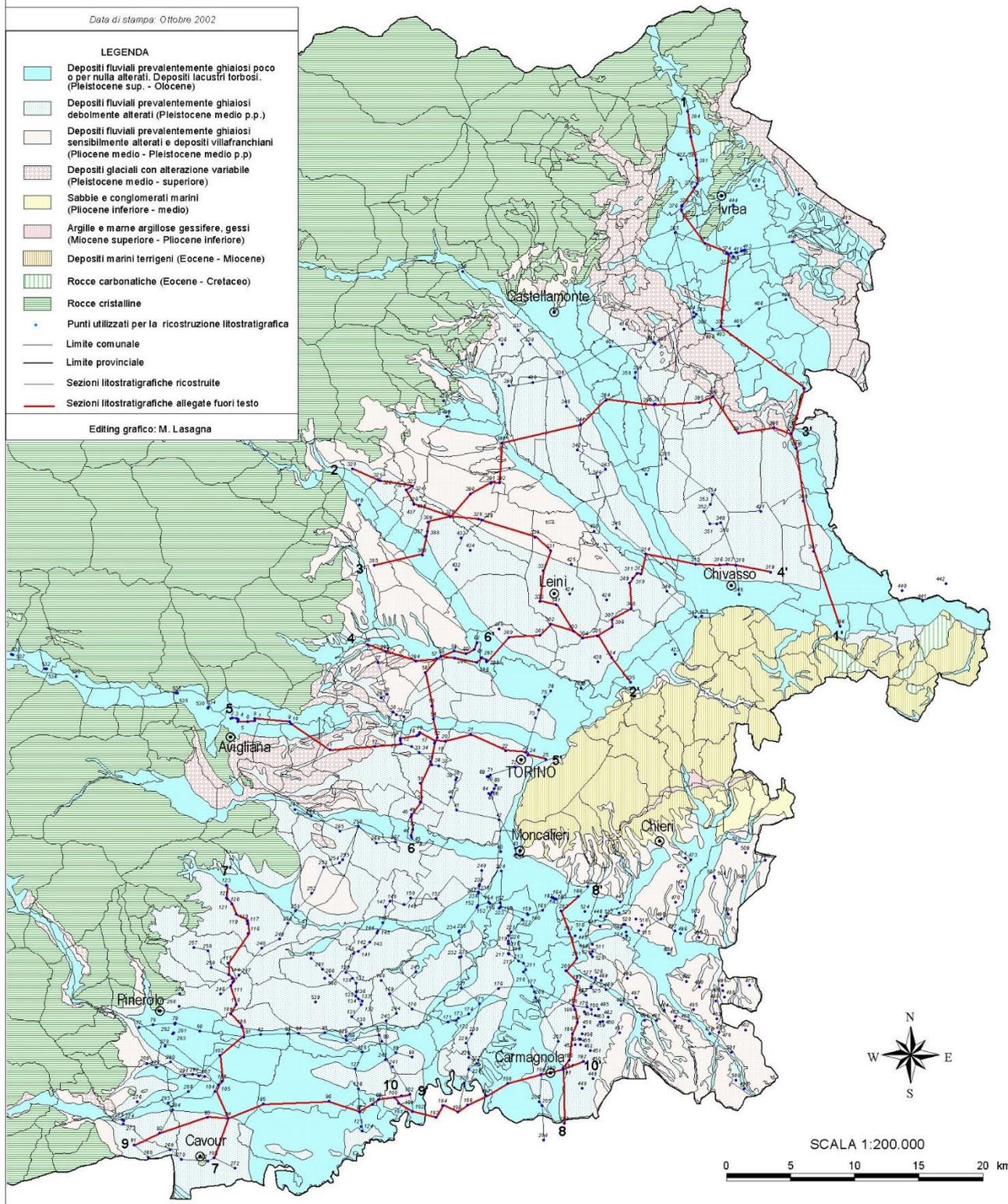
## UBICAZIONE DELLE STRATIGRAFIE UTILIZZATE PER LA RICOSTRUZIONE LITOSTRATIGRAFICA E TRACCE DELLE SEZIONI

Data di stampa: Ottobre 2002

### LEGENDA

- Depositi fluviali prevalentemente ghiaiosi poco o per nulla alterati. Depositi lacustri torbosi. (Pleistocene sup. - Olocene)
- Depositi fluviali prevalentemente ghiaiosi debolmente alterati (Pleistocene medio p.p.)
- Depositi fluviali prevalentemente ghiaiosi sensibilmente alterati e depositi villafranchiani (Pliocene medio - Pleistocene medio p.p)
- Depositi glaciali con alterazione variabile (Pleistocene medio - superiore)
- Sabbie e conglomerati marini (Pliocene inferiore - medio)
- Argille e marne argillose gessifere, gessi (Miocene superiore - Pliocene inferiore)
- Depositi marini terrigeni (Eocene - Miocene)
- Rocce carbonatiche (Eocene - Cretaceo)
- Rocce cristalline
- Punti utilizzati per la ricostruzione litostatigrafica
- Limite comunale
- Limite provinciale
- Sezioni litostatigrafiche ricostruite
- Sezioni litostatigrafiche alleggate fuori testo

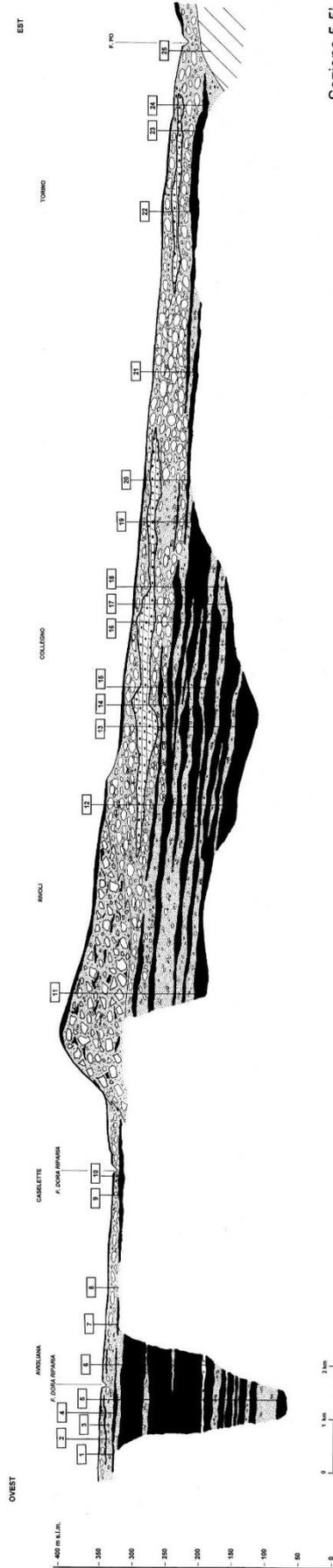
Editing grafico: M. Lasagna





PROVINCIA  
DI TORINO

Sezione 5-5'



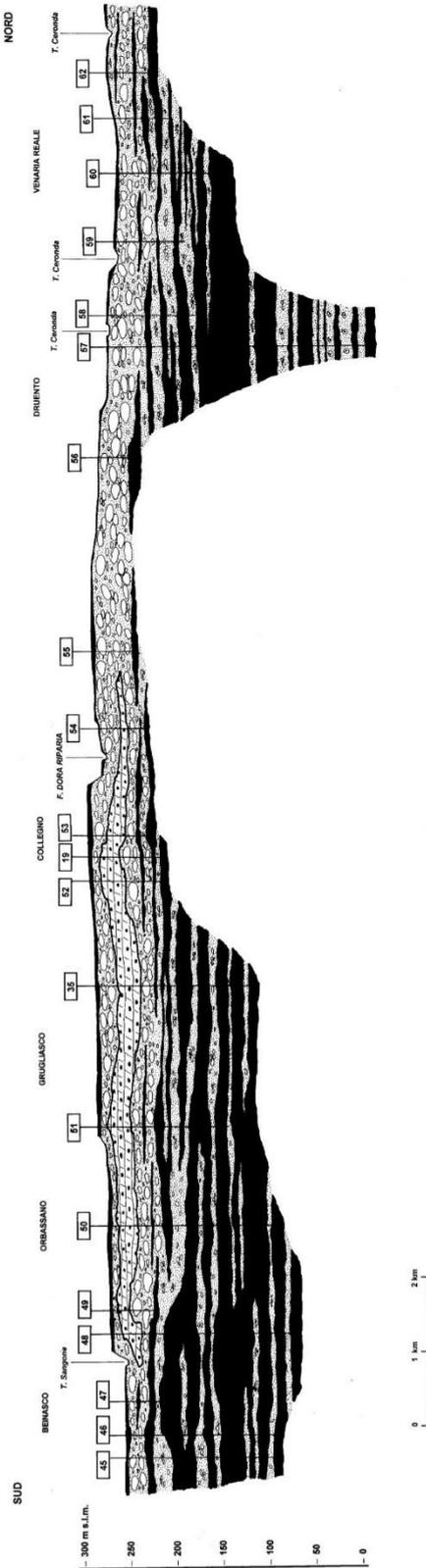
**Legenda delle sezioni litostratigrafiche**

	Sabbia		Argille e/o limi		Stratigrafia con relativo codice
	Ghiaie e ciottoli parzialmente cementati		Q <sub>4</sub>		Fossili
	Ghiaia		Ciotoli		

Sezione 5-5'  
Carta della base dell'acquifero superficiale del settore di pianura della Provincia di Torino

Figura 46. Sezione 5-5' litostratigrafica che attraversa Torino

**Sezione 6-6'**



Carta della base dell'acquifero superficiale del settore di pianura della Provincia di Torino

