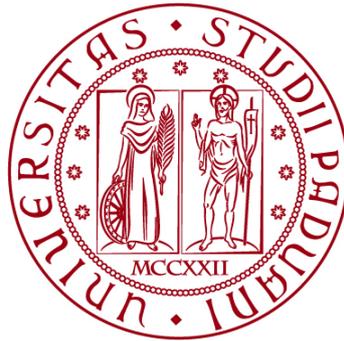


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

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'anelli 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'anelli, 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.*

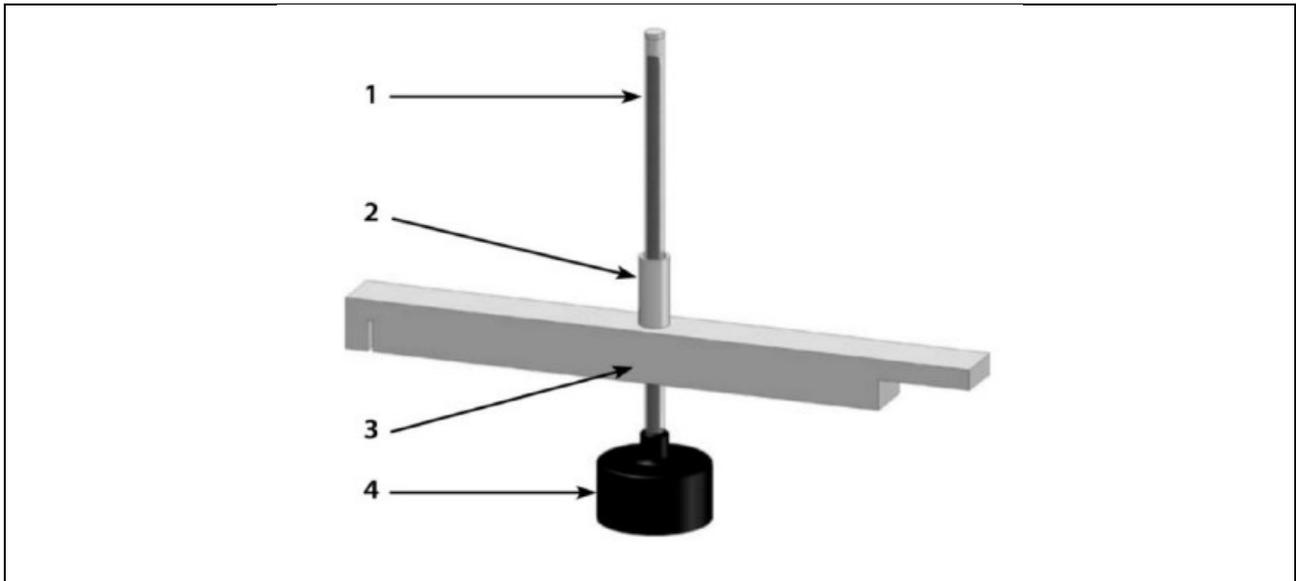


Figura 2.2: *asta con precisione millimetrica (1), tubo per la visualizzazione dei risultati (2), struttura di sostegno in grado di vincolare i gradi di libertà (3), galleggiante (4)*

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.

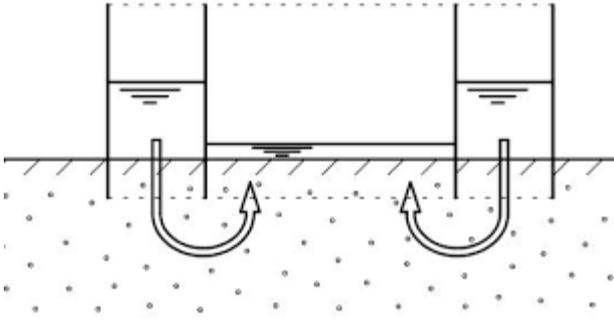


Figura 2.3: sezione trasversale dell'infiltrometro
Che dimostra il caso due illustrato sopra.

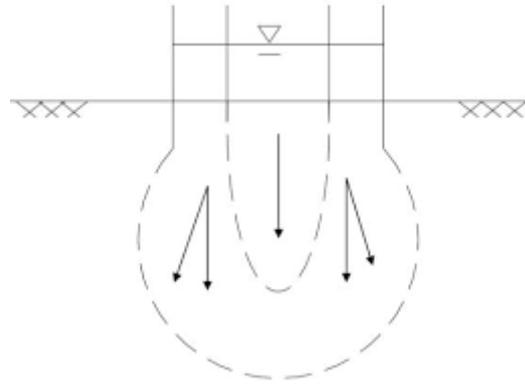


Figura 2.4: schema di flusso sotto
l'infiltrometro.

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, utilizzano 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 locazione 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:

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

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

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.

