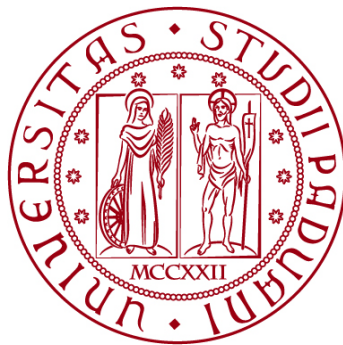


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in ingegneria per l'ambiente ed il territorio



TESI DI LAUREA

**ANALISI DI PROVE INFILTROMETRICHE FINALIZZATE ALLA
CARATTERIZZAZIONE IDRAULICA DEI SUOLI**

Relatore: Chiar.mo PROF. PAOLO SALANDIN
Correlatori: ING. LEONARDO COSTA

Laureando: ALBERTO BENOZZI

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Indice

Capitolo 1: Introduzione.....	1
Capitolo 2: Materiali & Metodi	5
2.1 Attività sperimentale ed elaborazione dei dati campionari	5
2.1.1 <i>Gli infiltrometri</i>	<i>5</i>
2.1.2 <i>Calcolo della capacità di infiltrazione sperimentale</i>	<i>8</i>
2.1.3 <i>Comportamento dell'acqua nel sottosuolo, la legge di Darcy.....</i>	<i>8</i>
2.1.4 <i>Equazione di Richards e meccanismi di infiltrazione</i>	<i>10</i>
2.1.5 <i>Metodo Green-Ampt</i>	<i>11</i>
2.2 Analisi statistica della conducibilità idraulica a saturazione	13
2.2.1 <i>Prima campagna</i>	<i>14</i>
2.2.2 <i>Seconda campagna</i>	<i>15</i>
2.3 Analisi Geostatistica della conducibilità idraulica a saturazione	16
2.3.1 <i>Rototraslazione e nuovo sistema di riferimento locale.....</i>	<i>17</i>
2.3.2 <i>Ipotesi di stazionarietà e variogramma</i>	<i>18</i>
2.3.3 <i>Gli stimatori lineari, il Kriging stazionario.....</i>	<i>22</i>
2.3.4 <i>Validazione incrociata (Cross Validation).....</i>	<i>25</i>
Capitolo 3: Discussione dei risultati	27
3.1 Test infiltrometrici e conducibilità idraulica a saturazione	27
3.2 Risultati analisi statistica	30
3.2.1 <i>Prima campagna sperimentale</i>	<i>31</i>
3.2.2 <i>Seconda campagna sperimentale</i>	<i>35</i>
3.3 Risultati dell'analisi Geostatistica	39
3.3.1 <i>Rototraslazione</i>	<i>40</i>
3.3.2 <i>Analisi strutturale e definizione dei parametri</i>	<i>40</i>
3.3.3 <i>Risultati del Kriging</i>	<i>45</i>
3.3.4 <i>Risultati della Validazione Incrociata (Cross-Validation)</i>	<i>48</i>
3.4 Conclusioni.....	56
Appendice.....	61
Riferimenti bibliografici	63

Capitolo 1

Introduzione

Per la conservazione delle caratteristiche qualitative delle acque destinate al consumo umano, il Testo Unico Ambientale, D.lgs. 152/2006, stabilisce l'obbligo per le Regioni di individuare delle aree di salvaguardia attorno alle opere di captazione, ad esempio attorno ai pozzi per l'estrazione di acqua potabile da falda. All'interno di queste aree numerose attività antropiche sono vietate o soggette a forti limitazioni.

Tali aree si suddividono, sempre secondo il D.lgs. 152/2006, in due zone:

- Area di tutela assoluta, la quale si estende per un raggio di 10 metri partendo dal punto di captazione delle acque, e dove è vietata qualsiasi attività che non sia esclusivamente correlata al mantenimento e alla gestione delle opere di captazione.
- Zona di rispetto, nella quale sono vietate attività quali la dispersione di fanghi e acque reflue, lo spandimento di fertilizzanti concimi e pesticidi, la predisposizione di aree cimiteriali, l'apertura di cave (che potrebbero avere connessioni con la falda stessa), lo stoccaggio di rifiuti o altre sostanze chimiche e il pascolo di bestiame.

Le Regioni hanno l'obbligo di indicare i criteri da adottare per la definizione di quest'ultima. In caso d'inerzia da parte delle regioni nello sviluppo dei criteri, la zona di rispetto deve avere una estensione di raggio pari ad almeno 200 metri (criterio geometrico) attorno alla struttura di captazione.

Lo studio della variabilità spaziale della conducibilità idraulica dei terreni rientra nel contesto della "definizione dei criteri", per lo sviluppo di una procedura che permetta la determinazione della zona di rispetto sulla base di ragioni fisiche e non prettamente geometriche.

Per questo lavoro di tesi, l'area di salvaguardia in esame è quella che si sviluppa attorno al campo pozzi del sito del "Settolo", gestito dalla società Alto Trevigiano Servizi, nel comune di Valdobbiadene (TV).

Il Campo Pozzi Settolo (Fig. 1.1) rifornisce di acqua potabile parte della provincia di Treviso prelevando l'acqua dalla falda freatica strettamente correlata alle condizioni di piena del fiume Piave, distante non più di 1 chilometro.

L'attività sperimentale è stata sviluppata eseguendo dei test infiltrometrici distribuiti omogeneamente nell'area di studio utilizzando degli infiltrometri a doppio anello, strumenti che consentono la misura puntuale della conducibilità idraulica di campo a saturazione (*field-saturated hydraulic conductivity*, K_{fs}) del terreno.

L'elaborazione dei dati sperimentali raccolti ha permesso il calcolo dei valori puntuali di conducibilità idraulica a saturazione per individuare zone caratterizzate da una più alta capacità di

infiltrazione, questo perché in tali aree è ipotizzabile un più alto rischio di trasporto verticale di contaminanti, dalla superficie del terreno verso la falda freatica da cui attinge il pozzo.

A partire dai valori di conducibilità idraulica a saturazione, si è prodotta un'analisi descrittiva con la quale è stato possibile individuare la presenza di eventuali aree con comportamenti discordi, da trattare separatamente in virtù delle proprie caratteristiche di conducibilità.

L'analisi descrittiva dei dati di conducibilità idraulica a saturazione ha permesso lo sviluppo di un'analisi geostatistica strutturale dei dati, sfruttando la localizzazione di ogni test svolto all'interno dell'area di studio valutando la correlazione spaziale dei dati raccolti.

Attraverso l'analisi geostatistica si è sviluppato un modello preliminare di stima puntuale per prevedere il comportamento della conducibilità idraulica a saturazione nei punti non campionati. Ciò ha permesso di ottenere una mappa della conducibilità idraulica a saturazione diffusa su tutta l'area utilizzabile come base per una prima valutazione del rischio di infiltrazione di fitofarmaci.

In questo caso, una più elevata conducibilità idraulica a saturazione potrebbe corrispondere a un rischio più elevato di contaminazione della falda freatica, attraverso il trasporto verticale di sostanze potenzialmente inquinanti.

L'elaborato si sviluppa in due capitoli: Materiali & Metodi e Discussione dei risultati, in cui si descrivono il metodo di raccolta dati, le analisi statistiche e le analisi geostatistiche effettuate su specifiche aree di interesse.



Figura 1.1, immagine satellitare Campo pozzi Settolo, area gestita da Alto Trevigiano Servizi e composta da tre pozzi, denominati pumping well 1, 2, 3.

Nel capitolo Materiali & Metodi si esplicitano tutte le tecniche utilizzate per la raccolta dei dati, la struttura degli strumenti e criteri di calcolo implementati.

Inoltre, si sviluppa la teoria necessaria alla definizione dei metodi di infiltrazione dell'acqua nel sottosuolo, con i quali è possibile ricavare i valori di conducibilità idraulica a saturazione a partire dai dati campionari.

Nel Capitolo 3; Discussione dei risultati, si analizzano i dati ottenuti, presentando sia i valori ricavati sperimentalmente dalle prove infiltrometriche, sia gli esiti finali delle analisi condotte sui valori di conducibilità idraulica ricavati.

Infine, è presente una validazione dei risultati geostatistici, attraverso metodi di controllo consolidati in via teorica, e una conclusione con la quale si riassumono i risultati ricavando le principali implicazioni pratiche e le conseguenze reali.

Capitolo 2

Materiali & Metodi

Nel seguente capitolo si analizzano le caratteristiche della strumentazione utilizzata, descrivendo la struttura e il metodo di utilizzo degli infiltrometri, la disposizione spaziale dei test effettuati, e le teorie d'infiltrazione necessarie alla definizione dei valori di conducibilità idraulica a saturazione. Successivamente, viene definito il processo di analisi statistica dedicato a ricercare la presenza di affinità tra i dati sia a livello numerico, sia a livello spaziale, ponendo le basi per l'analisi geostatistica, con la quale è possibile interpolare spazialmente i risultati ottenuti, inquadrando il tutto nel contesto del Campo Pozzi Settolo.

2.1 Attività sperimentale ed elaborazione dei dati campionari

La raccolta dei dati campionari avviene attraverso gli infiltrometri i quali, oltre che misurare la K_{fs} come già anticipato nel capitolo introduttivo, permettono di calcolare la capacità d'infiltrazione f_c , espressa in mm/min. Tale misura avviene mediante l'osservazione dell'andamento nel tempo del tirante idrico, creato appositamente, sopra il piano campagna nell'area circoscritta dallo strumento stesso.

La variazione del tasso di infiltrazione in funzione del tempo produce la curva sperimentale della capacità di infiltrazione dell'acqua nel terreno, dalla quale è possibile strutturare un modello capace di descrivere in modo efficiente il processo di infiltrazione.

2.1.1 Gli infiltrometri

L'infiltrometro è composto da una coppia anelli concentrici in acciaio inossidabile (Fig. 2.1), muniti di un galleggiante connesso a un'asta graduata con precisione millimetrica.

Tutte le coppie di anelli utilizzate, hanno una altezza costante pari a 25 cm, mentre differiscono per le dimensioni del diametro:

- Coppia uno; con diametro anello interno uguale a 28 cm, esterno pari a 53 cm.
- Coppia due; con diametro anello interno uguale a 30 cm, esterno pari a 55 cm.
- Coppia tre; con diametro anello interno uguale a 32 cm, esterno pari a 57 cm.

Poiché la misura riguarda il tirante idrico, i risultati delle prove non risentono del tipo di coppia di anelli utilizzata.

L'installazione dell'infiltrometro avviene per mezzo di una piastra in acciaio inossidabile, posta sopra la coppia di anelli, e un martello, con il quale, tramite una serie di colpi effettuati sulla piastra, si inserisce nel terreno la coppia di anelli per una profondità di almeno 5 cm.

La piastra e il martello sono universali, e sono utilizzabili per ogni coppia di infiltrometri a disposizione, grazie a delle scanalature che permettono il corretto incastro della piastra in base ai diametri a disposizione.

Successivamente, è necessario collocare nell'anello centrale (con diametro più piccolo) la struttura galleggiante-asta, attraverso un apposito sostegno in plastica rigida in grado di vincolare i gradi di libertà del galleggiante e dell'asta alla sola direzione verticale (Fig. 2.2).

Il test infiltrometrico ha inizio inserendo dell'acqua all'interno della coppia di anelli, facendo attenzione a pareggiare il livello del pelo libero tra l'anello interno e l'anello esterno, con un tirante idrico rispetto al terreno inferiore al dislivello massimo registrabile dal galleggiante.

Una volta terminato il riempimento dell'infiltrometro è necessario, il prima possibile, leggere il valore in millimetri segnato dall'asta verticale e contemporaneamente dare avvio al cronometro, o alternativamente, registrare l'ora di partenza del test, utilizzando un orologio sincronizzato con uno dei formati di ora standard.

Per la determinazione dell'istante temporale si è scelto l'utilizzo di orologi sincronizzati con il formato ora/minuti/secondi secondo l'orario standard dell'Europa centrale.



Figura 2.1. set completo test infiltrometrico, tre coppie di anelli con diverse dimensioni, una piastra in acciaio, un martello, quattro strutture asta-galleggiante, tre sostegni in plastica, due ganci per la rimozione e un cronometro

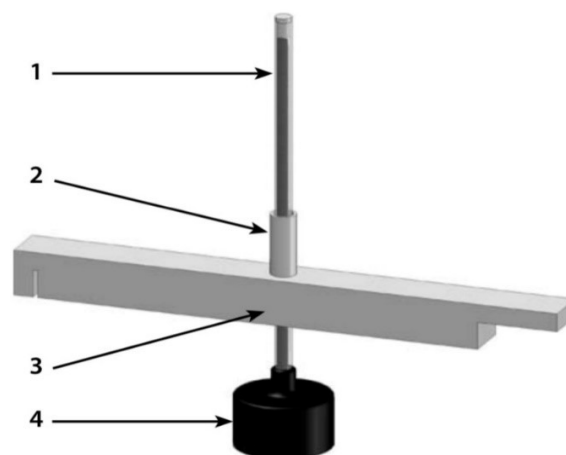


Figura 2.2. asta con precisione millimetrica (1), tubo per la visualizzazione dei risultati (2), struttura di sostegno in grado di vincolare i gradi di libertà (3), galleggiante (4)

Ad intervalli di tempo prefissati (i.e. ogni 30 secondi) si segna il livello del tirante idrico presente nel solo anello interno attraverso la lettura dell'asta verticale, la quale risulta essere una misura indiretta dell'altezza del pelo libero.

Dopo un certo periodo di tempo, non definibile a priori, ma relazionato al valore del tasso di infiltrazione presente nel punto in esame, è necessario ripetere l'operazione di riempimento, pareggiando nuovamente i livelli e registrando la nuova quota di partenza.

A questo punto, il test continua a cicli di riempimento con annesse misurazioni ad intervalli regolari.

Nel caso più frequente di una certa riduzione nel tempo della velocità di infiltrazione dell'acqua nel terreno, il delta temporale fissato inizialmente è aumentato sulla base dell'andamento del test.

Le misure di dislivello registrate possono essere prese attraverso operazioni automatiche, tramite l'utilizzo di macchine fotografiche impostate per produrre uno scatto ad intervalli di tempo regolari, facendo attenzione alla sincronizzazione temporale tra le varie macchine.

In modo del tutto equivalente, è possibile scrivere a mano i valori presenti nell'asta verticale e l'ora di registrazione, tale metodo operativo risulta essere pratico soprattutto verso la fine del test infiltrometrico, quando a causa della riduzione del tasso di infiltrazione, si possono eseguire le misure in tempi più dilatati.

Più complicata risulta essere la registrazione dei dati col metodo manuale durante la fase iniziale del test, dove si ha un tasso di infiltrazione molto più elevato con conseguente maggior velocità di abbassamento del tirante idrico rispetto al piano campagna.

Tutti i valori derivanti dalla lettura dell'asta, sono riferiti al comportamento del livello del pelo libero del solo anello centrale più piccolo, infatti, per una misurazione infiltrometrica sarebbe sufficiente la sola presenza dell'anello interno, ma il grado di abbassamento del tirante idrico, e il relativo tasso di infiltrazione, risulterebbe sovrastimato a causa del maggior deflusso orizzontale dell'acqua infiltrata nel terreno.

L'anello esterno permette di limitare il deflusso orizzontale dell'acqua proveniente dall'anello interno, visto che riesce a fornire un ulteriore deflusso verticale, ostacolando il moto radiale generato dall'acqua originaria dell'anello interno.

Se il livello d'acqua dell'anello esterno è superiore rispetto a quello interno, si produce una spinta radiale dell'acqua dall'esterno verso l'interno nella zona del terreno sottostante l'infiltrometro, causando una riduzione del deflusso verticale (Fig. 2.3).

Viceversa, la presenza nell'anello interno di un tirante idrico superiore, produce una spinta radiale dal centro dello strumento verso l'esterno, provocando una sovrastima della capacità di infiltrazione, ossia la stessa situazione dell'infiltrometro a singolo anello.

Di conseguenza, risulta necessario controllare in modo assiduo durante tutto il test, i livelli interno ed esterno in modo da non ottenere risultati alterati.

I dati grezzi, recuperati mediante le fotocamere oppure tramite le trascrizioni manuali, vengono importati in un file Excel, relazionando la misura dell'asta in millimetri, con l'orario a cui tale misura è associata. Inoltre, con un'operazione di sottrazione, si è determinato il tempo totale del test, ponendo come valore iniziale l'ora esatta in cui è cominciata la prova

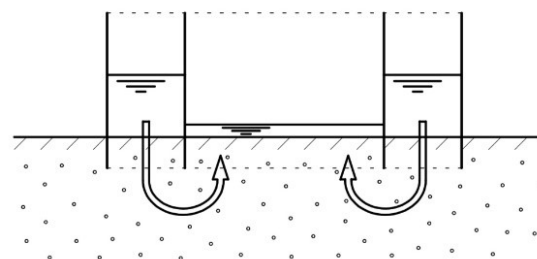


Figura 2.3, sezione trasversale dell'infiltrometro che mostra il fenomeno della riduzione del deflusso verticale dell'anello interno a causa del maggior valore del livello esterno

$$T_t = DT_0 - DT_i, \quad (2.1)$$

Dove con il termine T_t si indica il tempo del test, con il valore di DT_0 si indica il *Date time* iniziale del test, ossia l'ora di avvio della prova, mentre DT_i è l'ora di ogni i -esima registrazione.

Ad ogni ciclo di riempimento è stato associato un codice identificativo, associando il numero di cicli alle misurazioni effettuate e agli istanti temporali di riferimento.

2.1.2 Calcolo della capacità di infiltrazione sperimentale

Dai dati campionari raccolti attraverso i test infiltrometrici, si è determinato per ogni differenza temporale, il tasso di infiltrazione specifico per il terreno sottostante l'infiltrometro.

Il calcolo della capacità di infiltrazione sperimentale si è ottenuto sottraendo la quota i -esima segnata dall'asta verticale, con la quota calcolata all'istante successivo $i+1$, e dividendo tale valore con la differenza temporale tra le due misurazioni.

Definendo con H il valore in millimetri registrato attraverso l'asta verticale, l'equazione per il calcolo della capacità di infiltrazione sperimentale è:

$$f_c = \frac{H_{i+1} - H_i}{t_{i+1} - t_i} = \frac{\Delta H}{\Delta t}. \quad (2.2)$$

Con i valori t_i e t_{i+1} si intende i valori del tempo totale del test, ricavati con la (2.1) e riferiti rispettivamente all' i -esima e alla $i+1$ -esima lettura dell'asta graduata.

Si sottolinea l'importanza di escludere dal calcolo tutte le prime misurazioni avvenute dopo un riempimento dell'infiltrometro; infatti, non ha alcun significato fisico effettuare il calcolo di f_c tra la quota di fine ciclo e la prima quota misurata dopo l'aggiunta di acqua nell'anello infiltrometrico più piccolo, questo perché la variazione temporale non è correlata ad un processo di infiltrazione, ma esclusivamente al tempo meccanico di riempimento dello strumento, mentre la differenza di quota piezometrica a causa del processo stesso di riempimento.

Ponendo in relazione la capacità di infiltrazione sperimentale f_c con il tempo totale T_t a cui è stata misurata, è possibile ricavare la curva sperimentale del tasso d'infiltrazione, che può essere approssimata attraverso i vari modelli di infiltrazione presenti in letteratura.

La curva sperimentale è composta da una serie punti, corrispondenti ai valori di capacità d'infiltrazione sperimentale, che presentano un andamento approssimabile con un'esponenziale negativa, tendente asintoticamente al valore del tasso di infiltrazione a saturazione.

I modelli di infiltrazione consentono, a partire dai dati sperimentali, di determinare le caratteristiche fisiche del terreno, relazionate al flusso verticale dell'acqua, consentendo quindi di inquadrare in via teorica i valori sperimentali ricavati attraverso i test infiltrometrici.

2.1.3 Comportamento dell'acqua nel sottosuolo, la legge di Darcy

I dati sperimentali ricavati, permettono di definire un modello d'infiltrazione in grado di descrivere il comportamento dell'acqua nel sottosuolo, a partire da delle condizioni di sottosaturazione del terreno.

La relazione di base per la trattazione del moto idrico nel sottosuolo è la legge di Darcy (Citrini & Nosedà, 1987), la quale esprime una proporzionalità diretta tra la velocità dell'acqua nel terreno saturo e l'energia dissipata

$$v_d = -k_s \frac{\Delta E}{\Delta L} \simeq k_s \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (2.3)$$

Dove si ha che v_d è la velocità di Darcy, $\Delta E/\Delta L$ è il gradiente energetico ed indica l'energia dissipata per unità di lunghezza, mentre k_s è la conducibilità idraulica a saturazione, ossia la velocità di Darcy in condizioni di gradiente energetico unitario.

Ponendo l'ipotesi di incomprimibilità del fluido, e considerando trascurabile la componente cinetica dell'energia bernoulliana, è possibile riscrivere il gradiente energetico come gradiente piezometrico, uguagliando $\Delta H = -\Delta E$.

La distribuzione dell'umidità del suolo al variare della profondità durante un evento di precipitazione che produce infiltrazione si comporta come schematizzato in Figura 2.4

Sono presenti quattro zone principali; la *saturated zone*, vicino alla superficie, la *transmission zone* in cui esiste un flusso insaturo in cui l'umidità del terreno è pressoché costante lungo la verticale, la *wetting zone*, caratterizzata da un'umidità decrescente con la profondità ed infine il *wetting front*, nella quale esiste una brusca variazione dell'umidità ed oltre il quale, si ha un suolo praticamente asciutto (Hillel, 1980).