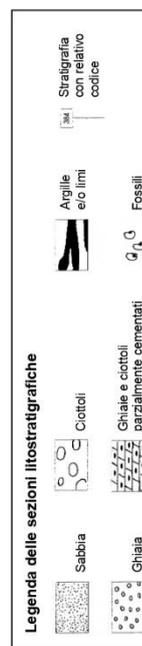


Figura 47: Sezione 6-6' litostratigrafica che attraversa Torino

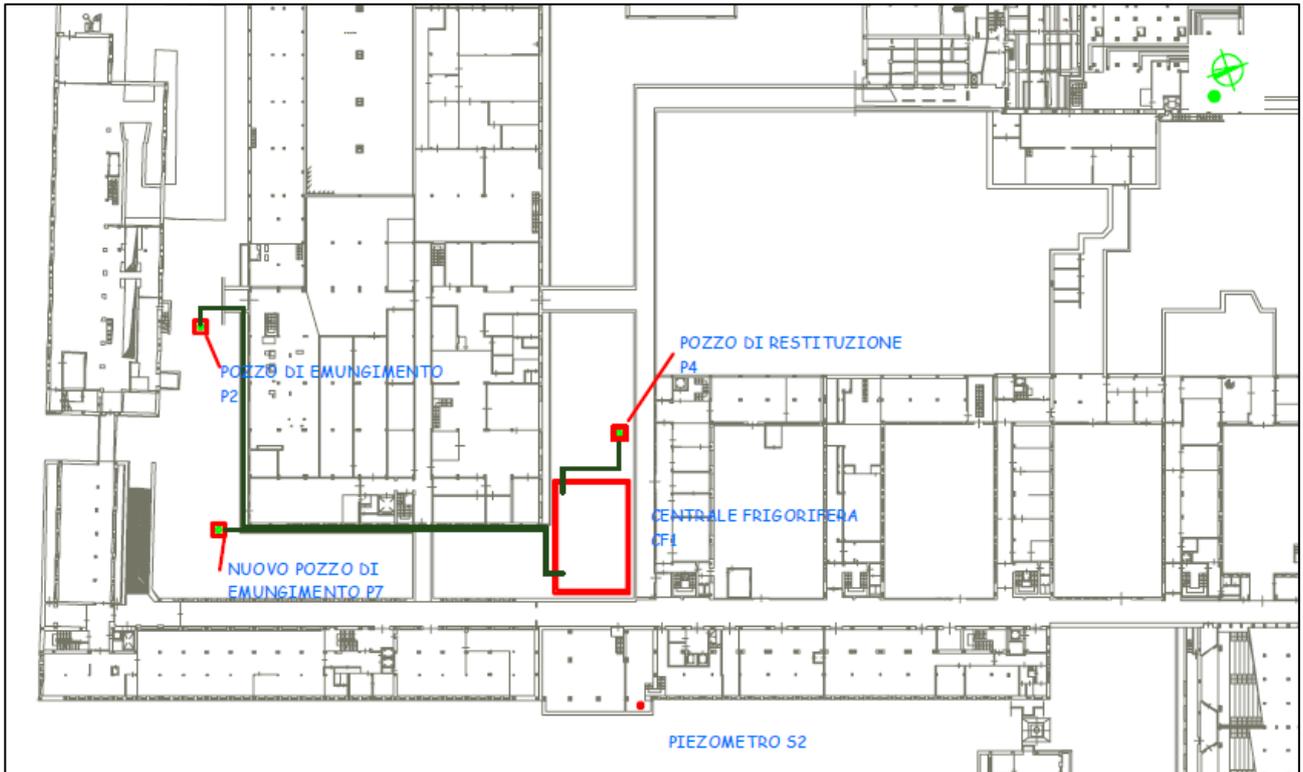


Figura 48: Particolare impianto CF1 con il pozzo di restituzione P4 ispezionato

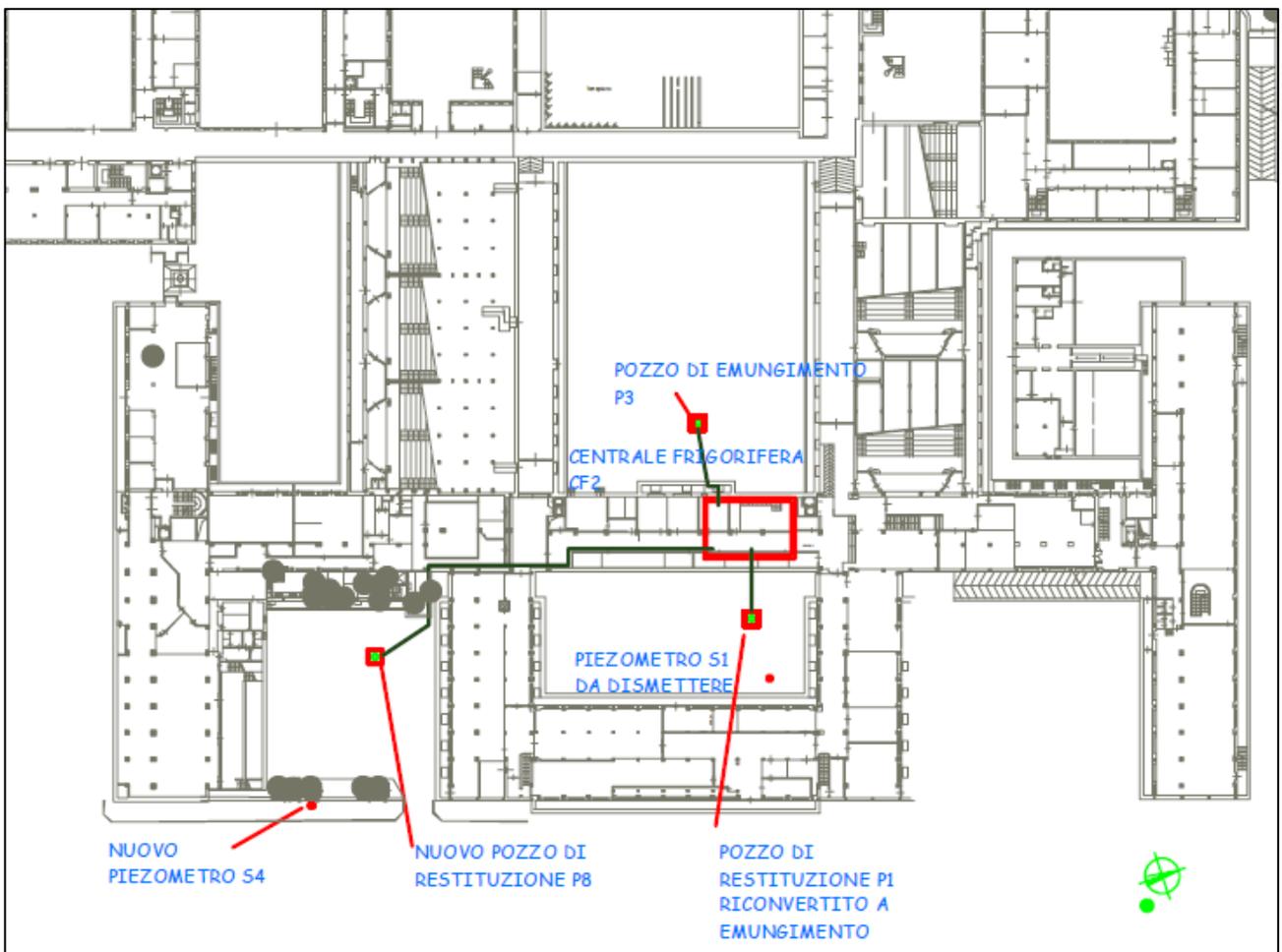


Figura 49: Particolare impianto CF2 con i pozzi P1, P8 e il piezometro S1 ispezionati

