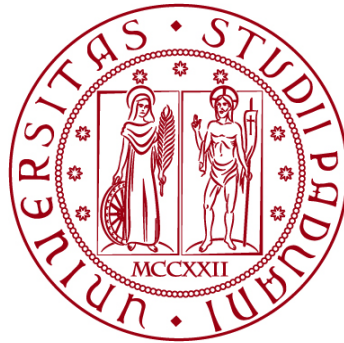


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

Analisi geostatistica delle proprietà idrauliche in suoli coltivati e non coltivati

Relatore: Chiar.mo Prof. PAOLO SALANDIN
Correlatori: Dott. Ing. LEONARDO COSTA

Laureando: MOHAMAD ALHAJ YAHYA

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

INDICE

Capitolo 1. Introduzione	4
Capitolo 2. Materiali & Metodi	8
2.1 Attività sperimentale.....	8
2.2 Elaborazione dei dati sperimentali	12
2.3 Analisi statistica della conducibilità idraulica a saturazione	13
2.4 Analisi geostatistica della conducibilità idraulica a saturazione	13
2.4.1 Rototraslazione delle coordinate dei punti sperimentali e nuovo sistema di riferimento locale.....	15
2.4.2 Ipotesi di stazionarietà	16
2.4.3 Semivariogramma sperimentale	16
2.4.4 Il Kriging ordinario (Ordinary Kriging)	18
2.4.5 Validazione incrociata (Cross-Validation)	20
Capitolo 3. Risultati e Discussione.....	22
3.1 Risultati delle prove infiltrometriche.....	22
3.2 Risultati delle analisi statistica.....	27
3.3 Risultati delle analisi geostatistica.....	31
3.3.2 Variogrammi sperimentali.....	31
3.3.3 Modellazione dei Variogrammi Sperimentali	32
3.3.3.1 Caratteristiche del modello 1	32
3.3.3.2 Calibrazione del modello 2	32
3.3.3 Risultati del Kriging ordinario	35
3.3.4 Risultati della validazione incrociata (Cross-Validation)	37
3.3.4.1 Risultati della validazione incrociata per il modello 1.....	38
3.3.4.2 Risultati della validazione incrociata per il modello 2.A	39
Capitolo 4. Conclusioni.....	40
Bibliografia.....	50

Capitolo 1. Introduzione

Nell'area pedemontana della provincia di Treviso (Veneto, Italia) numerose attività agricole, ad esempio la coltivazione di vigne per la produzione di Prosecco, sono sviluppate con l'uso di pesticidi e fertilizzanti chimici in aree dove l'acqua di falda è estratta per soddisfare il fabbisogno idropotabile della popolazione locale. In tale area l'acquifero è di tipo freatico, cioè non confinato, e quindi facile bersaglio di un eventuale contaminazione proveniente dal terreno agricolo trattato con prodotti chimici capaci di muoversi attraverso il suolo insaturo. Ciò costituisce un rischio sia per la qualità della risorsa potabile sotterranea che, di conseguenza, per la salute delle persone servite dal sistema acquedottistico.

A protezione dell'acqua di falda ad uso potabile, nel 2019 la regione Veneto ha applicato la normativa nazionale (Testo Unico Ambientale D.lgs. 152/2006) che prevede di delineare aree di salvaguardia attorno ai pozzi che emungono acqua potabile.

Le aree di salvaguardia, distinte, ai sensi dell'art. 94 del D.Lgs. n. 152/2006, e dall'art. 15 del Piano regionale di Tutela delle Acque (PTA) in zone di tutela assoluta, zone di rispetto ristrette e allargate e zone di protezione, sono quelle particolari porzioni di territorio che è necessario sottoporre a vincoli, al fine della tutela delle risorse idriche destinate al consumo umano.

La zona di tutela assoluta è l'area immediatamente circostante il punto di attingimento, deve avere almeno 10 metri di raggio ed essere adibita esclusivamente alle opere di captazione e derivazione e alle infrastrutture di servizio.

La zona di rispetto è la porzione di territorio circostante la zona di tutela assoluta; è suddivisa in ristretta ed allargata in base alla vulnerabilità del corpo idrico e alla tipologia dell'opera di presa. Ai sensi dell'art. 15 comma 4 del PTA, fino a diversa delimitazione la zona di rispetto ha un'estensione di 200 metri di raggio dal punto di captazione.

In particolare, nell'area di salvaguardia sono vietate le seguenti attività:

- Dispersione di fanghi e acque reflue, anche se depurate;
- Dispersione nel sottosuolo di acque meteoriche da piazzali e strade;
- Stoccaggio di prodotti e di sostanze chimiche pericolose.

Tra i criteri suggeriti per il delineamento di un'area di salvaguardia sono suggeriti anche lo studio della permeabilità del suolo insaturo e la definizione dell'estensione di aree che presentano vie preferenziali di infiltrazione.

In questo lavoro di tesi si è analizzata la distribuzione spaziale della capacità d'infiltrazione del suolo in aree coltivate e non coltivate all'interno dell'area di salvaguardia del campo pozzi di "Settolo" gestito dalla società Alto Trevigiano Servizi, nel comune di Valdobbiadene (TV). In questo campo, la cui mappa è riportata in Figura 1.1, 3 pozzi attivi riforniscono di acqua potabile una parte della provincia di Treviso (circa 50,000 abitanti), prelevando l'acqua dalla falda freatica.

Qui la distribuzione spaziale della capacità d'infiltrazione del suolo è stata valutata attraverso lo sviluppo di 100 prove infiltrometriche distribuite in un'area di circa 2 ettari intorno al Pozzo 1 (Base), utilizzando degli infiltrometri a doppio anello. Questo per determinare le zone con la più alta capacità di infiltrazione, poiché in queste aree è ipotizzato un maggior rischio di trasporto verticale di contaminanti, dalla superficie del terreno verso la falda freatica.

La successiva elaborazione dei risultati ottenuti in ciascun punto sperimentale ha permesso la stima della conducibilità idraulica a saturazione di campo (K_{fs} , in lingua inglese: field-saturated hydraulic conductivity) nella posizione di ciascun test.



Figura 1.1: immagine satellitare del Campo pozzi nel sito sperimentale del Settolo, area gestita da Alto Trevigiano Servizi e composta da quattro pozzi, denominati "Pozzo 1 (Base)", "Pozzo 2" e "Pozzi Castella e San Giacomo"

A partire dai valori di K_{fs} sono state sviluppate due ulteriori analisi. La prima è un'analisi statistica per verificare eventuali differenze tra i valori medi di conducibilità idraulica a saturazione in aree coltivate e non coltivate. La seconda è un'analisi geostatistica per lo sviluppo di un modello di stima puntuale di K_{fs} nelle aree comprese tra le posizioni dei test infiltrometrici, sempre all'interno dell'area di studio. Con quest'ultima analisi si ottiene una mappa che illustra la conducibilità idraulica a saturazione su tutta l'area che si può utilizzare come una prima valutazione della vulnerabilità delle aree coltivate e non coltivate al processo di infiltrazione dei prodotti chimici usati in agricoltura.

L'elaborato di tesi è strutturato nei capitoli "Materiali & Metodi", "Risultati e Discussione", "Conclusioni". Nel primo (Capitolo 2, Materiali & Metodi) si descrivono i metodi per la raccolta dei dati sperimentali, gli strumenti utilizzati e i metodi di analisi geostatistica per ottenere la stima della distribuzione spaziale della conducibilità idraulica a saturazione di campo. Nel secondo (Capitolo 3, Risultati e Discussione) si presentano e discutono i risultati ottenuti sia sperimentalmente, con le prove di infiltrazione, che numericamente, attraverso le analisi sviluppate a partire dai valori sperimentali.

Capitolo 2. Materiali & Metodi

In questo capitolo sono presentate le modalità secondo le quali sono stati sviluppati i test infiltrometrici, la loro disposizione spaziale, e le teorie d'infiltrazione necessarie alla definizione dei valori di K_f .

Successivamente, viene presentato il lavoro sviluppato per cercare la somiglianza tra i dati sperimentali, attraverso analisi statistiche, e per mettere le basi per l'analisi geostatistica, con la quale è possibile interpolare spazialmente i risultati ottenuti.

2.1 Attività sperimentale

I dati sperimentali sono stati raccolti usando tre infiltrometri a doppio anello composti da una coppia d'annei concentrici in acciaio inossidabile Figura 2.1 e un galleggiante connesso ad un'asta graduata con precisione millimetrica.

Questi strumenti permettono di misurare la capacità di infiltrazione, f_c – espressa in cm/min, tramite l'osservazione dell'andamento nel tempo del tirante idrico instaurato all'interno dell'anello centrale, sopra il piano campagna. Dalla variazione nel tempo della capacità d'infiltrazione del terreno, si ricava la curva sperimentale della capacità d'infiltrazione dell'acqua nel terreno, attraverso la quale è possibile analizzare il processo d'infiltrazione. Poiché la misura riguarda il tirante idrico, i risultati delle prove non sono influenzati dalla coppia di anelli utilizzata.

Dopo aver identificato la posizione del test infiltrometrico, la coppia di anelli viene infissa a percussione nel terreno, battendo con una mazzuola anti-rimbalzo su una piastra di acciaio inossidabile posizionata sopra agli anelli. Poiché si vuole misurare la capacità d'infiltrazione del terreno lungo la direzione verticale, l'infiltrometro a doppio anello è inserito nel terreno per una profondità non inferiore a 5 cm, per limitare il più possibile l'istaurarsi di flussi d'acqua con direzione diversa da quella verticale. La struttura ad asta-galleggiante, necessaria per eseguire la misurazione, si installa poi sull'anello centrale (con diametro più piccolo) tramite un sostegno in plastica rigida che ne vincola i gradi di libertà Figura 2.2 .

La prova inizia inserendo l'acqua all'interno della coppia d'annei, fino a raggiungere un tirante idrico ragionevole (circa 5-8 cm) e facendo attenzione a far coincidere i livelli dei peli liberi dell'anello interno e dell'anello esterno. La misura avviene poi ad intervalli regolari (ad esempio ogni 60 secondi), leggendo il valore di altezza dato dall'asta verticale relativa al livello del tirante idrico

presente nel solo anello interno. L'infiltrometro va nuovamente riempito prima che si svuoti, raggiungendo il livello iniziale e pareggiando i livelli tra i due anelli. A questo punto la prova va avanti, continuando con i cicli di riempimento e misurando il livello idrico ad intervalli regolari. Le misure di livello possono essere automatizzate. Questo perché la registrazione manuale dei dati può risultare difficile, soprattutto nella fase iniziale, quando il tasso di infiltrazione è più elevato (a causa di un abbassamento più veloce del tirante idrico rispetto al piano campagna). Nella campagna sperimentale qui descritta, sono state usate delle piccole macchine fotografiche (modello Yi – Action Cam), impostandole per produrre gli scatti ad intervalli di tempo regolari.



Figura 2.1: *infiltrometro a doppio anello posizionato in campo, struttura galleggiante-asta graduata e macchina fotografica impostata per produrre uno scatto ad intervallo di tempo regolare.*

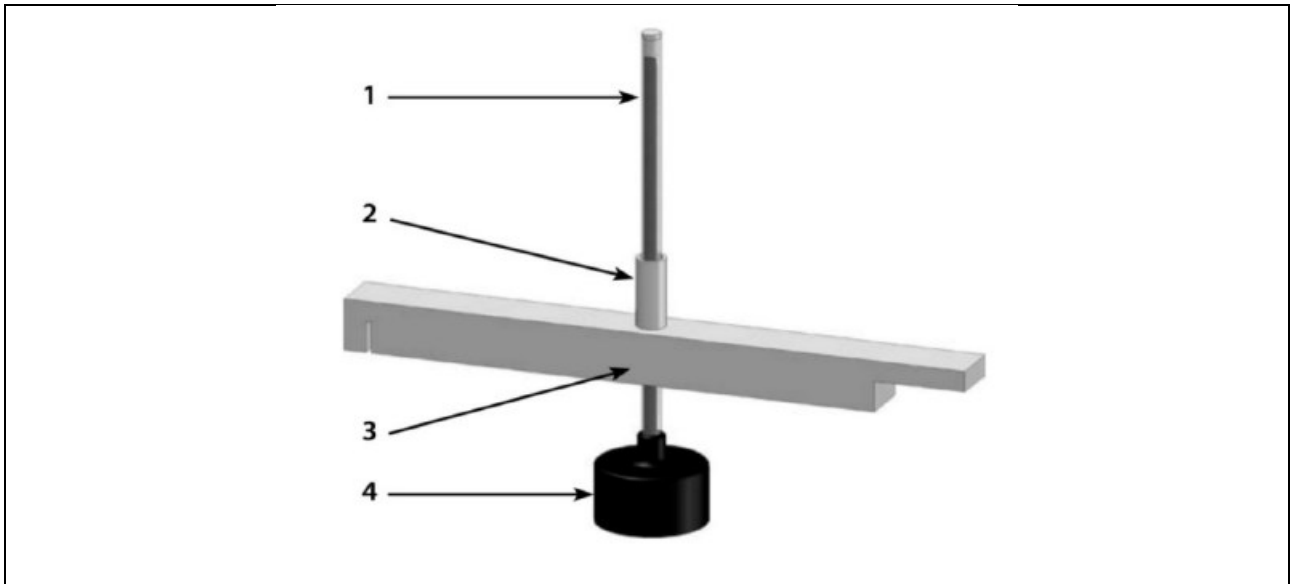


Figura 2.2: *asta con precisione millimetrica (1), tubo per la visualizzazione dei risultati (2), struttura di sostegno in grado di vincolare i gradi di libertà (3), galleggiante (4)*

I valori ottenuti dalla lettura dell'asta sono riferiti al comportamento dell'acqua nel solo anello interno. Tuttavia, se usassimo solo l'anello interno dell'infiltrometro, otterremmo un tasso d'infiltrazione verticale sovrastimato a causa del possibile deflusso orizzontale dell'acqua infiltrata nel terreno.

L'anello esterno permette quindi di limitare questo deflusso orizzontale creando, attraverso il moto d'infiltrazione nel primo metro di suolo, un flusso che ostacola il moto radiale dell'acqua proveniente dall'anello interno.

A questo punto, possiamo trovare due casi:

- 1- Se il livello dell'acqua nell'anello interno è superiore rispetto a quello esterno, si produce una spinta radiale dal centro dello strumento verso l'esterno, quindi otteniamo una sovrastima della capacità d'infiltrazione, ossia la stessa situazione di utilizzare un infiltrometro ad anello singolo.
- 2- Se il livello dell'acqua nell'anello esterno è superiore rispetto a quello interno, si produce una spinta radiale dell'acqua dall'esterno verso l'interno nel terreno sotto l'infiltrometro, quindi otteniamo una riduzione del deflusso verticale misurato nell'anello interno (figura 2.3).