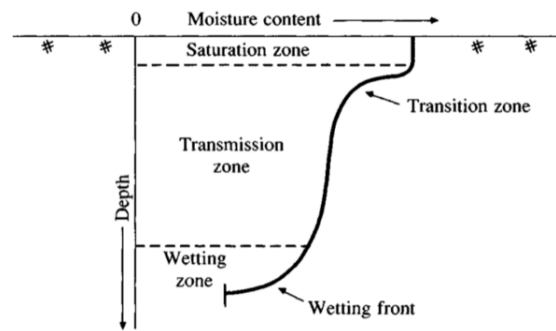


Figura 2.4, distribuzione dell'umidità del terreno in funzione della profondità, Hillel, 1980

Considerando un terreno in condizioni di sottosaturazione, si vede come le condizioni energetiche siano diverse da quelle espresse nella (2.3), che pertanto deve essere generalizzata, diventando una funzione della saturazione:

$$\mathbf{v}(s) = -\mathbf{k}(s)\nabla E(s). \quad (2.4)$$

In cui si ha che:

- $\mathbf{v}(s)$ è la velocità di Darcy generalizzata in funzione della saturazione del terreno.
- $\mathbf{k}(s)$ è la conducibilità idraulica, è funzione della saturazione, tale valore tende con k_s quando il suolo è saturo.
- $E(s)$ è l'energia presente nel terreno insaturo, ed è pari alla somma della quota verticale e della capillarità (funzione della saturazione).

L'equazione vettoriale (2.4) è valida per ogni punto del terreno; pertanto, inserendo il tutto in un sistema di riferimento cartesiano con asse z diretto verso il basso ed esplicitando la velocità di Darcy lungo la sola verticale, si ha che

$$v_z(\mathbf{x}, t) = -k_z(\mathbf{x}, s(\mathbf{x}, t)) \left[\frac{\partial z(\mathbf{x})}{\partial z} + \frac{\partial \Psi_c(\mathbf{x}, s(\mathbf{x}, t))}{\partial z} \right] \quad (2.5)$$

In cui \mathbf{x} è il vettore spazio, t , è il tempo, Ψ_c è la pressione capillare e k_z è la conducibilità idraulica lungo la direzione z .

2.1.4 Equazione di Richards e meccanismi di infiltrazione

Considerando il sistema di assi cartesiani definito per l'equazione (2.5), si consideri un volume infinitesimo di terreno, il bilancio di massa su tale volume lungo la sola direzione verticale sarà pari a:

$$\frac{dV_{H_2O}}{dt} = Q_{IN} - Q_{out} \quad (2.6)$$

Dividendo ambo i membri per l'area del volume infinitesimo scelto, e sostituendo i termini a destra dell'uguale con l'equazione (2.5) è possibile ottenere l'equazione di Richards,

$$\eta \frac{\partial s(z, t)}{\partial t} = - \frac{dk_z}{ds} \frac{\partial s(z, t)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[D(z, t) \frac{\partial s(z, t)}{\partial z} \right] \quad (2.7)$$

Dove:

- η è la porosità
- s è la saturazione
- $D(z, t)$ è il coefficiente di diffusività ed è pari a $k_z(s(z, t))(d\Psi_c/ds)$

Richards fornisce in questo modo un'equazione, alle derivate parziali del secondo ordine, in grado di descrivere l'andamento della saturazione nel volume di controllo al variare di profondità e tempo, perciò la (2.7) risulta essere la spiegazione analitica dei meccanismi di infiltrazione.

Esistono due meccanismi di infiltrazione che motivano a livello fisico il bilancio sviluppato con l'equazione di Richards:

1. Il suolo è caratterizzato, ad ogni istante temporale, da una massima capacità di infiltrazione, indicata con $f^*(t)$, dipendente dalle condizioni di umidità del suolo, e decrescente durante un evento meteorico.

Se la quantità di acqua che raggiunge il suolo è inferiore della massima capacità di infiltrazione, tutta l'acqua si infila nel terreno, mentre se la quantità di acqua che raggiunge il suolo è superiore della $f^*(t)$, la quantità di acqua che si infila nel terreno è pari proprio alla massima capacità di infiltrazione (Horton, 1933).

- L'acqua è in grado di infiltrarsi nel terreno fino a quando il suolo diventa completamente saturo (ipotizzando una zona più impermeabile al di sotto della zona radicale), dopodiché si sviluppa un deflusso superficiale (Dunne, 1970).

La risoluzione analitica dell'equazione di Richards richiede la definizione di due condizioni al contorno (spaziali e temporali) che difficilmente sono note a priori, inoltre l'eterogeneità del sottosuolo tende a crescere man mano che si allarga l'area di applicazione complicando la risoluzione numerica diretta.

2.1.5 Metodo Green-Ampt

Per evitare di implementare la risoluzione analitica dell'equazione di Richards, sono stati definiti diversi modelli di infiltrazione sia analitici, attuando diverse semplificazioni all'equazione di Richards, come ad esempio il modello di infiltrazione di Horton, che sperimentali, capaci di descrivere l'andamento dell'infiltrazione dell'acqua nel terreno attraverso osservazioni empiriche.

Una via alternativa è stata proposta da Green ed Ampt (1911), i quali non semplificarono l'equazione di Richards, ma adottarono una semplificazione dell'andamento della distribuzione dell'umidità in funzione della profondità, ricavandone un'equazione analitica (Fig. 2.5).

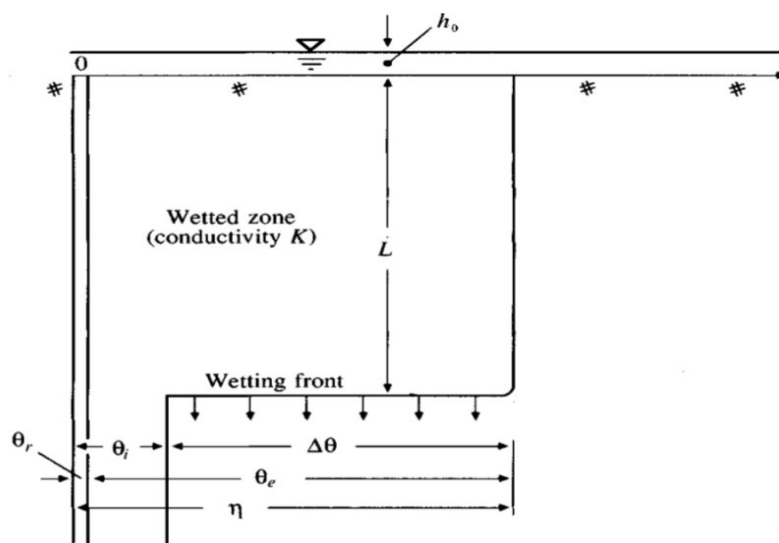


Figura 2.5. modello di infiltrazione di Green-Ampt (1911), l'asse verticale indica la distanza dalla superficie del terreno, l'asse orizzontale mostra i valori di umidità del terreno, con L si indica la profondità del wetting front a un tempo generico da quando l'infiltrazione è cominciata, h_0 è il tirante idrico sopra il terreno.

La saturazione di un terreno secondo il modello di Green-Ampt avviene traslando verso il basso l'area completamente satura fino al raggiungimento del *wetting front*, il quale rappresenta la zona di separazione tra l'area satura e l'area insatura con umidità del terreno pari a ϑ_i .

Il vantaggio di tale semplificazione è collegato alla validità della legge di Darcy, visto che si descrive lo spostamento del *wetting front* come una traslazione dell'area satura in cui è valida la l'equazione (2.3).

Considerando un volume di controllo di terreno completamente saturo con tirante idrico sopra la superficie pari ad h_0 il modulo della velocità di Darcy risulta essere pari alla capacità di infiltrazione f [L/T], ossia la quantità di acqua in grado di penetrare dalla superficie del terreno.

Scrivendo la capacità di infiltrazione con queste ipotesi lungo la verticale si ha,

$$f = |v_d| = k_s \frac{h_1 - h_2}{z_1 - z_2} \quad (2.8)$$

In cui il punto 1 è localizzato sulla superficie del terreno, mentre il punto 2 è collocato nel *wetting front* dalla parte insatura (Chow at all, 1988).

Secondo le regole dell'idrostatica, h_1 è uguale ad h_0 , ed h_2 è pari a $-L - \Psi$ visto che si è imposto come zero dell'asse verticale la superficie del terreno.

Sostituendo i valori così definiti si ottiene

$$f = k_s \frac{h_0 - (-L - \Psi)}{L} \quad (2.9)$$

Non sapendo sempre la profondità raggiunta dal *wetting front*, conviene riscrivere l'equazione (2.9) utilizzando F , ossia l'infiltrazione cumulata definita come

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt, \quad (2.10)$$

la quale, secondo le ipotesi proposte, si può riscrivere nella forma $F(t) = L (\eta - \vartheta_i) = L \Delta\vartheta$, e sostituire all'interno della (2.10) ottenendo l'equazione finale di Green-Ampt:

$$f = \frac{dF}{dt} = k_s \frac{h_0 \Delta\vartheta + \Psi \Delta\vartheta + F}{F} \quad (2.11)$$

In cui le incognite da determinare sono la conducibilità idraulica a saturazione k_s , la differenza di umidità del terreno tra le condizioni iniziali e le condizioni di saturazione $\Delta\vartheta$, e la pressione capillare del terreno Ψ .

La scelta del modello Green-Ampt è dovuta a precise ragioni fisiche inerenti alla zona del Campo Pozzi Settolo, che consentono di approssimare l'andamento del flusso verticale come un'unica traslazione del fronte bagnato.

Le ragioni fisiche che hanno condotto alla scelta di questo modello di infiltrazione sono riconducibili alla struttura geologica presente nel sito di studio.

La stretta vicinanza del Campo Pozzi Settolo con l'alveo fluviale del fiume Piave ha influenzato notevolmente la stratificazione geologica del terreno, il quale risulta essere per lo più materiale detritico grossolano, con elevata capacità d'infiltrazione.

Lo strato detritico è coperto da una zona radicale organica con spessore dell'ordine variabile di alcune decine di centimetri fino al metro, caratterizzato da una più elevata componente organico-vegetale, e da una granulometria più fine, rispetto al materiale detritico sottostante.

Le caratteristiche fisico-chimiche dello strato radicale producono una riduzione della conducibilità idraulica rispetto allo strato detritico sottostante, fungendo un ruolo di filtro.

I test infiltrometrici svolti consentono di ricavare le caratteristiche idrauliche del terreno superficiale, ossia della zona radicale, determinando la curva caratteristica della capacità d'infiltrazione del solo strato superiore, a causa della più elevata conducibilità presente nello strato successivo detritico (Fig. 2.6).

L'elevata conducibilità della zona sottostante è paragonabile alla quantità di acqua versata nell'infiltrometro, e pertanto secondo i meccanismi di infiltrazione di Horton e Dunne l'acqua va completamente a infiltrarsi nel sottosuolo senza provocare alcun tipo di deflusso diverso da quello verticale.

Il ridotto spessore dello strato radicale favorisce l'approssimazione presente nel metodo di Green-Ampt, in cui si trascura la presenza della *transition zone* e la *wetting zone*, trattando il fenomeno come una traslazione verticale della parte satura.

Le misurazioni infiltrometriche, dunque, non consentono la sola determinazione delle caratteristiche del terreno quali conducibilità idraulica a saturazione, pressione capillare e umidità iniziale, ma forniscono un metodo per identificare un ulteriore parametro di resistenza, un valore in grado di identificare l'opposizione offerta dal primo strato di terreno all'infiltrazione dell'acqua.

Una volta ottenuti tutti i dati sperimentali e avendo scelto il modello di infiltrazione, è possibile calcolare i parametri di tale modello attraverso un processo di approssimazione numerica.

Il modello di Green-Ampt prevede la determinazione di tre parametri chiave; la conducibilità idraulica a saturazione, la pressione capillare e il contenuto di acqua iniziale del terreno, ottenibili a partire dai valori della curva sperimentale della capacità di infiltrazione.

Il metodo di approssimazione utilizzato è il *goodness of fit metrics*, processo statistico che permette di individuare la bontà dei dati sperimentali in relazione a un modello ipotizzato.

Il metodo di calcolo della *goodness of fit metrics* consente quindi, a partire dai dati sperimentali, di determinare i parametri chiave del modello di infiltrazione di Green-Ampt, attraverso una serie di iterazioni che riducono man mano il possibile range di valori associabili ai parametri ricercati, terminando le iterazioni una volta raggiunto il valore del parametro con un residuo tollerabile.

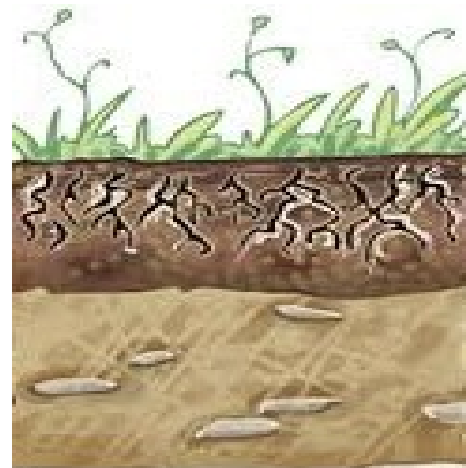


Figura 2.6, la zona superiore contraddistinta da una minor conducibilità idraulica, mentre la zona inferiore, avendo granulometria maggiore ha una conducibilità idraulica più elevata.

2.2 Analisi statistica della conducibilità idraulica a saturazione

Lo studio statistico si focalizza sull'analisi descrittiva classica dei valori di conducibilità idraulica a saturazione ricavati con il metodo di approssimazione del modello di Green-Ampt, a partire dai dati

sperimentali, ricercando eventuali dati fuori scala, valori significativi o zone con spiccate caratteristiche peculiari.

2.2.1 Prima campagna

La prima campagna di raccolta dati tenutasi dal 15/07/2021 al 15/09/2021, si focalizza nell'implementazione di una serie di test infiltrometrici (Fig. 2.7), localizzati in tre zone distinte del sito di studio.

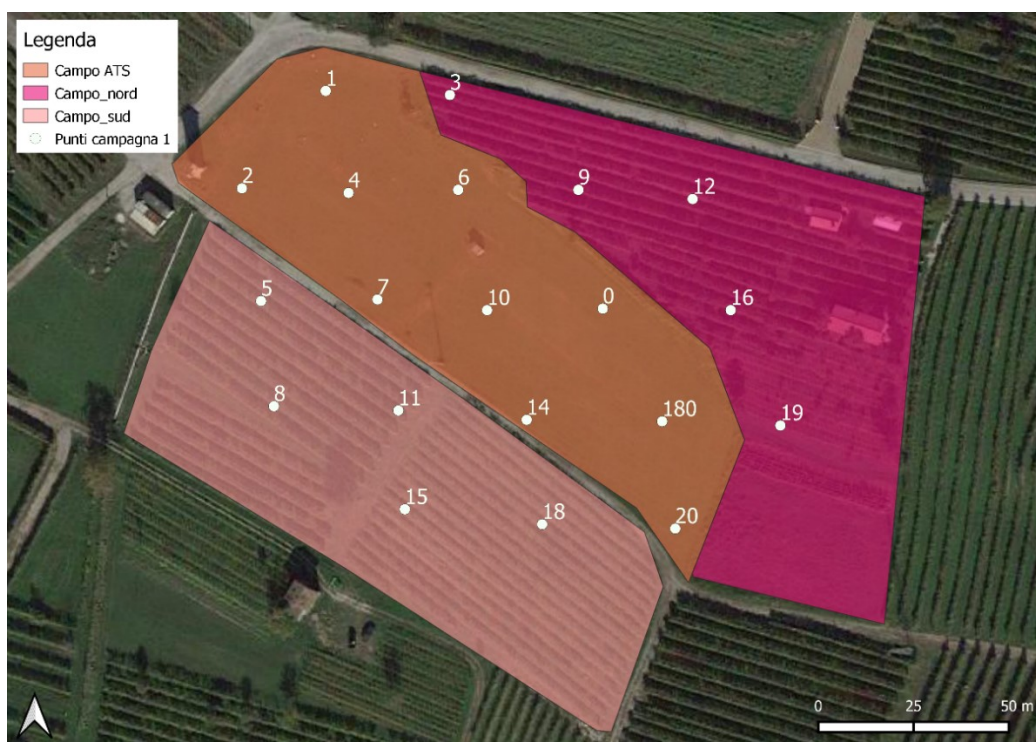


Figura 2.7. area Campo Pozzi Settolo, si evidenziano le tre aree di studio con i relativi test infiltrometrici associati definiti per la prima campagna; Campo ATS, il campo centrale in cui è presente il pozzo 1, Campo sud, l'area a sud del campo centrale in cui è presente un vigneto, Campo nord, vigneto a nord del pozzo.

Per comodità descrittiva, le diverse zone sono denominate nel seguente modo:

- Campo ATS, l'area centrale non coltivata gestita dalla società Alto Trevigiano Servizi, in cui è collocato il pozzo 1, essa è zona in cui si sviluppa l'area di salvaguardia.
- Campo nord, porzione di vigneto a nord del pozzo, è un'area coltivata da privati per uso vinicolo.
- Campo sud, area a sud del pozzo in cui sono presenti delle coltivazioni di vite per uso vinicolo.

Tutte le prove infiltrometriche svolte nei vigneti sono state autorizzate dai rispettivi gestori o proprietari.

Il numero totale di test effettuati durante la prima campagna ammonta a 20, un numero teoricamente sufficiente a fornire un'analisi statistica solida e sufficiente per una descrizione completa dell'area in esame.

Con i valori di conducibilità idraulica a saturazione ricavati con il modello Green-Ampt, si sono calcolati i principali coefficienti statistici descrittivi (media, mediana, range interquartile...) in modo da ottenere dei parametri confrontabili.

Il calcolo della media aritmetica dei valori di conducibilità idraulica a saturazione, in relazione con la moda e la classe con frequenza assoluta maggiore permette di strutturare un confronto diretto tra i vari dati, per individuare il tipo di distribuzione dei dati e l'eventuale presenza di valori estremi.

Al contrario, per ricercare i valori centrali della distribuzione e comprendere quindi la variabilità dei risultati di conducibilità idraulica a saturazione ottenuti, si utilizzano i range interquartili e la varianza, ottenendo di conseguenza dei coefficienti in grado di esplicitare l'eterogeneità dei dati.

2.2.2 Seconda campagna

La seconda campagna di test infiltrometrici, svoltasi tra il 15/09/2021 e il 15/10/2021, si è resa necessaria a causa dell'eterogeneità dei risultati, ottenuti dai test infiltrometrici relativi alla prima campagna, avendo quindi l'obiettivo di raggiungere un numero di test infiltrometrici statisticamente rilevante nel Campo sud, e di aumentare il numero di prove nel Campo ATS in modo da ottenere risultati più solidi a livello statistico (Fig. 2.8).

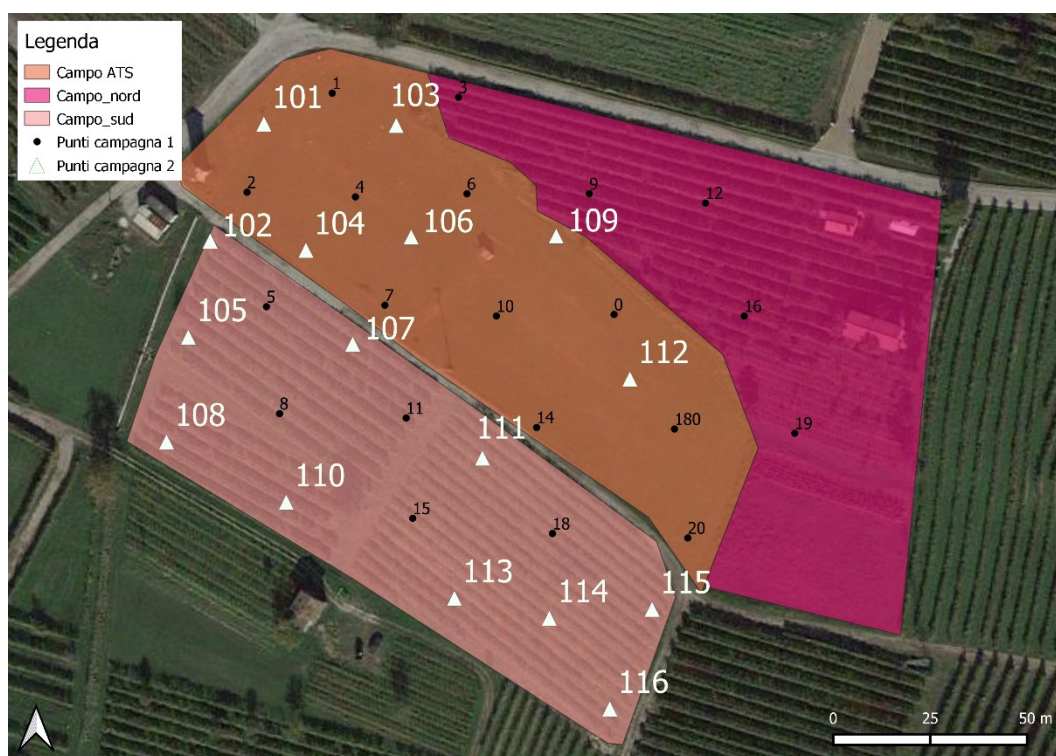


Figura 2.8, serie di test infiltrometrici relativi alla seconda campagna nell'area Campo Pozzi Settolo, in bianco sono evidenziati i nuovi punti appartenenti alla seconda campagna, in nero sono identificati i test infiltrometrici precedenti.