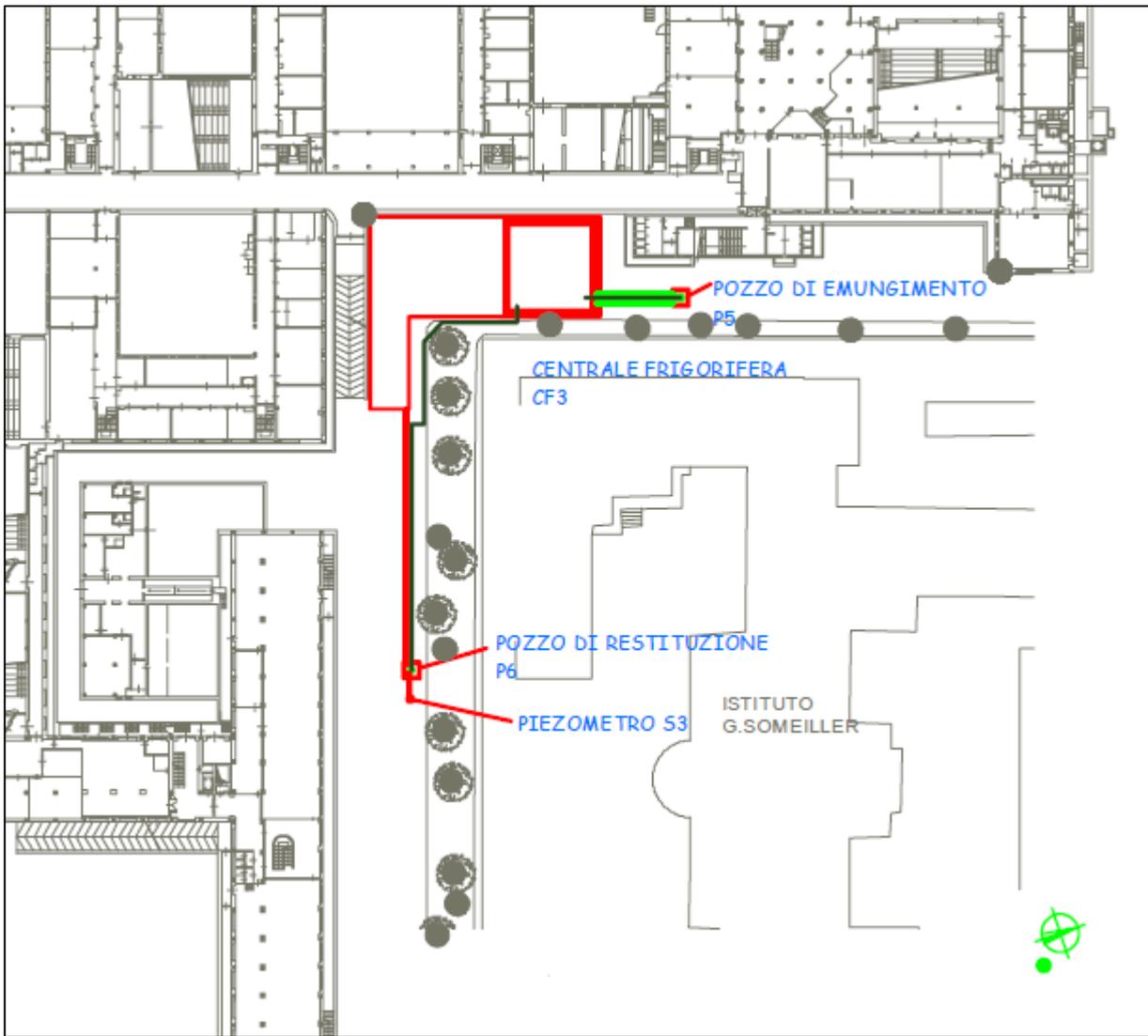


Figura 50: Particolare impianto CF3 con il pozzo di restituzione P6 ispezionato

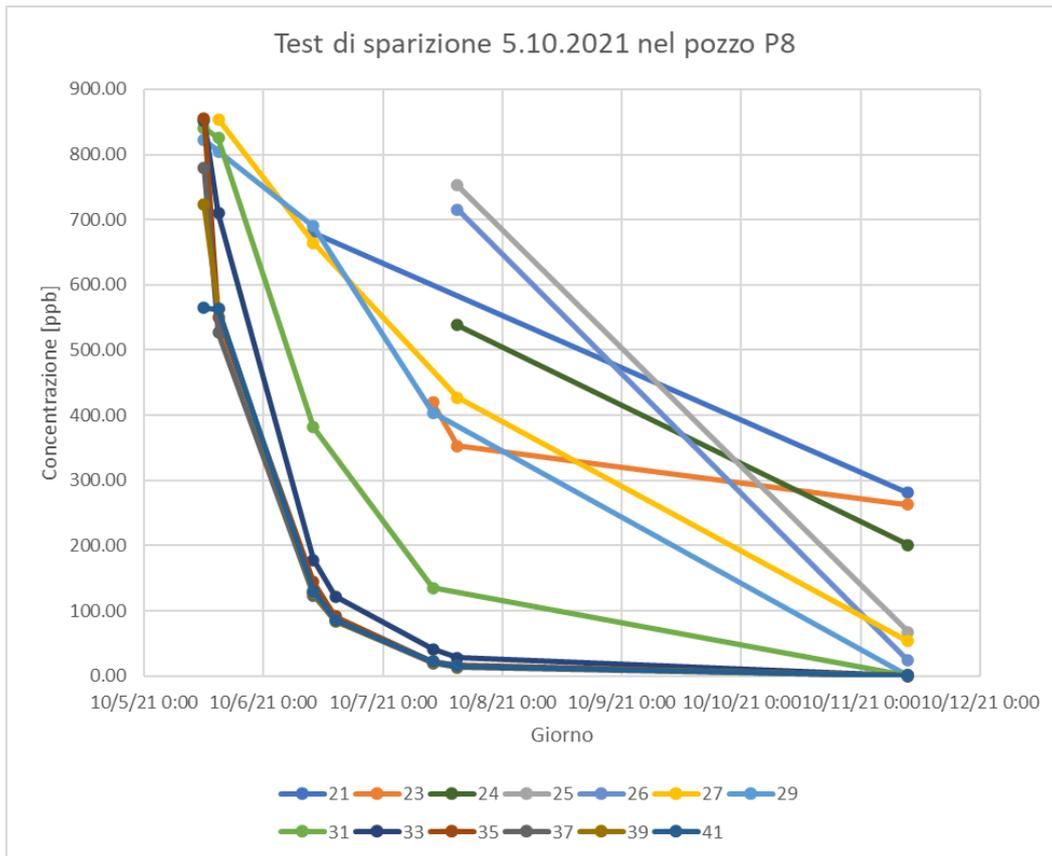


Figura 52: Trend delle concentrazioni di fluoresceina alle differenti profondità nel pozzo P8

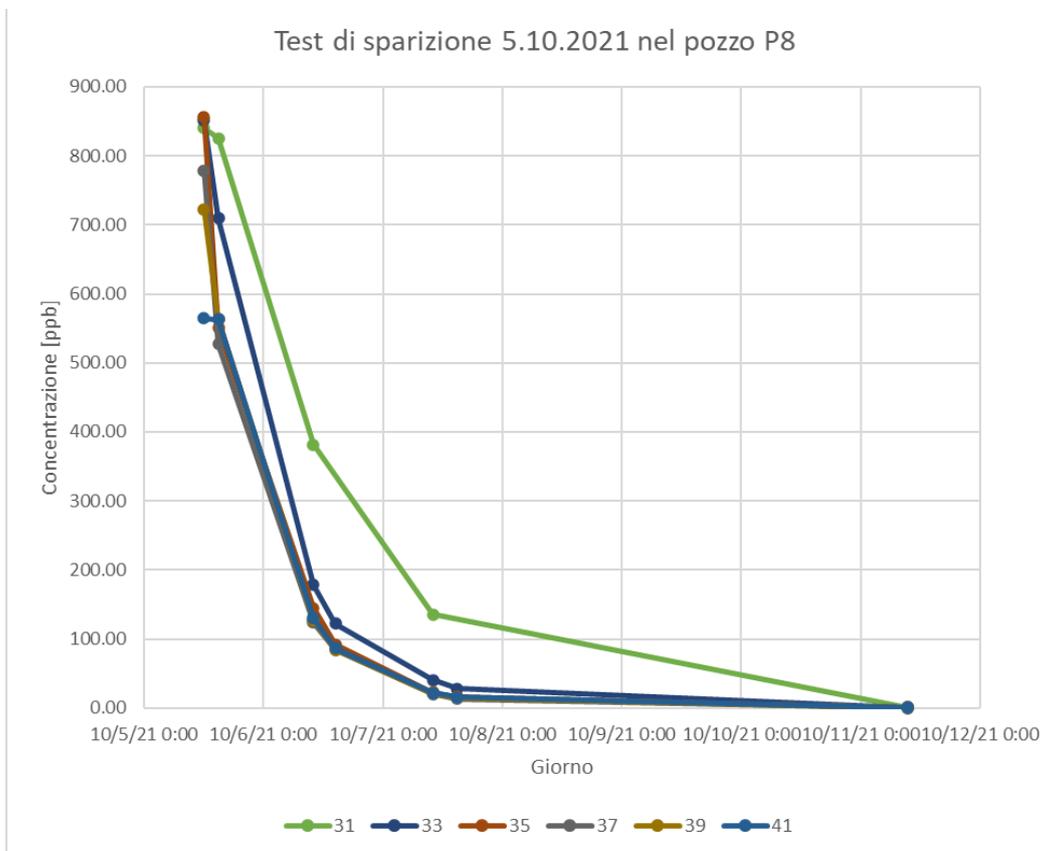


Figura 51: Variazione della concentrazione di fluoresceina nel tempo nel pozzo P8 tra 31 e 41 metri