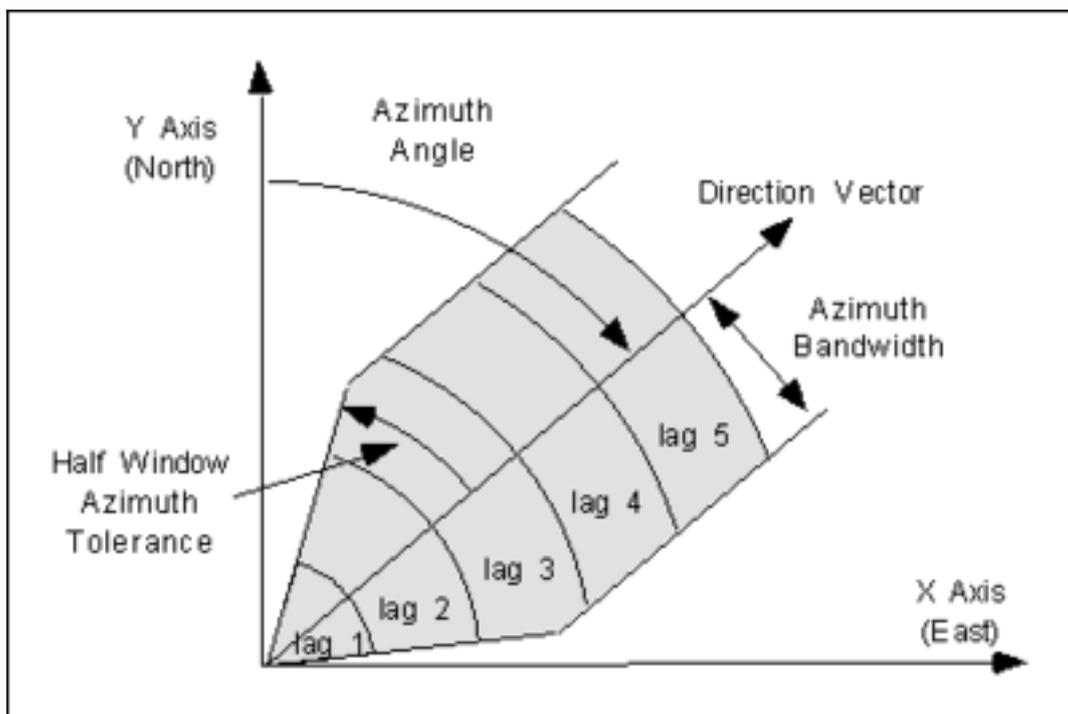


Figura 2.6: Descrizione grafica dei parametri per la determinazione del variogramma.

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.

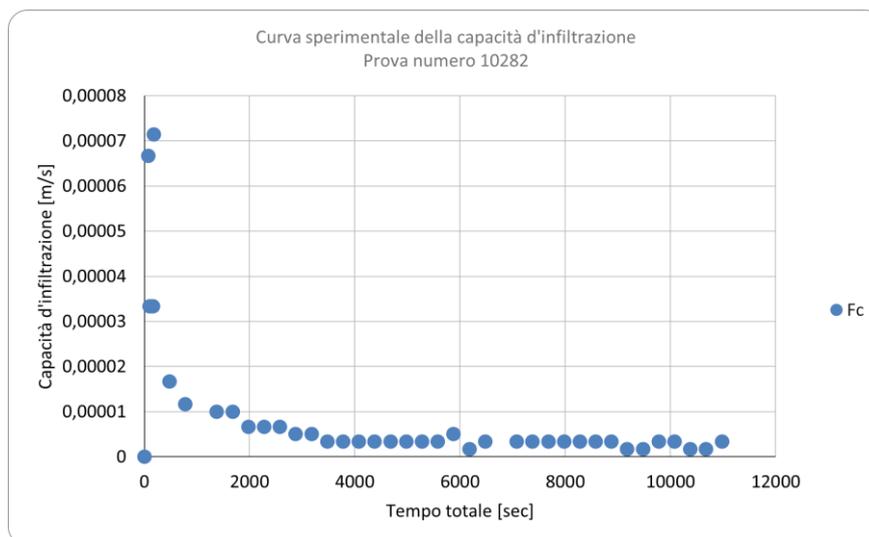


Figura 3.1: Esempio di curva sperimentale della capacità di infiltrazione f_c ottenuta con la prova infiltrometrica numero 10282.

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 |
|----------------------------|---|--|
| 1 | 3,33E-05 | -10,31 |
| 101 | 2,67E-05 | -10,53 |
| 2 | 1,89E-05 | -10,87 |
| 102 | 2,69E-05 | -10,52 |
| 103 | 2,67E-05 | -10,53 |
| 4 | 9,28E-06 | -11,59 |
| 104 | 5,34E-06 | -12,14 |
| 5 | 5,23E-05 | -9,86 |
| 105 | 1,72E-05 | -10,97 |
| 6 | 8,58E-07 | -13,97 |
| 106 | 1,20E-06 | -13,63 |
| 7 | 2,61E-05 | -10,55 |
| 107 | 1,00E-04 | -9,21 |
| 8 | 1,98E-05 | -10,83 |
| 108 | 3,25E-06 | -12,64 |
| 109 | 2,22E-06 | -13,02 |
| 10 | 1,85E-05 | -10,90 |
| 110 | 3,02E-06 | -12,71 |
| 11 | 8,33E-06 | -11,70 |
| 1010 | 1,67E-05 | -11,00 |
| 111 | 8,33E-05 | -9,39 |
| 112 | 1,31E-05 | -11,24 |
| 0 | 2,50E-06 | -12,90 |
| 113 | 8,33E-05 | -9,39 |
| 14 | 5,79E-06 | -12,06 |
| 114 | 4,40E-05 | -10,03 |
| 15 | 4,17E-05 | -10,09 |
| 115 | 8,70E-05 | -9,35 |
| 116 | 1,33E-04 | -8,92 |
| 180 | 3,82E-05 | -10,17 |