Si sono effettuati un numero aggiuntivo di test pari a 16, suddivisi tra Campo sud e Campo ATS rispettivamente in 10 e 6 prove.

Da tali test si sono ricavati i valori di conducibilità idraulica a saturazione, che a loro volta sono stati uniti ai dati calcolati durante la prima campagna e sui quali è stata svolta una nuova analisi statistica.

Per una miglior visualizzazione dei risultati statistici, si sono sviluppati i Poligoni di Voronoi, un metodo di stima puntuale geostatistico che sviluppa aree poligonali nell'intorno di ogni locazione spaziale, ossia a ogni punto del sito di studio in cui si è svolto un test infiltrometrico.

Il metodo poligonale di Voronoi è uno stimatore esatto perché associa all'area poligonale sviluppata il valore del dato geolocalizzato, in questo caso, la conducibilità idraulica a saturazione di ogni test infiltrometrico.

Con i poligoni di Voronoi è possibile visualizzare l'eterogeneità dei dati di conducibilità idraulica a saturazione e la loro disposizione spaziale, in modo tale da fornire una descrizione visiva del concetto di varianza ricavato mediante l'analisi statistica.

2.3 Analisi Geostatistica della conducibilità idraulica a saturazione

La Geostatistica è una branca della statistica applicata che studia i fenomeni che si manifestano su base spaziale. In particolare, studia la variabilità spaziale dei parametri che caratterizzano il fenomeno stesso, estrapolando un modello matematico di riferimento (Raspa, 1995).

Tutti i dati presi in considerazione dalla Geostatistica hanno una struttura spaziale, ossia le misurazioni di una o più caratteristiche, rilevate in corrispondenza di alcune localizzazioni di uno spazio o di un'area geografica (dominio).

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 distanti.

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). Il termine Geostatistica è stato coniato da Matheron (1962), statista francese riconosciuto dal mondo scientifico come padre della Geostatistica.

L'applicazione delle metodologie geostatistiche ai valori di conducibilità idraulica a saturazione determinati attraverso le prove infiltrometriche, consentono di ragionare non solo a livello numerico, con gli studi statistici di forma e variabilità dei dati, ma di ampliare le informazioni aggiungendo la posizione spaziale dei valori.

Lo studio del valore di una caratteristica, connesso alla locazione spaziale della caratteristica stessa, fornisce una via per individuare un modello in grado di descrivere l'andamento della conducibilità idraulica a saturazione in tutto il sito di studio a partire dai soli valori puntuali campionari.

L'analisi geostatistica si focalizza pertanto, nella ricerca di correlazioni spaziali tra i valori puntuali di conducibilità idraulica campionaria, con l'obiettivo di determinare, se possibile, un modello stimatore capace di descrivere i valori di conducibilità idraulica a saturazione nei punti dell'area di studio non campionati.

Il modello stimatore e tutte le analisi geostatistiche si sono svolte in SGeMS (*Stanford Geostatistics Modeling Software*), un software per la modellazione geostatistica sviluppato dall'università di Stanford, che contiene le principali metodologie statistico-probabilistiche in uso nella Geostatistica.

2.3.1 Rototraslazione e nuovo sistema di riferimento locale

Per la corretta visualizzazione dei dati in SGeMS, i file di *input* devono necessariamente presentare almeno tre valori:

- valore dell'ascissa, definito come X
- valore dell'ordinata, definito come Y
- valore della caratteristica in esame, ossia la conducibilità idraulica a saturazione.

Attraverso un sistema informativo geografico (QGIS), si sono estrapolate le coordinate planimetriche cartografiche con sistema di riferimento orientato a Roma Monte Mario, Italy 1, di ogni test infiltrometrico, in modo tale da avere per ogni prova, delle coordinate cartesiane (x,y) utilizzabili in SGeMS.

La disposizione spaziale dei valori di conducibilità idraulica a saturazione, in relazione alle coordinate cartesiane, ha reso necessaria l'implementazione di un nuovo sistema di riferimento rototraslato rispetto l'originale.

Tale necessità è dovuta alla struttura di elaborazione dei dati di SGeMS, il quale realizza le analisi geostatistiche solo in presenza di un dominio (griglia) capace di circoscrivere tutti i punti da analizzare.

La griglia è realizzabile direttamente nel programma di calcolo, ma segue esclusivamente le direzioni principali verticale e orizzontale (nord-est), senza la possibilità di ruotare secondo altre direzioni i lati della griglia rettangolare.

Alcune analisi geostatistiche effettate in SGeMS, come i metodi di stima puntuale, ottengono risultati in tutto il dominio definito, anche se esistono porzioni di dominio senza valori sperimentali caricati.

Un risultato di questo tipo andrebbe ad alterare i risultati sia a livello visivo, attraverso l'analisi delle mappe, che a livello numerico, durante le successive analisi di validazione.

Di conseguenza si è optato per la realizzazione di un nuovo sistema di riferimento locale, in grado di eliminare la presenza di aree vuote all'interno del dominio, e di ottenere coordinate solo positive. Conoscendo il valore dell'origine del nuovo sistema di riferimento X_0 , Y_0 (le quali saranno riferite al sistema iniziale Roma Monte Mario Italy 1), è possibile ricavare attraverso una semplice traslazione, le coordinate dei test infiltrometrici a partire dalla nuova origine:

$$x_i = x_{MM-i} - X_0 \quad (2.12a)$$

$$y_i = y_{MM-i} - Y_0 \quad (2.12b)$$

In cui x_{MM-i} e y_{MM-i} sono le coordinate dell' i -esimo punto riferite al sistema Monte Mario, Italy 1, mentre x_i e y_i sono i nuovi valori delle coordinate traslate con centro X_0 e Y_0 .

La rotazione dei dati secondo l'angolo α orario (in modo da ottenere coordinate positive) avviene attraverso l'utilizzo di basiche nozioni trigonometriche:

$$x_{RT} = x_i \cos(\alpha) - y_i \sin(\alpha) \quad (2.13a)$$

$$y_{RT} = x_i \sin(\alpha) + y_i \cos(\alpha) \quad (2.13b)$$

In cui x_{RT} e y_{RT} sono le coordinate dei valori di conducibilità idraulica a saturazione.

2.3.2 Ipotesi di stazionarietà e variogramma

L'evoluzione spaziale di un particolare fenomeno, sebbene risulti essere unica nella realtà, possiede generalmente diverse rappresentazioni possibili, denominate modelli che dipendono dall'informazione disponibile e dagli obiettivi che si intendono raggiungere (Posa, 2009).

La distribuzione spaziale di una data proprietà nello spazio è generata da un processo di tipo stocastico (Cressie, 1993).

Pertanto, risulta necessario introdurre il concetto di variabile regionalizzata attribuito da Matheron (1970) alle variabili spaziali, per cui una variabile regionalizzata, indicata con $Z(u)$, ha un modello probabilistico fondamentale del tipo:

$$Z(\mathbf{u}) = m(\mathbf{u}) + Y(\mathbf{u}) \quad (2.14)$$

In cui \mathbf{u} indica una qualsiasi localizzazione dello spazio a cui appartiene, ossia al dominio di appartenenza, $m(\mathbf{u})$ è la componente strutturale o deterministica della variabile, viene denominato anche *trend*, e il termine $Y(\mathbf{u})$ che rappresenta la componente casuale descritta da una variabile aleatoria, cioè indica le fluttuazioni casuali del valore assunto da $Z(\mathbf{u})$.

Una variabile regionalizzata è dunque una variabile aleatoria, associata ad uno specifico punto \mathbf{u} del dominio, capace di descrivere tutti i possibili valori assumibili nella realtà.

L'insieme di tutte le variabili aleatorie nel dominio costituiscono la funzione aleatoria, denominata anche come campo aleatorio.

Nella pratica non sempre è possibile o necessario conoscere tutte le caratteristiche di una funzione aleatoria, ma è sufficiente l'individuazione di alcuni parametri o momenti, capaci di descrivere le principali caratteristiche della funzione aleatoria.

Solitamente, si analizzano i primi due momenti:

Il momento del primo ordine della funzione aleatoria Z coincide con la componente deterministica del modello:

$$E[Z(\mathbf{u})] = m(\mathbf{u}), \quad (2.15)$$

essendo per definizione $E[Y(\mathbf{u})] = 0$, dove con l'operatore $E[]$ si indica il valore atteso di una variabile aleatoria.

L'equazione (2.15) stabilisce che il valore atteso del campo aleatorio è in funzione della posizione \mathbf{u} , e tale funzione è in grado di descrivere le variazioni sistematiche della variabile regionalizzata.

Il momento del secondo ordine può essere espresso in vari modi, uno di questi è la definizione della varianza:

$$Var [Z(\mathbf{u})] = E [Z(\mathbf{u}) - m(\mathbf{u})]^2 \quad (2.16)$$

Al concetto di varianza sono associati altre definizioni; il covariogramma è la covarianza della funzione aleatoria, e si definisce come:

$$Cov [Z(\mathbf{u}), Z(\mathbf{u}')] = E\{[Z(\mathbf{u})Z(\mathbf{u}')] - m(\mathbf{u})m(\mathbf{u}')\} . \quad (2.17)$$

Il covariogramma è funzione dei diversi punti \mathbf{u} e \mathbf{u}' , e quindi della disposizione spaziale.

Con variogramma si identifica la varianza degli incrementi $[Z(\mathbf{u})-Z(\mathbf{u}')]$ della funzione aleatoria, e vale:

$$2\gamma[Z(\mathbf{u}), Z(\mathbf{u}')] = Var [Z(\mathbf{u}) - Z(\mathbf{u}')] . \quad (2.18)$$

Il problema sostanziale dell'utilizzo di tali definizioni risulta essere l'inferenza statistica, le funzioni covariogramma e variogramma dipendono dalla posizione spaziale \mathbf{u} e \mathbf{u}' , ma in tali localizzazioni spaziali non è possibile avere più di un valore reale della variabile aleatoria per le caratteristiche di non ripetitività dei dati spaziali (Posa, 2009).

La risoluzione del problema inferenziale si ottiene imponendo le ipotesi di stazionarietà del secondo ordine, con la quale si elimina la dipendenza spaziale puntuale delle funzioni variogramma e covariogramma, rendendole dipendenti dalla sola distanza tra i punti, definita come vettore \mathbf{h} .

In questo modo, qualsiasi coppia di valori distante \mathbf{h} , diventa una realizzazione della coppia di variabili regionalizzate, superando il problema di inferenza statistica.

Applicando le ipotesi di stazionarietà del secondo ordine si ha che la funzione aleatoria $Z(\mathbf{u})$ diventa indipendente dal punto spaziale \mathbf{u} :

$$E[Z(\mathbf{u})] = m, \quad (2.19)$$

Ossia il valore atteso del campo aleatorio è costante e non varia con la posizione spaziale nel dominio.

Considerando due coppie di valori a distanza \mathbf{h} , il covariogramma dipenderà solo dalla distanza \mathbf{h} nella forma:

$$C(\mathbf{h}) = E\{[Z(\mathbf{u} + \mathbf{h}) - m][Z(\mathbf{u}) - m]\}. \quad (2.20)$$

La varianza diventa costante e pari al valore del covariogramma con $\mathbf{h}=0$:

$$Var [Z(\mathbf{u})] = C(\mathbf{0}), \quad (2.21)$$

mentre il semivariogramma risulta essere direttamente relazionato al covariogramma attraverso la forma:

$$\gamma(\mathbf{h}) = C(\mathbf{0}) - C(\mathbf{h}). \quad (2.22)$$

Il semivariogramma è la stessa funzione variogramma senza un coefficiente moltiplicativo pari a 2. Dall'equazione (2.22) si intuisce la relazione tra le due funzioni covariogramma e semivariogramma (o variogramma in base al coefficiente moltiplicativo), la prima è una misura di similarità, perché descrive la correlazione spaziale tra valori del campo aleatorio all'aumentare della distanza, perciò una diminuzione del valore del covariogramma è sintomo di una riduzione della correlazione spaziale tra le variabili aleatorie, mentre la seconda, aumenta al diminuire della correlazione, ossia al crescere della differenza tra le variabili regionalizzate.

In sintesi, assumendo le ipotesi di stazionarietà si presuppone, nell'area Campo Pozzi Settolo, l'assenza di qualsiasi tipo di *trend* continuo, con una correlazione spaziale legata esclusivamente alla distanza tra i valori e non alla posizione spaziale nel dominio in studio.

Di conseguenza, la correlazione spaziale dei valori di conducibilità idraulica a saturazione viene studiata attraverso l'uso del variogramma sotto le ipotesi di stazionarietà del secondo ordine, cioè con una funzione γ dipendente dal solo valore del vettore distanza.

Avendo a disposizione una serie di dati sparsi nell'area di studio, è possibile realizzare una semivariogramma sperimentale, ossia una serie di valori definiti secondo la mutua distanza e la direzione calcolata.

I valori del semivariogramma sperimentale si determinano attraverso l'equazione:

$$\hat{\gamma}(\mathbf{h}) = \frac{\sum_{N(\mathbf{h})} [Z(\mathbf{u}_i) - Z(\mathbf{u}_j)]^2}{2 |N(\mathbf{h})|} \quad (2.23)$$

Dove \mathbf{u}_j e \mathbf{u}_i sono due punti in cui è stato svolto un test infiltrometrico, mentre $N(\mathbf{h})$ è il numero delle coppie distanti h lungo una direzione scelta.

Una volta ottenuti i valori di dissimilarità sperimentali, è possibile approssimare tali valori con un modello di variogramma, definito attraverso le condizioni di ammissibilità di funzioni continue.

Il variogramma (o semivariogramma) sotto le ipotesi di stazionarietà del secondo ordine (o anche le ipotesi intrinseche) è sia funzione del valore h , che dell'angolo polare scelto per la direzione di calcolo.

Esistono diversi modelli di semivariogramma, i più utilizzati sono:

- Modello sferico
- Modello esponenziale
- Modello gaussiano

Quest'ultimo è il modello di semivariogramma che meglio approssima i valori di conducibilità idraulica a saturazione, ed è definito come:

$$\gamma(\mathbf{h}) = C \left[1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}} \right] \quad (2.24)$$

Il valore a indica il range, ossia la distanza dopodiché si comincia a perdere la correlazione spaziale, a livello numerico, vale la relazione $a' = \sqrt{3}a$, dove a' è il range effettivo, ossia la distanza per cui il modello gaussiano raggiunge il 95% del valore di sella.

Il valore di sella è il valore a cui tende all'infinito il variogramma, esso è pari alla covarianza calcolata con distanza \mathbf{h} pari a zero, cioè è il valore della varianza statistica, ed indica il valore massimo di variabilità tra i dati.

Tale modello risulta essere numericamente molto instabile, se ad esso non viene associato un effetto *nugget* (Posa, 1989).

L'effetto *nugget* è il valore a cui tende il modello quando va a zero la distanza di calcolo, tale valore è dovuto a disturbi della scala di misura scelta per il variogramma.

I parametri richiesti per il corretto calcolo del variogramma sperimentale (Fig. 2.9) sono; la *lag separation*, cioè la distanza \mathbf{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 $\mathbf{h}_i = i \mathbf{h}$, dove \mathbf{h} è la *lag separation*, $i = 1, \dots, nl$ è il coefficiente moltiplicativo che va da uno al *number of lags*, ed \mathbf{h}_i è la distanza di ricerca per ogni i -esimo moltiplicatore.

Inoltre, serve esplicitare 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 \mathbf{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, 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.

La scelta del valore dei parametri di ricerca è dipesa dalla media delle distanze tra le varie coppie di punti nelle aree definite, facendo attenzione, attraverso la tolleranza, a non riproporre il valore di una coppia di punti in un altro range di distanza, in modo tale da non sovrapporre una coppia di punti in più range differenti.

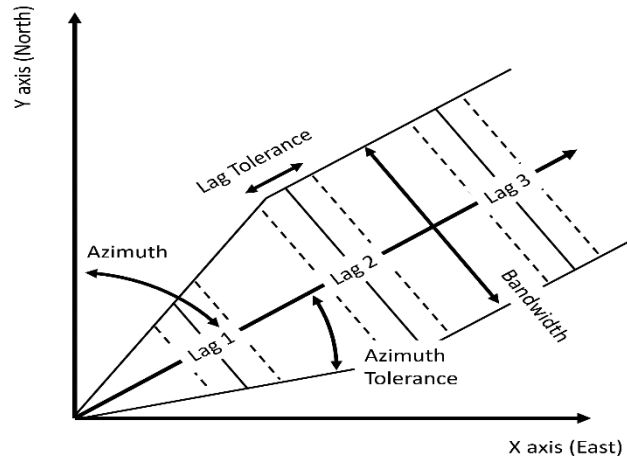


Figura 2.9, descrizione grafica dei parametri utili per la determinazione del variogramma, l'azimuth è l'angolo rispetto la verticale, la lag tolerance è la tolleranza spaziale per la ricerca dei valori, la tolleranza angolare che indica l'apertura angolare rispetto la direzione prefissata, e la bandwidth è la tolleranza ortogonale la direzione angolare prefissata.

I modelli di variogramma consentono di individuare la possibile correlazione spaziale tra i valori della conducibilità idraulica a saturazione, consentendo di conseguenza lo sviluppo di un metodo di stima puntuale.

2.3.3 Gli stimatori lineari, il Kriging stazionario

I metodi di stima puntuale consentono di attribuire un valore alla variabile aleatoria, associata a una generica locazione spaziale \mathbf{u} , mediante l'utilizzo dei valori degli n dati campionati, riferiti nell' i -esima locazione spaziale \mathbf{u}_i , su cui è stata effettuata la misurazione sperimentale.

Tale soluzione è possibile perché si considerano i valori campionari, come realizzazioni della variabile aleatoria nel punto di appartenenza \mathbf{u}_i .

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

$$\hat{Z}(\mathbf{u}) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(\mathbf{u})Z(\mathbf{u}_i) . \quad (2.25)$$

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.

Esistono diversi metodi di stima puntuale, uno dei più semplici è il metodo poligonale utilizzato nel sottoparagrafo §2.2 per fornire una migliore visualizzazione dei valori di conducibilità idraulica a saturazione.

Il metodo poligonale ha la principale caratteristica di essere uno stimatore con il valore atteso dell'errore di stima pari a zero e con valore della variabile aleatoria nella localizzazione spaziale campionata è pari al valore campionato stesso, cioè si dice che si è in presenza di uno stimatore non distorto ed esatto.

Il principale problema dell'utilizzo dei Poligoni di Voronoi risiede nella non gradualità di informazioni, imponendo a un'intera area strutturata per via geometrica un valore relativo al dato campionario, senza un reale studio della variabilità fisica del dato.

Il metodo migliore per la stima puntuale è il Kriging, in particolare il termine Kriging è adottato in statistica classica come sinonimo di "metodo di stima ottimale", essendo in grado di utilizzare nella maniera migliore le osservazioni relative a localizzazioni vicine al punto oggetto di inferenza (Cressie, 1991).

Matheron (1963) ha definito il Kriging, in onore a D. G. Krige per il suo contributo scientifico per la risoluzione ai problemi di previsione in ambito minerario (1951), come una media ponderata delle osservazioni, dove i pesi rispettano la condizione di non distorsione (o correttezza) e di efficienza.

Si parla di Kriging stazionario 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 (stazionario), 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

$$Var[R(\mathbf{u})] = Var[\hat{Z}(\mathbf{u}) - Z(\mathbf{u})] = \text{minimo}, \quad (2.26)$$

mentre la non distorsione si ottiene imponendo la speranza matematica nulla

$$E[R(\mathbf{u})] = E[\hat{Z}(\mathbf{u}) - Z(\mathbf{u})] = 0 \quad (\text{Isaaks e Srivastava, 1989}). \quad (2.27)$$

Esplicitando l'errore $R(\mathbf{u})$ e sfruttando le proprietà del valore atteso è possibile ricavare un'espressione alternativa alla (2.27):

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i(\mathbf{u}) = 1. \quad (2.28)$$

Allo stesso modo, è possibile riscrivere la varianza presente nell'equazione 2.26 nella forma:

$$Var[R(\mathbf{u})] = \sigma^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i(\mathbf{u}) \lambda_j(\mathbf{u}) C_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{i0}(\mathbf{u}) = \text{minimo}. \quad (2.29)$$

Dove si ha che:

- σ^2 è pari alla varianza della funzione aleatoria $Z(\mathbf{u})$, cioè $Var[Z(\mathbf{u})]$
- C_{ij} è il covariogramma tra l' i -esimo e il j -esimo punto campionato
- $C_{i0}(\mathbf{u})$ è il covariogramma tra la posizione i -esima e la generica posizione definita dal vettore posizione \mathbf{u} .