Quindi, è strettamente necessario controllar durante le prove, i livelli dell'acqua nei due anelli per avere dei risultati corretti.

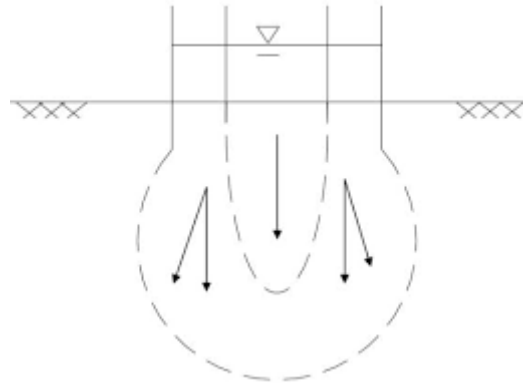
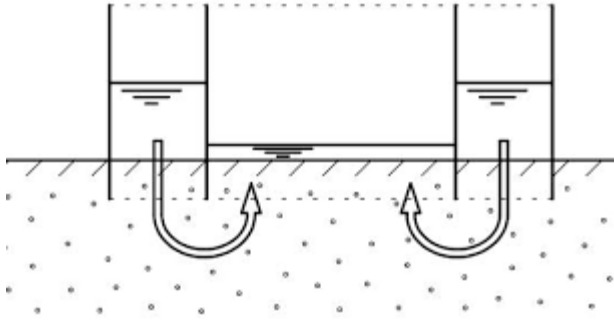


Figura 2.3: sezione trasversale dell'infiltrometro
 Che dimostra il caso due illustrato sopra.

Figura 2.4: schema di flusso sotto
 l'infiltrometro.

Ogni prova d'infiltrazione si ferma dopo 3 ore (circa 11000 secondi).

Le prove infiltrometriche sono state sviluppate in due periodi distinti:

1- 33 prove sono state sviluppate dal 15/07/2021 al 15/10/2021, per le quali è stata già sviluppata un'analisi preliminare (Benozzi 2022, Costa 2022),

2- 67 prove sono state sviluppate dal 22/07/2022 al 02/11/2022,

per un totale di cento prove.

In questo elaborato sono stati considerati i risultati di tutte le prove insieme, in modo da avere un campione sufficiente a sviluppare un'analisi statistica solida e avere una descrizione accurata della distribuzione della capacità di infiltrazione del suolo nell'area d'interesse.

La Figura 2.5 mostra la distribuzione spaziale delle prove, sviluppate sia nel campo centrale non coltivato attorno al Pozzo 1 gestito dalla società Alto Trevigiano Servizi, che nei tre vigneti a Sud.



Figura 2.5: Area campo pozzi “Settolo”, di cui i puntini gialli evidenziano la localizzazione delle Prove svolte.

2.2 Elaborazione dei dati sperimentali

I dati acquisiti durante lo sviluppo delle prove sperimentali sono stati importati ed organizzati in una cartella Excel, contenente un foglio per ciascuna prova infiltrometrica avente un codice identificativo. Qui le misure dell’asta osservate negli scatti acquisiti ad intervalli regolari durante la prova sono state associate all’orario di ogni scatto.

A partire dai dati sperimentali raccolti con le prove infiltrometriche, il tasso d’infiltrazione, nell’area sottostante l’infiltrometro, si determina per ogni differenza temporale sottraendo la quota i -esima segnata dall’asta verticale con la quota segnata all’istante successivo $i+1$, e dividendo questo valore per l’intervallo temporale tra le due misure. L’equazione per il calcolo della capacità di infiltrazione sperimentale è:

$$f_c = \frac{(H_{i+1}) - (H_i)}{(t_{i+1}) - (t_i)} = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (2.1.1)$$

Dove H è il valore in millimetri registrato attraverso l’asta verticale, t è il valore del tempo totale del test, ricavati con la seguente formula e riferiti rispettivamente all’ i -esima e alla $i+1$ -esima lettura dell’asta graduata.

Inoltre,

$$T_t = DT_0 - DT_i \quad (2.1.2)$$

Dove T_t è il tempo del test, DT_0 è il tempo iniziale del test, DT_i è l'ora di ogni i -esima registrazione. Le misure registrate dopo un riempimento dell'infiltrometro non vengono conteggiate, non avendo significato fisico il calcolo di fc tra la quota di fine ciclo e la prima quota dopo il riempimento dell'anello interno.

A questo punto si può ricavare la curva sperimentale del tasso d'infiltrazione, mettendo in relazione la capacità d'infiltrazione sperimentale fc con il tempo totale T_t in cui è stata misurata. La curva sperimentale d'infiltrazione è quindi composta da una serie di punti, corrispondenti ai valori di capacità d'infiltrazione sperimentali nel tempo e tendenti asintoticamente al valore del tasso d'infiltrazione a saturazione. Tale curva può essere approssimata attraverso i vari modelli d'infiltrazione.

In questo lavoro di tesi si è considerato il valore di capacità di infiltrazione a saturazione di campo, K_{fs} . Per ottenere tale valore a partire dall'analisi di ciascuna curva sperimentale del tasso d'infiltrazione, è stato considerato il valore del tasso di infiltrazione a cui tende la curva.

I valori di K_{fs} così ottenuti per ciascun test sono stati organizzati in una seconda cartella Excel, calcolandone il logaritmo naturale, al fine di sviluppare le successive analisi statistiche e geostatistiche.

2.3 Analisi statistica della conducibilità idraulica a saturazione

L'analisi statistica è stata sviluppata considerando i logaritmi naturali dei valori di K_{fs} ricavati dall'elaborazione dei risultati sperimentali, anche per verificare l'eventuale presenza di valori fuori scala nel campione.

Sono stati calcolati i seguenti principali indici statistici: media, mediana, minimo, massimo, varianza, primo quartile, terzo quartile, range interquartile; in modo da ottenere dei parametri confrontabili nella ricerca sia dei valori centrali, che di quelli estremi.

2.4 Analisi geostatistica della conducibilità idraulica a saturazione

La geostatistica è la branca della statistica che si occupa dell'analisi di dati spaziali (Raspa, 1995). Si occupa di valutare l'autocorrelazione spaziale dei dati, cercando di verificare se osservazioni effettuate in punti vicini presentano effettivamente una maggiore correlazione rispetto ad osservazioni raccolte in punti distanti.

L'obiettivo è quindi valutare come tale autocorrelazione vari in funzione del vettore separazione considerato (quindi distanza e direzione).

La struttura di continuità spaziale viene di solito derivata dai dati mediante l'analisi ed inferenza del variogramma.

Le caratteristiche fondamentali dei dati a struttura spaziale sono le seguenti:

- la non ripetitività, poiché in ogni localizzazione spaziale è possibile disporre soltanto di una osservazione;
- la dipendenza, poiché, in generale, i valori che una caratteristica assume in diverse localizzazioni spaziali sono dipendenti, ovvero localizzazioni spaziali molto vicine sono, solitamente, caratterizzate da valori molto simili, rispetto a valori osservati in localizzazione più distante.

Con riferimento a quest'ultimo aspetto, è opportuno osservare che la Geostatistica, rispetto alla statistica classica, consente di tener conto della dipendenza spaziale tra le osservazioni (Posa, 1995).

Per il nostro caso, utilizzando la geostatistica ai valori di conducibilità idraulica a saturazione ottenuti tramite le prove infiltrometriche, riusciamo ad aggiungere una informazione in più, ossia la posizione spaziale dei valori a disposizione.

Quindi, studiando la K_{fs} insieme alla localizzazione spaziale della caratteristica stessa, riusciamo ad individuare un modello che descrive l'andamento della conducibilità idraulica a saturazione in tutta l'area di studio a partire dai valori sperimentali.

Quindi, con l'analisi geostatistica cerchiamo una correlazione spaziale tra i valori della conducibilità idraulica a saturazione per trovare una stima che descrive i valori della conducibilità idraulica a saturazione nei punti non campionati nell'area di studio.

Il modello stimatore e tutte le analisi geostatistiche sono stati sviluppati usando il codice SGeMS (*Stanford Geostatistics Modeling Software*), un software per la modellazione geostatistica sviluppato dall'università di Stanford.

Nel codice SGeMS il file base di input, in formato GSlib, richiede per ogni test infiltrometrico i valori dei seguenti parametri:

- 1- Codice identificativo della prova (ID).
- 2- Valore dell'ascissa (X).
- 3- Valore dell'ordinata (Y).
- 4- Il logaritmo naturale del valore di K_{fs} ottenuta sperimentalmente.

2.4.1 Rototraslazione delle coordinate dei punti sperimentali e nuovo sistema di riferimento locale

Le coordinate di ogni prova d'infiltrazione sono state estrapolate attraverso un sistema informativo geografico (GIS) sviluppato su piattaforma open-source QGIS, avente come sistema di riferimento di coordinate il sistema *Monte Mario / Italy zone 1 (EPSG:3003)*.

Le coordinate sono state poi rototraslate per sviluppare le analisi geostatistiche con il codice SGeMS. Il software svolge le funzioni di analisi strutturale e di stima puntuale sulla base di una griglia rettangolare definita a priori che può svilupparsi solo lungo le direzioni orizzontale e verticale (non può quindi essere rotata in modo da contenere i punti sperimentali senza lasciare ampie aree senza punti sperimentali).

Individuando l'origine del nuovo sistema di riferimento X_0, Y_0 nel sistema iniziale Monte Mario / Italy zone 1, riusciamo a ricavare attraverso una semplice traslazione, le coordinate delle prove infiltrometriche rispetto alla nuova origine:

$$X_i = (XMM_i) - (X_0) \quad (2.3.1)$$

$$Y_i = (YMM_i) - (Y_0) \quad (2.3.2)$$

dove:

XMM_i, YMM_i : sono le coordinate dell' i -esimo punto riferito al sistema Monte Mario Italy 1.

X_i, Y_i : i nuovi valori delle coordinate traslate con centro X_0 e Y_0 .

La rotazione dei punti, secondo l'angolo α in senso orario, si ottiene tramite le seguenti relazioni:

$$X_{RT} = X_i \cdot \cos(\alpha) - Y_i \cdot \sin(\alpha). \quad (2.3.3)$$

$$Y_{RT} = X_i \cdot \sin(\alpha) + Y_i \cdot \cos(\alpha). \quad (2.3.4)$$

dove:

X_{RT} e Y_{RT} sono le nuove coordinate dei punti

2.4.2 Ipotesi di stazionarietà

Un processo stazionario è un processo stocastico in cui la funzione di densità di probabilità di una qualche variabile casuale Z non cambia né nel tempo né nello spazio (Cressie, 1993).

Quindi anche i parametri media e varianza non cambiano nel tempo e nello spazio, di conseguenza la distribuzione del processo casuale mantiene gli stessi attributi ovunque.

$$Z(X) = Y(X) + m(X) \quad (2.3.5)$$

Dove:

Z : è il variabile per ogni punto X .

$Y(X)$: La deviazione dalla media del valore misurato.

$m(X)$: il valore medio della variabile in funzione della localizzazione in cui la variabile è stata misurata.

2.4.3 Semivariogramma sperimentale

Il semivariogramma è un algoritmo geostatistico che viene impiegato per valutare l'autocorrelazione spaziale di dati osservati sulla base della loro posizione geografica .

La funzione semivariogramma che interpola la semi-varianza dei valori osservati in gruppi di coppie di punti a determinate distanze (lag) secondo una certa direzione, è data da:

$$\gamma(h) = \frac{1}{m(h)} \sum_{i=1}^{m(h)} (Z(x_i + h) - Z(x_i))^2 \quad (2.3.6)$$

dove:

Z : il valore di una misura in un particolare punto.

h : intervallo di distanza tra punti di misurazione (lag).

$m(h)$: il numero di coppie di osservazioni effettuate alla distanza h .

I parametri richiesti per lo sviluppo del variogramma sperimentale (Figura 2.6) sono; la *lag separation*, cioè la distanza h tra i vari punti che definiscono la coppia di calcolo, la *number of lags*, un coefficiente moltiplicativo che specifica il numero di volte che si deve moltiplicare la *lag separation* prima di terminare la ricerca, secondo l'equazione $hi=i h$, dove h è la *lag separation*, $i=1, \dots, nl$ è il coefficiente moltiplicativo che va da uno al *number of lags*, ed hi è la distanza di ricerca per ogni i -esimo moltiplicatore

Inoltre, vanno esplicitate la *lag tolerance*, ossia tolleranza rispetto il valore puntuale previsto dalla *lag separation*, la *angle tolerance*, cioè la tolleranza angolare per la definizione dell'area di ricerca, e la *bandwidth*, una distanza ortogonale rispetto la direzione angolare scelta.

Oltre il valore del modulo della distanza h , è necessario specificare l'angolo polare di ricerca, ossia la direzione nella quale ricercare le coppie di punti aventi come distanza il modulo prescelto (*lag separation*).

Questo tipo di variogramma viene definito Direzionale, avendo imposto una direzione di ricerca delle coppie di punti.

In alcune situazioni è utile sviluppare un variogramma, definito come Omnidirezionale (isotropo), in cui non si impone una direzione di ricerca, ma si vanno a ricercare tutte le coppie di valori presenti che rispettano i criteri di ricerca sopra definiti.