| Codice test identificativo | Conducibilità idraulica A saturazione [m/s] | Logaritmo naturale Conducibilità idraulica a saturazione |
|----------------------------|---|--|
| 7273 | 2,04E-05 | -10,80 |
| 7274 | 2,41E-05 | -10,63 |
| 7275 | 6,67E-05 | -9,62 |
| 7276 | 2,50E-05 | -10,60 |
| 8041 | 6,67E-06 | -11,92 |
| 8042 | 2,55E-06 | -12,88 |
| 8043 | 2,78E-06 | -12,79 |
| 8044 | 8,33E-06 | -11,70 |
| 8045 | 2,50E-05 | -10,60 |
| 8046 | 8,33E-06 | -11,70 |
| 8051 | 1,25E-05 | -11,29 |
| 8052 | 5,00E-06 | -12,21 |
| 8053 | 8,33E-06 | -11,70 |
| 8054 | 8,33E-06 | -11,70 |
| 8055 | 8,33E-06 | -11,70 |
| 8056 | 1,67E-05 | -11,00 |
| 10191 | 4,17E-06 | -12,39 |
| 10192 | 5,00E-05 | -9,90 |
| 10193 | 4,17E-06 | -12,39 |
| 10194 | 2,33E-06 | -12,97 |
| 10195 | 1,67E-06 | -13,30 |
| 10196 | 2,78E-06 | -12,79 |
| 10201 | 8,33E-06 | -11,70 |
| 10202 | 1,19E-05 | -11,34 |
| 10203 | 8,33E-06 | -11,70 |
| 10204 | 1,67E-06 | -13,30 |
| 10205 | 2,08E-05 | -10,78 |
| 10206 | 6,67E-06 | -11,92 |
| 10261 | 1,67E-06 | -13,30 |
| 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.

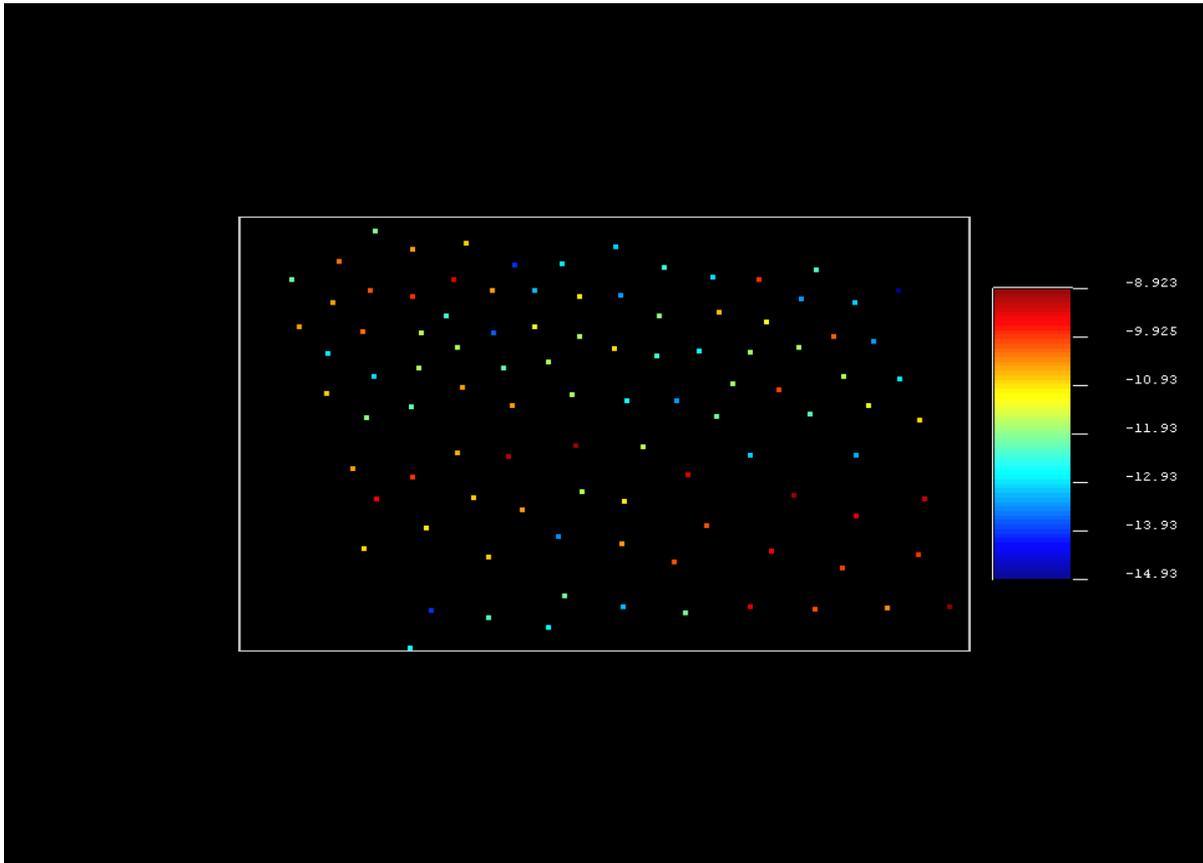


Figura 3.2: prove infiltrometriche con coordinate rototraslate nel sistema di riferimento locale.