Si è in presenza di un problema di minimo vincolato, in cui la varianza è la funzione da derivare e il vincolo è rappresentato dall'equazione (2.28), risolvibile attraverso il metodo dei moltiplicatori di Lagrange, che secondo la definizione si determinano attraverso l'equazione

$$F(\lambda_1, \dots, \lambda_n, \mu) = \sigma^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i(\mathbf{u}) \lambda_j(\mathbf{u}) C_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{i0}(\mathbf{u}) + 2\mu(\mathbf{u}) \sum_{i=1}^n \lambda_i(\mathbf{u}) - 1, \quad (2.30)$$

dove μ è il moltiplicatore di Lagrange incognito.

Svolgendo la derivata della (2.30) per ogni incognita $(\lambda_1, \dots, \lambda_n, \mu)$ si ottiene un sistema lineare con $n+1$ incognite ed $n+1$ equazioni, riassumibile mediante la scrittura:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j(u) C_{ij} + \mu(u) = C_{i0}(u) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j(u) = 1 \end{cases} \quad (2.31)$$

Si può riscrivere il sistema lineare in chiave matriciale esplicitandone meglio la struttura:

$$\begin{pmatrix} C_{11} & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{1n} & \cdots & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{i0} \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

Il sistema permette di determinare il valore dei pesi da utilizzare nella combinazione lineare (2.25) per la stima del valore puntuale nella locazione non campionata dell'area di studio.

Ricordando che si è nelle ipotesi di stazionarietà, vale l'equazione del variogramma (2.22), pertanto è possibile riscrivere il sistema lineare con i valori del variogramma:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j(u) \gamma_{ij} - \mu(u) = \gamma_{i0}(u) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j(u) = 1 \end{cases} \quad (2.33)$$

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 scelta una circonferenza di raggio di 80 metri.

Il metodo del Kriging viene applicato ai punti con valori noti di conducibilità idraulica a saturazione attraverso il programma SGeMS, il quale a partire dal modello di variogramma definito per ogni area determinata, sviluppa il Kriging stazionario per pixel di dimensione 1 metro per 1 metro.

Tuttavia, esiste un ulteriore problema legato alle operazioni di calcolo automatico in SGeMS, infatti i valori di conducibilità idraulica a saturazione, per i vari punti, hanno come unità di misura i metri al secondo, e di conseguenza un ordine di grandezza non superiore a 10^{-4} .

Durante le operazioni di calcolo per lo sviluppo del Kriging, l'utilizzo di valori di conducibilità idraulica in [m/s] ha provocato una matrice di inversione singolare, a causa dell'errore di indeterminazione di macchina.

Per evitare questo errore, si è optato per una modifica della scala di misura, applicando la funzione logaritmo naturale, con base il numero di Nepero (Tab. 3.3) a tutti i valori di conducibilità idraulica a saturazione, inoltre la funzione logaritmo consente di ridurre la variabilità tra i dati, come si può verificare attraverso il coefficiente di variazione, rendendoli più maneggevoli per le analisi geostatistiche.

2.3.4 Validazione incrociata (Cross Validation)

Nel Kriging gli unici valori reali utilizzabili per un confronto con quelli stimati sono i valori campionari stessi.

Se il modello di conducibilità idraulica a saturazione 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.

Una volta effettuato il Kriging per tutte le possibili combinazioni degli $n-1$ punti a disposizione eliminando dunque a turno l' i -esimo punto, è possibile confrontare le varie stime dei punti campionari con i valori sperimentali corretti, potendo di conseguenza calcolare un coefficiente di correlazione tra i dati.

Più il coefficiente di correlazione è prossimo al valore 1, più la stima è efficiente e quindi il modello risulta essere solido.

Questo metodo di verifica viene chiamato Validazione incrociata (*Cross Validation*), ed è applicabile a qualsiasi tipo di Kriging o metodo di simulazione geostatistico.

Si implementa quindi il metodo della validazione incrociata per tutti i test infiltrometrici effettuati, andando a calcolare il Kriging per $n-1$ punti, in relazione a tutte le n combinazioni di valori di conducibilità idraulica a saturazione.

Capitolo 3

Discussione dei risultati

Nel seguente capitolo si forniscono i risultati ottenuti a partire dai test infiltrometrici, ossia i valori di conducibilità idraulica a saturazione e le relative curve d'infiltrazione.

Successivamente, dai dati di conducibilità idraulica a saturazione si sviluppa l'analisi statistica e l'analisi geostatistica, fornendo una lettura numerico-spaziale dei valori a disposizione.

Infine, si utilizza la validazione incrociata per verificare l'efficacia dell'analisi geostatistica e del relativo metodo di stima lineare.

3.1 Test infiltrometrici e conducibilità idraulica a saturazione

Prendendo in considerazione il test infiltrometrico numero 8, svolto in data 14/09/2021, è possibile osservare un esempio di trascrizione ordinata dei dati grezzi (Tabella 3.1), ottenuti mediante trascrizione manuale dell'altezza dell'asta graduata.

Tabella 3.1. *Dati grezzi test numero 8, la prima colonna indica il codice identificativo del ciclo di riempimento, la seconda colonna contiene il valore letto nell'asta graduata, il quale è direttamente correlato alla quota del tirante idrico presente all'interno dell'anello più piccolo, la terza colonna indica l'ora in cui è avvenuta la registrazione, mentre la quarta colonna indica l'orario di registrazione a partire dall'istante di inizio del test.*

Codice cicli	Altezza asta graduata [mm]	Date time	Tempo del test
t1	2590	12:08:40	00:00:00
	2595	12:09:01	00:00:21
	2600	12:09:30	00:00:50
	2605	12:10:05	00:01:25
	2610	12:10:53	00:02:13
	2615	12:11:50	00:03:10
	2620	12:12:50	00:04:10
	2625	12:14:13	00:05:33
	2630	12:15:44	00:07:04
	2635	12:17:39	00:08:59
	2640	12:19:33	00:10:53
	2645	12:21:34	00:12:54
	2650	12:24:01	00:15:21
	t2	2590	12:24:43
2602		12:30:00	00:21:20
2615		12:35:30	00:26:50

	2623	12:40:00	00:31:20
	2632.5	12:45:00	00:36:20
	2642.5	12:50:50	00:42:10
	2650	12:55:26	00:46:46
t3	2586.5	12:56:40	00:48:00
	2594.5	13:00:41	00:52:01
	2606.5	13:07:35	00:58:55
	2619	13:15:00	01:06:20
	2634.5	13:25:13	01:16:33
	2647	13:35:00	01:26:20
	2649	13:36:38	01:27:58
t4	2585	13:37:00	01:28:20
	2598.5	13:47:00	01:38:20
	2618	14:00:30	01:51:50
	2637	14:15:25	02:06:45
	2659	14:30:00	02:21:20
t5	2585	14:30:51	02:22:11
	2604	14:45:26	02:36:46
	2624	15:00:20	02:51:40
	2642	15:15:30	03:06:50

Questo tipo di schema è utilizzato per tutte le prove infiltrometriche svolte, e fa riferimento alla (2.1).

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 (2.2).

Tabella 3.2, valori calcolati dai dati campionari del test numero 8, nella prima colonna si ha il codice cicli di riempimento, nella seconda colonna sono presenti i valori letti dall'asta graduata, nella terza colonna si hanno i valori temporali espressi in minuti, nella quarta colonna sono trascritti i valori temporali in riferimento a ogni serie, nella quinta colonna si hanno le differenze temporali, nella quinta e sesta colonna sono calcolati i valori di capacità d'infiltrazione sperimentale rispettivamente in millimetri su minuto, e metri al secondo.

Codice cicli	Altezza asta graduata [mm]	Tempo totale [min]	tempo ciclo di riempimento [min]	Differenza temporale [min]	Capacità d'infiltrazione campionaria [mm/min]	Capacità d'infiltrazione campionaria [m/s]
t1	2590	0.000	0.000			
	2595	0.350	0.350	0.350	14.286	2.38E-04
	2600	0.833	0.833	0.483	10.345	1.72E-04
	2605	1.417	1.417	0.583	8.571	1.43E-04
	2610	2.217	2.217	0.800	6.250	1.04E-04
	2615	3.167	3.167	0.950	5.263	8.77E-05
	2620	4.167	4.167	1.000	5.000	8.33E-05
	2625	5.550	5.550	1.383	3.614	6.02E-05
	2630	7.067	7.067	1.517	3.297	5.49E-05
	2635	8.983	8.983	1.917	2.609	4.35E-05
	2640	10.883	10.883	1.900	2.632	4.39E-05
	2645	12.900	12.900	2.017	2.479	4.13E-05
2650	15.350	15.350	2.450	2.041	3.40E-05	
t2	2590	16.050	0.000			
	2602	21.333	5.283	5.283	2.271	3.79E-05
	2615	26.833	10.783	5.500	2.364	3.94E-05
	2623	31.333	15.283	4.500	1.778	2.96E-05
	2632.5	36.333	20.283	5.000	1.900	3.17E-05
	2642.5	42.167	26.117	5.833	1.714	2.86E-05
	2650	46.767	30.717	4.600	1.630	2.72E-05
t3	2586.5	48.000	0.000			
	2594.5	52.017	4.017	4.017	1.992	3.32E-05
	2606.5	58.917	10.917	6.900	1.739	2.90E-05
	2619	66.333	18.333	7.417	1.685	2.81E-05
	2634.5	76.550	28.550	10.217	1.517	2.53E-05
	2647	86.333	38.333	9.783	1.278	2.13E-05
	2649	87.967	39.967	1.633	1.224	2.04E-05
t4	2585	88.333	0.000			
	2598.5	98.333	10.000	10.000	1.350	2.25E-05
	2618	111.833	23.500	13.500	1.444	2.41E-05
	2637	126.750	38.417	14.917	1.274	2.12E-05
	2659	141.333	53.000	14.583	1.509	2.51E-05
t5	2585	142.183	0.000			
	2604	156.767	14.583	14.583	1.303	2.17E-05
	2624	171.667	29.483	14.900	1.342	2.24E-05
	2642	186.833	44.650	15.167	1.187	1.98E-05

Considerando nuovamente il test numero 8, si sono suddivise le varie misurazioni in cicli, ossia si sono raggruppate tutte le misure prese durante un'unica fase di svuotamento dell'infiltrometro, arrestando il ciclo ad ogni riempimento dell'anello interno, ottenendo i risultati visibili in Tabella 3.2.

Ogni valore di inizio ciclo t_i (con $i = 1, \dots, 5$), ha associato un valore del tempo di ciclo di riempimento pari a zero, a causa del processo di riempimento stesso.

Una volta che il tirante idrico all'interno dell'infiltrometro ha raggiunto la minima quota utile possibile, è necessario riempire gli anelli riportando il livello dell'acqua a quello di partenza, di conseguenza, esisterà un dislivello negativo nei dati dovuto al processo di riempimento dello strumento, ma che non ha alcun significato fisico per la determinazione delle caratteristiche idraulica del sottosuolo.

Per evitare il calcolo di valori non necessari, si è deciso di considerare le differenze temporali dei soli cicli di riempimento, ripartendo da zero ogni qual volta si introduceva nuova acqua nello strumento.

Ponendo in correlazione la capacità d'infiltrazione campionaria in metri al secondo, con il tempo associato ad ogni valore in minuti (Fig. 3.1), si ottiene la curva sperimentale del tasso di infiltrazione.

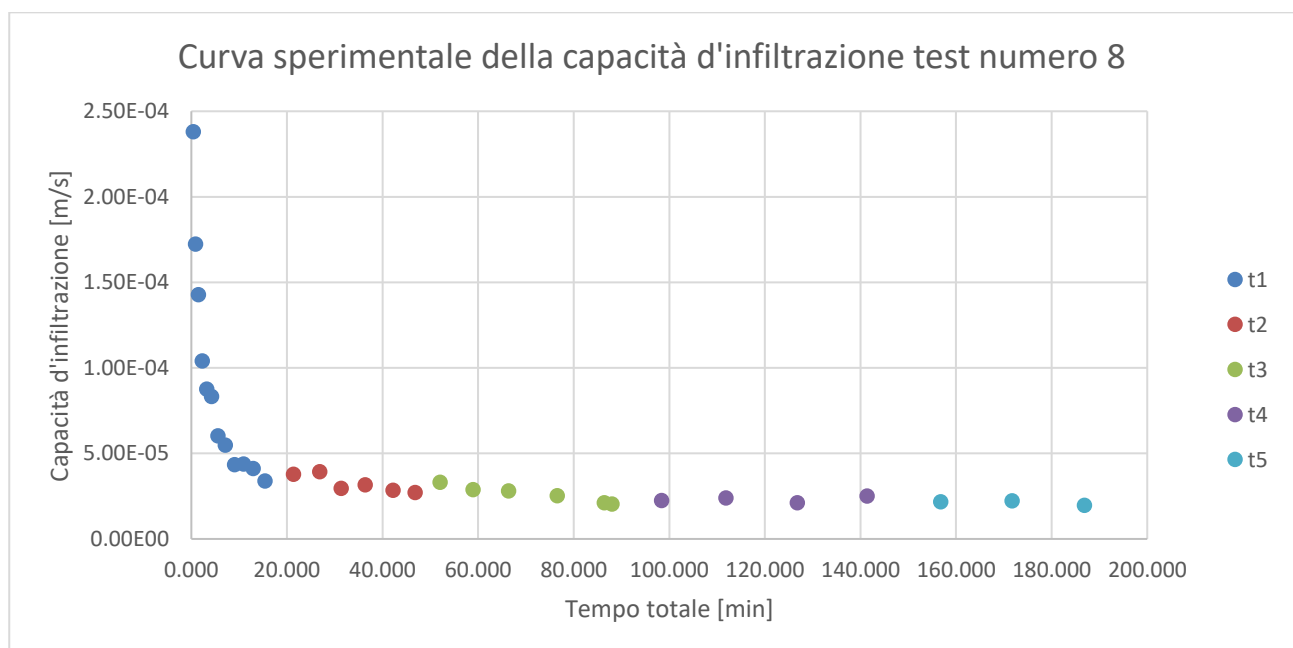


Figura 3.1, curva sperimentale della capacità di infiltrazione della prova infiltrometrica numero 8, si sono evidenziati con colori differenti le misurazioni appartenenti a cicli di riempimento diversi, in modo da evidenziare la correlazione tra serie di riempimenti e asintoticità della curva sperimentale.

La curva segue l'andamento previsto dai vari modelli di infiltrazione, avendo un comportamento esponenziale negativo, tendente a un valore asintotico pari alla capacità di infiltrazione a saturazione, ossia la condizione in cui tutto il primo strato di terreno sottostante l'infiltrometro si è saturato, causando un'infiltrazione direttamente proporzionale alla legge di Darcy.

Ottenute le curve sperimentali, con le relative tabelle riassuntive dei valori di capacità di infiltrazione campionaria, è possibile identificare la curva di approssimazione dei dati mediante il modello di infiltrazione proposto da Green-Ampt, ottenendo quindi i tre parametri chiave.

I risultati ottenuti a partire dai dati infiltrometrici utilizzando il metodo di calcolo della *goodness of fit metrics* in relazione al modello teorico di Green-Ampt sono riassunti in Tabella 3.3.

Tabella 3.3, risultati approssimazione modello Green-Ampt; nella prima colonna si specificano i codici identificativi dei test, nella seconda colonna si ha il valore dell'umidità iniziale del terreno, nella terza colonna sono presenti i valori della pressione capillare, nella quarta colonna sono riportati i valori di conducibilità idraulica a saturazione k_s , mentre nell'ultima colonna viene esplicitato il logaritmo naturale della conducibilità idraulica a saturazione.

Codice identificativo test infiltrometrici	Umidità del terreno iniziale	Pressione capillare	Conducibilità idraulica a saturazione [m/s]	Logaritmo naturale conducibilità idraulica a saturazione
1	0.398	0.247	3.26E-05	-10.330
101	0.423	0.238	2.68E-05	-10.527
2	0.378	0.261	1.87E-05	-10.885
102	0.404	0.241	3.07E-05	-10.391
3	0.362	0.258	9.28E-05	-9.286
103	0.406	0.235	2.15E-05	-10.748
4	0.361	0.262	1.18E-05	-11.346
104	0.345	0.246	3.92E-06	-12.449
5	0.372	0.223	6.35E-05	-9.665
105	0.413	0.225	1.61E-05	-11.036
6	0.399	0.228	9.02E-07	-13.919
106	0.363	0.241	1.37E-06	-13.502
7	0.332	0.258	2.53E-05	-10.586
107	0.370	0.232	1.08E-04	-9.137
8	0.329	0.256	2.04E-05	-10.798
108	0.367	0.234	3.08E-06	-12.691
9	0.410	0.213	1.92E-06	-13.163
109	0.406	0.209	2.18E-06	-13.037
10	0.361	0.223	1.76E-05	-10.946
110	0.404	0.206	2.46E-06	-12.914
11	0.359	0.225	1.15E-05	-11.373
111	0.403	0.207	8.42E-05	-9.383
12	0.450	0.201	3.87E-05	-10.159
112	0.406	0.205	1.49E-05	-11.116
0	0.414	0.208	1.84E-06	-13.208
113	0.383	0.219	8.17E-05	-9.413
14	0.352	0.231	5.42E-06	-12.126
114	0.394	0.216	4.58E-05	-9.992
15	0.351	0.239	5.84E-05	-9.748
115	0.313	0.263	6.16E-06	-11.997
16	0.351	0.239	6.15E-05	-9.696
116	0.394	0.216	1.50E-04	-8.802
180	0.351	0.237	3.88E-05	-10.158
18	0.314	0.257	1.65E-04	-8.710
19	0.351	0.233	3.25E-07	-14.941
20	0.314	0.258	1.73E-05	-10.966

La Tabella 3.3 indica il punto di partenza di tutte le analisi statistiche e geostatistiche svolte nei paragrafi successivi, contenendo i valori di conducibilità idraulica a saturazione per ogni locazione spaziale in cui è stato svolto il test infiltrometrico.

3.2 Risultati analisi statistica

I risultati dell'analisi statistica dei valori di conducibilità idraulica a saturazione sono stati il principale motivo per cui si sono rese necessarie due campagne di raccolta dati.

Lo studio della varianza e della distribuzione dei dati ha evidenziato una netta differenziazione tra i valori di conducibilità idraulica a saturazione presenti nel Campo sud, rispetto a tutti i valori localizzati nel Campo ATS e nel Campo nord, rendendo quindi necessaria una suddivisione delle aree, con conseguente riorganizzazione dei risultati.

3.2.1 Prima campagna sperimentale

Svolgendo l'analisi dei dati su tutti i valori di conducibilità idraulica a saturazione determinati durante la prima campagna, è possibile notare una distribuzione *J-Shaped* dei valori (Fig. 3.2), con una elevata frequenza per bassi valori di conducibilità idraulica.

Una distribuzione di questo tipo suggerisce una disomogeneità nei dati in possesso, con probabile presenza di valori fuori scala o comunque molto differenti tra loro.

La media aritmetica non appartiene al range di valori che definisce la colonna con frequenza assoluta maggiore (Tab. 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 conducibilità idraulica a saturazione ricavati dai test infiltrometrici svolti durante la prima campagna.

Media	Varianza	Minimo	Massimo	Mediana	Primo quartile	Terzo quartile	Range interquartile
3.42E-05	1.58E-09	3.25E-07	1.65E-04	1.96E-05	6.94E-06	5.35E-05	4.66E-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 (Fig. 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 conducibilità idraulica a saturazione, 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.

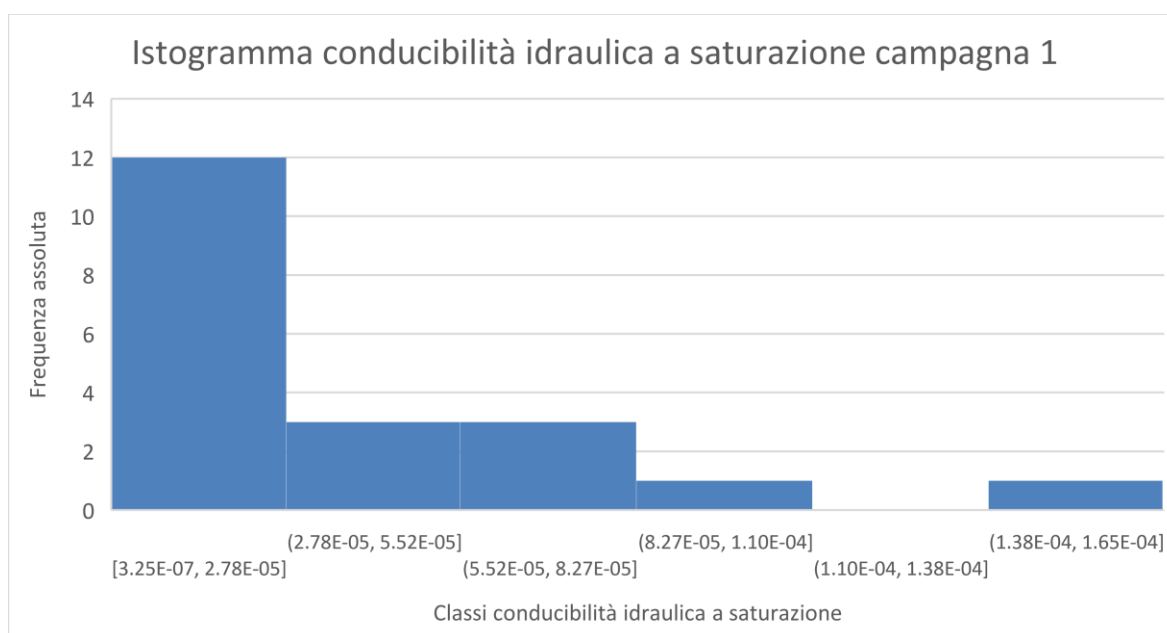


Figura 3.2, istogramma conducibilità idraulica a saturazione suddiviso in sei classi relativo ai test infiltrometrici sviluppati durante la prima campagna.