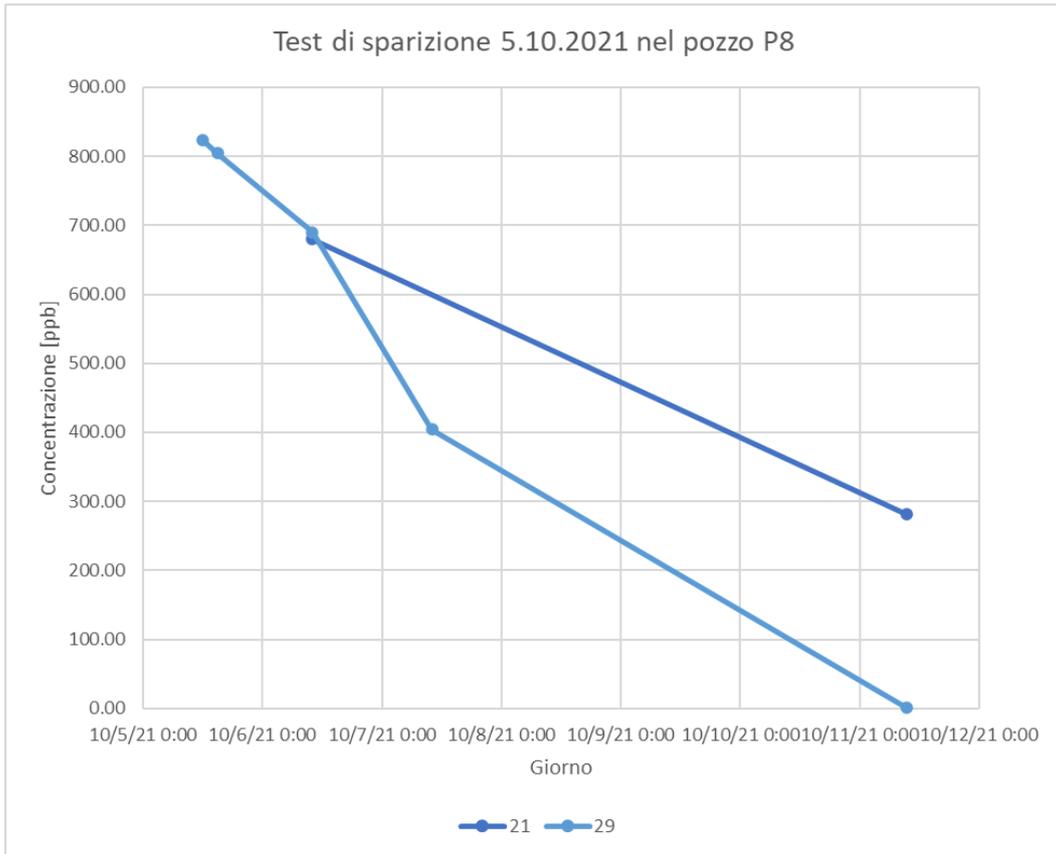


Figura 54: Variazione della concentrazione di fluoresceina nel tempo nel pozzo P8 alla profondità di 21 e 29 metri

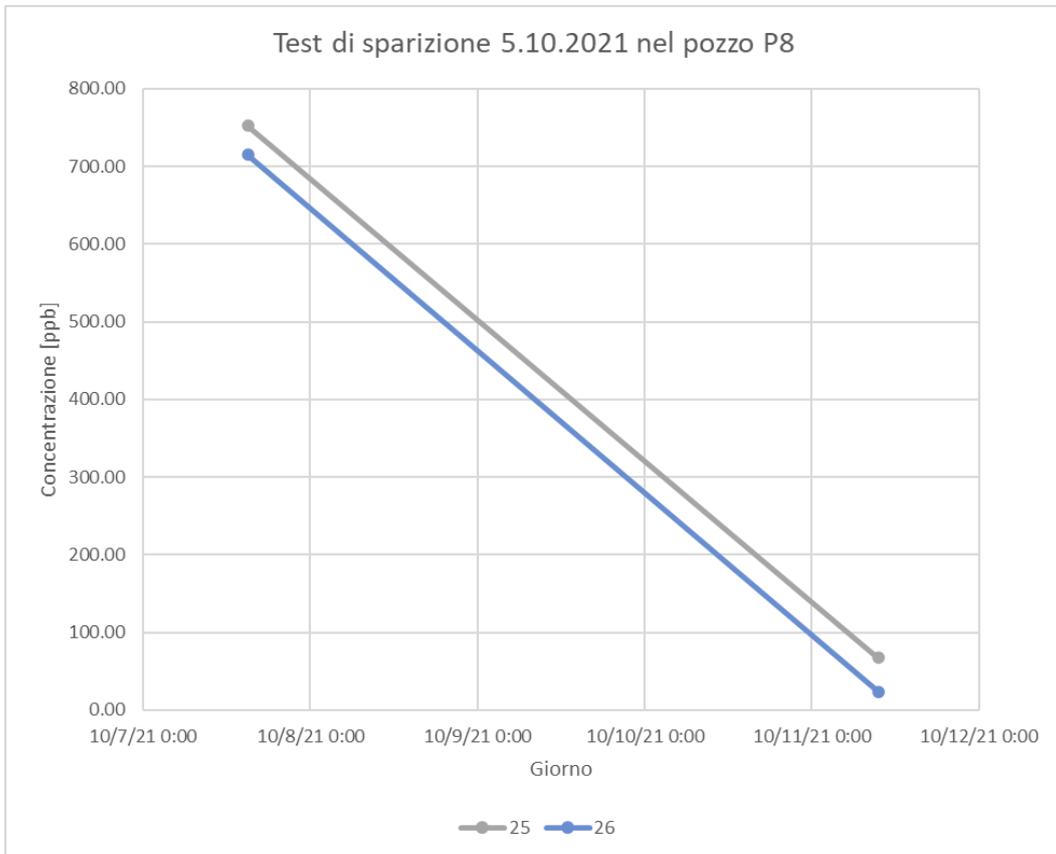


Figura 53: Variazione di concentrazione della fluoresceina nel tempo nel pozzo P8 alla profondità di 25 e 26 metri

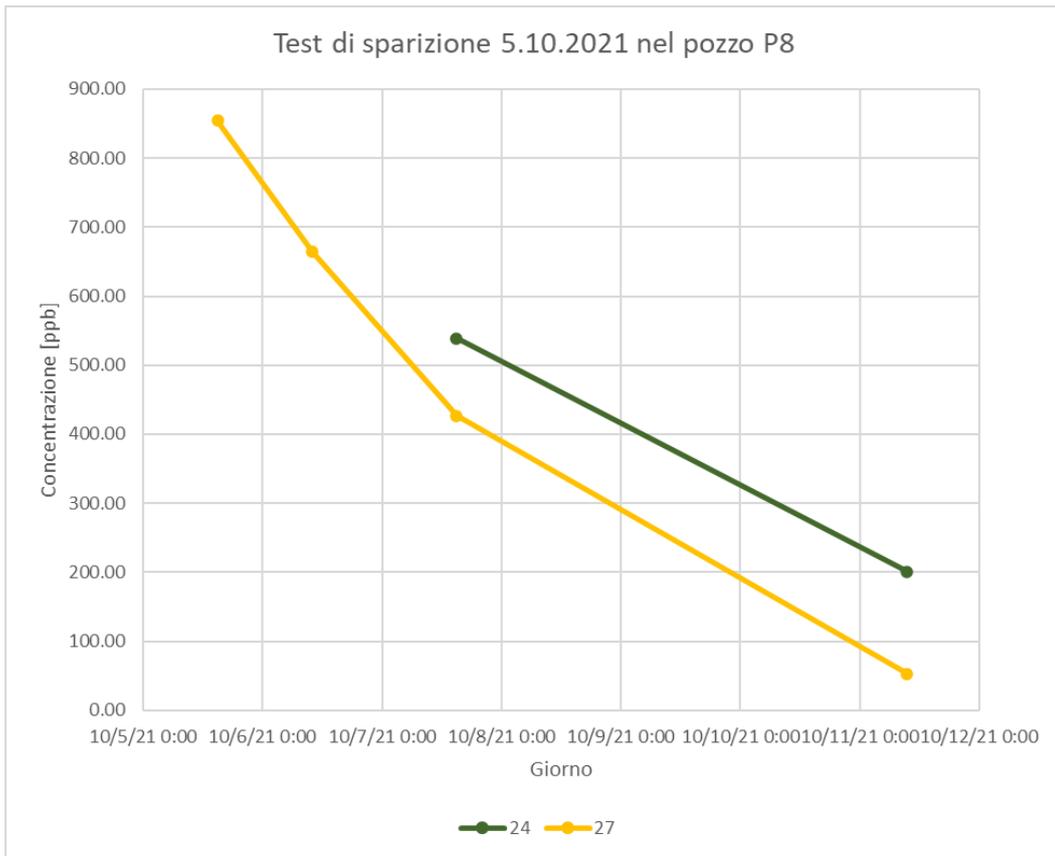


Figura 55: Variazione della concentrazione di fluoresceina nel tempo nel pozzo P8 alla profondità di 24 e 27

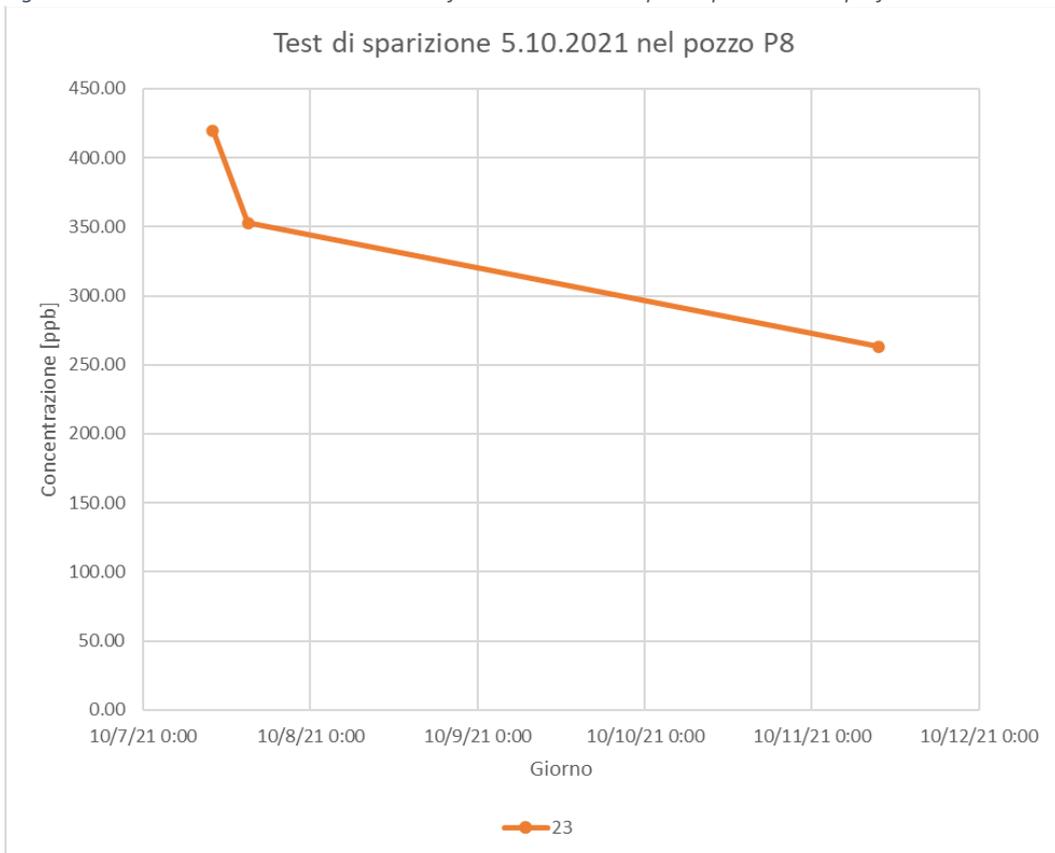


Figura 56: Variazione della concentrazione di fluoresceina nel tempo nel pozzo P8 alla profondità di 23 metri