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} .

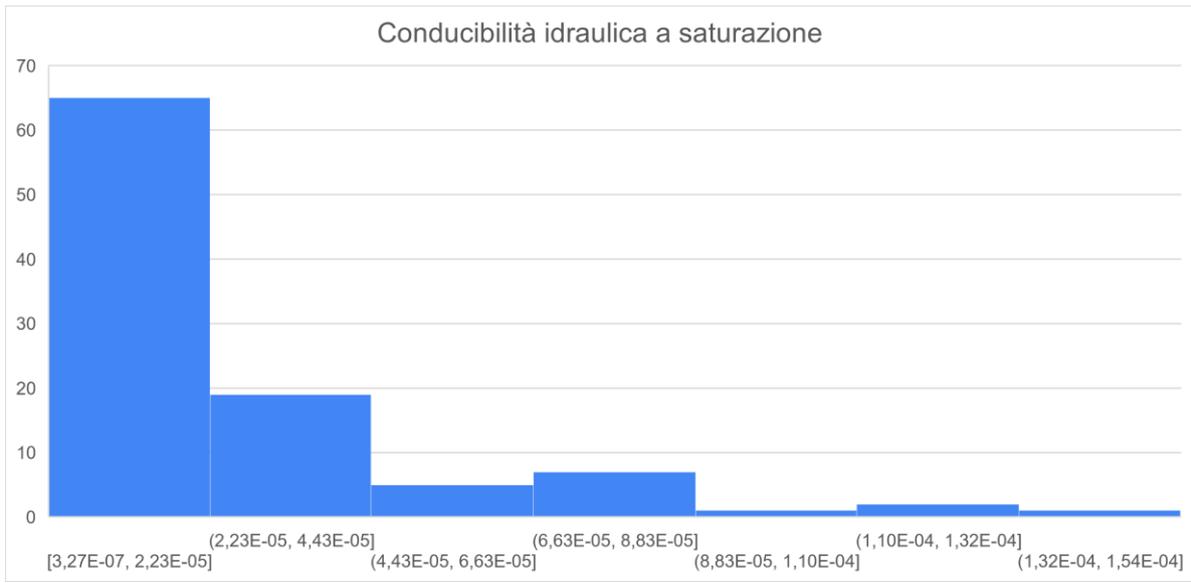


Figura 3.3: istogramma conducibilità idraulica a saturazione K_{fs} suddiviso in sette classi.

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} .

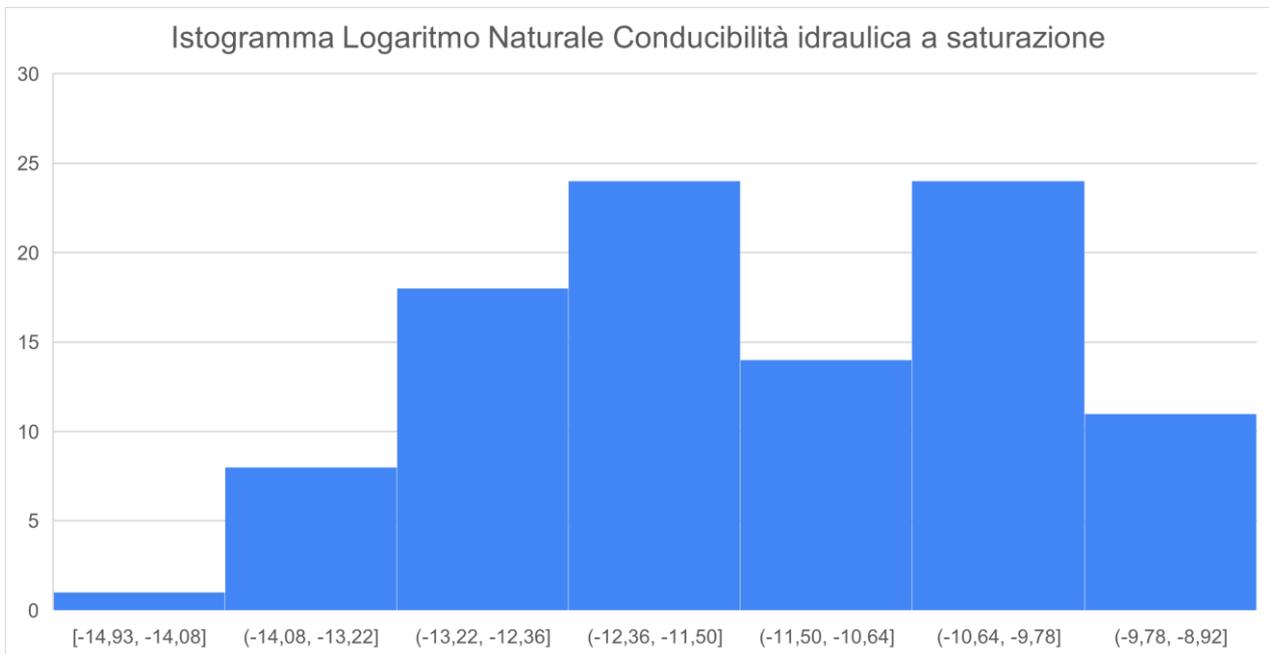


Figura 3.4: istogramma logaritmo naturale conducibilità idraulica a saturazione K_{fs} per tutto il sito sperimentale suddiviso in sette classi.