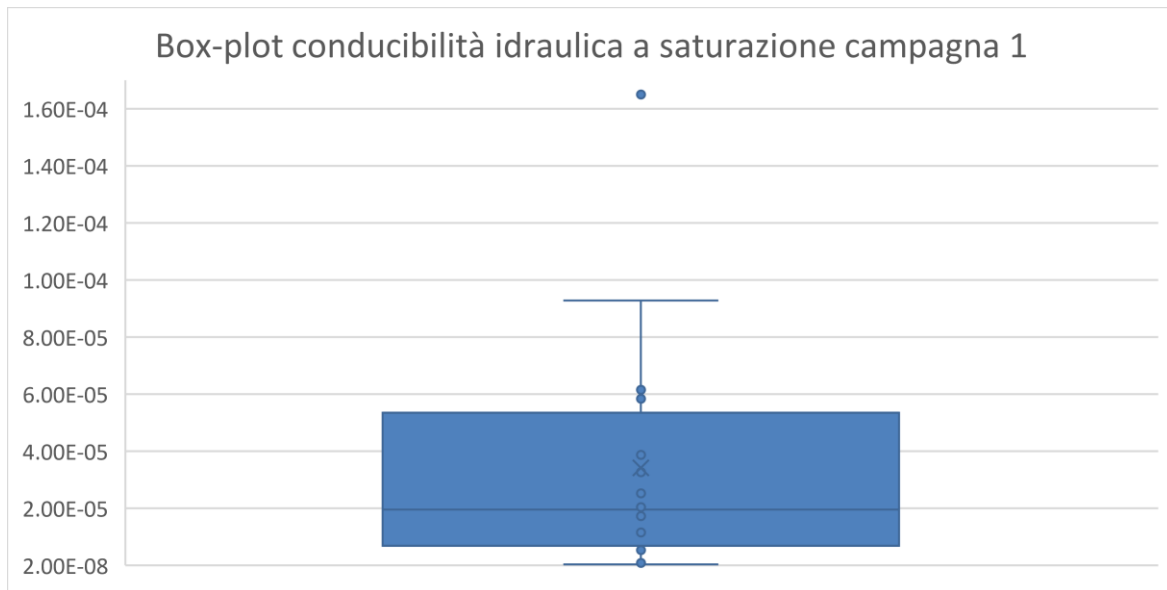


Figura 3.3, Box-plot dei valori di conducibilità idraulica a saturazione determinati durante la prima campagna, è presente un valore fuori scala pari a $1.65E-04$, ossia il valore di conducibilità idraulica del test numero 18.

Sviluppando il metodo poligonale sui valori di conducibilità idraulica a saturazione (Fig. 3.4), si vede come l'area a sud abbia valori di conducibilità idraulica a saturazione sensibilmente più elevati, grazie alla tonalità tendente al rosso utilizzata come simbolo identificativo per maggior conducibilità idraulica nel terreno, evidenziando, di conseguenza, una disomogenea distribuzione dei valori nel sito di studio.

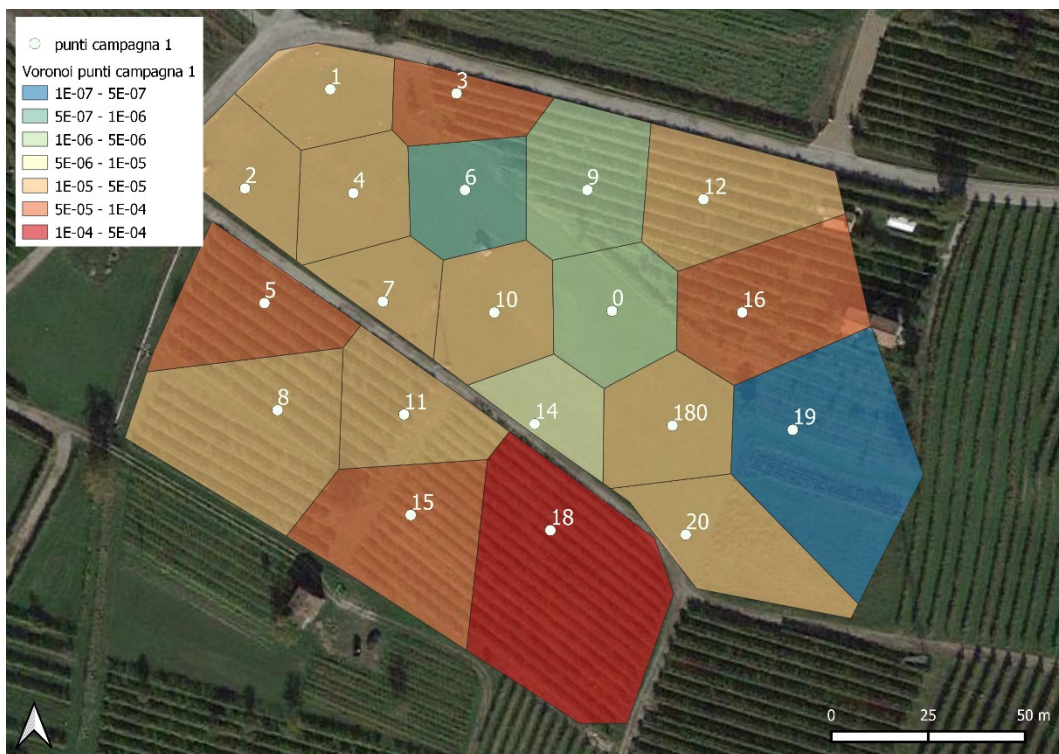


Figura 3.4, Poligoni di Voroni riferiti ai valori di conducibilità idraulica a saturazione determinati durante l'analisi dei dati dei test infiltrometrici svolti durante la prima campagna.

Dalle analisi statistiche si nota come, trattando insieme tutti i test infiltrometrici, si accomunano valori di conducibilità idraulica a saturazione con una differenza di tre ordini di grandezza.

L'area definita come Campo sud, presenta valori di conducibilità idraulica a saturazione in media più elevati, con un valore significativamente più elevato identificato con il numero 18.

La zona al di sopra del Campo sud, presenta invece una distribuzione di valori di conducibilità idraulica a saturazione in media più bassa.

Tale risultato, suggerisce la necessità di scorporare i dati, trattando il problema mediante la distinzione tra i valori di conducibilità idraulica presenti nel Campo Sud, e i valori di conducibilità idraulica presenti nella restante area del sito, ossia il Campo ATS e il Campo nord.

Svolgendo l'analisi statistica sui dati scorporati secondo le nuove distinzioni (Tab. 3.5), si evidenzia come esista una minor variabilità dei dati appartenenti al Campo Nord e al Campo ATS, infatti, si ha una riduzione della varianza rispetto alle considerazioni sui dati totali, e un valore della media aritmetica appartenente al range di valori che definisce la classe con frequenza maggiore.

Tabella 3.5, *indici statistici per l'analisi descrittiva dei valori di conducibilità idraulica a saturazione, suddivisi in tre gruppi; la riga Totale contiene i risultati relativi a tutto l'insieme dei dati in possesso, la riga Campo nord e Campo ATS tratta i dati presenti nelle rispettive aree, la terza riga contiene le analisi statistiche dei soli dati presenti nel campo sud.*

	Media	Varianza	Minimo	Massimo	Mediana	Primo quartile	Terzo quartile	Range interquartile
Totale	3.42E-05	1.58E-09	3.25E-07	1.65E-04	1.96E-05	6.94E-06	5.35E-05	4.66E-05
Campo nord e Campo ATS	2.44E-05	6.66E-10	3.25E-07	9.28E-05	1.76E-05	1.92E-06	3.87E-05	3.68E-05
Campo sud	6.38E-05	3.72E-09	1.15E-05	1.65E-04	5.84E-05	1.60E-05	1.14E-04	9.83E-05

Realizzando un istogramma dei soli punti appartenenti al Campo ATS e al Campo nord (Fig. 3.5), si nota come la distribuzione sia ancora *J-shaped*, con un'elevata frequenza nella prima classe.

Tale distribuzione viene evidenziata anche attraverso il confronto tra media e mediana, con un valore di quest'ultima minore rispetto alla media aritmetica, denotando una distribuzione spostata a destra.

Considerando i soli dati presenti nel Campo sud, si evidenzia in Tabella 3.5 come tutti gli indici statistici siano sensibilmente più elevati rispetto alle precedenti situazioni, indicando una probabile differenza delle caratteristiche fisiche del terreno tra le aree di studio, che non è però accertabile a causa del limitato numero di dati campionari relativi al Campo sud.

La distribuzione dei dati nel Campo sud (Fig. 3.6) indica una certa variabilità dei valori in possesso, ma il ridotto numero dei test effettuati in zona non permette alcun tipo di considerazione statistica valida in relazione al comportamento della conducibilità idraulica a saturazione.

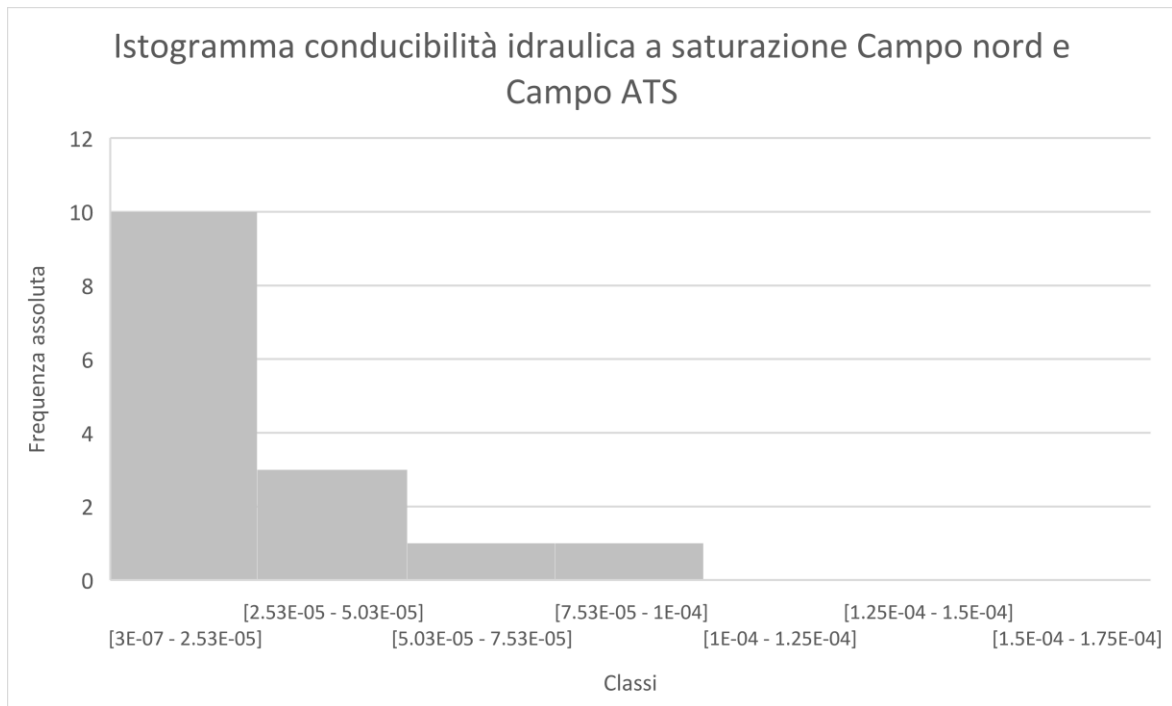


Figura 3.5, istogramma suddiviso in sei classi contenente i soli dati calcolati durante la prima campagna, presenti nell'area Campo nord e nell'area Campo ATS.

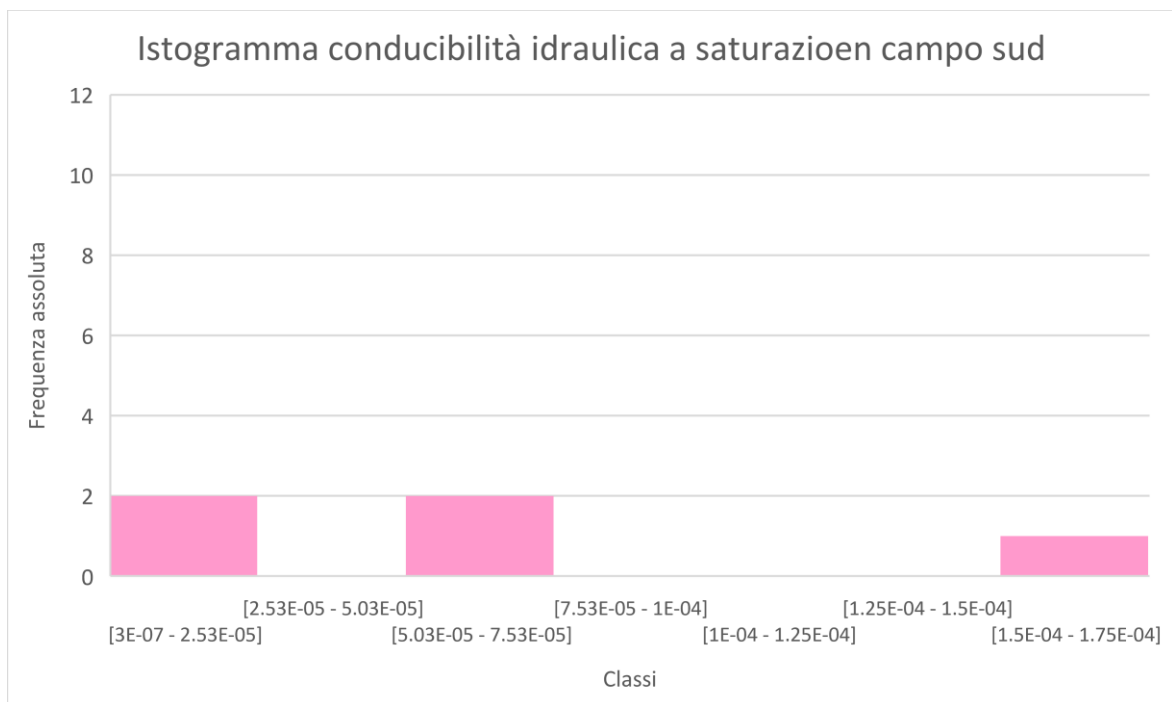


Figura 3.6, istogramma valori di conducibilità idraulica a saturazione relativi al Campo sud calcolati durante la prima campagna.

Si è dunque resa necessaria, l'implementazione di una ulteriore campagna di test infiltrometrici focalizzata al raggiungimento di un numero minimo di misurazioni valide pari a 15 nel Campo sud, e di un aumento del numero di prove nel solo Campo ATS, in modo da poter confrontare le analisi statistiche con certo grado di affidabilità.

3.2.2 Seconda campagna sperimentale

I valori di conducibilità idraulica a saturazione determinati attraverso il modello Green-Ampt a partire dai dati sperimentali dei test infiltrometrici sono presenti in Tabella 3.3, insieme a tutti i valori calcolati durante la prima campagna.

Analizzando i vari dati secondo le associazioni spaziali definite dalle aree (Tab. 3.6), si nota come la media aritmetica della conducibilità idraulica a saturazione riferita al solo Campo ATS è inferiore rispetto le medie aritmetiche dei dati del Campo Sud, e dell'insieme dei punti parte sia del Campo ATS che del Campo Nord.

Allo stesso modo, nel Campo ATS si evidenzia un minor range interquartile, e una minor varianza dei dati, sintomo di una maggior correlazione tra i valori di conducibilità idraulica a saturazione.

La media aritmetica riferita al Campo ATS appartiene al range che definisce la classe con frequenza più alta (Fig. 3.7), inoltre, risulta essere circa uguale al valore della mediana, indicando quindi una distribuzione dei dati più omogenea (Fig. 3.8).

Tabella 3.6, indici statistici riferiti alle tre aree definite; la prima riga specifica i valori del Capo sud, la seconda riga contiene i risultati delle analisi dei dati parte del Campo ATS e del Campo nord, l'ultima riga mostra i valori riferiti al solo Campo ATS.

	Media	Varianza	Minimo	Massimo	Mediana	Primo quartile	Terzo quartile	Range interquartile
Campo sud	5.65E-05	2.76E-09	2.46E-06	1.65E-04	4.58E-05	1.15E-05	8.42E-05	7.27E-05
Campo nord e Campo ATS	2.08E-05	5.30E-10	3.25E-07	9.28E-05	1.73E-05	2.05E-06	2.97E-05	2.77E-05
Campo ATS	1.51E-05	1.42E-10	9.02E-07	3.88E-05	1.61E-05	2.61E-06	2.43E-05	2.17E-05

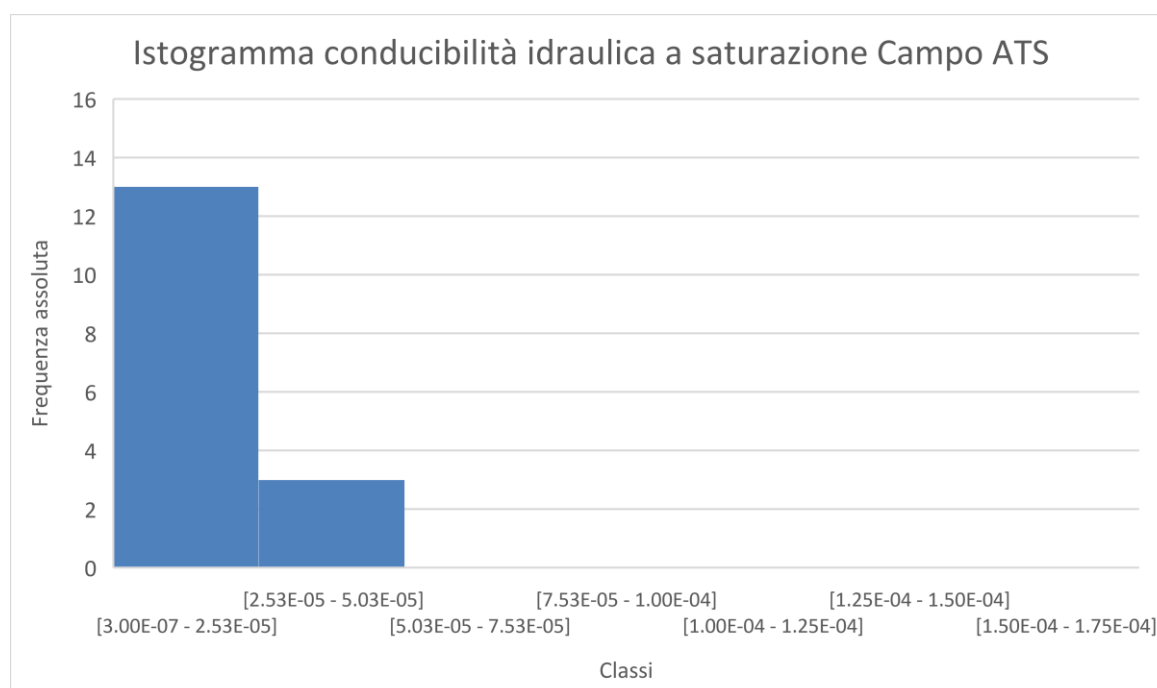


Figura 3.7, istogramma della conducibilità idraulica a saturazione relativa al solo Campo ATS, con la suddivisione in classi definita per tutti i possibili valori

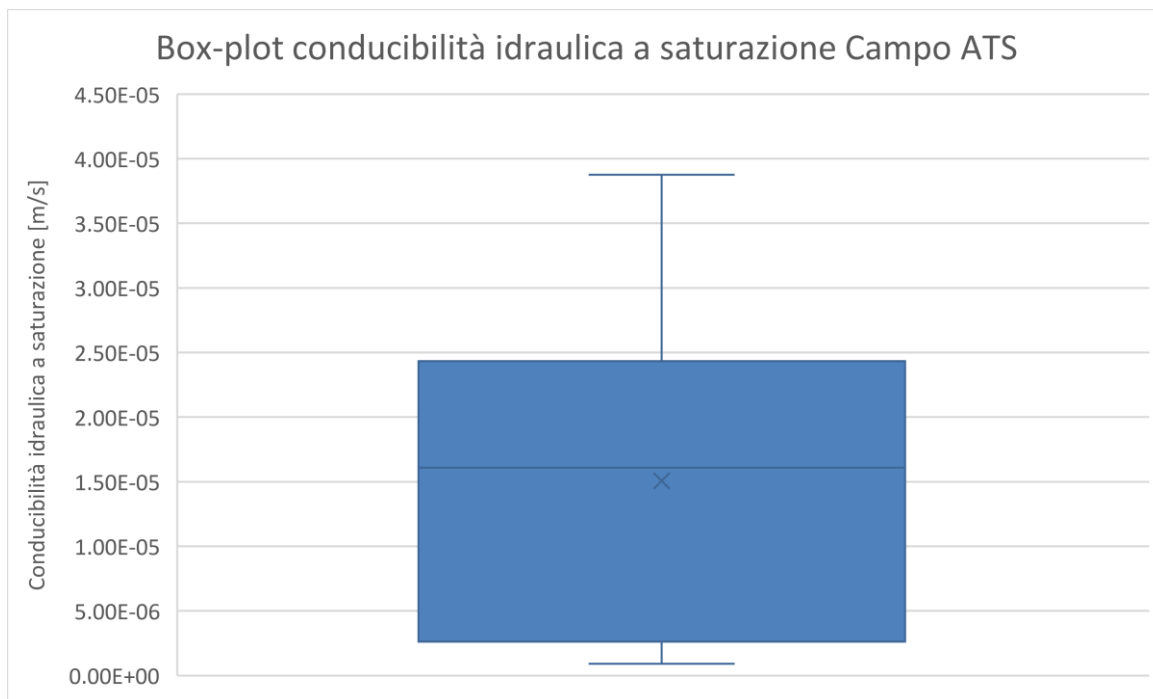


Figura 3.8. Box-plot relativo al Campo ATS, calcolato per i valori di conducibilità idraulica a saturazione in metri al secondo.