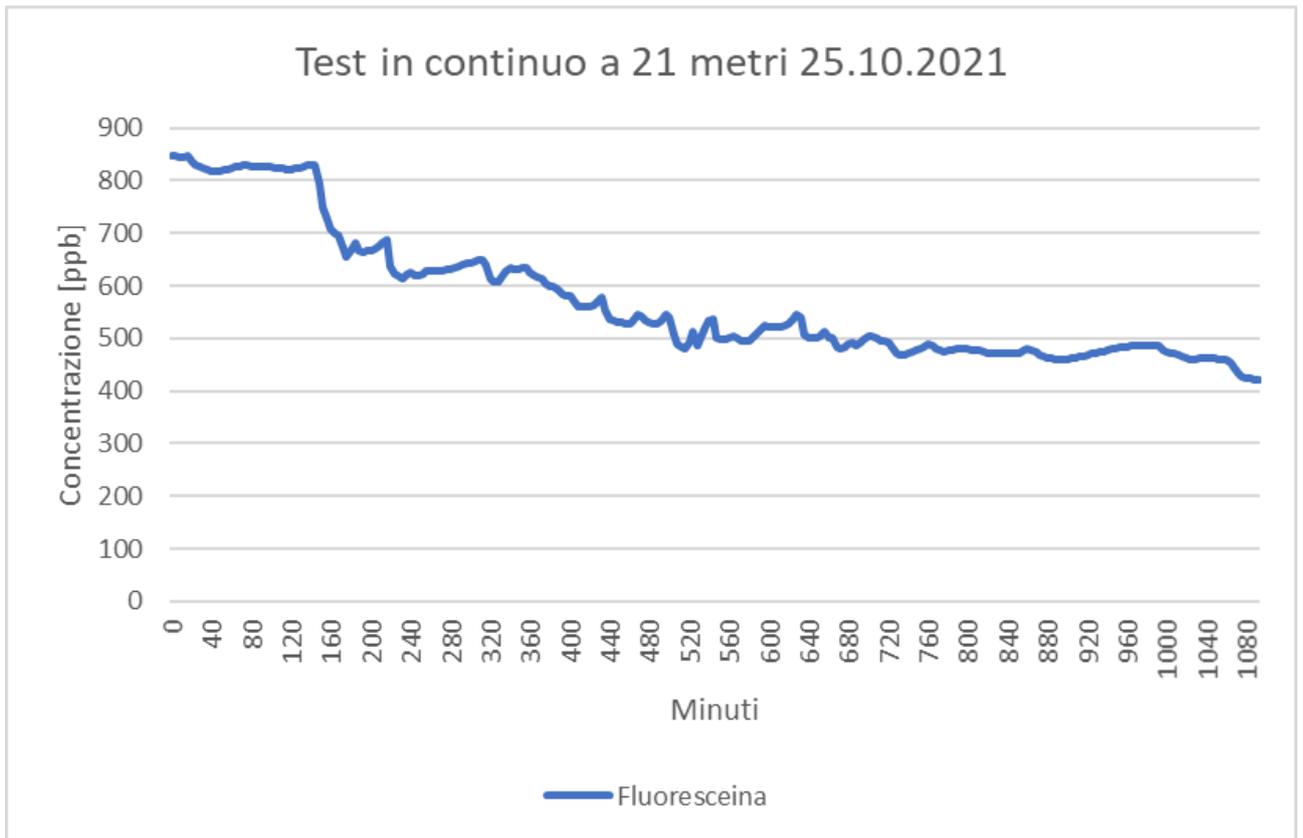


Figura 58: Campionamento continuo della concentrazione di fluoresceina tra le due misure di sparizione effettuate alle 14.30 e alle 17.00 all'interno del pozzo P6

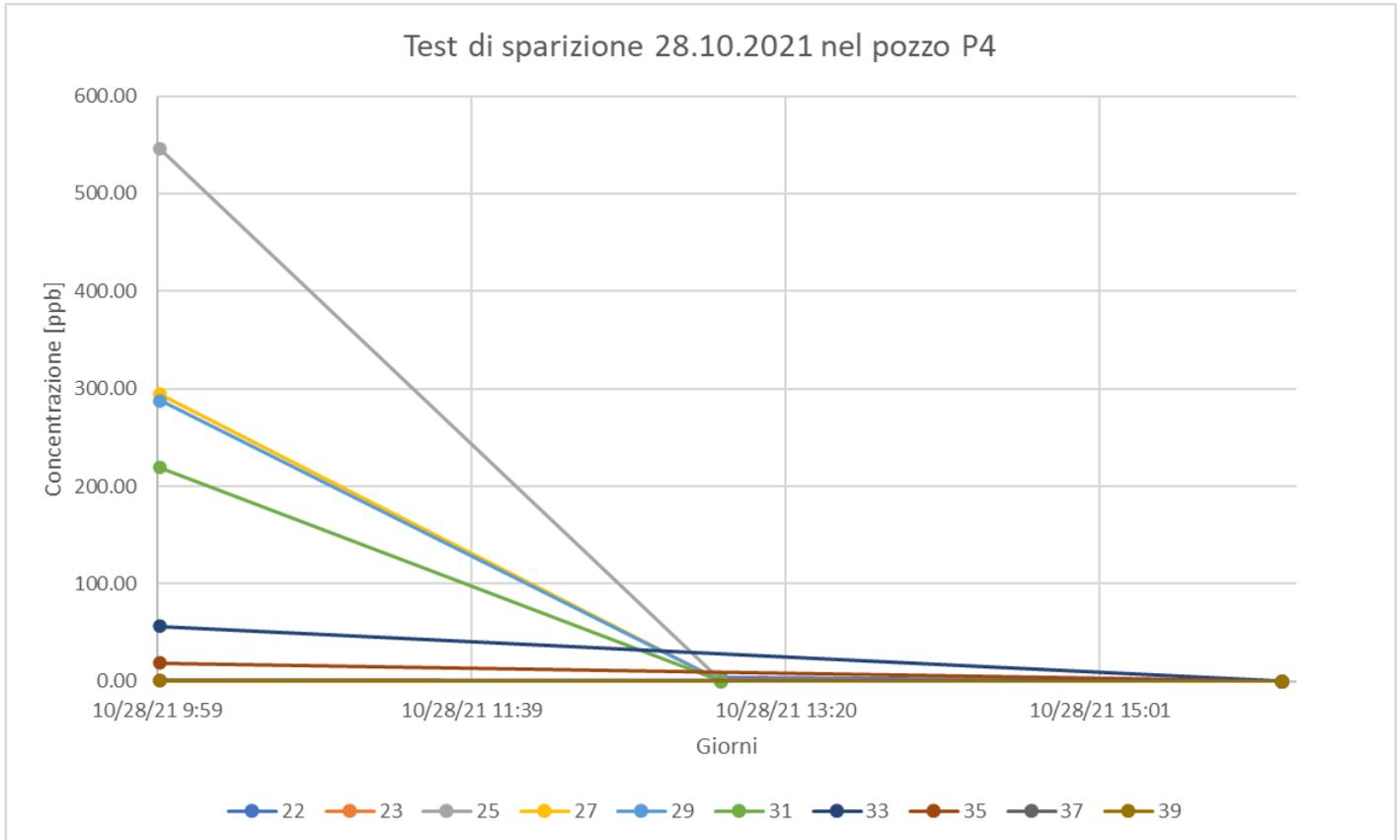


Figura 57: Variazione della concentrazione di fluoresceina nel tempo all'interno del pozzo P4 a differente profondità