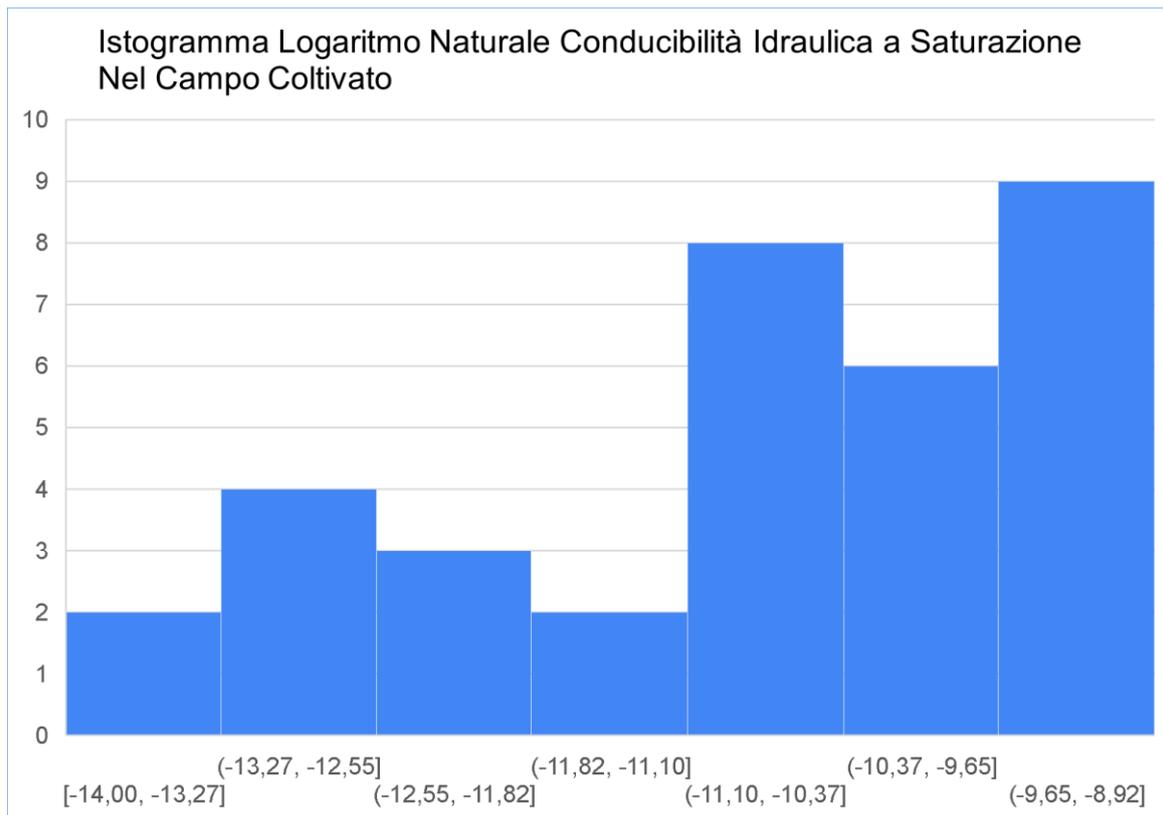


Figura 3.5: istogramma logaritmo naturale conducibilità idraulica a saturazione K_{fs} nei campi coltivati (vigneti).