Considerando ora i valori del Campo ATS insieme ai valori appartenenti al Campo nord, si vede che aumentano in modo significativo sia la media aritmetica, che la varianza e il range interquartile, evidenziando come l'aggiunta dei dati calcolati nell'area nord, provochi un aumento del grado di infiltrazione dell'acqua nel terreno, e una maggior variabilità dei risultati come si evince dall'istogramma (Fig. 3.9) e dal Box-plot (Fig. 3.10).

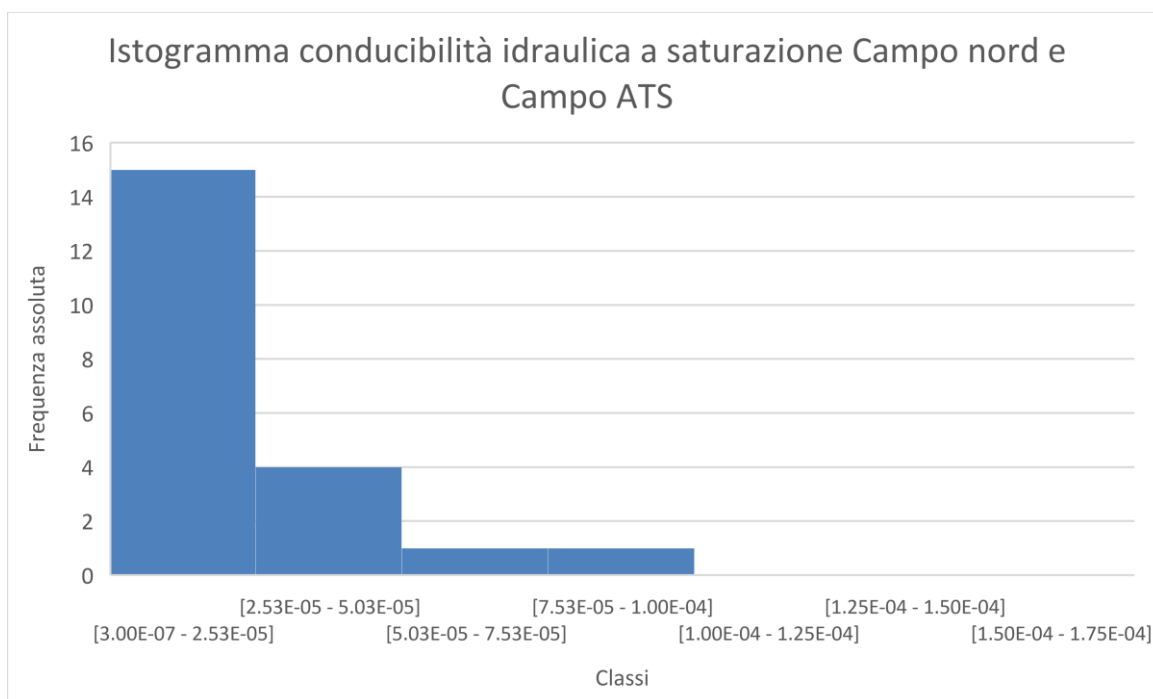


Figura 3.9. istogramma della conducibilità idraulica a saturazione riferito alla zona Campo nord e Campo ATS.

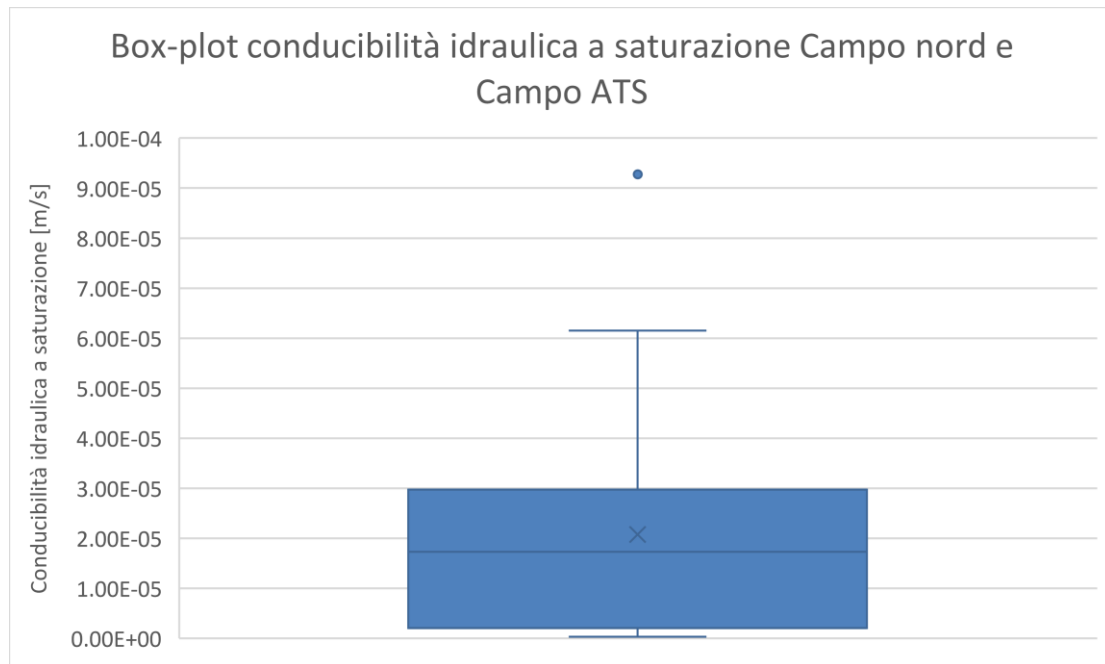


Figura 3.10, Box-polt relativo al Campo ATS e al Campo nord, calcolato per i valori di conducibilità idraulica a saturazione.

La situazione risulta essere molto diversa nei dati riferiti al Campo sud, dove la media aritmetica e la varianza sono molto più elevate, implicando non solo una maggiore conducibilità idraulica a saturazione nel vigneto, ma anche una più elevata variabilità tra i dati.

Realizzando un istogramma con le stesse classi utilizzate fino ad ora (Fig. 3.11) è possibile visualizzare come sia presente una distribuzione più omogenea dei valori in tutte le classi, denotando un forte aumento di variabilità.

In particolare, il Campo sud è la sola area ad avere valori di conducibilità idraulica dell'ordine di 10^{-4} , e di come sia effettivamente presente una distribuzione unimodale con frequenza assoluta maggiore in riferimento alla prima classe, come nelle altre due analisi, ma tale classe contiene solo il 40% dei valori totali riferiti a tutto il Campo sud.

Analizzando invece la distribuzione del solo Campo ATS si ha che la prima classe, con range che varia tra $3.00E-07$ e $2.53E-05$, contiene l'81,25% dei dati di conducibilità idraulica a saturazione, ed aggiungendo i valori del Campo nord, si ha una percentuale di valori presenti nella prima classe pari al 71,43%, confermando come la variabilità in queste due aree sia inferiore rispetto il vigneto a sud.

La Figura 3.10 presenta al suo interno un valore fuori scala, che coincide con il test numero 3.

Tale valore è significativamente più elevato rispetto sia alla media che ai valori interquartili, condizionando molto i risultati del range, della media e della varianza.

Tuttavia, non può essere trascurato perché in linea con i valori di conducibilità idraulica a saturazione presenti nel vigneto a nord.

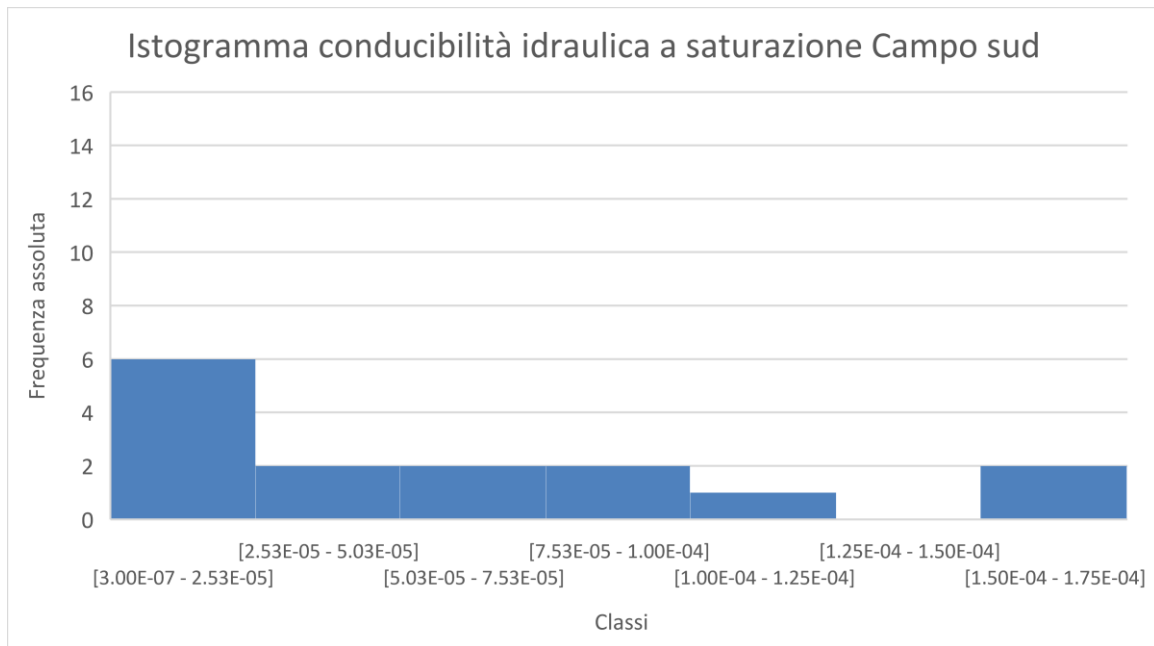


Figura 3.11, istogramma della conducibilità idraulica a saturazione riferito a soli valori parte del Campo sud suddiviso in 6 classi comprendenti tutti i valori possibili.

Sviluppando invece un *Box-plot* per i dati presenti nel Campo sud (Fig. 3.12) si nota come non ci siano valori fuori scala, e che è presente una distribuzione spostata verso destra meno accentuata rispetto le altre due aree analizzate.

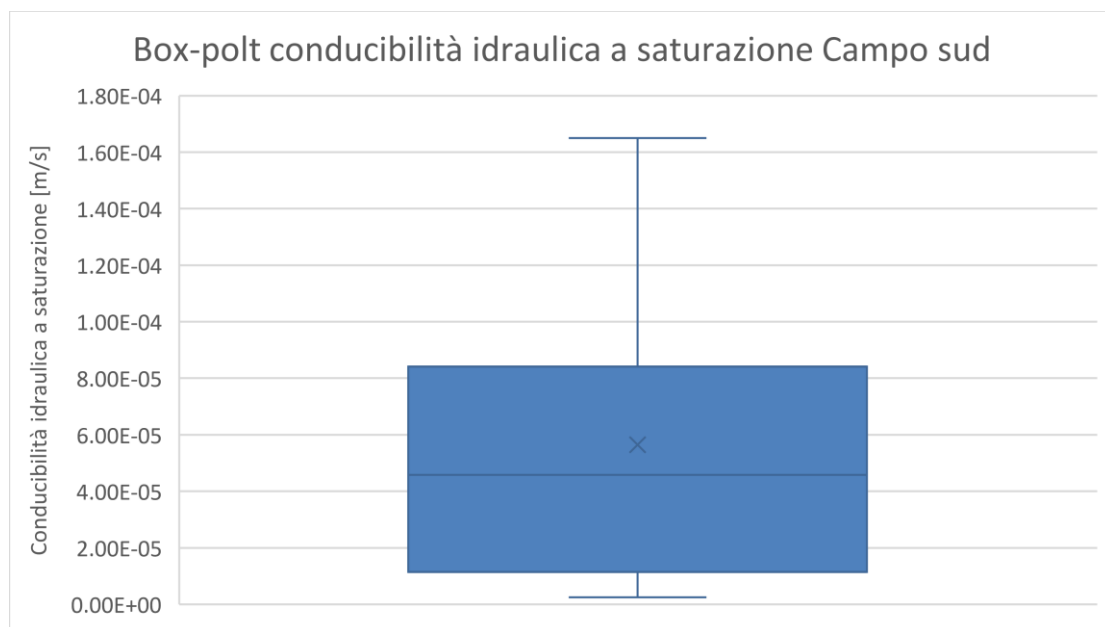


Figura 3.12, Box-plot relativo al Campo sud, calcolato per i valori di conducibilità idraulica a saturazione.

Per una più corretta visualizzazione dei dati, si ripropone il metodo poligonale di stima puntuale con tutti i valori di conducibilità idraulica a saturazione a disposizione (Fig. 3.13).

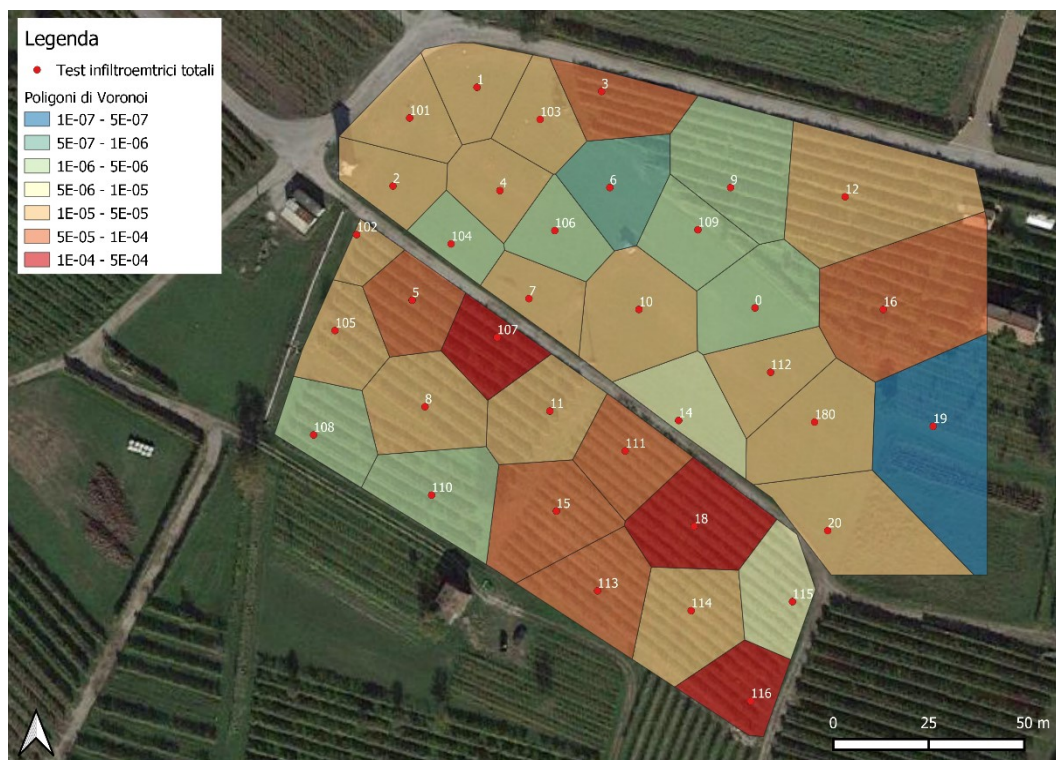


Figura 3.13, Poligoni di Voronoi relativi ai valori di conducibilità idraulica a saturazione della prima campagna e della seconda campagna.

I poligoni di Voronoi mostrano la presenza di valori di conducibilità idraulica a saturazione mediamente più elevati nel Campo sud, come evidenziato dall'analisi statistica, ma la loro distribuzione spaziale è disomogenea.

Infatti, nel vigneto a sud sono presenti alcuni test (in particolare il 108 e il 110) con valori di conducibilità idraulica a saturazione molto più bassi rispetto ai test limitrofi, provocando un aumento sensibile della variabilità dei risultati.

Il Campo ATS e il vigneto a nord mostrano invece un minor variabilità spaziale, e soprattutto valori di conducibilità idraulica a saturazione mediamente inferiori.

3.3 Risultati dell'analisi Geostatistica

Con l'analisi geostatistica si pone l'obiettivo di unire la locazione spaziale dei test infiltrometrici con i valori logaritmici di conducibilità idraulica a saturazione, ricercando le eventuali correlazioni spaziali, e stimando il comportamento della conducibilità idraulica a saturazione nei punti in cui non si hanno valori sperimentali, attraverso i metodi di stima puntuale.

Permane dunque la suddivisione zonale proposta, individuata mediante le analisi statistiche e dovuta ai valori di conducibilità idraulica a saturazione.

3.3.1 Rototraslazione

Caricando su SGeMS i valori logaritmici di conducibilità idraulica a saturazione con le relative coordinate rispetto al sistema di riferimento originario (Roma Monte Mario, Italy 1), si nota come la principale direzione dei punti si sviluppa lungo la diagonale nordovest-sudest.

Una direzione di questo tipo non rende agevole l'utilizzo di alcune metodologie geostatistiche, come ad esempio i metodi di stima puntuale, quale il Kriging (§ 2.3.3).

La griglia realizzabile in SGeMS ha solo direzioni cartesiane, mentre i punti si sviluppano lungo la direzione NW-SE, producendo delle ampie zone senza valori sperimentali, come si vede in Figura 3.14a.

Per tali ragioni si è adoperata la rototraslazione del sistema di riferimento, costruendo un sistema di riferimento cartesiano locale, con origine nel punto di coordinate Roma Monte Mario, Italy 1, pari a (1730987.67789019, 5085592.53016935), identificato come (X_0, Y_0) , e una rotazione oraria di un angolo α pari a 35.5318734695948 radianti (Fig. 3.14b).

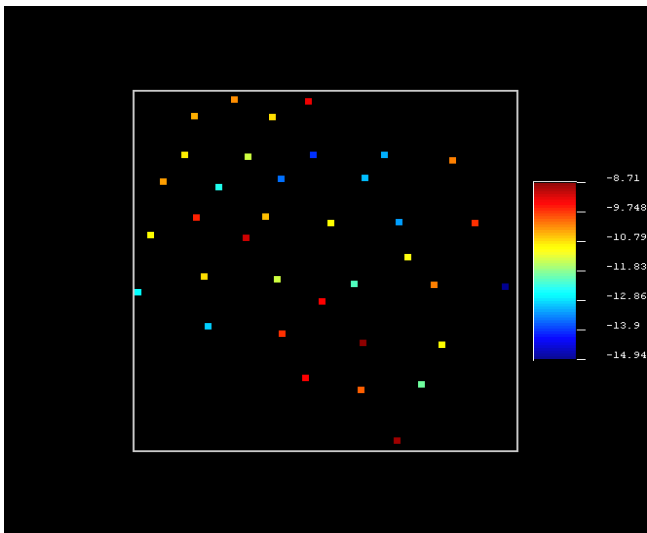


Figura 3.14a, test infiltrometrici con coordinate relative al sistema di riferimento Roma Monte Mario, Italy 1, i valori di conducibilità idraulica a saturazione sono in scala logaritmica in base naturale.

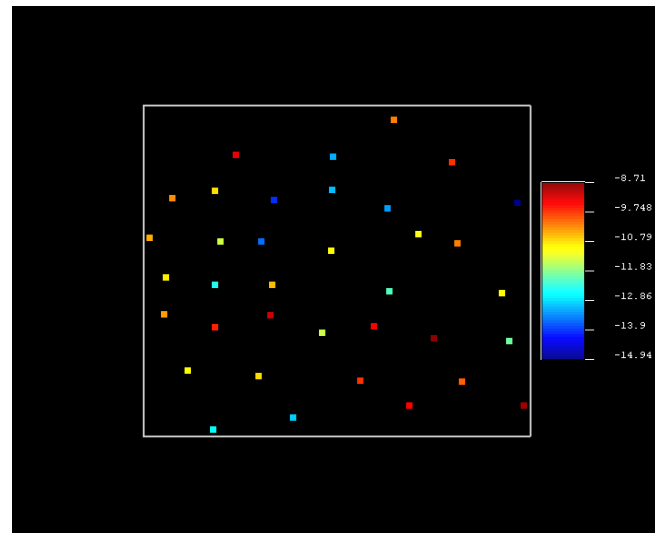


Figura 3.14b, test infiltrometrici con coordinate rototraslate nel sistema di riferimento locale, i valori di conducibilità idraulica a saturazione sono in scala logaritmica in base naturale.