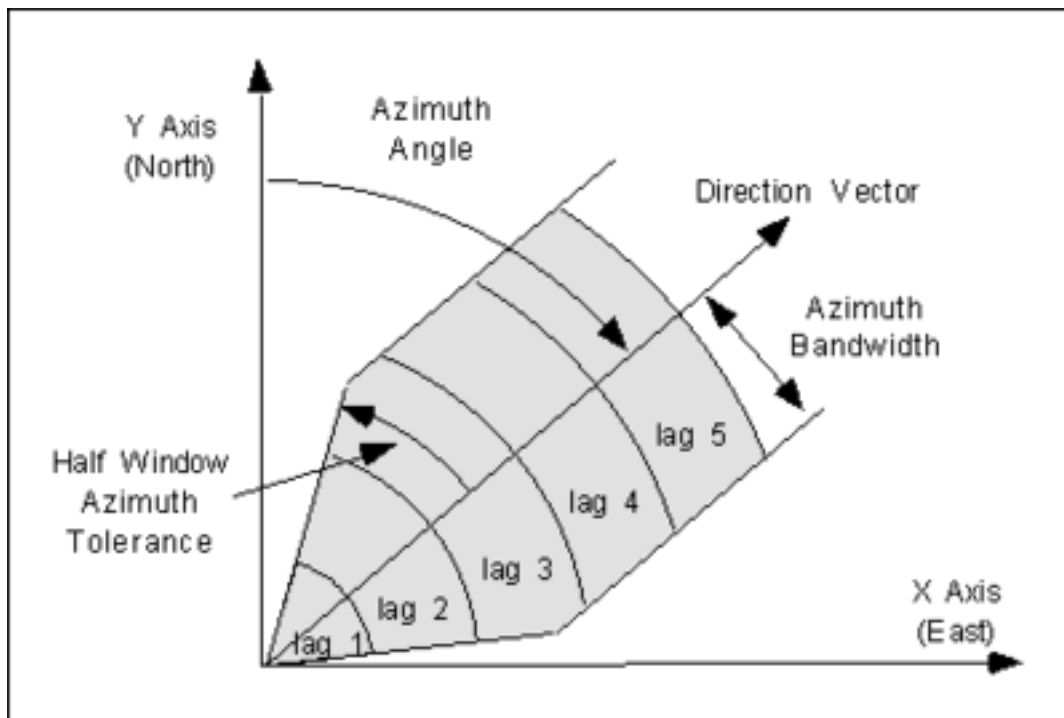


Figura 2.6: Descrizione grafica dei parametri per la determinazione del variogramma.

Una volta sviluppato il variogramma sperimentale, si può immaginare una funzione che meglio approssimi i suoi punti (in inglese *fitting*), ma il problema è capire quanto questa curva seguirà i dati sperimentali.

Per sviluppare un buon fitting del variogramma sperimentale è necessario dunque porre attenzione sull'andamento di tutto il campione di dati.

Esistono vari tipi di modelli per l'approssimazione dei variogrammi sperimentali:

- 1- Il modello gaussiano
- 2- Il modello sferico
- 3- Il modello esponenziale
- 4- Il modello lineare

In questi modelli, i parametri sono:

- 1- Nugget: descrive il livello di variabilità casuale.
- 2- Sill: Valore massimo della semi-varianza.
- 3- Range: La distanza massima entro la quale si manifesta correlazione tra semivarianza e lag.

In questo lavoro di tesi è stato adottato il modello sferico, definito dalle seguenti equazioni:

$$\gamma(h) = c \left[1.5 \frac{r}{a} - 0.5 \frac{r^3}{a^3} \right] \quad r = |h| \leq a \quad (2.3.7)$$

$$\gamma(h) = c \quad r = |h| \geq a \quad (2.3.8)$$

nelle quali a e c sono i parametri del modello e rappresentano rispettivamente il range ed il Sill. Il comportamento nell'origine è lineare con una pendenza pari a $1.5 c/a$.

I modelli di variogramma consentono di individuare la possibile anti-correlazione spaziale tra i valori di K_{fs} , consentendo di conseguenza lo sviluppo di un metodo di stima puntuale.

2.4.4 Il Kriging ordinario (Ordinary Kriging)

Il Kriging è un metodo di regressione usato nell'ambito dell'analisi spaziale (geostatistica) che permette di interpolare una grandezza nello spazio, minimizzando l'errore quadratico medio.

Il Kriging ordinario può lavorare solo con variabili stazionarie del secondo ordine (presentano, cioè, media costante e varianza dipendente solo dal lag muovendosi da punto a punto).

Si definisce stimatore lineare di $Z(\mathbf{u})$, una qualsiasi combinazione lineare $Z^*(\mathbf{u})$ delle variabili aleatorie $Z(\mathbf{u}_i)$, con coefficienti reali $\lambda_i(\mathbf{u})$, i da 1, ..., n , del tipo:

$$Z^*(\mathbf{u}) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(\mathbf{u}) Z(\mathbf{u}_i) \quad (2.3.9)$$

I valori $\lambda_i(\mathbf{u})$ rappresentano i pesi da attribuire ai dati campionari, allo scopo di fornire una valutazione appropriata della variabile $Z(\mathbf{u})$ in corrispondenza della localizzazione spaziale \mathbf{u} (Posa, 2009).

Si va quindi a stimare una realizzazione della variabile aleatoria in una localizzazione spaziale precisa, attraverso una combinazione lineare pesata dei valori campionati più vicini, assumendo che il valore campionato sia una delle realizzazioni della funzione aleatoria.

Si parla di Kriging ordinario quando si sviluppano le equazioni del metodo di stima puntuale in un campo aleatorio supposto stazionario, come si è ipotizzato per il sito di studio.

Lo stimatore Kriging (ordinario), sviluppa una serie di equazioni in grado di calcolare nel modo migliore i pesi $\lambda_i(\mathbf{u})$, soddisfacendo le proprietà di correttezza ed efficienza definite da Matheron.

Ogni peso $\lambda_i(\mathbf{u})$ viene scelto in modo che lo stimatore sia ottimale e non distorto. Uno stimatore è ottimale quando si minimizza la varianza dell'errore

$$Var[R(\mathbf{u})]=Var[Z(\mathbf{u})-Z(\mathbf{u})]=\text{minimo}, \quad (2.3.10)$$

mentre la non distorsione si ottiene imponendo la speranza matematica nulla

$$E[R(\mathbf{u})]=E[Z(\mathbf{u})-Z(\mathbf{u})]=0 \quad (\text{Isaaks e Srivastava, 1989}). \quad (2.3.11)$$

Nella pratica reale non si utilizzano tutti i valori puntuali campionari a disposizione, ma si definiscono delle aree di ricerca in funzione della disposizione dei dati nello spazio.

Nel caso dell'area di Settolo, si è scelti una circonferenza di raggio di 60 metri.

Il metodo del Kriging viene applicato ai punti con valori noti di K_{fs} attraverso il programma SGeMS, il quale a partire dal modello di variogramma definito per ogni area determinata, sviluppa il Kriging ordinario per pixel di dimensione 1 metro per 1 metro.

Nel nostro caso, in SGeMS è stato utilizzato il logaritmo naturale dei valori di K_{fs} per rendere più maneggevoli le analisi geostatistiche.

2.4.5 Validazione incrociata (Cross-Validation)

La cross-validation è una procedura per cui iterativamente ogni punto del campione viene escluso dal dataset usato per l'interpolazione e stimato, utilizzando il modello di variogramma che si vuole testare. Se il modello di K_{fs} determinato attraverso il Kriging è solido, eliminando a turno un i -esimo dato campionario, e svolgendo nuovamente il Kriging, si dovrà ottenere una stima molto vicina al valore puntuale precedentemente campionato ed eliminato per la prova di solidità.

Dopo aver sviluppato la procedura di Cross-validation sul campione, è stato possibile calcolare il coefficiente di correlazione, mettendo a confronto i valori misurati e i valori stimati. La stima è tanto più efficiente, e quindi il modello risulta essere solido, tanto più il coefficiente di correlazione è prossimo al valore 1.

La procedura di cross-validation sui dati è stata automatizzata tramite uno script di istruzioni per il codice SGeMS. Per ciascun punto il Kriging ordinario è stato sviluppato all'interno della griglia rettangolare contenente il campione sulla base dei rimanenti $n-1$ punti, in relazione a tutte le n combinazioni di valori di K_{fs} . Il coefficiente di correlazione è stato poi calcolato analizzando tutti i risultati della cross-validation attraverso uno script sviluppato in ambiente Matlab.

Considerando tutti i 100 punti determinati nell'area di studio e con l'aiuto di due script in modo da automatizzare la procedura del Cross-Validation, riusciamo a fare le stime puntuali rimuovendo ogni posizione dei dati una alla volta e leggere il valore logaritmico di K_{fs} stimato.

Capitolo 3. Risultati e Discussione

Nel capitolo corrente si illustrano i risultati ottenuti attraverso l'analisi dei dati raccolti durante le prove infiltrometriche, a partire quindi dalla curva del tasso d'infiltrazione e la conducibilità idraulica a saturazione di campo trovate per ogni prova effettuata.

Dai valori di capacità d'infiltrazione sono state sviluppate l'analisi statistica (analisi univariata) e l'analisi geostatistica.

L'efficacia dell'analisi geostatistica è stata verificata validando il modello di stima sviluppato (Ordinary Kriging) tramite validazione incrociata.

3.1 Risultati delle prove infiltrometriche

Consideriamo come esempio la prova d'infiltrazione numero 10282, svolta in data 28/10/2022. In Tabella 3.1 è possibile osservare la trascrizione ordinata dei dati grezzi, ottenuti usando una macchina fotografica settata per acquisire immagini ad intervalli regolari. I primi istanti della prova (2-3 minuti), essendo di norma caratterizzati da un tasso d'infiltrazione più elevato, sono registrati con un video dal quale sono estratti i fotogrammi significativi.

Tabella 3.1: *Dati grezzi test numero 10282, la prima colonna indica il nome della foto scattata dalla fotocamera, la seconda colonna indica l'ora in cui è avvenuta la registrazione, la terza colonna contiene il valore letto nell'asta graduata in cm, il quale è direttamente correlato alla quota del tirante idrico nell'anello interno dell'infiltrometro.*

Name	Time	Level
YDXJ0027.mp4	12:02:28	261,5
YDXJ0027.mp4	12:02:58	261,7
YDXJ0027.mp4	12:03:28	261,8
YDXJ0027.mp4	12:03:58	261,9
YDXJ0027.mp4	12:04:28	262
Y0680028.jpg	12:04:42	262,1
Y0680033.jpg	12:09:42	262,6
Y0680038.jpg	12:14:42	262,95
Y0680043.jpg	12:19:42	259,6
Y0680048.jpg	12:24:42	259,9
Y0680053.jpg	12:29:42	260,2
Y0680058.jpg	12:34:42	260,4

Name	Time	Level
Y0680108.jpg	13:24:42	261,7
Y0680113.jpg	13:29:42	261,8
Y0680118.jpg	13:34:42	261,9
Y0680123.jpg	13:39:42	262,05
Y0680128.jpg	13:44:42	262,1
Y0680133.jpg	13:49:42	262,2
Y0680138.jpg	13:54:42	259
Y0680143.jpg	13:59:42	259,1
Y0680148.jpg	14:04:42	259,2
Y0680153.jpg	14:09:42	259,3
Y0680158.jpg	14:14:42	259,4
Y0680163.jpg	14:19:42	259,5

Y0680063.jpg	12:39:42	260,6
Y0680068.jpg	12:44:42	260,8
Y0680073.jpg	12:49:42	260,95
Y0680078.jpg	12:54:42	261,1
Y0680083.jpg	12:59:42	261,2
Y0680088.jpg	13:04:42	261,3
Y0680093.jpg	13:09:42	261,4
Y0680098.jpg	13:14:42	261,5
Y0680103.jpg	13:19:42	261,6

Y0680168.jpg	14:24:42	259,6
Y0680173.jpg	14:29:42	259,7
Y0680178.jpg	14:34:42	259,75
Y0680183.jpg	14:39:42	259,8
Y0680188.jpg	14:44:42	259,9
Y0680193.jpg	14:49:42	260
Y0680198.jpg	14:54:42	260,05
Y0680203.jpg	14:59:42	260,1
Y0680208.jpg	15:04:42	260,2

A partire dai valori di altezza dell'asta graduata e del tempo del test si è determinata la capacità d'infiltrazione campionaria istantanea, attraverso l'equazione (2.1.1).

Tabella 3.2: valori calcolati dai dati campionari del test numero 10282, nella prima colonna si ha il codice cicli di riempimento, nella seconda colonna sono presenti i valori del tirante idrico nell'anello più piccolo, nella terza colonna si hanno i valori del tempo totale espressi in secondi, nella quarta colonna sono calcolati i valori di capacità d'infiltrazione sperimentale in metri al secondo.

Codice cicli	Tirante idrico [cm]	Tempo totale [sec]	Capacità d'infiltrazione Campionaria [m/s]
t1	8,3	44	
	8,1	74	6,7E-05
	8	104	3,3E-05
	7,9	134	3,3E-05
	7,8	164	3,3E-05
	7,7	178	7,1E-05
	7,2	478	1,7E-05
	6,85	778	1,2E-05
t2	10,2	1078	
	9,9	1378	1E-05
	9,6	1678	1E-05
	9,4	1978	6,7E-06
	9,2	2278	6,7E-06
	9	2578	6,7E-06
	8,85	2878	5E-06
	8,7	3178	5E-06
	8,6	3478	3,3E-06
	8,5	3778	3,3E-06
	8,4	4078	3,3E-06
	8,3	4378	3,3E-06
	8,2	4678	3,3E-06
	8,1	4978	3,3E-06

	8	5278	3,3E-06
	7,9	5578	3,3E-06
	7,75	5878	5E-06
	7,7	6178	1,7E-06
	7,6	6478	3,3E-06
t3	10,8	6778	
	10,7	7078	3,3E-06
	10,6	7378	3,3E-06
	10,5	7678	3,3E-06
	10,4	7978	3,3E-06
	10,3	8278	3,3E-06
	10,2	8578	3,3E-06
	10,1	8878	3,3E-06
	10,05	9178	1,7E-06
	10	9478	1,7E-06
	9,9	9778	3,3E-06
	9,8	10078	3,3E-06
	9,75	10378	1,7E-06
	9,7	10678	1,7E-06
9,6	10978	3,3E-06	

Mettendo in relazione la capacità d'infiltrazione campionaria, espressa in metri al secondo, con il tempo associato ad ogni valore, si ottiene la curva sperimentale d'infiltrazione riportata in Figura 3.1.

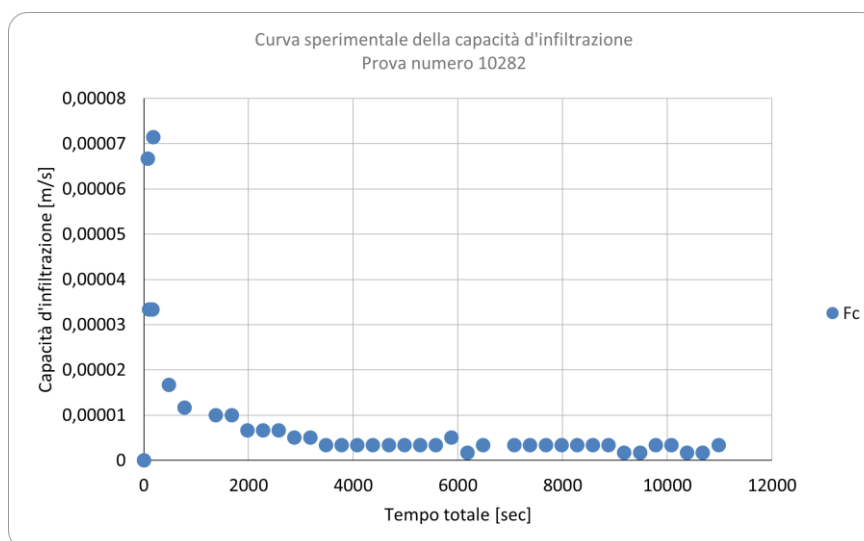


Figura 3.1: Esempio di curva sperimentale della capacità di infiltrazione f_c ottenuta con la prova infiltrometrica numero 10282.