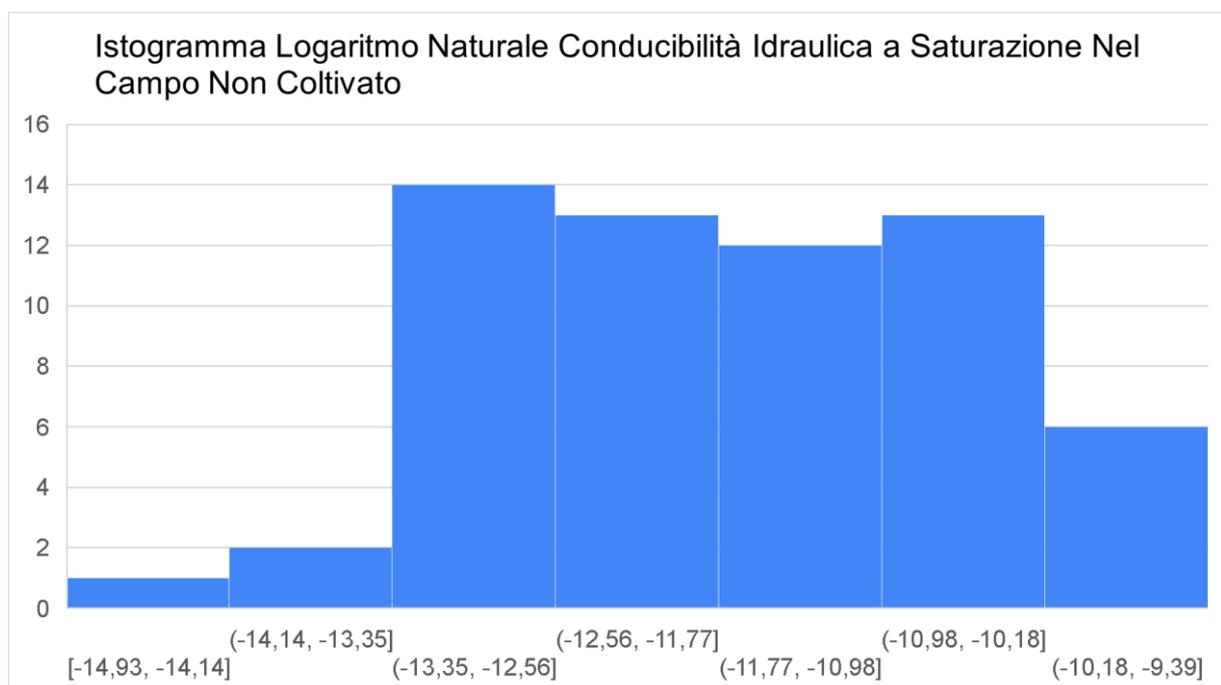


Figura 3.6: istogramma logaritmo naturale conducibilità idraulica a saturazione K_{fs} nel campo non coltivato.

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).