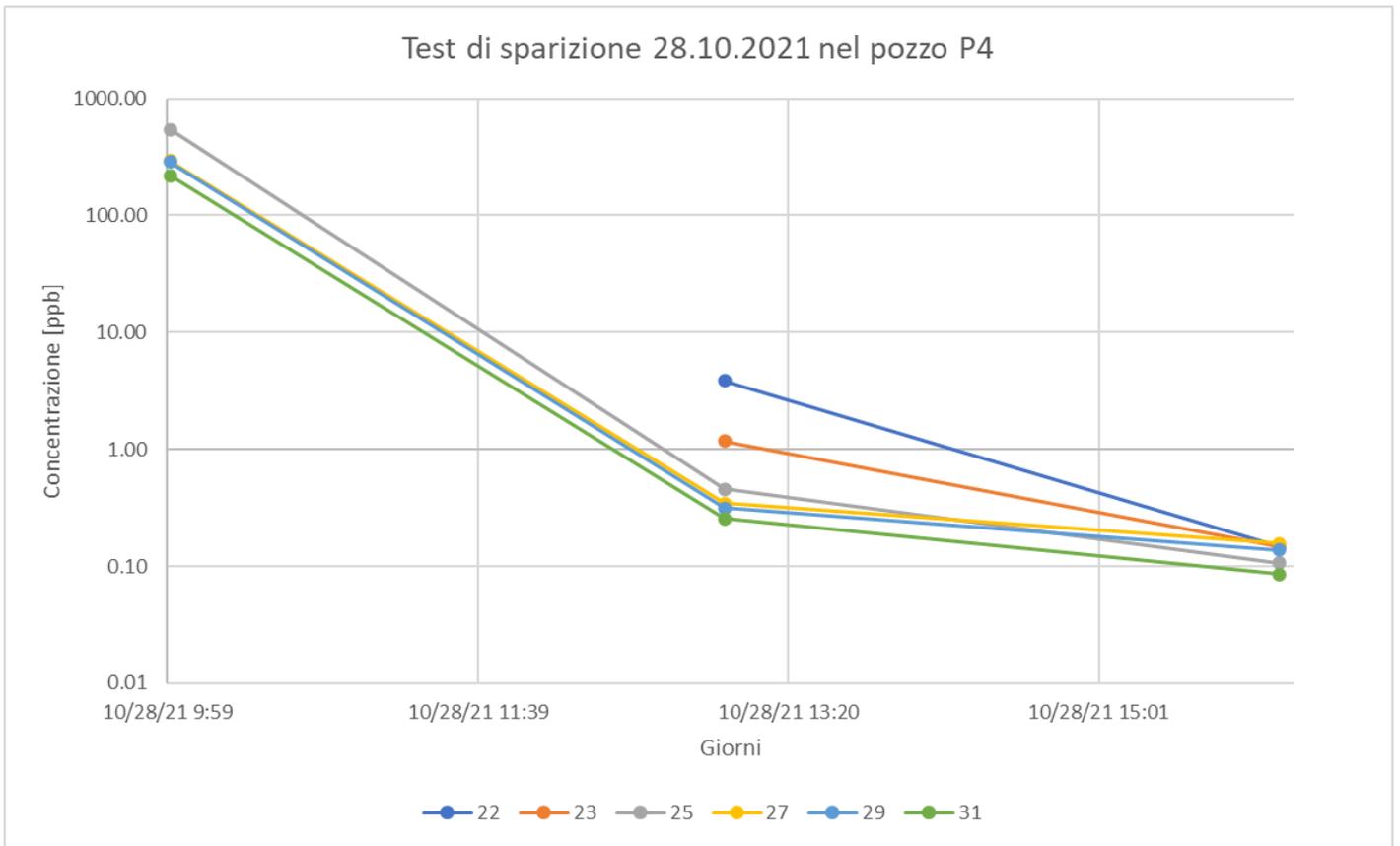


Figura 60: Variazione del logaritmo della concentrazione di fluoresceina nel tempo nel pozzo P6 tra i 22 e i 31 metri da p.c.

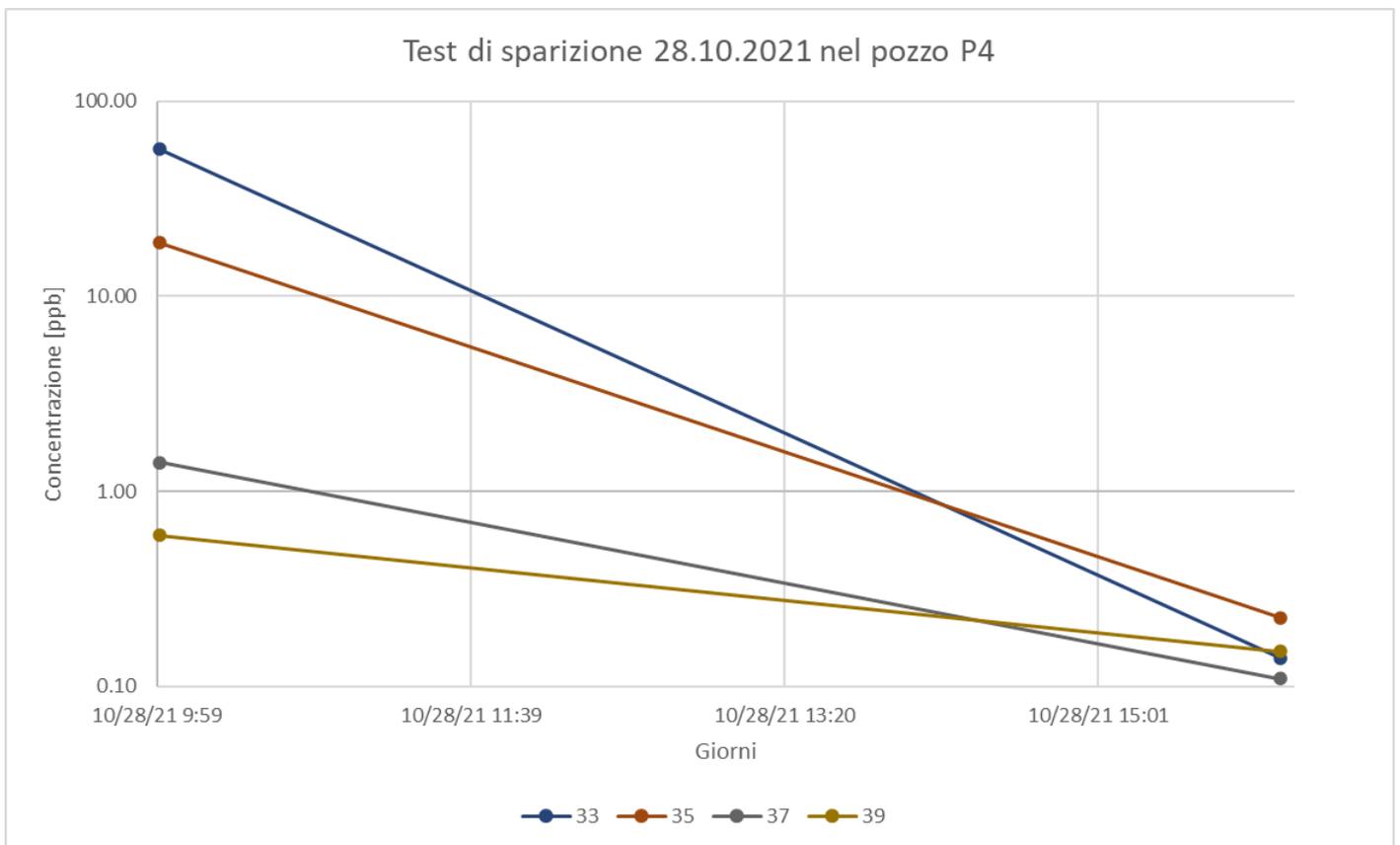
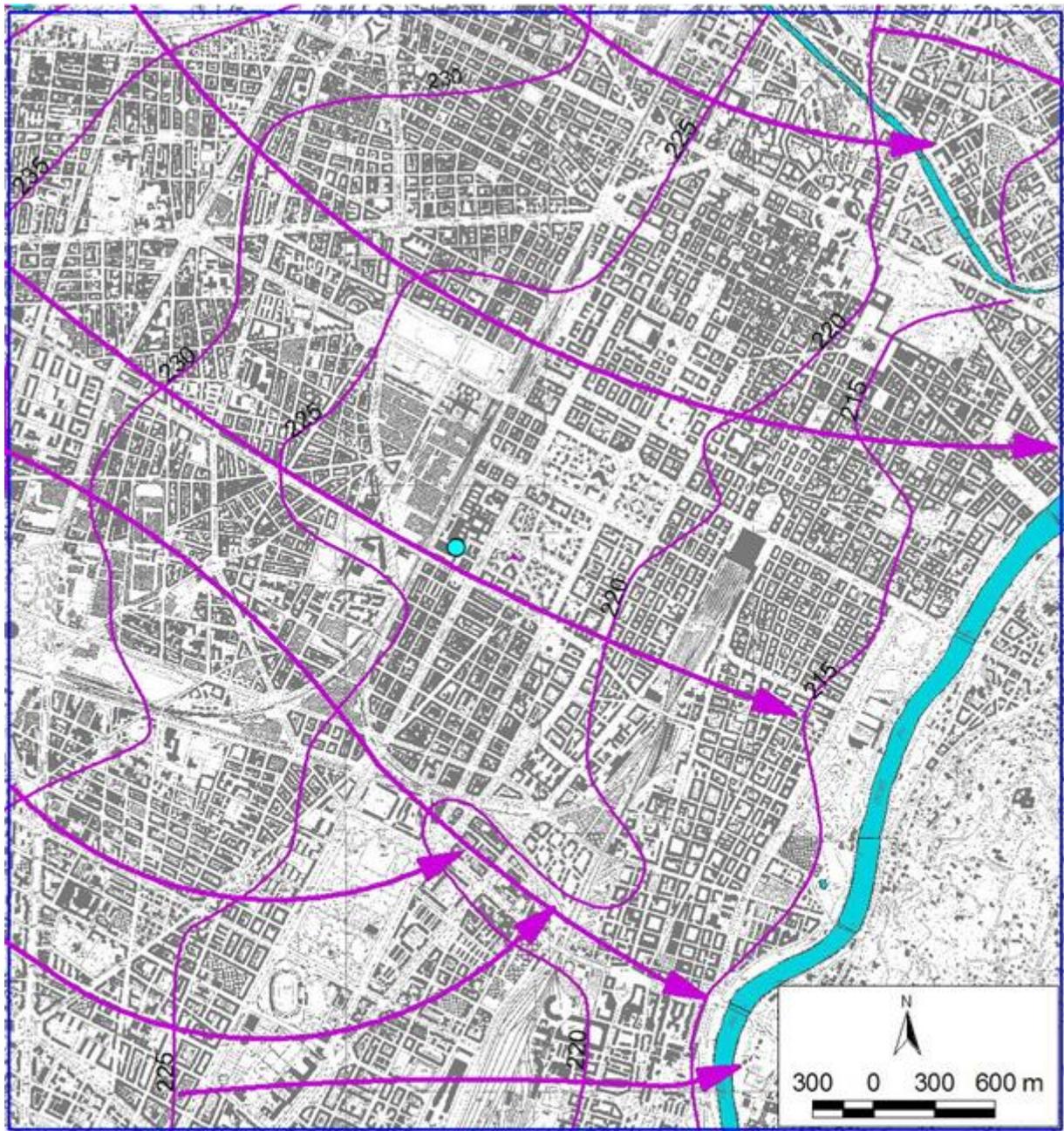