Tutte le coordinate dei test infiltrometrici, riferiti a Roma Monte Mario, Italy 1, sono state modificate attraverso la (3.1) e la (3.2), i risultati sono visibili nella Tabella A.1 presente in Appendice

3.3.2 Analisi strutturale e definizione dei parametri

L'analisi della correlazione spaziale, in base alle analisi statistiche svolte (§ 3.2), permette di suddividere il sito di studio in quattro aree principali in cui ricercare una correlazione spaziale tra i valori, la zona centrale di area non coltivata, definita come Campo ATS, la zona a sud, definita

come Campo sud, l'area a nord della strada comprendente il Campo ATS e il Campo nord, ed infine l'area totale.

Per ognuna di queste aree si sono definiti i parametri necessari al programma di simulazione geostatistica SGeMS per la ricerca dei valori del variogramma (Tab. 3.7).

Tabella 3.7, *parametri per la definizione del variogramma, nella prima colonna si ha la suddivisione dell'area di studio, la seconda colonna presenta il valore in metri della distanza tra i punti, la seconda colonna contiene il numero moltiplicativo massimo utilizzabile nella ricerca delle coppie, la quarta colonna contiene la tolleranza per la definizione dell'area di ricerca della coppia, la quarta colonna contiene la tolleranza angolare e l'ultima colonna la distanza massima ortogonale alla retta congiungente i due punti.*

	Lag separation	Number of lags	Lag tolerance	Angle tolerance	Bandwidth
Campo ATS	19	4	9.5	45	12
Campo sud	21	3	9	40	11
Campo ATS e Campo nord	17	4	8	45	11
Campo totale	18	4	9	40	12

L'angolo polare di ricerca delle coppie di punti, che specifica le direzioni per il calcolo del variogramma sono rimaste costanti per tutte le analisi di correlazione svolte, e sono riferite al sistema di riferimento locale:

- Azimut, 0°, indica la direzione verticale (Nord-Sud) rispetto al sistema di riferimento locale rototraslato, in altri termini, è la direzione verticale della Figura 3.14b.
- Azimut, 45°, direzione inclinata di 45 gradi rispetto alla verticale di Figura 3.14b.
- Azimut, 90°, indica la direzione orizzontale dei punti nel sistema di riferimento, locale, è la direzione orizzontale della figura 3.14b.
- Azimut, 135°, è la direzione che si forma inclinando la verticale di figura 3.14b di 135 gradi.

La scelta del valore dei parametri è dipesa dalla media delle distanze tra le varie coppie di punti nelle aree definite, facendo attenzione, attraverso la tolleranza, a non riproporre il valore di una coppia di punti in un altro range di distanza.

3.3.2.1 Correlazione spaziale Campo ATS

Il calcolo del variogramma nella sola area Campo ATS, utilizzando per ogni punto i valori logaritmici della conducibilità idraulica a saturazione, ha prodotto i risultati esposti in Figura 3.15.

Il modello di variogramma, definito attraverso i valori campionari, ha la forma Gaussiana, e possiede le seguenti caratteristiche:

- Nugget effect pari a 0.2
- Sill contribution pari a 1.32
- Range massimo pari a 58.52 m
- Range minimo pari a 22.8 m

La direzione preferenziale di maggior continuità sembra essere la direzione 45 gradi, nella quale si ha il range massimo, ossia esiste una correlazione spaziale più estesa, di conseguenza, la direzione

con minor continuità risulta essere la direzione di 135 gradi rispetto alla verticale, in cui il logaritmo della conducibilità idraulica a saturazione possiede una distanza di correlazione inferiore.

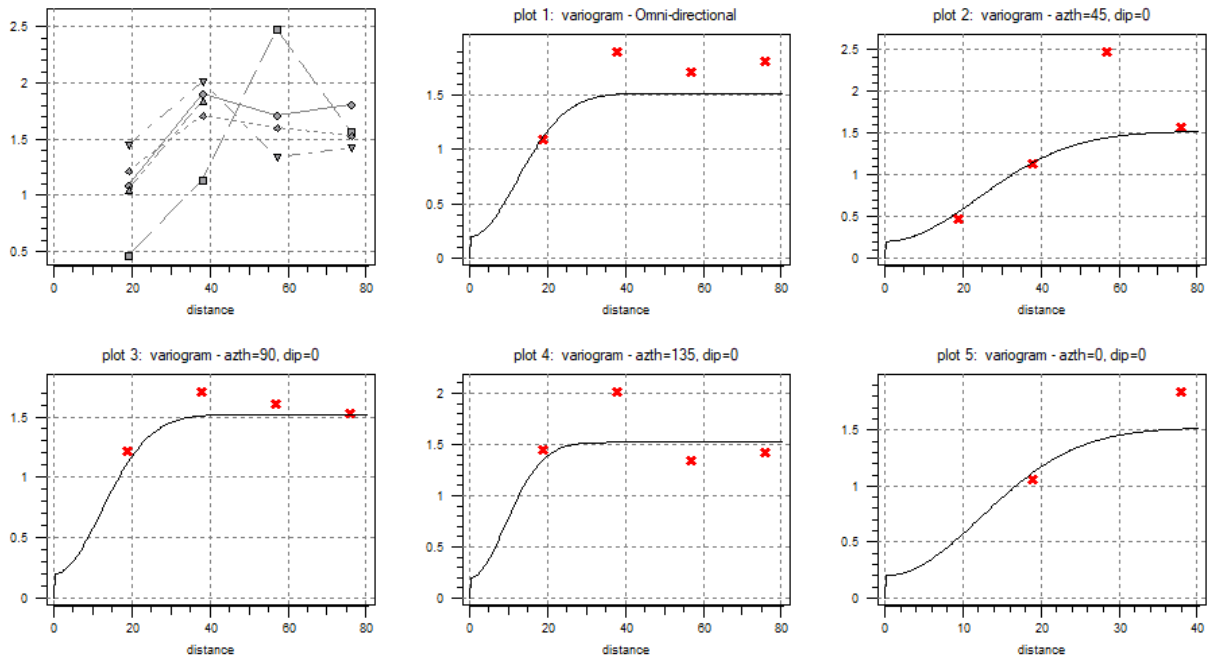


Figura 3.15, variogrammi in tutte le direzioni angolari, in alto a sinistra sono presenti tutti i variogrammi risultanti, in alto centrale si ha il variogramma omnidirezionale, in alto a destra si ha il variogramma con una direzione pari a 45 gradi rispetto la verticale, in basso a sinistra è presente il variogramma in direzione orizzontale, in basso al centro è presente il variogramma per una direzione di 135 gradi rispetto la verticale, in basso a destra è presente il variogramma lungo la direzione verticale.

La variabilità del valore Range lungo le diverse direzioni implica la presenza di una anisotropia geometrica nella zona di studio.

3.3.2.2 Correlazione spaziale Campo sud

A causa della diversa disposizione spaziale dei test infiltrometrici nel Campo sud, si sono dovuti modificare i parametri utili alla determinazione del variogramma, dovendo aumentare la *lag separation* per consentire una corretta individuazione delle coppie, con un conseguente aumento della tolleranza.

I risultati ottenuti attraverso il calcolo del variogramma (Fig. 3.16) mostrano come la direzione preferenziale della correlazione spaziale non sia più la direzione di 45 rispetto alla verticale, ma piuttosto, la direzione orizzontale, ossia la stessa direzione dei filari dei vigneti.

I valori precisi del modello di variogramma sono:

- Nugget effect pari a 0.5
- Sill contribution pari a 1.3
- Range massimo pari a 70.4 m
- Range minimo pari a 36.8 m

Il range massimo di influenza, lungo la direzione orizzontale, è pari a 70 metri, mentre il range minimo è lungo la verticale e vale solamente 36.8 metri, si è dunque in presenza di una anisotropia geometrica.

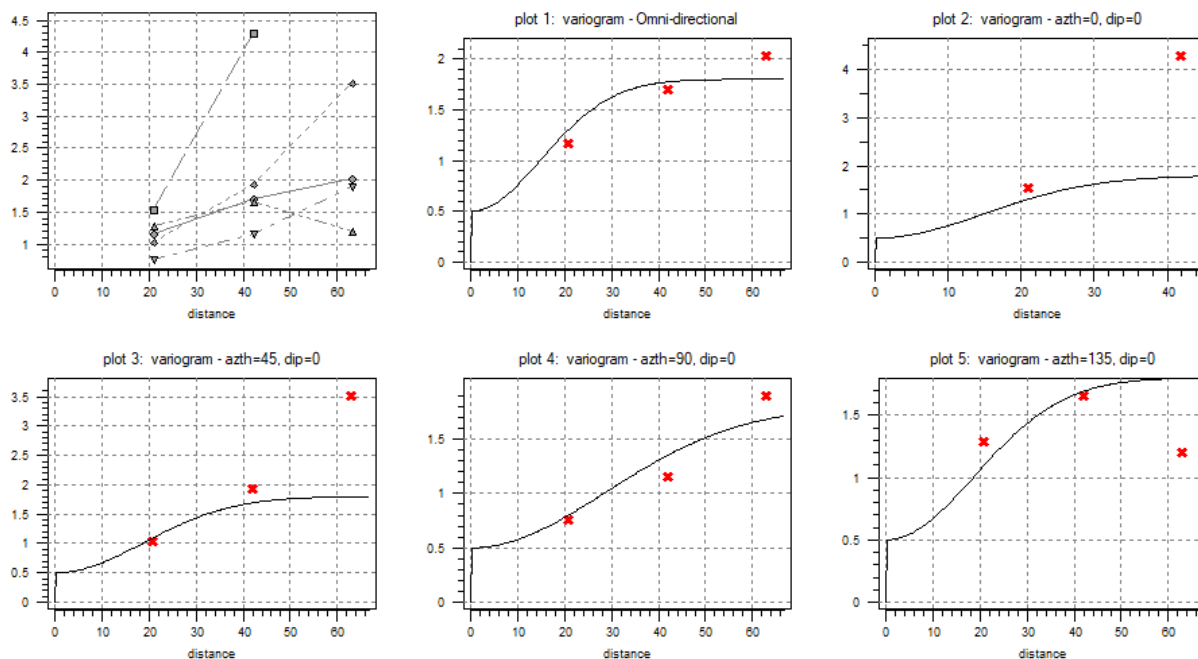


Figura 3.16, in alto a sinistra sono presenti tutti i valori dei variogrammi sperimentali, in alto al centro è presente il variogramma omnidirezionale, in alto a sinistra è presente il variogramma con direzione verticale, in basso a destra si ha il variogramma lungo la direzione di 45 gradi rispetto la verticale, in basso al centro si ha il variogramma orizzontale, in basso a destra è presente il variogramma lungo la direzione di 135 rispetto la verticale.

Si noti che il range massimo di influenza del Campo sud è maggiore del medesimo de Campo ATS, mentre i valori del range minimo sono rimasti costanti.

3.3.2.3 Correlazione Campo nord e Campo ATS

I parametri utili alla definizione del variogramma seprimentale, molto simili ai valori riferiti al solo campo ATS, consentono di ottenere la Figura 3.17, in cui si ha che la direzione principale per la quale esiste la più elevata correlazione spaziale risulta essere nuovamente i 45 gradi rispetto la verticale del sistema di riferimento locale.

I valori significativi del modello Gaussiano ottenuto sono:

- Nugget effect pari a 0.3
- Sill contribution pari a 2.08
- Range massimo pari a 48.96 m
- Range minimo pari a 36.04 m

Risulta essere una curva con un raggio di influenza sia minimo che massimo leggermente più basso rispetto al solo campo ATS.

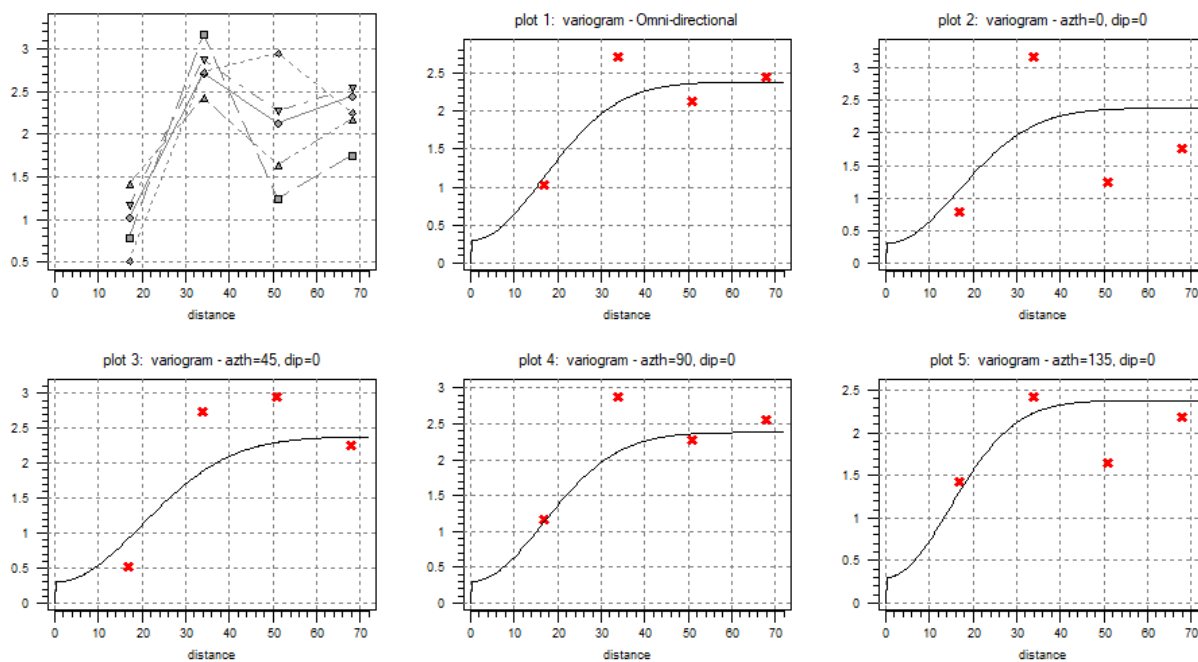


Figura 3.17, variogrammi lungo le direzioni del Campo ATS e del Campo nord; in alto a sinistra si ha l'insieme di tutti i punti calcolati del variogramma sperimentale, in alto al centro si ha il variogramma omnidirezionale, in alto a destra è presente il modello lungo la direzione verticale, in basso a sinistra si ha il variogramma lungo la direzione di 45 gradi rispetto la verticale, in basso al centro si mostra il variogramma lungo la direzione orizzontale, mentre in basso a destra è presente il variogramma lungo la direzione di 135 gradi rispetto la verticale.

Anche in questa circostanza, si è in presenza di una anisotropia geometrica a causa della differenza nel valore dei range.

3.3.2.4 Area totale

Lo studio geostatistico sull'area totale garantisce un ottimo strumento per l'osservazione del fenomeno nel suo complesso, ma come già evidenziato, la maggior variabilità tra i dati suggerisce, per una migliore analisi, una separazione dei dati nelle aree precedentemente descritte.

Ragionando a livello generale, si ha la necessità di determinare i parametri geostatistici per la ricerca del variogramma attraverso una mediazione tra i parametri già descritti in precedenza.

I risultati del variogramma totale (Fig. 3.18) permettono di definire un nuovo modello, con le seguenti caratteristiche:

- Nugget effect pari a 0.8
- Sill contribution pari a 1.64
- Range massimo pari a 45.36
- Range minimo pari a 39,6

Ancora una volta è variato il range massimo, confermando l'anisotropia geometrica anche se in forma più lieve.

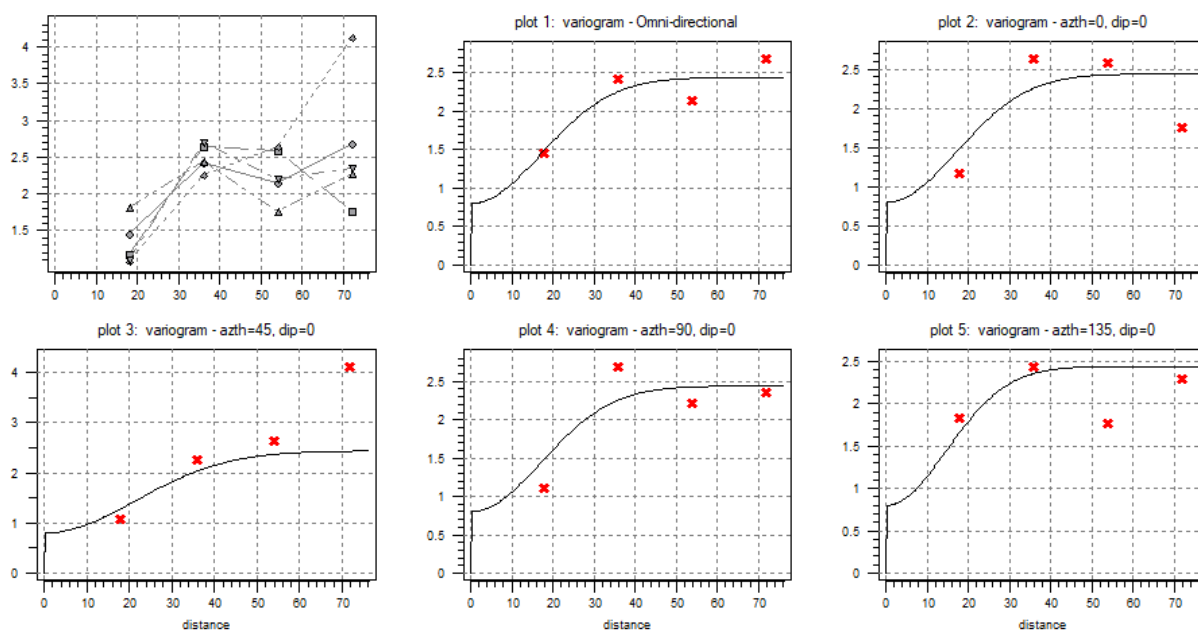


Figura 3.18, modelli di variogramma lungo le direzioni prefissate; in alto a sinistra sono presenti tutti i valori del variogramma sperimentale, in alto al centro è presente il variogramma omnidirezionale, in alto a destra si vede il modello lungo la direzione verticale, in basso a sinistra si ha il variogramma lungo la direzione di 45 gradi rispetto la verticale, in basso al centro è presente il modello nella direzione orizzontale, mentre in basso a destra si ha il variogramma lungo la direzione di 135 gradi rispetto la verticale.

La *lag separation* non sarà maggiore di 18 metri, a causa della più ridotta distanza tra i punti presenti nel campo ATS, e con una tolleranza pari a 9 metri, in grado di comprendere tutti i valori possibili e quindi di generare tutte le coppie disponibili.

3.3.3 Risultati del Kriging

Svolgendo il Kriging per il campo ATS (Fig. 3.19), si ottiene un modello con una accentuata correlazione spaziale lungo la direzione di 45 gradi e con una forte alternanza tra zone con conducibilità relativamente bassa (visibili nella scala con il colore blu), e zone con discreta conducibilità idraulica a saturazione (tendenti verso il rosso).

La zona centrale del campo gestito da Alto Trevigiano Servizi presenta un'ampia zona con conducibilità idraulica molto bassa, proprio in corrispondenza della posizione del pozzo 1 di prelevamento.

La scala di misura per i pixel stimati è uguale per ogni Kriging, ed è compresa tra i valori -9 e -13.5, che corrispondono a valori di conducibilità idraulica a saturazione in metri al secondo rispettivamente di 1.23E-04, e di 1.37E-06.

In questo modo è possibile confrontare anche a livello visivo gli andamenti di conducibilità idraulica a saturazione nelle aree non campionate.

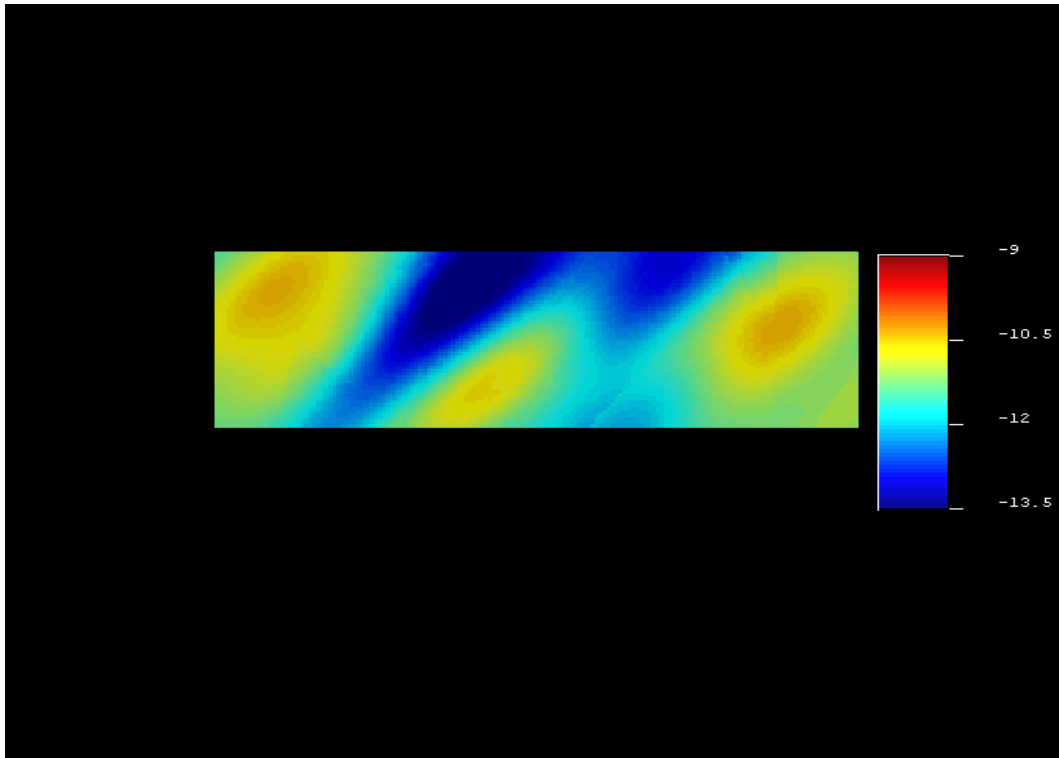


Figura 3.19, *Kriging stazionario del solo Campo ATS, determinato utilizzando i valori logaritmici naturali di conducibilità idraulica a saturazione, localizzati attraverso le coordinate del sistema di riferimento locale rototraslato.*

Ampliando ora lo studio del Campo ATS, si introducono i valori logaritmici di conducibilità idraulica a saturazione localizzati nel Campo nord.