La curva sperimentale del tasso d'infiltrazione tende ad un valore asintotico pari alla capacità di infiltrazione a saturazione di campo, corrispondente alla condizione in cui tutto il primo strato di terreno sottostante l'infiltrometro si è saturato.

Ottenute le curve sperimentali, è possibile quindi identificare il valore a cui tende la curva sperimentale come il valore della capacità idraulica a saturazione di campo (Tabella 3.3).

La tabella rappresenta il punto di partenza di tutte le analisi statistiche e geostatistiche svolte nei paragrafi successivi, contenendo i valori di conducibilità idraulica a saturazione K_{fs} per ogni posizione in cui è stata svolta la prova infiltrometrica.

Tabella 3.3: Valori finali; nella prima colonna si specificano i codici identificativi delle prove, nella seconda colonna si ha il valore della conducibilità idraulica a saturazione f_c , nella terza colonna viene esplicitato il logaritmo naturale della conducibilità idraulica a saturazione.

Codice test identificativo	Conducibilità idraulica A saturazione [m/s]	Logaritmo naturale Conducibilità idraulica a saturazione	Codice test identificativo	Conducibilità idraulica A saturazione [m/s]	Logaritmo naturale Conducibilità idraulica a saturazione
1	3,33E-05	-10,31	7273	2,04E-05	-10,80
101	2,67E-05	-10,53	7274	2,41E-05	-10,63
2	1,89E-05	-10,87	7275	6,67E-05	-9,62
102	2,69E-05	-10,52	7276	2,50E-05	-10,60
103	2,67E-05	-10,53	8041	6,67E-06	-11,92
4	9,28E-06	-11,59	8042	2,55E-06	-12,88
104	5,34E-06	-12,14	8043	2,78E-06	-12,79
5	5,23E-05	-9,86	8044	8,33E-06	-11,70
105	1,72E-05	-10,97	8045	2,50E-05	-10,60
6	8,58E-07	-13,97	8046	8,33E-06	-11,70
106	1,20E-06	-13,63	8051	1,25E-05	-11,29
7	2,61E-05	-10,55	8052	5,00E-06	-12,21
107	1,00E-04	-9,21	8053	8,33E-06	-11,70
8	1,98E-05	-10,83	8054	8,33E-06	-11,70
108	3,25E-06	-12,64	8055	8,33E-06	-11,70
109	2,22E-06	-13,02	8056	1,67E-05	-11,00
10	1,85E-05	-10,90	10191	4,17E-06	-12,39
110	3,02E-06	-12,71	10192	5,00E-05	-9,90
11	8,33E-06	-11,70	10193	4,17E-06	-12,39
1010	1,67E-05	-11,00	10194	2,33E-06	-12,97
111	8,33E-05	-9,39	10195	1,67E-06	-13,30
112	1,31E-05	-11,24	10196	2,78E-06	-12,79
0	2,50E-06	-12,90	10201	8,33E-06	-11,70
113	8,33E-05	-9,39	10202	1,19E-05	-11,34
14	5,79E-06	-12,06	10203	8,33E-06	-11,70
114	4,40E-05	-10,03	10204	1,67E-06	-13,30
15	4,17E-05	-10,09	10205	2,08E-05	-10,78
115	8,70E-05	-9,35	10206	6,67E-06	-11,92
116	1,33E-04	-8,92	10261	1,67E-06	-13,30
180	3,82E-05	-10,17	10262	3,33E-06	-12,61

18	1,21E-04	-9,02
19	3,27E-07	-14,93
20	1,77E-05	-10,94
7221	6,02E-06	-12,02
7222	4,36E-05	-10,04
7223	3,33E-05	-10,31
7251	2,00E-05	-10,82
7252	1,67E-05	-11,00
7253	1,56E-06	-13,37
7254	8,33E-07	-14,00
7255	5,83E-06	-12,05
7256	4,76E-06	-12,26
7261	5,00E-05	-9,90
7262	4,17E-06	-12,39
7263	8,33E-05	-9,39
7264	2,50E-05	-10,60
7266	2,78E-06	-12,79
7271	5,56E-06	-12,10
7272	2,50E-05	-10,60

10263	7,62E-06	-11,78
10264	4,46E-06	-12,32
10266	4,63E-06	-12,28
10271	9,49E-06	-11,57
10272	2,16E-06	-13,05
10273	1,88E-06	-13,18
10274	7,50E-05	-9,50
10275	4,17E-05	-10,09
10276	6,85E-05	-9,59
10281	7,41E-06	-11,81
10282	1,67E-06	-13,30
10283	3,33E-06	-12,61
11091	4,44E-05	-10,02
11092	1,22E-04	-9,01
11093	2,08E-06	-13,08
11021	5,00E-05	-9,90
11022	2,96E-05	-10,43
11023	4,17E-05	-10,09
11024	5,56E-06	-12,10
11025	2,08E-06	-13,08

Si è adoperata la rototraslazione del sistema di riferimento, costruendo un sistema di riferimento cartesiano locale, con origine pari a (1730987.67, 5085592.53), identificato come $(X0, Y0)$, e una rotazione oraria di un angolo α pari a 35.53 radianti, dove i risultati si vedono nella Figura. 3.2.

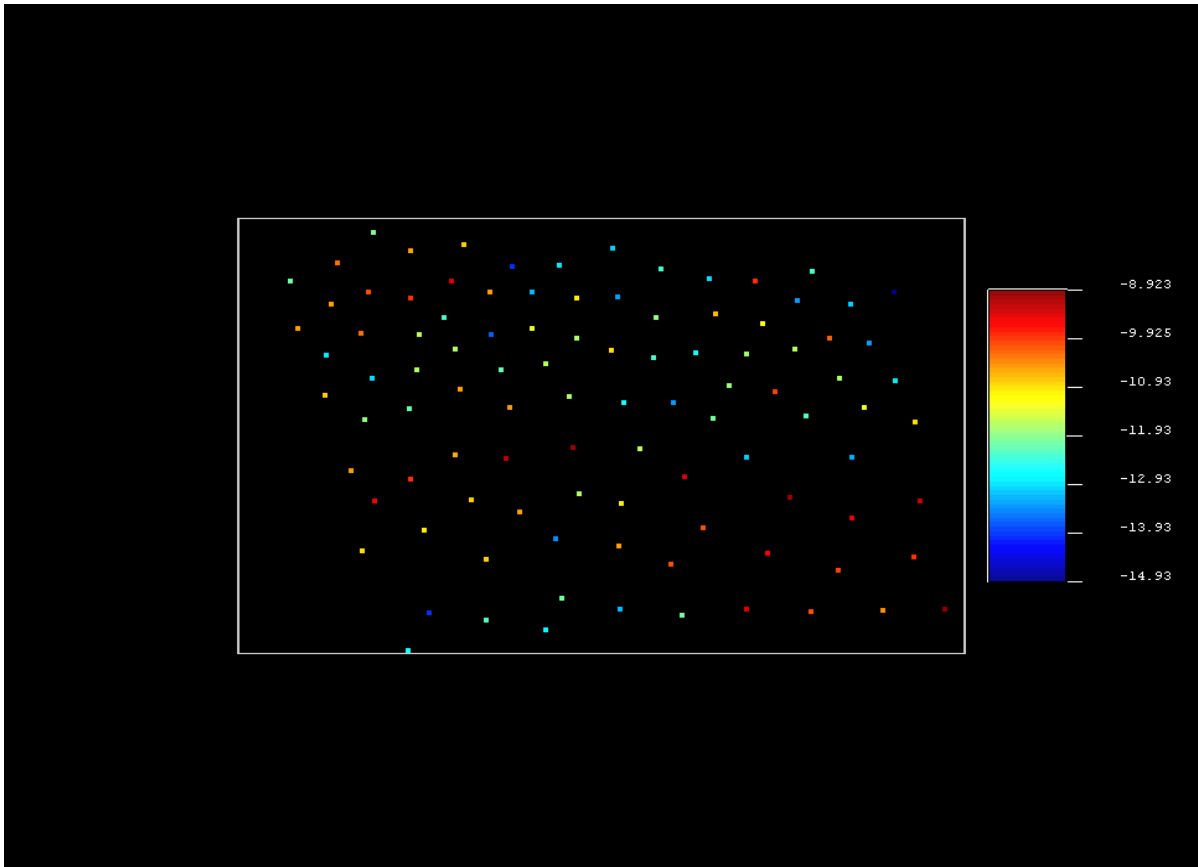


Figura 3.2: prove infiltrometriche con coordinate rototraslate nel sistema di riferimento locale.

I valori di K_{fs} sono in scala logaritmica in base naturale.

In Tabella A.1 in appendice sono riportate le coordinate delle prove infiltrometriche relative al sistema di riferimento Monte Mario Italy 1, e le coordinate relative al sistema di riferimento locale nuovo ($X0, Y0$).

3.2 Risultati delle analisi statistica

Svolgendo l'analisi dei dati su tutti i valori di K_{fs} , è possibile notare dall'istogramma che i valori della K_{fs} espressi in m/s, sono spostati a sinistra (*Positively skewed*) Figura 3.3, con una elevata frequenza per bassi valori di K_{fs} .

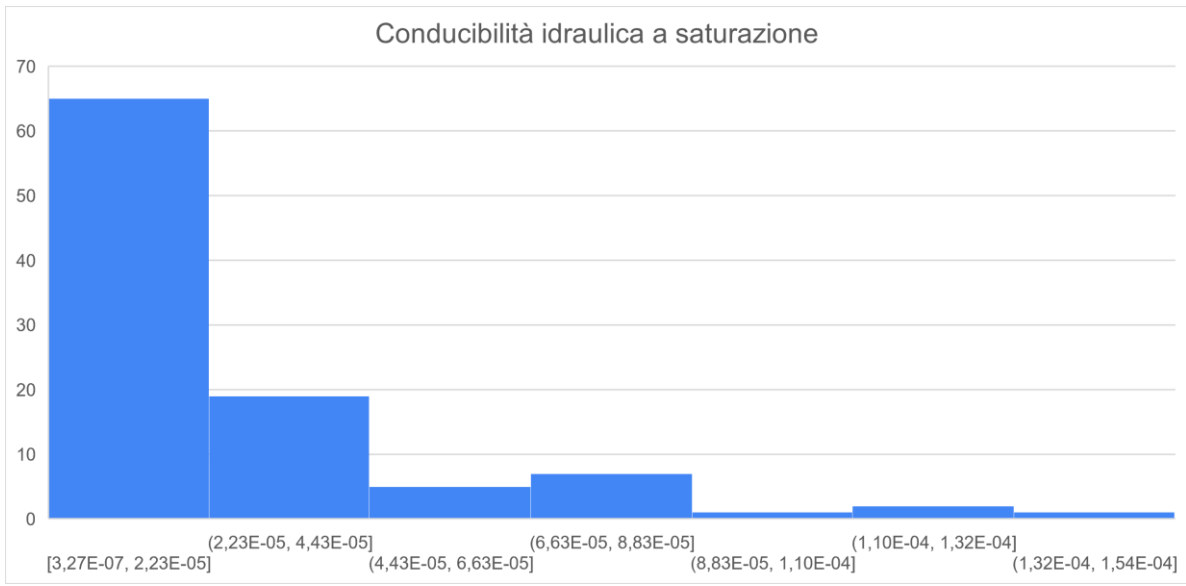


Figura 3.3: istogramma conducibilità idraulica a saturazione K_{fs} suddiviso in sette classi.

Per avere una miglior visualizzazione dei risultati l'analisi statistica univariata e le successive analisi geostatistiche sono sviluppate considerando il logaritmo naturale di K_{fs} .

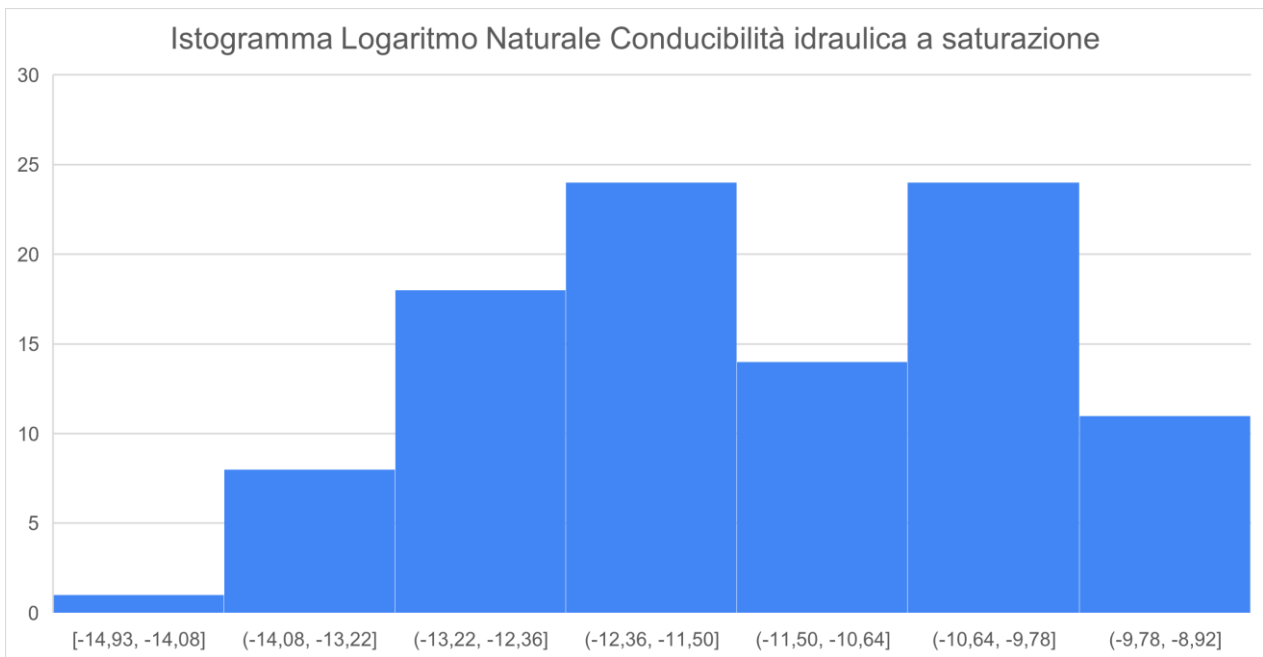


Figura 3.4: istogramma logaritmo naturale conducibilità idraulica a saturazione K_{fs} per tutto il sito sperimentale suddiviso in sette classi.