Figura 59: Variazione del logaritmo della concentrazione di fluoresceina nel tempo all'intero del pozzo P6 tra i 31 e i 37 metri da p.c.



LEGENDA

- Nuovo Pozzo [n°4]
- Area Politecnico di Torino
- Linee isopiezometriche
- Direzioni di flusso

Figura 61: Campo di moto nell'area oggetto di studio (Pizzo, 2006)

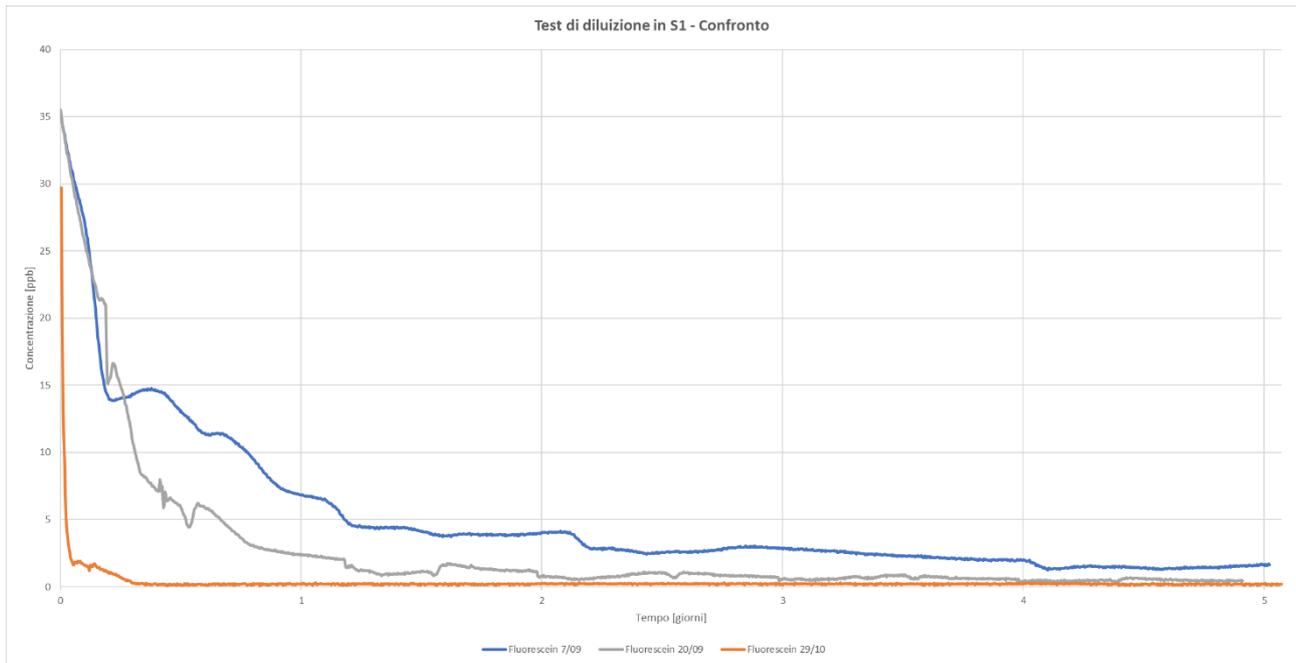


Figura 62: Confronto della concentrazione di fluoresceina indicata dalle due curve campionate grigio e blu per l'impianto acceso e dalla curva arancione per l'impianto spento alla profondità di 38 metri

Impianto	Pozzo/piezometro	Tipo di prova	Anno	Profondità da p.c.	Conducibilità idraulica orizzontale	Trasmissività
				[m]	[m/s]	[m <sup>2</sup> /s]
CF1	P1	Prove di pompaggio pregresse	2006	-	4.90E-03	1.37E-01
	S1	Test di sparizione continuo	2021	38	5.39E-03	-
	S1	Test di tracciamento multiplo	2021	26	2.77E-03	-
	P8	Test di sparizione	2021	21-29 31-41	5.00E-04 2.07E-03	- -
CF2	P2	Prove di pompaggio pregresse	2011	-	1.50E-03	3.60E-02
			2014	-	2.50E-03	7.50E-02
	P4	Prove di pompaggio pregresse	2010	-	5.74E-04	1.55E-02
			Test di sparizione	2021	22-35 37-39	2.61E-02 4.18E-03
CF3	P6	Prove di pompaggio pregresse	2015	-	2.37E-03	7.10E-02
		Test di sparizione	2021	21-37	1.96E-03	-

Tabella 3: Riassunto dei valori di conducibilità idraulica e trasmissività ottenuti dalle prove effettuate negli ultimi 15 anni

# Bibliografia

- AESCHBACH-HERTIG, W., SOLOMON, D.K., 2013, Noble Gas Thermometry in Groundwater Hydrology. In: Burnard P. (eds) *The Noble Gases as Geochemical Tracers. Advances in Isotope Geochemistry*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- ALEY, T., and FLETCHER, M.W, 1976, Water tracer's cookbook: *Journal of the Missouri Speleological Survey*, Vol. 16, No. 3.
- ALLEN, M. J., and MORRISON, S. M., 1973, Bacterial movement through fractured bedrock: *Groundwater*, vol. 11, no. 2, p. 6-10.
- ALTHAUS, R., KLUMP, S., ONNIS, A., KIPFER, R., PURTSCHERT, R., STAUFFER, F., KINZELBACH, W., Noble gas tracers for characterisation of flow dynamics and origin of groundwater: A case study in Switzerland, *Journal of Hydrology*, Volume 370, Issues 1–4, 2009, Pages 64-72.
- ATKINSON T. and SMITH D. and LAVIS J. and WITAKER R. J., 1973, Experiments in tracing underground waters in limestones, Vol. 19, pp. 323-349.
- BATSCHKE, H., BAUER, F., BEHRENS, H., BUCHTELA, K., and DOMBROWSKI, H., 1970, Combined karst and water research in the Danube River seepage region in the years 1967-1969, *Steirische Beitrage zur Hydrogeologic*, 72 p.
- BORTOLAMI, G., DE LUCA, D.A., MASCIOTTO, L., MORELLI DI POPOLO E TICINETO, A., 2010, *Le acque sotterranee della provincia di Torino*, Provincia di Torino.
- CASTRO, M. C., GOBLET, P., LEDOUX, E., VIOLETTE, S., and DE MARSILY, G., 1998, Noble gases as natural tracers of water circulation in the Paris Basin: 2. Calibration of a groundwater flow model using noble gas isotope data, *Water Resour. Res.*, 34 (10), 2467– 2483.
- CORBETT, D. Reide, DILLON, Kevin, BURNETT, William, CHANTON, Jeffrey, 2000, Estimating the groundwater contribution into Florida Bay via natural tracers,  $^{222}\text{Rn}$  and  $\text{CH}_4$ , *Limnology and Oceanography*.

DAVIS S. N., CAMPBELL D.J., BENTLEY H.W., FLYNN T.J., Ground Water Tracers, National Water Well Association.

DI MOLFETTA, A., SETHI, R., 2012, *Ingegneria degli acquiferi*, Springer.

DROST, W., KLOTZ, D., ARND, K., HERIBERT, M., NEUMAIER, F., and RAUERT, W., 1968, Point dilution methods of investigating groundwater flow by means of radioisotopes, *Water Resour. Res.*, 4(1), 125–146.

FIELD, M.S., 2005. Assessing aquatic ecotoxicological risks associated with fluorescent dyes used for water-tracing studies. *Environ. Eng. Geosci.* 11, 295–308.

FIELD, M.S., WILHELM, R.G., QUINLAN, J.F., ALEY, T.J., 1995. An assessment of the potential adverse properties of fluorescent tracer dyes for used for groundwater tracing. *Environ. Monit. Assess.* 38, 75–96.

FLETCHER, M.W. and MYERS, R.L., 1974, Ground water tracing in karst terrain using phage T-4. *Abstr. Annu. Meet. Am. Soc. Microbiol.* 74, 52.

GASPAR, E., 1987, *Mod trends tracer Hydrology*, CRC Press.

HAGEDORN, C., HANSEN, D. T., and SIMONSON, G. H., 1978, Survival and movement of fecal indicator bacteria in soil under conditions of saturated flow: *Journal of Environmental Quality*, vol. 7, no. 1, p. 55-59.