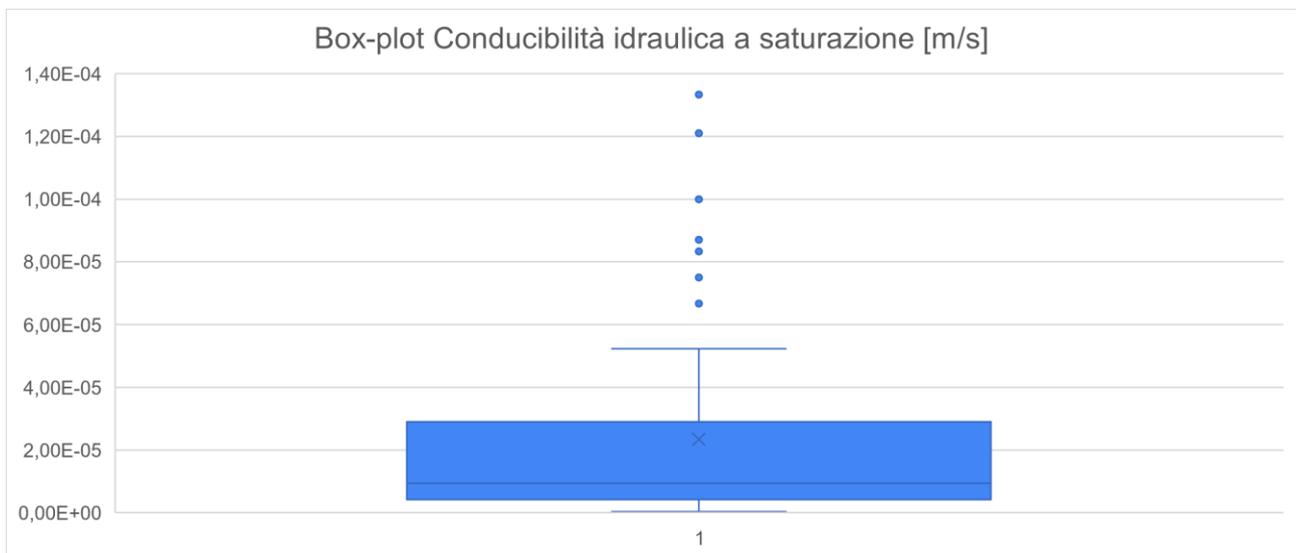


Figura 3.7: *Box-plot dei valori di K_{fs} .*

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

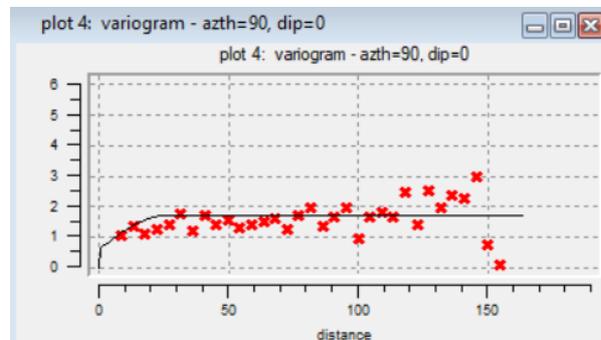
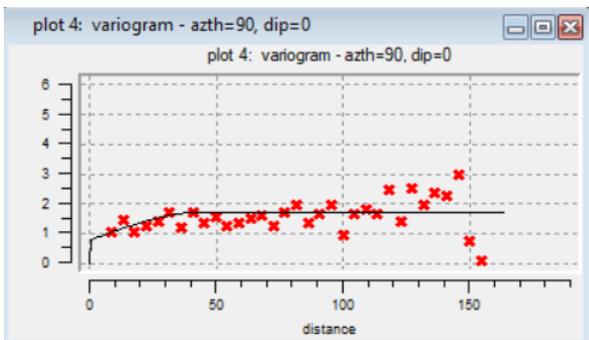
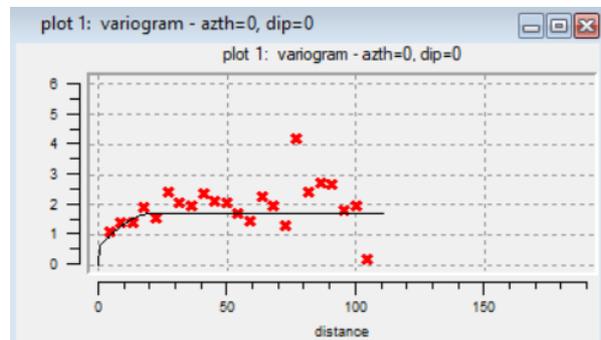
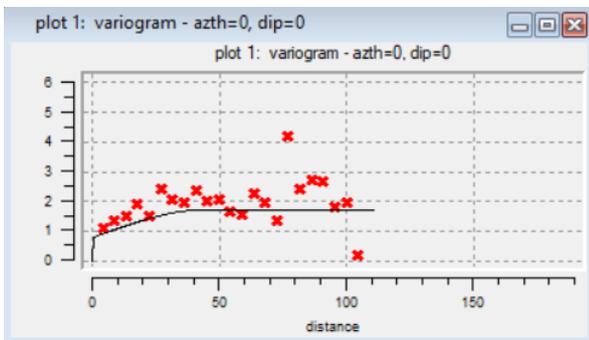
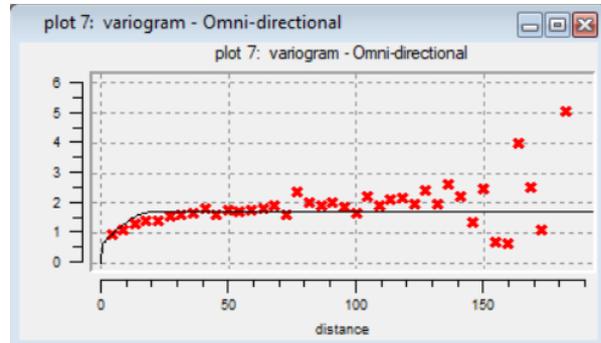
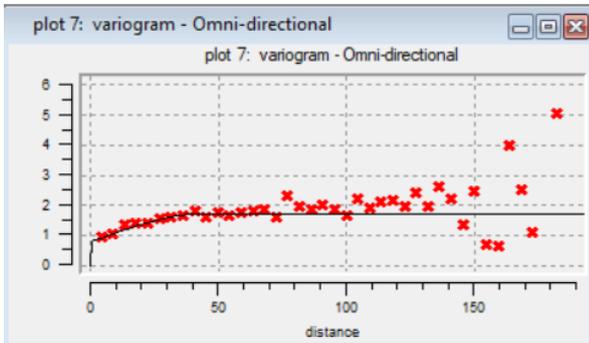


Figura 3.6: Variogrammi sperimentali (punti in rosso) e risultati della calibrazione (linea continua nera) per il modello 1 e per il modello 2 nella configurazione 2A.

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 Settole 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.

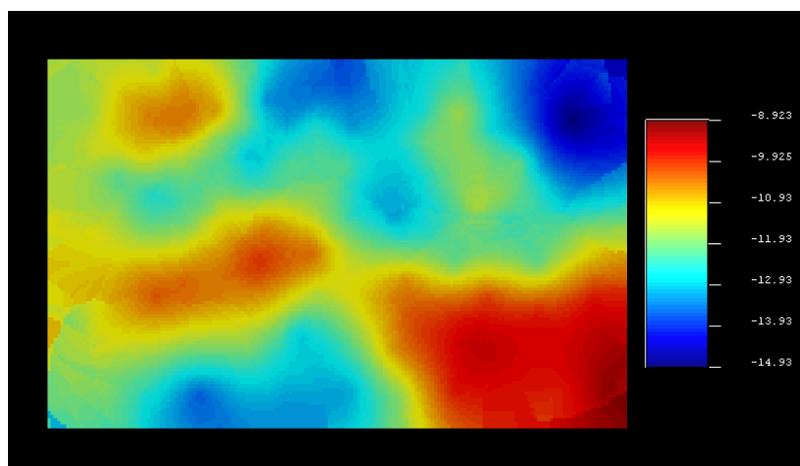


Figura 3.8: Il Kriging svolto per l'area di studio considerando il modello variogramma 1, i valori sono in scala logaritmica.

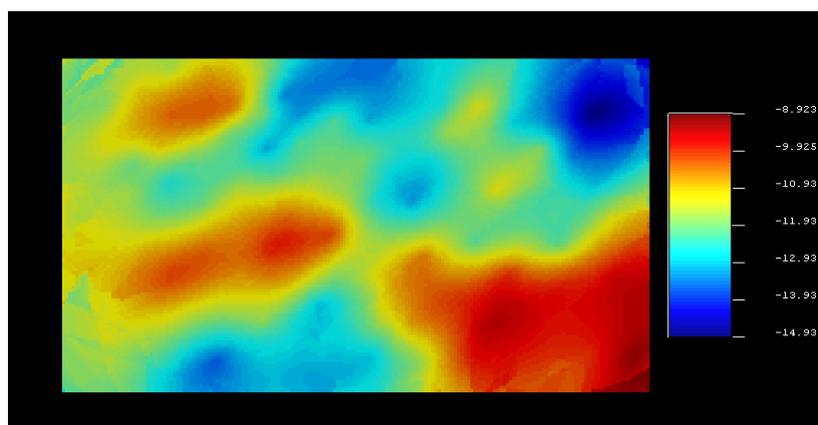


Figura 3.9: Il Kriging svolto per l'area di studio considerando il modello variogramma 2, i valori sono in scala logaritmica.