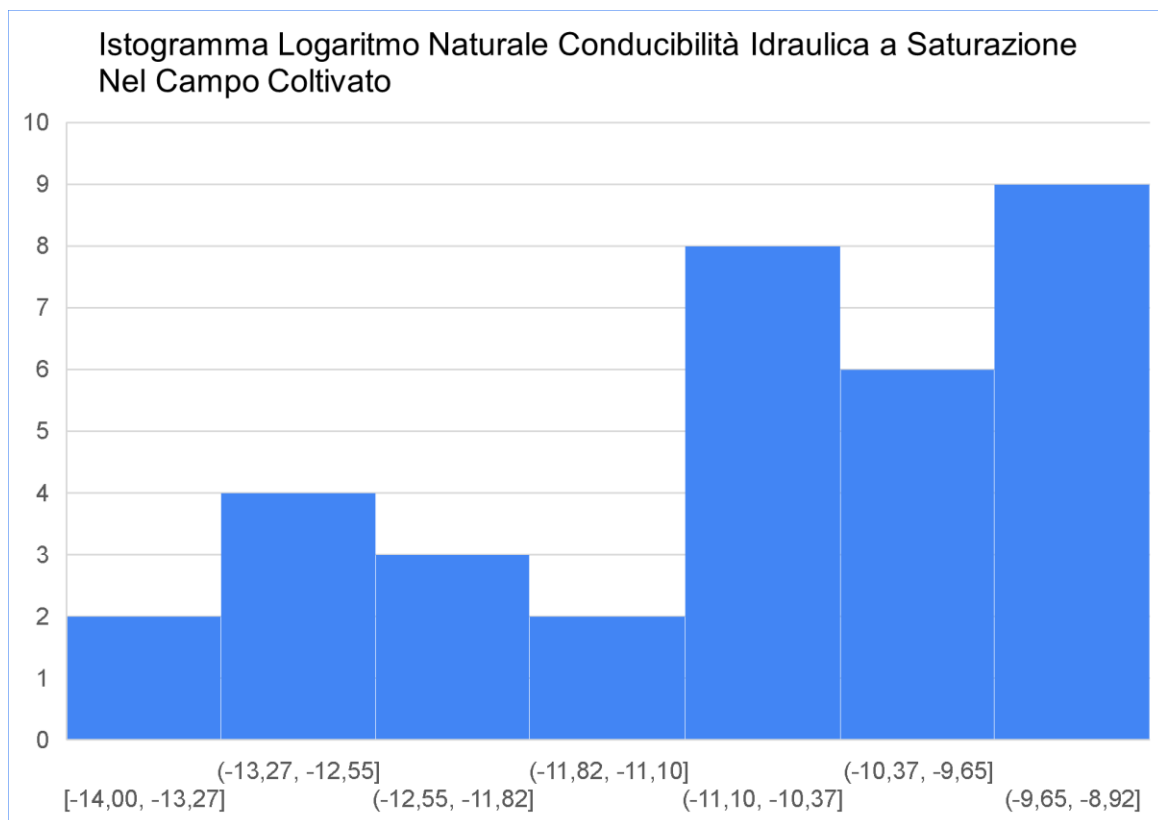


Figura 3.5: istogramma logaritmo naturale conducibilità idraulica a saturazione K_{fs} nei campi coltivati (vigneti).

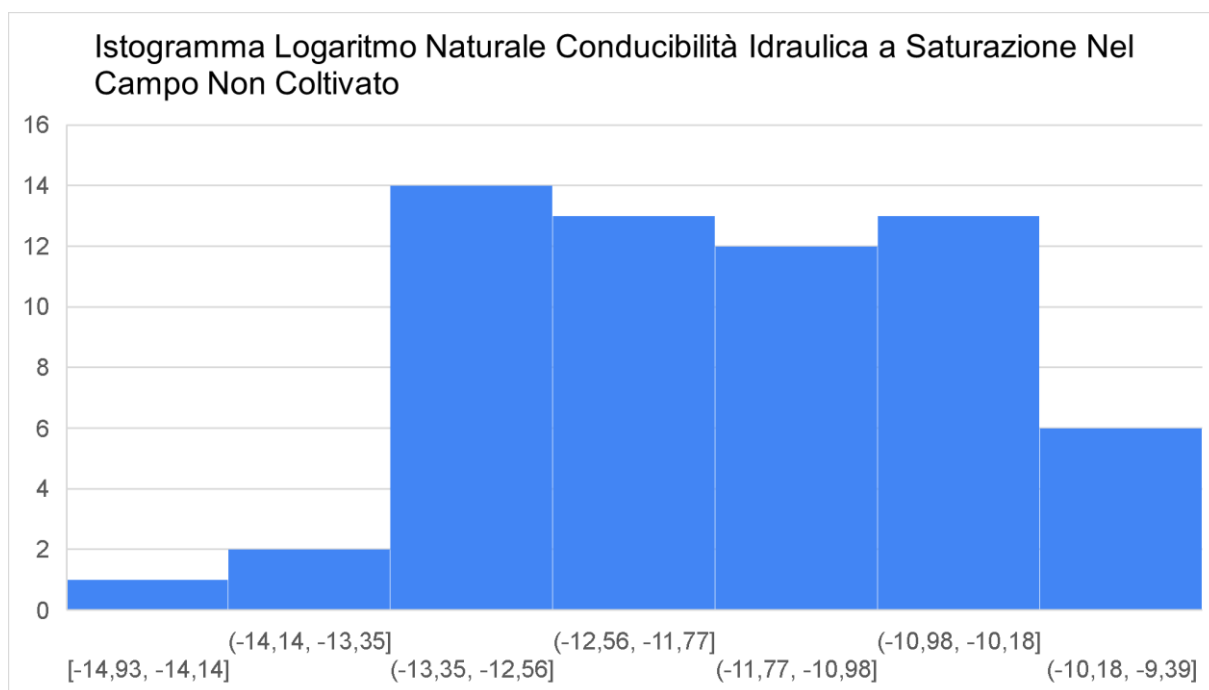


Figura 3.6: istogramma logaritmo naturale conducibilità idraulica a saturazione K_{fs} nel campo non coltivato.

La media aritmetica non appartiene al range di valori che restituisce la colonna con frequenza assoluta maggiore (Tabella 3.4). Tale condizione sottolinea come la media aritmetica in questo insieme di dati sia poco rappresentativa a livello statistico, a causa di una serie di valori estremanti, che ne influenzano il calcolo.

Tabella 3.4: *indici statistici necessari per l'analisi descrittiva dei dati di K_{fs} .*

Media	Varianza	Minimo	Massimo	Mediana	Primo quartile	Terzo quartile	Range interquartile
2,34E-05	8,44E-10	3,27E-07	1,33E-04	9,39E-06	4,17E-06	2,76E-05	2,34E-05

Allo stesso modo, anche confrontando il valore della mediana e della media, si nota come la mediana sia inferiore della media aritmetica, denotando la tipica situazione distribuzione di dati asimmetrica a destra (Figura. 3.3).

La situazione risulta essere molto differente osservando i valori interquartili; infatti, il primo interquartile ha un ordine di grandezza superiore rispetto al valore minimo di K_{fs} , viceversa, il terzo quartile ha un ordine di grandezza inferiore rispetto il valore massimo dei dati a disposizione, riducendo in questo modo la variabilità tra dati (Figura. 3.5).

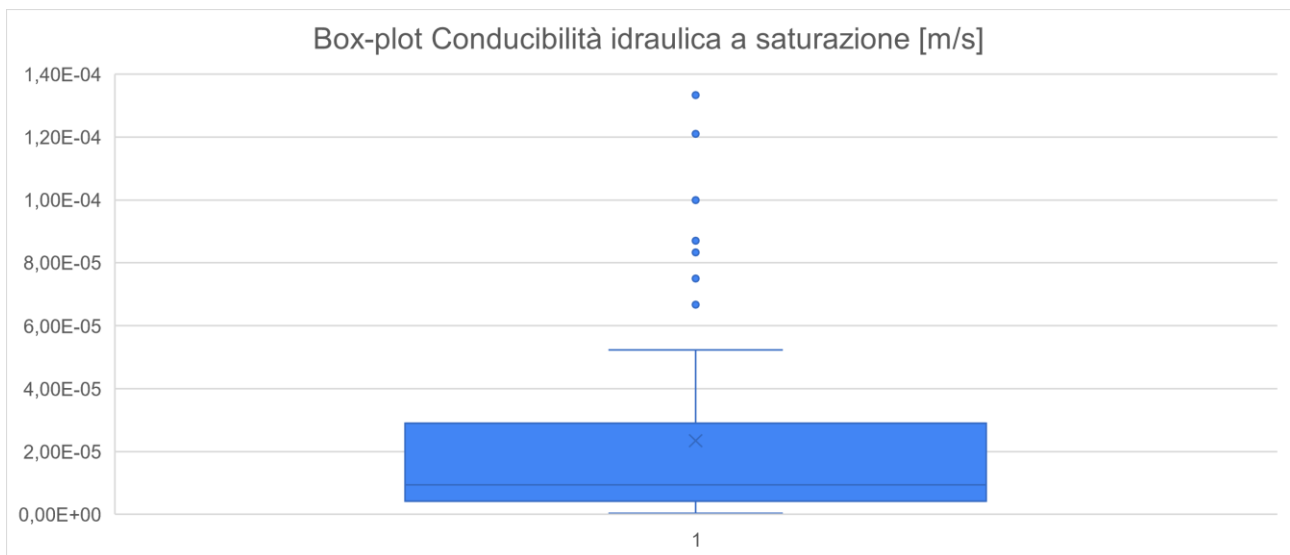


Figura 3.7: *Box-plot dei valori di K_{fs} .*

3.3 Risultati delle analisi geostatistica

Con l'analisi geostatistica si considera la posizione spaziale delle prove infiltrometriche, ricercando eventuali correlazioni spaziali, e cercando un modello per stimare il comportamento di K_{fs} nei punti non campionati.

Il modello sviluppato è calibrato considerando i variogrammi sperimentali omni-direzionale e considerando gli assi principali lungo le direzioni 0° e 90° (anisotropo). Il risultato è confrontato con il modello calibrato sul solo variogramma sperimentale omni-direzionale (Costa & Salandin, 2022). Le differenze tra i risultati ottenuti dai due modelli sono analizzate e discusse nei seguenti paragrafi.

3.3.2 Variogrammi sperimentali

Tre variogrammi sperimentali, necessari per la successiva calibrazione dei due modelli di stima testati, sono stati sviluppati sulla base dei dati raccolti sul campo. I parametri del codice SGeMS per la ricerca dei valori di varianza in funzione della distanza tra le posizioni dei test sono riportati in Tabella 3.6. I risultati dello sviluppo dei variogrammi sperimentali sono riportati in Figura 3.6.

Tabella 3.6: *parametri comuni per la definizione dei variogrammi sperimentali così come definiti al paragrafo 2.3.3.*

Lag separation	Number of lags	Lag tolerance	Angle tolerance	Bandwidth
4.55	40	4.55	15	10

La *lag separation* è stata impostata inferiore a 5 metri, per tenere conto delle distanze tra i punti di misura scelti nel campo non coltivato (ATS).

Per il calcolo dei variogrammi diversi da quello omnidirezionale, gli angoli polari di ricerca delle coppie sono i seguenti:

- Azimuth 0° , indica la direzione verticale (Nord-Sud) rispetto al sistema di riferimento rototraslato.
- Azimuth 90° , indica la direzione orizzontale rispetto al sistema di riferimento rototraslato.

3.3.3 Modellazione dei Variogrammi Sperimentali

Dopo lo sviluppo dei 3 variogrammi sperimentali sulla base dei risultati ottenuti dalle prove infiltrometriche (Figura 3.6) , si è sviluppato il confronto tra i seguenti due modelli.

3.3.3.1 Caratteristiche del modello 1

Il modello 1 consiste nel modello di variogramma calibrato da Costa & Salandin, 2022 sulla base del variogramma sperimentale omni-direzionale

Il modello è di tipo Sferico e i parametri calibrati sono riportati in Tabella 3.7.

Tabella 3.7: Parametri del modello 1 calibrato da Costa & Salandin, 2022.

Modello	Nugget effect	Sill Contribution	Range			Angles		
			Max	Med	Min	X	Y	Z
1	0,7852	0,9535	47,3	47,3	0	0	0	0

3.3.2.2 Calibrazione del modello 2

Il modello 2 consiste nel modello di variogramma di tipo Sferico calibrato sulla base dei variogrammi sperimentali omni – direzionale e lungo le direzioni aventi angoli 0° e 90°.

La calibrazione è stata sviluppata testando 12 configurazioni i cui parametri sono riportati in Tabella 3.8.

A titolo di esempio, si riporta in Figura 3.6 il risultato della calibrazione del modello 2 nella configurazione 2.A, ottenuta impostando:

- Nugget effect pari a 0.6
- Sill contribution pari a 1.1
- Range massimo pari a 30 m
- Range medio pari a 20 m
- Range minimo pari a 0 m
- La direzione del massimo range pari a 60°

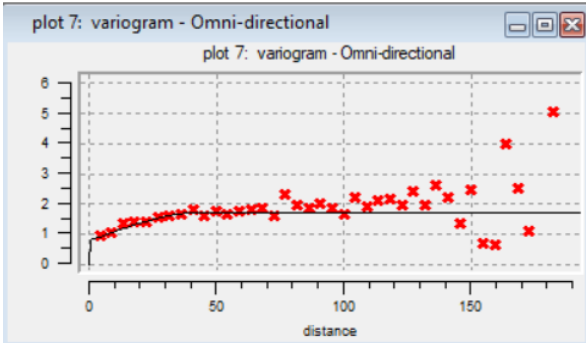
Gli altri angoli saranno pari a zero perché abbiamo una sorta di anisotropia verticale.

La direzione di maggior continuità sembra essere la direzione 0 gradi

Tabella 3.7: Parametri per la calibrazione del modello 2.