HARVEY, R.W., KINNER, N.E., BUNN, A., MACDONALD, D. and METGE, D.W. (1995). Transport behavior of groundwater protozoa and protozoan-sized microspheres in sandy aquifer sediments. *Appl. Environ. Microbiol.* 61, 209–217.

HARVEY, R. W., July 1997, Microorganisms as tracers in groundwater injection and recovery experiments: a review, *FEMS Microbiology Reviews*, Volume 20, Issue 3-4, Pages 461–472.

HALL, S.H., 1993. Single Well Tracer Tests in Aquifer Characterization. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 13(2), 118–124.

HUBBARD, E. F., KILPATRICK, F.A., MARTENS, L.A., WILSON, J.F., JR., 1982, Measurement of time of travel and dispersion in streams by die tracing, *Techniques of Water Resources Investigations of the U.S.G.S.*, Chapter A9, Book 3, Applications of Hydraulics.

KÄSS, W.A., 1998, *Tracing Technique in Geohydrology*. A.A.Balkema, Rotterdam, Brookfield.

KENDALL C., McDONNELL J.J., 1998, *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*, Elsevier.

KRALIK M., How to Estimate Mean Residence Times of Groundwater, 2015, *Procedia Earth and Planetary Science*, Volume 13, Pages 301-306.

LICHA, T., NIEDBALA, A., BOZAU, E., GEYER, T., 2012, An assessment of selected properties of the fluorescent tracer, Tinopal CBS-X related to conservative behavior, and suggested improvements, *Journal of Hydrology*, 484, Pages 38-44.

LIN, A. Y., DEBROUX, J.F., CUNNINGHAM, J.A., and REINHARD, M., 2003, Comparison of rhodamine WT and bromide in the determination of hydraulic characteristics of constructed wetlands, *Ecol. Eng.*, 20, 75– 88.

LO RUSSO, S., CIVITA, M.V., 2010, Hydrogeological and thermal characterization of shallow aquifers in the plain sector of Piemonte region (NW Italy): implications for groundwater heat pumps diffusion. *Environ Earth Sci* 60, pp.703–713.

LO RUSSO, S., TADDIA, G., 2010, Advective heat transport in an unconfined aquifer induced by the field injection of an open-loop groundwater heat pump. *American Journal of Environmental Sciences* 6(3), pp. 253-259.

LO RUSSO, S., GNAVI, L., ROCCIA, E., TADDIA, G., VERDA, V., 2014, Groundwater Heat Pump (GWHP) system modeling and Thermal Affected Zone (TAZ) pre-diction reliability: Influence of temporal variations in flow discharge and injection temperature, *Geothermics*, 51, 103-112.

LO RUSSO, S., TADDIA, G., BACCINO, G., VERDA, V., 2011, Different design scenarios related to an open loop groundwater heat pump in a large building: impact on subsurface and primary energy 387 consumption. *Energy and Buildings* 43, pp. 347-357.

LO RUSSO, S., TADDIA, G., VERDA, V., 2012, Development of the Thermally Affected Zone (TAZ) around a Ground Water Heat Pump (GWHP) System: a sensitivity analysis. *Geothermics* 43, pp. 66-74.

LO RUSSO, S., TADDIA, G., DABOVE, P., CERINO ABDIN, E., MANZINO, A.M., 2018, Effectiveness of time-series analysis for thermal plume propagation assessment in an open-loop groundwater heat pump plant, *Environmental Earth Sciences* (2018), 77:647.

MAKOTO, K., MIDORI, M., KIYOSHI, I., NORIYUKI, M., JUN, S., 2017, Groundwater age determination using <sup>85</sup>Kr and multiple age tracers (SF<sub>6</sub>, CFCs, and <sup>3</sup>H) to elucidate regional groundwater flow systems, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Volume 12, Pages 165-180.

MARTIN R., THOMAS A., 1974, An example of the use of bacteriophage as a ground water tracer. *J. Hydrol.*23, 73–78.

MATTSON, S., 1929, The laws of soil colloidal behavior 1: *Soil Science*, Vol. 27-28, pp. 179-220.

MOSETTI, F., 1961. Misure della velocità di flusso dell'acqua mediante la diffusione di un tracciante. *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*, III, 12.

NANCY, R.C., and GOULD, J.M., 1981, Pyranine (8-hydroxy-1,3,6-pyrenetrisulfonate) as a probe of internal aqueous hydrogen ion concentration in phospholipid vesicles, *Biochemistry* 1981, 20, pp. 1534-1538.

NOVAKOWSKI, K., BICKERTON, G., LAPCEVIC, P., VORALEK, J. and ROSS, N., 2006. Measurements of groundwater velocity in discrete rock fractures. *Journal of Contaminant Hydrology*, 82(1-2), 44–60.

NÖDLER, K., LICHA, T., FISCHER, S., WAGNER, B., SAUTER, M., 2011. A case study on the correlation of micro-contaminants and potassium in the Leine River (Germany). *Appl. Geochem.* 26, 2172–2180.

PITRAK, M., MARES, S, and KOBR, M., 2007. A Simple Borehole Dilution Technique in Measuring Horizontal Ground Water Flow. *Ground Water*, 45(1), 89–92.

PIZZO, S., 2006, Relazione per costruzione pozzo P4.

POIGER, T., FIELD, J.A., FIELD, T.M., SIEGRIST, H., GIGER, W., 1998. Behavior of fluorescent whitening agents during sewage treatment. *Water Res.* 32, 1939–1947.

POLEMIO, M., LIMONI, P.P., 2009, Primi risultati del monitoraggio con misure di velocità in un acquifero carsico costiero (Bari, Italia meridionale), *EngHydroEnv Geology* 2009, 12, 199-208.

POLEMIO, M., MITOLO, D., 1998, L'uso dei traccianti nello studio delle acque sotterranee ed esperienze relative alla puglia, *Acque sotterranee*, Fascicolo 60, CNR-CERIST, Bari.

RICHARDSON, S. D., WILLSON, C.S., and RUSCH, K.A., 2004, Use of rhodamine water tracer in the marshland upwelling system, *Ground Water*, 42(5), 678– 688.

RIEMANN, K., VAN TONDER, G. and DZANGA, P., 2002. Interpretation of single-well tracer tests using fractional-flow dimensions. Part 2: A case study. *Hydrogeology Journal*, 10(3), 357–367.

ROBERTSON, J. B., 1969, Behavior of xenon-133 gas after injection underground: U.S. Geol. Survey Open File Report ID022051, 37 p.

ROSSI, P., DÖRFLIGER, N., KENNEDY, K., MÜLLER, I., AND ARAGNO, M., 1998, Bacteriophages as surface and ground water tracers, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2, 101–110.

ROWINSKI, P. M., GUYMER, I., and KWIATKOWSKI, K., 2008, Response to the slug injection of a tracer a large- scale experiment in a natural river, *Hydrol. Sci. J.*, 53, 1300– 1309.

SANFORD, W. E., SHROPSHIRE, R. G., and SOLOMON, D. K. 1996, Dissolved gas tracers in groundwater: Simplified injection, sampling, and analysis, *Water Resour. Res.*, 32 (6), 1635– 1642

SCHUBERT, M., KNOELLER, K., TREUTLER, H. C., WEISS, H., DEHNERT, J., 222Rn as a tracer for the estimation of infiltration of surface waters into aquifers, Editor(s): P.P. Povinec, J.A. Sanchez-Cabeza, *Radioactivity in the Environment*, Elsevier, Volume 8, 2006, Pages 326-334.

SCHUDEL et al., 2002, Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie – Guide pratique. *Rapp. OFEG, Sér. Geol.* 3

SHAFFER, J.M., BRANTLEY, D.T. and WADDELL, M.G., 2010. Variable-density flow and transport simulation of wellbore brine displacement. *Ground Water*, 48(1), 122–30.

TADDIA, G., 2018, Underground exploitation in urban areas by geothermal heat pump systems: the example of Turin Politecnico test site (NW Italy), *Alpine and Mediterranean Quaternary*, 31 (2), pp. 235–244.

THOMPSON, G. M., HAYES, J. M., AND DAVIS, S. N., 1974, Fluorocarbon tracers in hydrology: *Geophysical Research Letters*, Vol. 1, pp. 177-180.

UGGERI, A., VIGNA, B., 1990, Nuovi traccianti ed esperienze di valutazione della velocità di flusso in acquiferi carbonatici.

UGGERI, A., VIGNA, B., 1997. Use of optical brighteners in applied hydrogeology. In: Kranjc, A., (Ed.), *Tracer Hydrology 97*, Proceedings of the 7th Int. Symposium on Water Tracing, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 91–98.

- UNITO DST, 2011, Definizione di linee guida per la valutazione delle perdite dei canali irrigui.
- VAN TONDER, G., RIEMANN, K. and DENNIS, I., 2002. Interpretation of single-well tracer tests using fractional-flow dimensions. Part 1: Theory and mathematical models. *Hydrogeology Journal*, 10(3), 351–356.
- WILSON, J. F., COBB, E. D., and KILPATRICK, F. A., 1986, Fluorometric procedures for dye tracing, U.S. Geol. Surv. Tech. of Water Resour. Invest., Book 3, Chap. A12, pp. 34.
- WOOD W. W., EHRLICH G.G., 1978, Use of baker's yeast to trace microbial movement in ground water, Vol. 16, N° 6, pp. 398-403.
- WYMPENNY J. W. T., COTTON N. and STRATHEM M., 1972, Microbes ad tracers of water movement: Water research, Vol. 6, pp. 731-739