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.

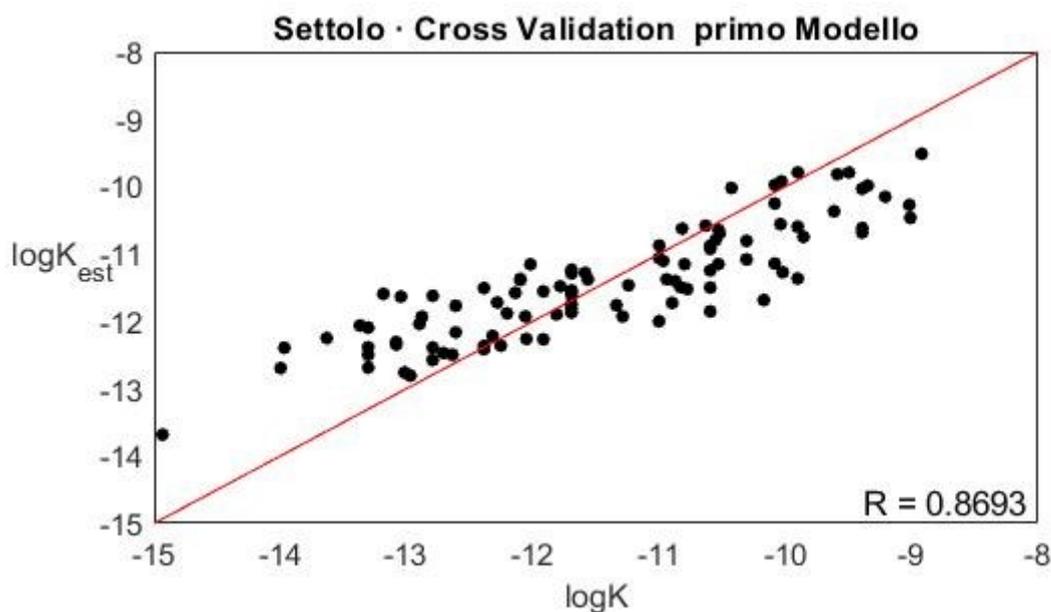


Figura 3.10: validazione incrociata dei punti campionati, nell'asse delle ascisse si ha il logaritmo di K_{fs} campionaria, mentre nell'asse delle ordinate è presente il valore logaritmico di K_{fs} stimata attraverso il metodo della validazione incrociata.

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.

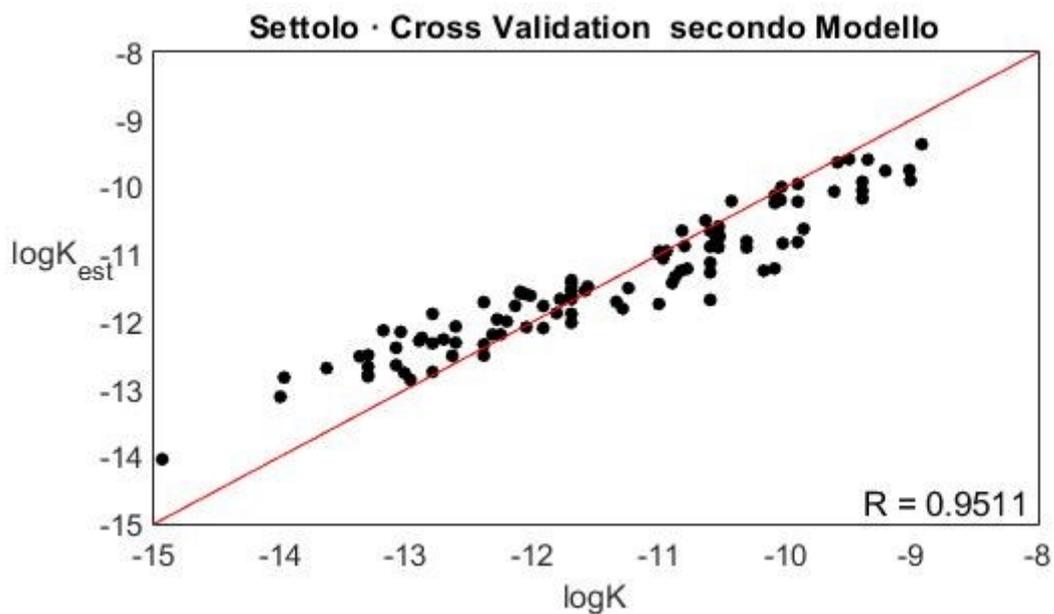


Figura 3.11: validazione incrociata dei punti campionati, nell'asse delle ascisse si ha il logaritmo di K_{fs} campionaria, mentre nell'asse delle ordinate è presente il valore logaritmico di K_{fs} stimata attraverso il metodo della validazione incrociata.

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 ."