Modello	Nugget effect	Sill Contribution	Range			Angles		
			Max	Med	Min	X	Y	Z
2.A	0,6	1,1	30	20	0	60	0	0
2.B	0,65	1,15	50	35	17	45	0	0
2.C	0,75	0,8	40	33,5	20	0	0	0
2.D	0,7	1	35	25	15	30	0	0
2.E	0,85	1,05	48,4	48,4	0	0	0	0
2.F	0,8	0,9	36,4	32,67	0	0	0	0
2.G	0,73	0,88	32,85	30,5	0	0	0	0
2.H	0,78	0,93	27,3	27,3	0	0	0	0
2.I	0,82	0,98	48	48	0	0	0	0
2.J	0,77	0,95	42	33	0	0	0	0
2.K	0,8	0,95	37	37	0	0	0	0
2.L	0,79	0,9	30	30	0	0	0	0

Modello variogramma 1
Grafici a, b,c



Modello variogramma 2.A
Grafici d, e,f

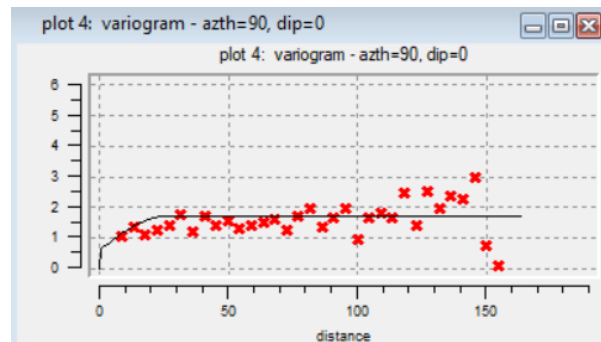
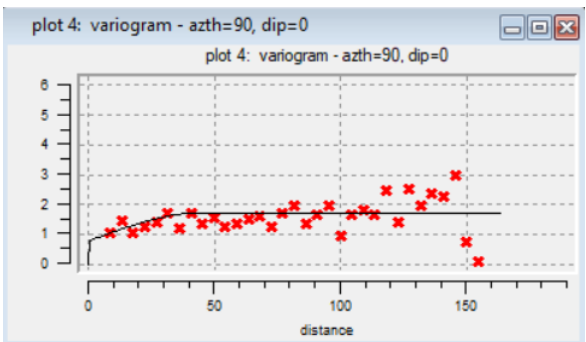
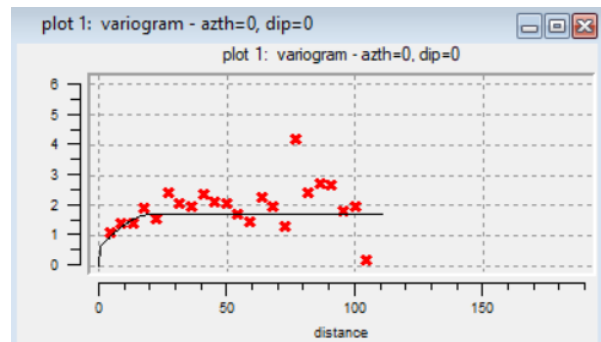
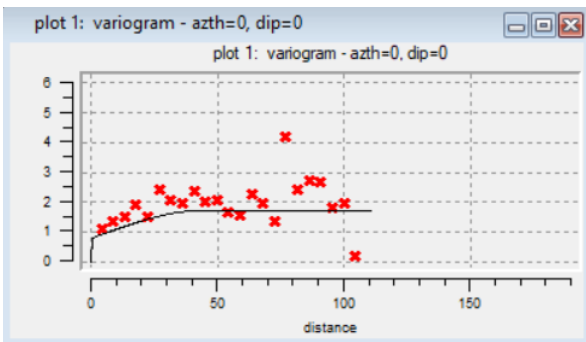
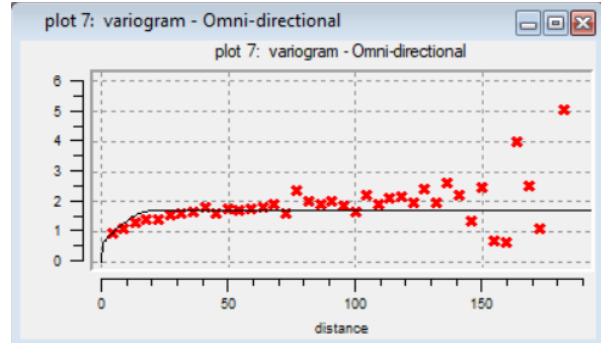


Figura 3.6: Variogrammi sperimentali (punti in rosso) e risultati della calibrazione (linea continua nera) per il modello 1 e per il modello 2 nella configurazione 2A.

3.3.3 Risultati del Kriging ordinario

Svolgendo il Kriging ordinario nell'area di studio, utilizzando rispettivamente il modello variogramma 1 e il modello variogramma 2, si ottengono i due modelli di stima per il logaritmo naturale di K_{fs} .

In entrambi i modelli di stima si osserva una forte alternanza tra zone con K_{fs} relativamente bassa (corrispondente al colore blu nella scala dei colori in legenda) e zone con K_{fs} maggiore (colore tendente al rosso).

Il Kriging ottenuto con il modello 1, calibrato rispetto al variogramma omni-direzionale (Figura 3.8), presenta una K_{fs} relativamente bassa a nord e al centro dell'area di studio, nell'area circostante il Pozzo 1, e un chiaro aumento di K_{fs} nel vigneto posto a Sud-Est.

Considerando il Kriging sviluppato mediante l'utilizzo del modello 2, nella configurazione 2.A, calibrato anche sulla base dei variogrammi sperimentali calcolati nelle direzioni 0° e 90° (Figura 3.9), si osservano valori di K_{fs} stimati inferiori nelle aree interessate dalla coltivazione di vigneti, mentre si osserva un lieve incremento dei valori stimati di K_{fs} nell'area non coltivata circostante il Pozzo 1. Si nota quindi una leggera diminuzione della differenza tra valori di conducibilità idraulica stimati in aree coltivate e non coltivate, pur rimanendo limitata la differenza tra le stime sviluppate con i due modelli.

I risultati ottenuti tramite entrambi i modelli evidenziano la presenza di una zona a K_{fs} limitata nella parte centrale e nella parte nord-est dell'area di studio, e una zona caratterizzata da K_{fs} più elevata nei vigneti posti a est e a sud-est nell'area di studio.



Figura 3.7: immagine satellitare del Campo pozzi Settolo in un sistema di riferimento rototraslato, di cui i punti gialli evidenziano la posizione delle prove svolte e il punto rosso indica il pozzo 1.

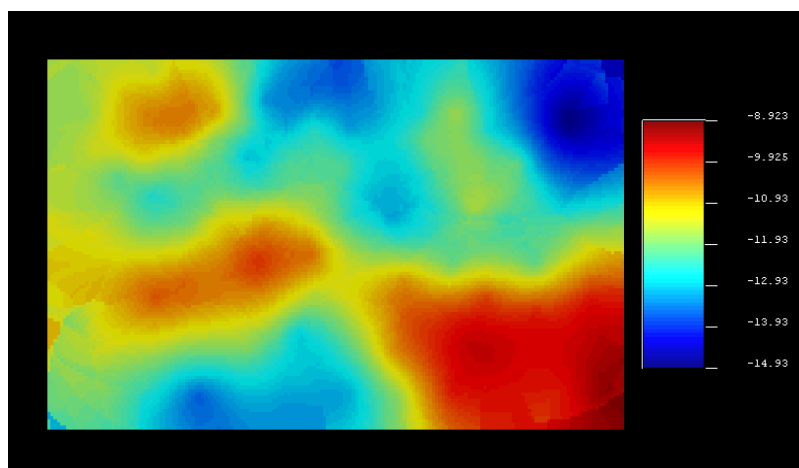


Figura 3.8: Il Kriging svolto per l'area di studio considerando il modello variogramma 1, i valori sono in scala logaritmica.

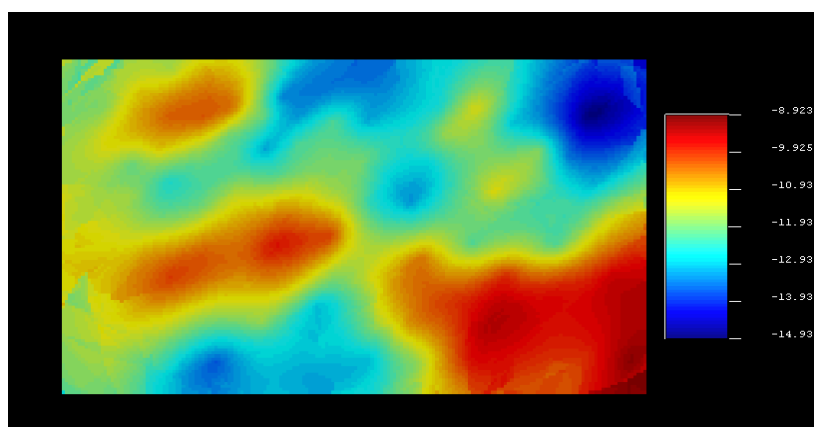


Figura 3.9: Il Kriging svolto per l'area di studio considerando il modello variogramma 2, i valori sono in scala logaritmica.

3.3.4 Risultati della validazione incrociata (Cross-Validation)

Con la validazione incrociata si valuta l'accuratezza della stima ottenuta nella descrizione dell'andamento spaziale di K_{fs} .

La Cross-Validation è stata sviluppata per il modello 1 e per tutte le configurazioni del modello 2 per poter confrontare il coefficiente di correlazione ottenuto tra i valori sperimentali e i valori stimati dai Kriging sviluppati. Una sintesi dei risultati è riportata in Tabella 3.10.

Tabella 3.10: Parametri di calibrazione dei modelli confrontati e il corrispondente coefficiente di correlazione.

Modello	Nugget effect	Sill Contribution	Range			Angles			Coefficiente di correlazione
			Max	Med	Min	X	Y	Z	
1	0,7852	0,9535	47,3	47,3	0	0	0	0	0,8693
2.A	0,6	1,1	30	20	0	60	0	0	0,9511
2.B	0,65	1,15	50	35	17	45	0	0	0,9068
2.C	0,75	0,8	40	33,5	20	0	0	0	0,8806
2.D	0,7	1	35	25	15	30	0	0	0,9261
2.E	0,85	1,05	48,4	48,4	0	0	0	0	0,8687
2.F	0,8	0,9	36,4	32,67	0	0	0	0	0,8924
2.G	0,73	0,88	32,85	30,5	0	0	0	0	0,9054
2.H	0,78	0,93	27,3	27,3	0	0	0	0	0,9217
2.I	0,82	0,98	48	48	0	0	0	0	0,8667
2.J	0,77	0,95	42	33	0	0	0	0	0,8888
2.K	0,8	0,95	37	37	0	0	0	0	0,8896
2.L	0,79	0,9	30	30	0	0	0	0	0,9072

Si nota che il modello 1, calibrato considerando il solo variogramma omni-direzionale (isotropo) ha un coefficiente di correlazione minore rispetto alle configurazioni del modello 2, calibrate considerando anche le direzioni 0° e 90°.

Il valore percentuale del coefficiente di correlazione restituisce dei valori compresi tra 86% e 95%; indici di una precisione abbastanza elevata per entrambi i modelli.

3.3.4.1 Risultati della validazione incrociata per il modello 1

Per visualizzare in modo ottimale i risultati **Figura 3.10**, si realizza un grafico a dispersione ponendo sull'asse delle ascisse i valori logaritmici di K_{fs} sperimentali, e sull'asse delle ordinate i valori stimati. I punti si distribuiscono nell'intorno della retta di coefficiente angolare 1, che indica la perfetta correlazione lineare.

I risultati in Tabella. A.2 in appendice mostrano che esiste un coefficiente di correlazione pari al 86.93%, ossia i dati sono stati stimati con una precisione abbastanza elevata.

Possiamo osservare che le stime tendono verso il valore medio di K_{fs} . Quindi i valori sperimentali bassi di K_{fs} tendono ad essere sovrastimati, mentre i valori sperimentali elevati tendono ad essere sottostimati.

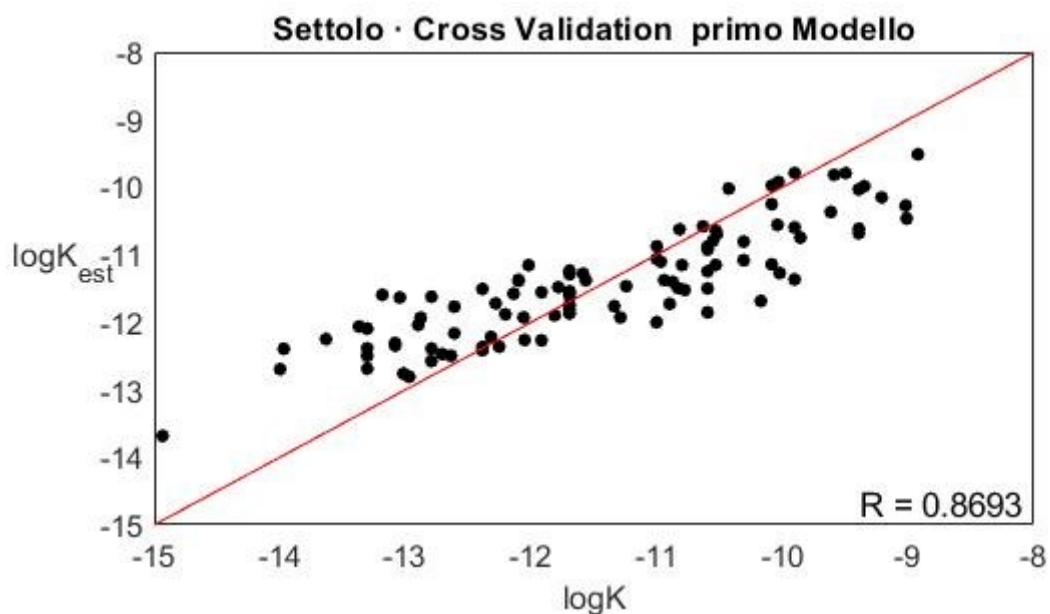


Figura 3.10: validazione incrociata dei punti campionati, nell'asse delle ascisse si ha il logaritmo di K_{fs} campionaria, mentre nell'asse delle ordinate è presente il valore logaritmico di K_{fs} stimata attraverso il metodo della validazione incrociata.

I punti si distribuiscono nell'intorno della bisettrice del primo e del terzo quadrante, indice di una perfetta correlazione lineare

3.3.4.2 Risultati della validazione incrociata per il modello 2.A

Considerando il modello 2.A e svolgendo la validazione incrociata, otteniamo un coefficiente di correlazione maggiore di quello del primo modello e pari al 95,11%, ossia i dati sono stati stimati con una precisione più elevata e l'errore delle prove è inferiore a quello generato dal modello 1. Si riporta il grafico di correlazione in Figura 3.11, come nel punto precedente, per visualizzare i risultati in modo ottimale.

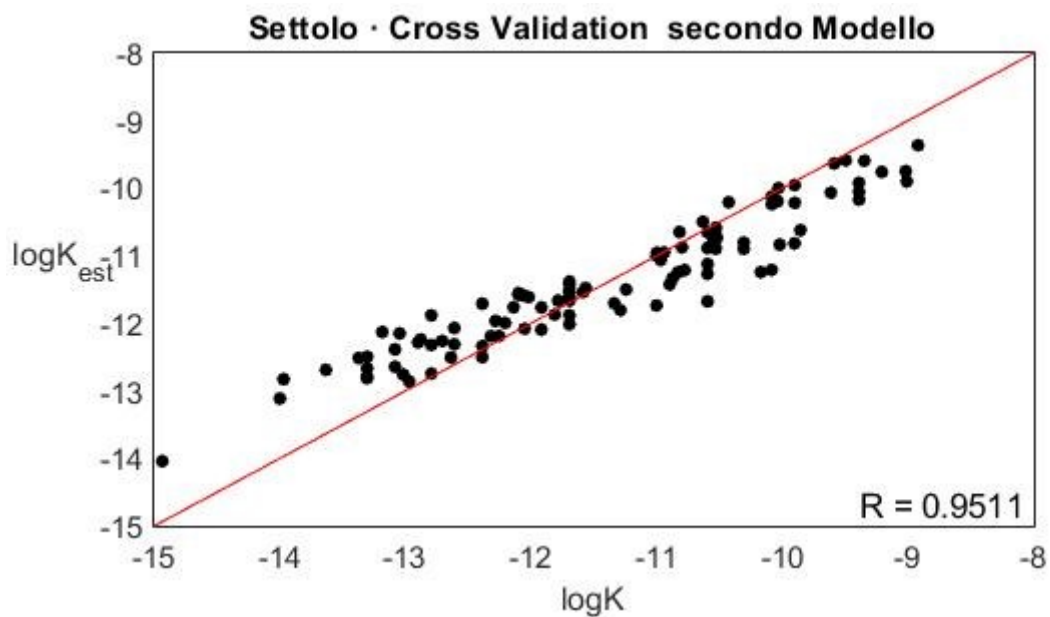


Figura 3.11: validazione incrociata dei punti campionati, nell'asse delle ascisse si ha il logaritmo di K_{fs} campionaria, mentre nell'asse delle ordinate è presente il valore logaritmico di K_{fs} stimata attraverso il metodo della validazione incrociata.

I punti si distribuiscono nell'intorno della bisettrice del primo e del terzo quadrante, indice di una perfetta correlazione lineare.

Capitolo 4. Conclusioni

In questo elaborato è stata presentata l'analisi delle proprietà idrauliche di suoli coltivati e non coltivati nel sito sperimentale di Settolo, all'interno dell'area di salvaguardia stabilita attorno alle opere di presa da pozzo presenti nel sito, destinate all'estrazione di acqua potabile da acquifero non confinato.

Lo studio è stato sviluppato in due fasi, una sperimentale, effettuando le prove infiltrometriche nell'area di studio, e una di analisi statistica e geostatistica, per valutare preliminarmente la vulnerabilità dell'acquifero sottostante a possibili processi di lisciviazione di prodotti fitosanitari usati in agricoltura.

A partire dalle prove infiltrometriche, sono stati ricavati i valori di K_{fs} nelle posizioni campionate. Essi presentano una elevata variabilità, soprattutto nel confronto tra le zone coltivate e non coltivate, nelle quali una maggiore K_{fs} può comportare un rischio per la qualità dell'acqua nella falda freatica considerando l'infiltrazione dell'acqua come fattore determinante per l'infiltrazione delle sostanze chimiche nel terreno. È stata sviluppata un'analisi statistica dei valori logaritmici di K_{fs} , la quale mostra una differenza tra il valore minimo e il valore massimo pari a tre ordini di grandezza, e che i valori di K_{fs} risultano in media più elevati in suoli coltivati.

Ai fini di sviluppare una stima affidabile dei valori di K_{fs} all'interno dell'area di studio, in corrispondenza delle posizioni non campionate, è stata sviluppata un'analisi geostatistica a partire dai valori osservati e dalle posizioni delle prove infiltrometriche.

Sono stati sviluppati e confrontati due modelli di variogramma sperimentale, il primo calibrato considerando il solo variogramma omni-direzionale (isotropo), il secondo calibrato considerando anche le direzioni 0° e 90° . Una mappa per ogni modello è stata successivamente sviluppata mediante l'algoritmo Ordinary Kriging, in grado di stimare i valori di K_{fs} nei punti non campionati nell'area di studio. Per verificare la precisione della stima dei due modelli sviluppati, è stata sviluppata una validazione incrociata, applicata ai kriging generati dai due modelli testati. Il kriging sviluppato sulla base del modello 1 presenta un coefficiente di correlazione tra valori osservati e stimati pari al 86.93%, che è un indicatore di una precisione abbastanza elevata; il kriging sviluppato sulla base del modello 2 nella configurazione 2.A, presenta invece i risultati migliori, con un coefficiente di correlazione pari al 95.11%.

Alla luce dei risultati ottenuti, si evidenzia come sia più conveniente, per l'area di studio considerata, considerare direzioni di anisotropia nell'analisi e modellazione della variabilità spaziale della K_{fs} .

Appendice

Tabella A.1: le coordinate delle prove d'infiltrazione, dove nella prima colonna contiene i codici identificativi delle prove, la seconda e la terza colonna contengono le coordinate delle prove infiltrometriche relative al sistema di riferimento Monte Mario Italy 1, rispettivamente per l'asse x e y, la quarta e la quinta colonna contengono le coordinate delle prove infiltrometriche relative al nuovo sistema di riferimento locale.

ID	XMM-i	YMM-i	XRT	YRT
1	1731064.31684897	5085658.74861325	23.8849684822249	98.4272350321982
101	1731046.68908721	5085650.79736083	14.1605469405206	81.7120914372127
2	1731042.32742093	5085633.16091516	20.8605782064682	64.8248794216472
102	1731036.62333126	5085613.96650060	27.3735781759480	45.8896471639669
103	1731080.84017864	5085650.41597808	42.1740866401901	101.248828425886
4	1731070.31396570	5085631.96149181	44.3328660013389	80.1133394559269
104	1731057.54115992	5085618.17180039	41.9524129211479	61.4684044842695
5	1731047.34435589	5085603.58063418	42.1340720434987	43.6682937054575
105	1731027.16922480	5085595.70488948	30.2927390846618	25.5341793669397
6	1731099.10012604	5085632.76110738	67.2941218551441	97.4933032586967
106	1731084.68867727	5085621.60424511	62.0500698316277	80.0386377014015
7	1731077.91031357	5085603.97494703	66.7792573642466	61.7527647239097
107	1731069.60672319	5085593.93666038	65.8556671083062	48.7580045069575
8	1731050.72550354	5085575.96792837	60.9329070480286	23.1622583974848
108	1731021.55249707	5085568.66138561	41.4383769634139	0.262189175236557
109	1731122.13352879	5085621.81227207	92.4015074467564	101.969219437099
10	1731106.69647391	5085601.17629255	91.8316685684864	76.2044838906949
110	1731052.44449958	5085553.05936414	75.6452568342058	5.51844854092287
11	1731079.28495989	5085576.20024457	84.0393622234382	39.9488079849902
1010	1731086.27778218	5085568.20644636	94.3757093427373	37.5074350847643
111	1731103.09906260	5085564.50084655	110.218269308841	44.2676302472341
112	1731141.16799497	5085584.88748793	129.350661229326	82.9821021920833
0	1731137.08186538	5085601.57610033	116.326717078514	94.1884895496197
113	1731095.87012599	5085528.25215001	125.401554639309	10.5675802190497
14	1731117.09147626	5085572.39013220	117.020284725724	58.8196422858241
114	1731120.36529969	5085523.10348293	148.327717094953	20.6131455272921
15	1731087.19615171	5085548.46150150	106.597959794254	21.9728657625248
115	1731146.88873618	5085525.44378615	168.552206095615	37.9319141631103
116	1731135.96732115	5085499.70045073	174.625329656998	10.6351415511961
180	1731152.67436890	5085571.99032442	146.209721107521	79.1734846406665
18	1731121.16607956	5085544.97407491	136.269165213337	38.8766437817874
19	1731172.29209876	5085572.39853100	161.937247970489	90.9066366571725
20	1731157.65857117	5085542.45112441	167.432702889872	58.0313075117315
7221	1731075.93531123	5085659.68328248	32.7967957752251	105.939997916253
7222	1731066.44153769	5085648.11770143	31.7922395012535	91.0106554077597
7223	1731058.66450317	5085640.61644827	29.8227447598933	80.3865246029430
7251	1731056.64457426	5085590.59409245	57.2497220730823	38.5048208404342
7252	1731042.50371510	5085591.05853676	45.4720845952118	30.6647403725798
7253	1731067.65497571	5085570.31977801	77.9924370659944	28.4044970428456
7254	1731031.46884184	5085573.38037665	46.7657536634224	9.86540881927489
7255	1731060.33738591	5085557.13101652	79.7021631256354	13.4189244167902

7256	1731041.66790831	5085563.52704125	60.7919985066100	7.77408604081028
7261	1731073.89320055	5085640.87491224	42.0655343509634	89.4471057402357
7262	1731077.89891284	5085631.85151826	50.5693497136211	84.4318795106251
7263	1731084.64442010	5085638.42879027	52.2363724260784	93.7046035204770
7264	1731090.87819538	5085630.43284257	61.9562620843651	90.8203568431642
7266	1731108.74060943	5085626.00719513	79.0645484578952	97.5996435547838
7271	1731052.11815353	5085661.51466084	12.3502589865594	93.5888813289577
7272	1731056.96271549	5085651.01810993	22.3928574223652	87.8623135740000
7273	1731092.48950321	5085644.04487680	55.3568200270732	102.834146974582
7274	1731059.78219960	5085602.09173390	53.1211770618443	49.6849625109065
7275	1731036.88622234	5085604.31852471	33.1944936462004	38.1909788647426
7276	1731064.45352708	5085581.11179260	69.1152812689449	35.3264156487396
8041	1731046.83376226	5085622.31734832	30.8296055859586	58.6193538924093
8042	1731054.37180588	5085629.95007956	32.5282021180430	69.2115896160405
8043	1731048.49477787	5085641.14219190	21.2411611817521	74.9041763529661
8044	1731064.50275359	5085625.04800809	43.6215569041354	71.1099799325441
8045	1731070.53091831	5085614.89814526	54.4258824367637	66.3534018416037
8046	1731075.51396514	5085623.86762955	53.2683804001894	76.5486258792328
8051	1731094.07204226	5085616.96185345	72.3841331036114	81.7138914599787
8052	1731081.71509008	5085613.01566090	64.6214924756246	71.3211962701463
8053	1731091.49682717	5085607.79271650	75.6171394805499	72.7555168902680
8054	1731101.56241393	5085608.77313080	83.2386635618137	79.4030442274731
8055	1731091.49682717	5085597.59640784	81.5427829468646	64.4578389134688
8056	1731107.38257303	5085616.86035238	83.2751291375845	89.3667822360765
10191	1731128.95223165	5085610.71581003	104.399288449198	96.9017319412392
10192	1731145.89412034	5085594.68720166	127.501585856564	93.7036492104262
10193	1731159.00931486	5085588.38829997	141.835273786585	96.1996219915626
10194	1731161.71421907	5085576.05115336	151.206307900881	87.7317171213230
10195	1731159.83809458	5085565.28604703	155.935735650706	77.8808354069284
10196	1731159.60953690	5085554.00733676	162.304424551456	68.5694796699829
10201	1731143.93427731	5085574.77100681	137.481091865285	76.3570281604857
10202	1731149.51395697	5085552.77126851	154.807067022740	61.6964724005902
10203	1731148.67078889	5085562.53640516	148.445837919503	69.1532539112224
10204	1731151.66846596	5085584.36583266	138.199027145636	88.6599922795405
10205	1731132.98289922	5085593.57416621	117.641379849663	85.2944390082440
10206	1731120.71351847	5085601.47822610	103.063161767781	84.5962812298511
10261	1731115.94555865	5085611.12309856	93.5778594011027	89.6742773523835
10262	1731123.59250393	5085588.39093740	113.011811264654	75.6190847863570
10263	1731133.57580015	5085580.79960156	125.547889864953	75.2431638212035
10264	1731114.16267994	5085593.37017522	102.444179929453	74.1909539402452
10266	1731136.25324637	5085559.49662786	140.107120896727	59.4629800923311
10271	1731097.97493202	5085576.62730070	99.0009324197292	51.1581278762308
10272	1731118.29479354	5085559.43991950	125.525625771853	48.9801730344864
10273	1731139.48482416	5085544.43575889	151.489664867836	49.0846101868804
10274	1731130.66540054	5085531.79584679	151.658243072376	33.6728876269201
10275	1731099.10338355	5085551.29708951	114.640055671205	31.2004019101763
10276	1731108.37175636	5085536.79390277	130.611197004575	24.7841877094911
10281	1731125.45358071	5085576.96472472	121.166750575657	67.4020958113903
10282	1731111.51847434	5085581.37277109	107.264706108162	62.8908629459949
10283	1731101.42798356	5085588.51760947	94.9008779637663	62.8411309587882
11091	1731133.87364366	5085568.94546268	132.679373675377	65.7694497657059
11092	1731084.71845271	5085586.53252521	82.4564327445538	51.5148445448754
11093	1731099.22281424	5085624.57946153	72.1487751515508	90.9064434168325
11021	1731137.58944194	5085514.90403055	167.109751222931	23.9504033219142
11022	1731123.50617380	5085508.36823974	159.447207808776	10.4470544244926

11023	1731108.70974054	5085518.53180531	141.499368996699	10.1190539702994
11024	1731082.09042398	5085536.49223620	109.398965053177	9.26514617908167
11025	1731070.43590782	5085546.39517006	94.1594619571223	10.5509888401406
11026	1731079.61960310	5085559.71152822	93.8942047207119	26.7248966006591

Tabella 3.8: valori della validazione incrociata per il primo modello, la prima colonna contiene il codice identificativo dei punti campionati, la seconda colonna contiene i valori sperimentali logaritmici di K_{fs} , nella terza colonna sono presenti i valori logaritmici stimati di K_{fs} , nella quarta e quinta colonna sono presenti rispettivamente gli errori assoluti e gli errori totali, nell'ultima colonna è presente il coefficiente di correlazione riferito ai valori presenti nella seconda e nella terza colonna.

Codice test identificativo	Logaritmo di K_{fs}	Stima del logaritmo K_{fs}	Errore assoluto	Errore totale	Coefficiente di correlazione
1	-10.3089	-10.8075	0.4985	4.8360	0.8693
101	-10.5314	-11.1508	0.6193	5.8808	
2	-10.8748	-11.4020	0.5271	4.8469	
102	-10.5219	-10.6961	0.1741	1.6554	
103	-10.5297	-10.6459	0.1161	1.1031	
4	-11.5873	-11.3757	0.2116	1.8266	
104	-12.1402	-11.5787	0.5615	4.6256	
5	-9.8580	-10.4344	0.5763	5.8467	
105	-10.9690	-11.1036	0.1345	1.2267	
6	-13.9690	-12.3934	1.5756	11.2798	
106	-13.6331	-12.2504	1.3827	10.1428	
7	-10.5532	-10.7925	0.2392	2.2670	
107	-9.2103	-10.1514	0.9410	10.2174	
8	-10.8308	-11.4949	0.6640	6.1313	
108	-12.6378	-12.4978	0.1400	1.1082	
109	-13.01700	-12.7615	0.2555	1.9628	
10	-10.8978	-11.7292	0.8313	7.6287	
110	-12.7088	-12.4707	0.2381	1.8740	
11	-11.6952	-11.2368	0.4584	3.9199	
1010	-11.0020	-11.0598	0.0577	0.5244	
111	-9.3926	-10.6837	1.2910	13.7451	
112	-11.2437	-11.4664	0.2226	1.9803	
0	-12.8992	-12.0409	0.8583	6.6540	
113	-9.39266	-10.0340	0.6413	6.8280	
14	-12.0602	-11.9680	0.0922	0.7646	
114	-10.0323	-9.9234	0.1088	1.0847	
15	-10.0858	-10.7291	0.6432	6.3781	
115	-9.3496	-9.9883	0.6387	6.8313	
116	-8.9226	-9.5143	0.5916	6.6310	
180	-10.1728	-11.6856	1.5127	14.8707	
18	-9.0197	-10.2728	1.2530	13.8926	
19	-14.9339	-13.6839	1.2500	8.3703	
20	-10.9419	-11.3767	0.4347	3.9728	

7221	-12.0204	-11.1560	0.8644	7.1912
7222	-10.0404	-10.5582	0.5177	5.1566
7223	-10.3089	-11.0201	0.7111	6.8983
7251	-10.8197	-10.6237	0.1960	1.8122
7252	-11.0001	-10.9188	0.0813	0.7391
7253	-13.3708	-12.0638	1.3070	9.7751
7254	-13.9982	-12.6958	1.3024	9.3042
7255	-12.0524	-12.2639	0.2114	1.7540
7256	-12.2552	-12.3631	0.1078	0.8799
7261	-9.90348	-10.5962	0.6927	6.9946
7262	-12.3883	-11.4322	0.9561	7.7184
7263	-9.39266	-10.7053	1.3126	13.975
7264	-10.5966	-11.6531	1.0564	9.9698
7266	-12.7938	-12.5760	0.2178	1.7028
7271	-12.1007	-11.3704	0.7303	6.0352
7272	-10.5966	-10.8782	0.2815	2.6571
7273	-10.7999	-11.1524	0.3524	3.2631
7274	-10.6332	-10.5803	0.0529	0.4984
7275	-9.6158	-10.3682	0.7523	7.8245
7276	-10.5966	-10.9358	0.3391	3.2006
8041	-11.9178	-11.5558	0.3620	3.0382
8042	-12.8794	-11.9635	0.9159	7.1114
8043	-12.7938	-11.6232	1.1706	9.1501
8044	-11.6952	-11.7059	0.0106	0.0910
8045	-10.5966	-11.2137	0.6170	5.8232
8046	-11.6952	-11.7250	0.0297	0.2544
8051	-11.2897	-11.9440	0.6542	5.7947
8052	-12.2060	-11.8187	0.3873	3.1736
8053	-11.6952	-11.6359	0.0593	0.5074
8054	-11.6952	-11.7421	0.0468	0.4006
8055	-11.6952	-11.3060	0.3892	3.3282
8056	-11.0020	-12.0013	0.9992	9.0819
10191	-12.3883	-12.3647	0.0236	0.1912
10192	-9.9034	-11.3663	1.4628	14.770
10193	-12.3883	-12.4171	0.0287	0.2317
10194	-12.9696	-12.8084	0.1612	1.2432
10195	-13.3046	-12.6890	0.61560	4.6275
10196	-12.7938	-12.3920	0.4018	3.1410
10201	-11.6952	-11.5403	0.1549	1.3248
10202	-11.3389	-11.7972	0.4582	4.0411
10203	-11.6952	-11.7803	0.0850	0.7272
10204	-13.3046	-12.1097	1.1949	8.9816
10205	-10.7789	-11.5705	0.7915	7.3434
10206	-11.9183	-12.1402	0.2218	1.8610
10261	-13.3046	-12.4406	0.8640	6.4945
10262	-12.6115	-12.1642	0.4473	3.5470
10263	-11.7847	-11.5332	0.2515	2.1344
10264	-12.3203	-12.2167	0.1036	0.8413
10266	-12.2829	-11.7200	0.5629	4.5832
10271	-11.5652	-11.3789	0.1863	1.6114

10272	-13.0454	-11.6347	1.4107	10.813
10273	-13.1842	-11.6643	1.5199	11.528
10274	-9.4980	-10.0591	0.5610	5.9073
10275	-10.0858	-10.2499	0.1640	1.6269
10276	-9.5886	-9.8080	0.2193	2.2875
10281	-11.8126	-11.8999	0.0872	0.7383
10282	-13.3046	-12.3664	0.9382	7.05228
10283	-12.6115	-11.9622	0.6493	5.14875
11091	-10.0222	-11.2734	1.2511	12.4834
11092	-9.0114	-10.4653	1.4538	16.1328
11093	-13.0831	-12.3478	0.7353	5.6205
11021	-9.9034	-9.7893	0.1141	1.1527
11022	-10.4277	-10.0203	0.4074	3.9072
11023	-10.0858	-9.9789	0.1068	1.0594
11024	-12.1007	-11.3866	0.7141	5.9014
11025	-13.0831	-12.3089	0.7742	5.9178

Tabella 3.9: valori della validazione incrociata per il secondo modello, la prima colonna contiene il codice identificativo dei punti campionati, la seconda colonna contiene i valori sperimentali logaritmici di K_{fs} , nella terza colonna sono presenti i valori logaritmici stimati di K_{fs} , nella quarta e quinta colonna sono presenti rispettivamente gli errori assoluti e gli errori totali, nell'ultima colonna è presente il coefficiente di correlazione riferito ai valori presenti nella seconda e nella terza colonna.

Codice test identificativo	Logaritmo di K_{fs}	Stima del logaritmo di K_{fs}	Errore assoluto	Errore totale	Coefficiente di correlazione
1	-10.3089	-10.8068	0.4978	4.8292	0.9511
101	-10.5314	-10.8978	0.3663	3.4785	
2	-10.8748	-11.3319	0.4570	4.2023	
102	-10.5219	-10.7309	0.2089	1.9862	
103	-10.5297	-10.5845	0.0547	0.5200	
4	-11.5873	-11.5640	0.0233	0.2015	
104	-12.1402	-11.7622	0.3780	3.1141	
5	-9.8580	-10.1591	0.3010	3.0541	
105	-10.9690	-11.0621	0.0930	0.8483	
6	-13.9690	-12.8268	1.1422	8.1772	
106	-13.6331	-12.6888	0.9443	6.9271	
7	-10.5532	-10.7444	0.1911	1.8112	
107	-9.21034	-9.76103	0.5506	5.9790	
8	-10.8308	-11.2436	0.4127	3.8110	
108	-12.6378	-12.5046	0.1332	1.0544	
109	-13.0170	-12.7603	0.2567	1.9720	
10	-10.8978	-11.4247	0.5268	4.8346	
110	-12.7088	-12.2600	0.4488	3.5319	

11	-11.6952	-11.4986	0.1966	1.6814
1010	-11.0020	-11.0021	0.16e-06	0.144e-05
111	-9.3926	-10.1687	0.7760	8.2621
112	-11.2437	-11.5003	0.2565	2.2818
0	-12.899	-12.2812	0.6180	4.7911
113	-9.3926	-9.9229	0.5303	5.6459
14	-12.060	-11.9013	0.1589	1.3177
114	-10.032	-9.9972	0.0351	0.3500
15	-10.085	-10.5087	0.4228	4.1929
115	-9.3496	-9.59459	0.2449	2.6202
116	-8.92265	-9.36614	0.4434	4.9702
180	-10.1728	-11.2426	1.0697	10.516
18	-9.0197	-9.7487	0.7289	8.0822
19	-14.9339	-14.0387	0.8952	5.9945
20	-10.9419	-10.9516	0.0096	0.0877
7221	-12.0204	-11.6133	0.4071	3.3869
7222	-10.0404	-10.1960	0.1555	1.5491
7223	-10.3089	-10.8761	0.5671	5.5015
7251	-10.8197	-10.6496	0.1701	1.5728
7252	-11.0001	-10.9886	0.0115	0.1045
7253	-13.3708	-12.5134	0.8574	6.4126
7254	-13.9982	-13.1961	0.8021	5.7302
7255	-12.0524	-12.0792	0.0267	0.2215
7256	-12.2552	-12.1885	0.0667	0.5447
7261	-9.90348	-10.2178	0.3143	3.1737
7262	-12.3883	-11.6559	0.7324	5.9127
7263	-9.39266	-10.1629	0.7702	8.2004
7264	-10.5966	-11.5327	0.9360	8.8336
7266	-12.7938	-12.7426	0.0512	0.4006
7271	-12.1007	-11.5770	0.5237	4.3279
7272	-10.5966	-10.6544	0.0577	0.5451
7273	-10.7999	-10.8756	0.0756	0.7002
7274	-10.6332	-10.4962	0.1370	1.2893
7275	-9.61580	-10.0659	0.4500	4.6807
7276	-10.5966	-10.8868	0.2901	2.7382
8041	-11.9178	-11.7655	0.1523	1.2786
8042	-12.8794	-12.2679	0.6115	4.7480
8043	-12.7938	-11.8803	0.9135	7.1406
8044	-11.6952	-11.8020	0.1067	0.9127
8045	-10.5966	-11.1135	0.5168	4.8776
8046	-11.6952	-11.9498	0.2545	2.1765
8051	-11.2897	-11.8212	0.5314	4.7070
8052	-12.2060	-11.8817	0.3243	2.6574
8053	-11.6952	-11.5998	0.0954	0.8161
8054	-11.6952	-11.6284	0.0668	0.5715
8055	-11.6952	-11.4417	0.2535	2.1679
8056	-11.0020	-11.7356	0.7335	6.6669
10191	-12.3883	-12.5013	0.1129	0.9113
10192	-9.9034	-10.8174	0.9139	9.2281
10193	-12.3883	-12.3381	0.0502	0.4059

10194	-12.9696	-12.8590	0.1106	0.8530
10195	-13.3046	-12.8132	0.4914	3.6940
10196	-12.7938	-12.3210	0.4728	3.6959
10201	-11.6952	-11.3824	0.3128	2.6749
10202	-11.3389	-11.7033	0.3643	3.2130
10203	-11.6952	-11.7928	0.0975	0.8341
10204	-13.3046	-12.4950	0.8096	6.0857
10205	-10.7789	-11.2239	0.4449	4.1278
10206	-11.9183	-11.9996	0.0812	0.6813
10261	-13.3046	-12.6236	0.6810	5.1191
10262	-12.6115	-12.3099	0.3016	2.3917
10263	-11.7847	-11.7194	0.0653	0.5543
10264	-12.3203	-12.1991	0.1212	0.9842
10266	-12.2829	-11.9644	0.3185	2.5934
10271	-11.5652	-11.4772	0.0880	0.7615
10272	-13.0454	-12.1492	0.8962	6.8698
10273	-13.1842	-12.2176	0.9666	7.3317
10274	-9.4980	-9.7601	0.2621	2.7596
10275	-10.0858	-10.2020	0.1161	1.1520
10276	-9.58867	-9.6735	0.0848	0.8849
10281	-11.8126	-11.8708	0.0581	0.4920
10282	-13.3046	-12.7977	0.5069	3.8105
10283	-12.6115	-12.1754	0.4361	3.4582
11091	-10.0222	-10.8372	0.8149	8.1311
11092	-9.0114	-9.9003	0.8889	9.8640
11093	-13.0831	-12.6422	0.4409	3.3703
11021	-9.9034	-9.9553	0.0518	0.5237
11022	-10.4277	-10.2097	0.2180	2.0909
11023	-10.0858	-10.1245	0.0386	0.3836
11024	-12.1007	-11.5542	0.5465	4.5163
11025	-13.0831	-12.3841	0.6990	5.3430
11026	-10.5966	-11.3820	0.7853	7.4114

Bibliografia

1. Isaaks, Edward H.; Srivastava, R. Mohan, *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York; Oxford: Oxford University press, 1989.
2. Trevisani, S., *Geostatistica nel contesto idrogeologico ed ambientale*. Tesi di dottorato in Scienze della Terra XVII ciclo, Università degli studi di Padova, 2004.
3. Raspa, G., *Dispense di geostatistica applicata*. Corso di laurea di primo livello in ingegneria per l'ambiente ed il territorio, Università di Roma "La Sapienza".
4. Posa, Donato, *Introduzione alla geostatistica*. Lecce: Adriatica editrice salentina, 1995.
5. Lantuejoul, Christian, *Geostatistical simulation: models and algorithms*. Berlin [etc.]: Springer, 2002.
6. "Costa, L. and Salandin, P, *Evaluating the vulnerability to pesticides of wells supplying drinking water from wine-growing areas through the spatial analysis of the soil infiltration capacity at the scale of the wellhead protection areas*, 2022 Fall Meeting, AGU, Chicago, IL, 12-16 December, H43E-02 ."