Il Kriging risultante (Fig. 3.20), mediante l'utilizzo del variogramma associato all'area di riferimento presenta una correlazione spaziale della conducibilità idraulica a saturazione molto simile a quella mostrata dalla Figura 3.19.

L'aggiunta dei punti localizzati nel vigneto a nord del pozzo hanno prodotto due principali conseguenze:

- L'aumento di più elevati valori di conducibilità idraulica a saturazione (a causa principalmente del punto 3 e del punto 12).
- L'introduzione di un'ampia area a bassa conducibilità idraulica a saturazione dovuta al punto 19, collocato a destra nella Figura 3.19.

Considerando invece il Kriging svolto nel Campo sud (Fig. 3.21), ossia l'area a sud del pozzo in cui è presente un vigneto, si può notare un netto aumento dei valori logaritmici di conducibilità idraulica a saturazione rispetto ai casi precedenti.

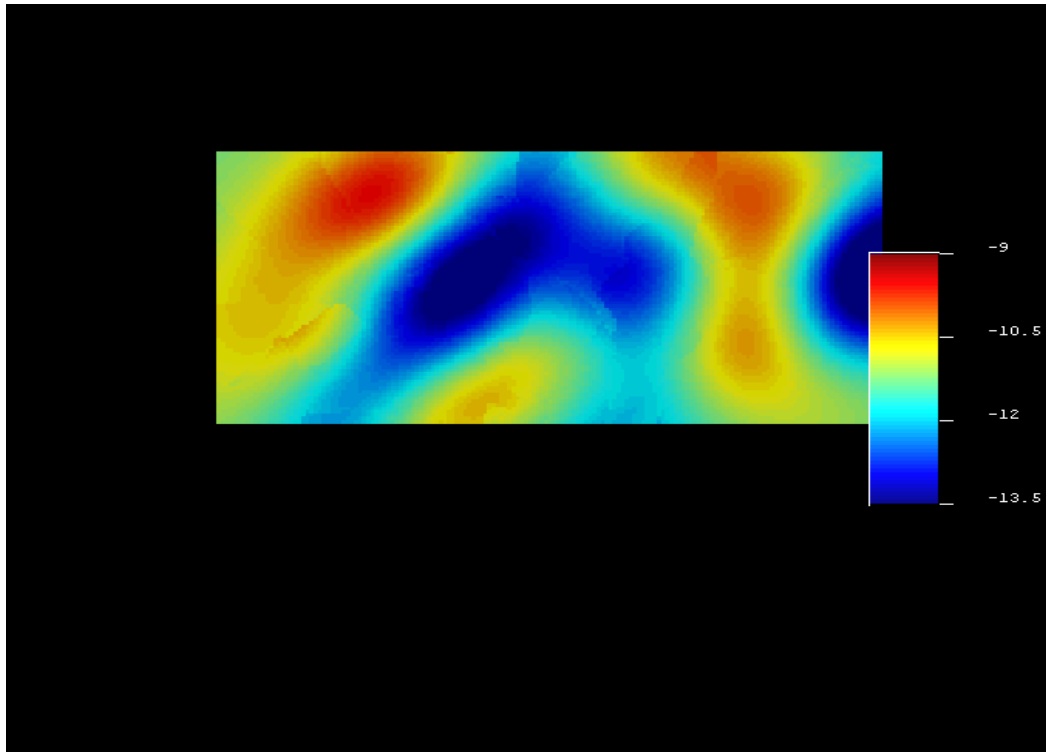


Figura 3.20, Kriging del Campo ATS e del Campo Nord, i valori utilizzati sono in scala logaritmica riferiti alle coordinate del sistema di riferimento locale rototraslato.

L'unica area con conducibilità idraulica a saturazione paragonabile ai valori presenti nel Campo ATS risulta essere la zona in basso a sinistra, in cui sono stati svolti i test 108 e 110.

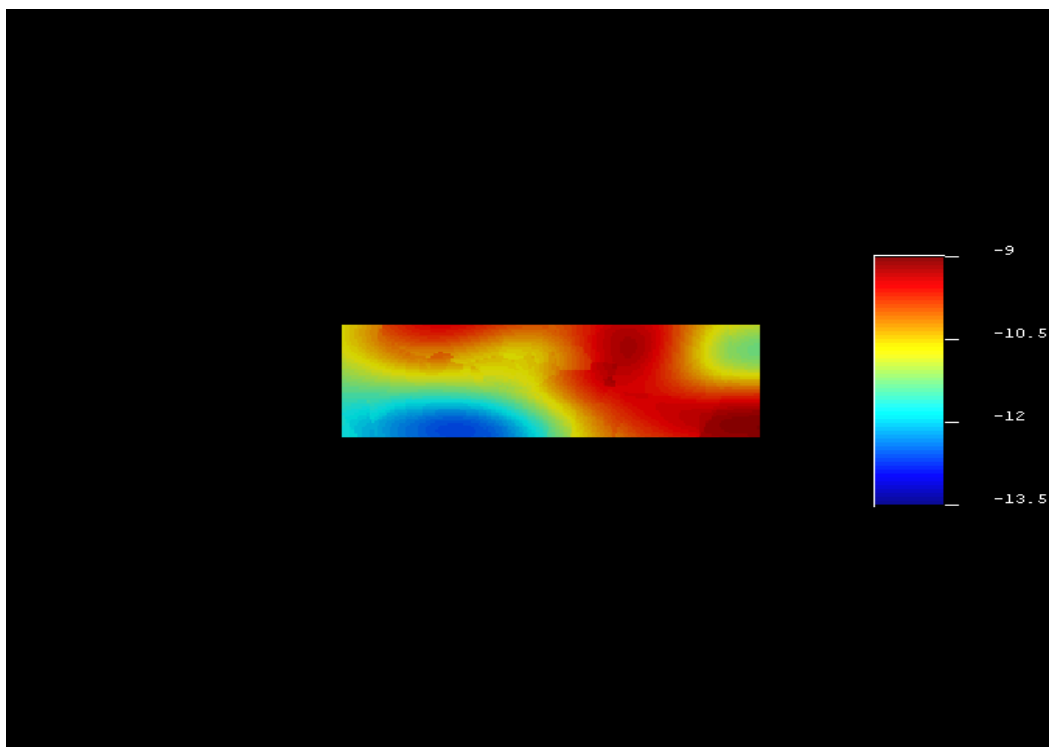


Figura 3.21, Kriging calcolato per l'area Campo sud, attraverso il modello di variogramma associato a tale area e ai valori logaritmici di conducibilità idraulica a saturazione orientati secondo il sistema di riferimento locale.

Se invece si uniscono tutti i dati a disposizione con le relative posizioni spaziali è possibile svolgere il Kriging attraverso il modello di variogramma calcolato per l'area totale (Fig. 3.22).

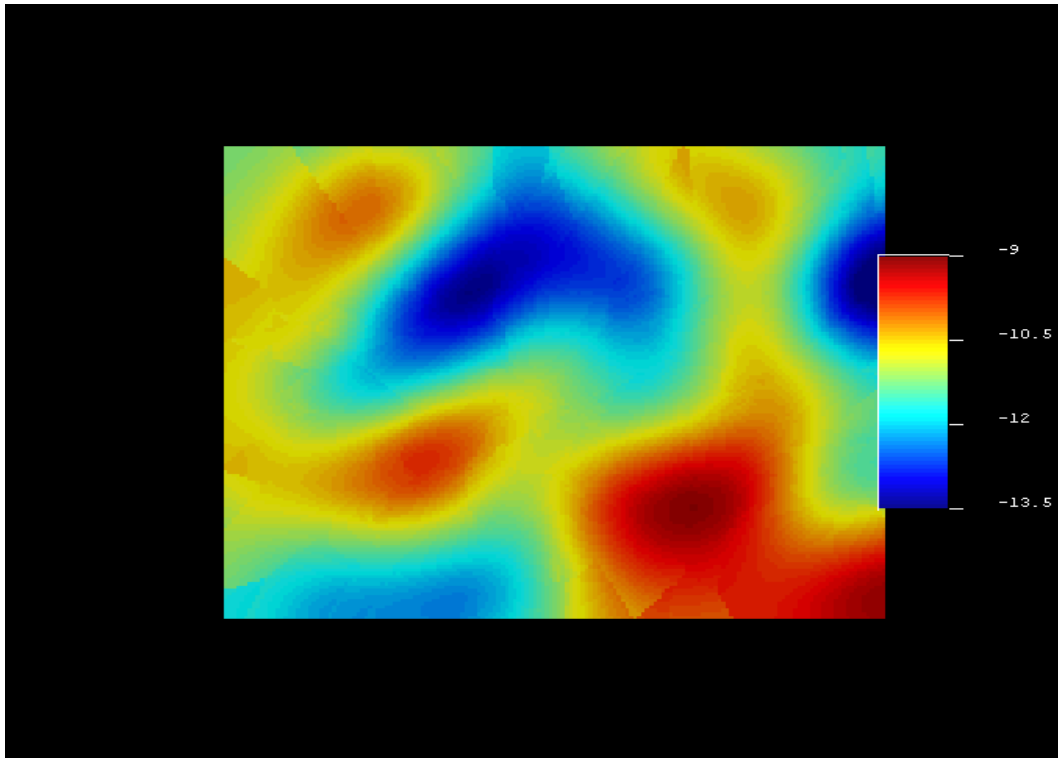


Figura 3.22. *Kriging svolto su tutta l'area di interesse, il modello di variogramma è relativo all'intero sito di studio. I dati puntuali utilizzati sono i valori logaritmici della conducibilità idraulica a saturazione orientati secondo il sistema di riferimento rototraslato.*

Il risultato conferma parzialmente la correlazione vista per le diverse aree descritte con una zona a ridotta conducibilità idraulica nella parte centrale dell'area di studio, mentre è presente un'ampia zona di maggior conducibilità idraulica a saturazione nella parte inferiore, come evidenziato in precedenza.

3.3.4 Risultati della Validazione Incrociata (Cross-Validation)

Le stime puntuali attraverso il Kriging stazionario hanno prodotto una mappa con specifici andamenti della conducibilità idraulica a saturazione.

Serve tuttavia, verificare l'esattezza delle stime ottenute, in modo da essere certi di possedere una mappa capace di descrivere in modo realistico l'andamento della conducibilità idraulica a saturazione.

Considerando i 16 punti determinati nel Campo ATS, si sono svolti 16 stime puntuali attraverso il Kriging stazionario andando successivamente a leggere il valore logaritmico della conducibilità idraulica a saturazione stimato nel pixel in cui era assente il punto campionario.

È utile sottolineare nuovamente il fatto che il punto eliminato nell'*i*-esimo Kriging, viene re-introdotto nel calcolo del Kriging successivo, *i*+1.

I risultati (Tab. 3.8) mostrano che esiste un coefficiente di correlazione pari al 66.5%, ossia i dati sono stati stimati con una precisione abbastanza elevata.

Tabella 3.8, valori della validazione incrociata per il Campo ATS, la prima colonna contiene il codice identificativo dei punti campionati, la seconda colonna contiene i valori sperimentali logaritmici della conducibilità idraulica a saturazione, nella terza colonna sono presenti i valori logaritmici stimati di conducibilità idraulica a saturazione, nella quarta e quinta colonna sono presenti rispettivamente gli errori assoluti e percentuali, nell'ultima colonna è presente il coefficiente di correlazione riferito ai valori presenti nella seconda e nella terza colonna.

Codice identificativo test infiltrometrici	Logaritmo della conducibilità idraulica a saturazione	Stima del logaritmo della conducibilità idraulica a saturazione	Errore assoluto	Errore totale percentuale	Coefficiente di correlazione
101	-10.5270	-10.7698	0.2428	1.9074	0.665
103	-10.7483	-11.1766	0.4283	3.3643	
104	-12.4485	-11.9234	0.5251	4.1252	
106	-13.5016	-12.8933	0.6083	4.7783	
109	-13.0374	-12.4691	0.5683	4.4642	
112	-11.1159	-11.9148	0.7989	6.2763	
0	-13.2076	-11.5649	1.6427	12.9044	
180	-10.1582	-10.7328	0.5746	4.5139	
1	-10.3301	-11.0040	0.6739	5.2938	
2	-10.8852	-10.9883	0.1031	0.8101	
4	-11.3464	-12.3677	1.0213	8.0228	
6	-13.9192	-12.3868	1.5324	12.0380	
7	-10.5858	-11.9430	1.3572	10.6615	
10	-10.9462	-12.1624	1.2162	9.5540	
14	-12.1261	-11.1897	0.9364	7.3558	
20	-10.9662	-11.4665	0.5003	3.9299	

Soprattutto, si nota come più del 45 % dell'errore totale sia dovuto ai punti 0, 6, 7 e 10, mentre gli altri punti hanno valori stimati con errore molto più contenuto.

Per visualizzare in modo ottimale i risultati (Fig. 3.23), si realizza un grafico a dispersione ponendo sull'asse delle ascisse i valori logaritmici in modulo di conducibilità idraulica a saturazione 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.

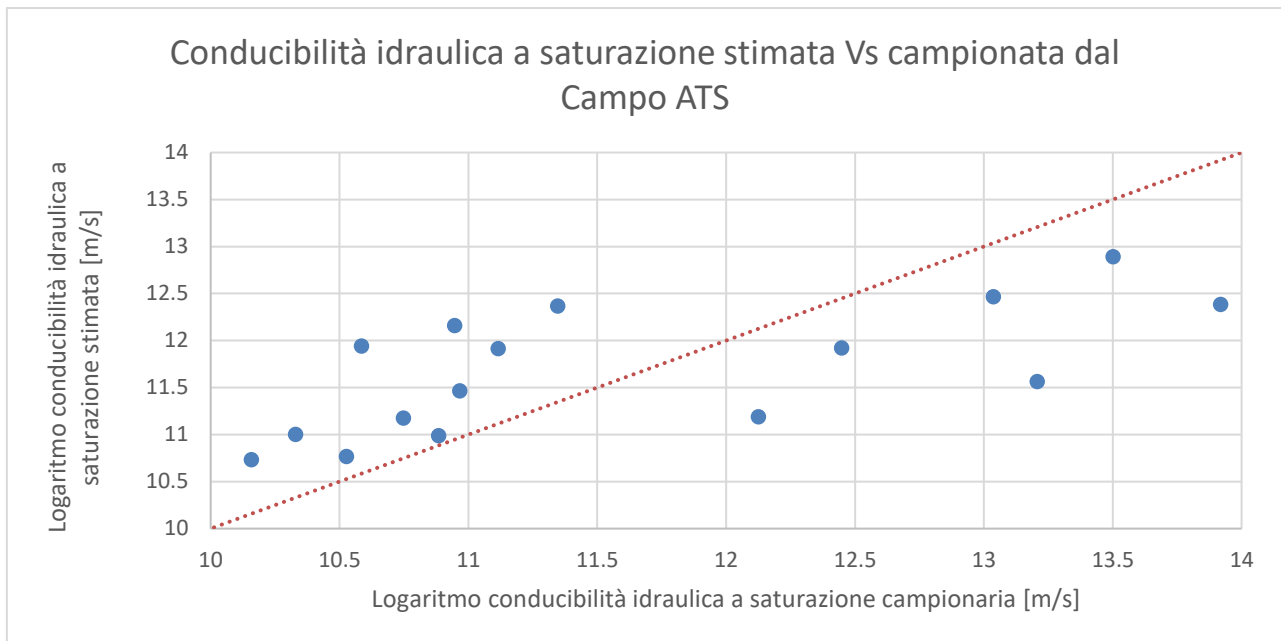


Figura 3.23, validazione incrociata dei punti presenti nel Campo ATS, nell'asse delle ascisse si ha il modulo della conducibilità idraulica a saturazione campionaria, mentre nell'asse delle ordinate è presente il valore logaritmico, in modulo, della conducibilità idraulica a saturazione stimata attraverso 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.

Considerando ora il Campo ATS insieme ai punti determinati nel Campo nord, con un totale di 21 dati (Tab. 3.9), si nota il forte abbassamento del grado di correlazione dei risultati.

Un coefficiente di correlazione pari al 9.6% indica come le stime effettuate dal modello sviluppato siano altamente imprecise, sintomo di una forte variabilità nei dati.

Considerando tutti i punti con un valore di errore totale percentuale superiore al 5%, si nota come quattro di questi punti (3, 12, 16 e 19) siano collocati nel Campo nord, mentre i restanti tre punti, ossia il 180, 7 e 0, sono parte del campo centrale.

In particolare, il test numero 7 e il test 0 sono punti con errore elevato sia nella validazione incrociata del solo Campo ATS, sia del controllo effettuato su tutta l'area a nord della strada.

È importante notare l'errore causato dal punto 19, il quale da solo causa il 15 % dell'errore totale, mentre gli errori riferiti ai restanti punti sono tutti inferiori del 10%, questo fenomeno è dovuto della sua particolare collocazione spaziale, molto isolato ad est del campo, e soprattutto, dal suo valore di conducibilità idraulica a saturazione molto basso (il più basso registrato durante tutti i test infiltrometrici).

Allo stesso modo, riportando i valori di conducibilità idraulica campionari e stimati in un grafico a dispersione (Fig. 3.24), con asse delle ascisse pari alla conducibilità campionaria, e asse delle ordinate pari alla conducibilità idraulica a saturazione stimata, si nota una scarsa distribuzione dei punti attorno la bisettrice del primo e del terzo quadrante, sintomo di una correlazione tra i dati molto bassa.

Tabella 3.9, valori utilizzati per lo sviluppo della validazione incrociata; nella prima colonna sono presenti i codici identificativi dei test infiltrometrici, nella seconda colonna si ha il valore logaritmico della conducibilità idraulica a saturazione campionaria, nella terza colonna sono presenti le stime, ottenute attraverso il Kriging senza l'i-esimo punto, dei valori logaritmici di conducibilità idraulica a saturazione, nella quarta e nella quinta colonna si ha rispettivamente l'errore assoluto e l'errore percentuale, l'ultima colonna contiene il coefficiente di correlazione lineare calcolato utilizzando i dati presenti nella seconda e nella terza colonna.

Codice identificativo test infiltrometrici	Logaritmo della conducibilità idraulica a saturazione	Stima del logaritmo della conducibilità idraulica a saturazione	Errore assoluto	Errore totale percentuale	Coefficiente di correlazione
101	-10.5270	-10.5868	0.0598	0.2191	0.096
103	-10.7483	-10.5433	0.2050	0.7513	
104	-12.4485	-11.1474	1.3011	4.7673	
106	-13.5016	-12.3600	1.1416	4.1827	
109	-13.0374	-13.2201	0.1827	0.6695	
112	-11.1159	-11.4121	0.2962	1.0854	
0	-13.2076	-11.2163	1.9913	7.2961	
180	-10.1582	-11.8055	1.6473	6.0356	
1	-10.3301	-10.7585	0.4284	1.5696	
2	-10.8852	-11.3018	0.4166	1.5265	
4	-11.3464	-12.4112	1.0648	3.9013	
6	-13.9192	-12.8575	1.0617	3.8900	
7	-10.5858	-12.5118	1.9260	7.0568	
9	-13.1625	-12.2251	0.9374	3.4347	
10	-10.9462	-12.1910	1.2448	4.5609	
14	-12.1261	-10.9411	1.1850	4.3417	
16	-9.6963	-12.2629	2.5666	9.4040	
12	-10.1586	-12.1118	1.9532	7.1567	
20	-10.9662	-11.9732	1.0070	3.6896	
3	-9.2855	-11.6335	2.3480	8.6031	
19	-14.9405	-10.6126	4.3279	15.8578	

L'aggiunta dei valori logaritmici (in modulo) di conducibilità idraulica a saturazione appartenenti al Campo nord, ha provocato una drastica riduzione di correlazione nei dati con una conseguente perdita di efficacia del modello di stima puntuale elaborato attraverso il Kriging stazionario.

In altri termini, il valore stimato della conducibilità idraulica a saturazione nei punti non campionati, definita in Figura 3.20, non risulta essere significativo, perché il modello è stato in grado di fornire una correlazione del solo 9.6 %, con conseguente perdita di accuratezza della stima.

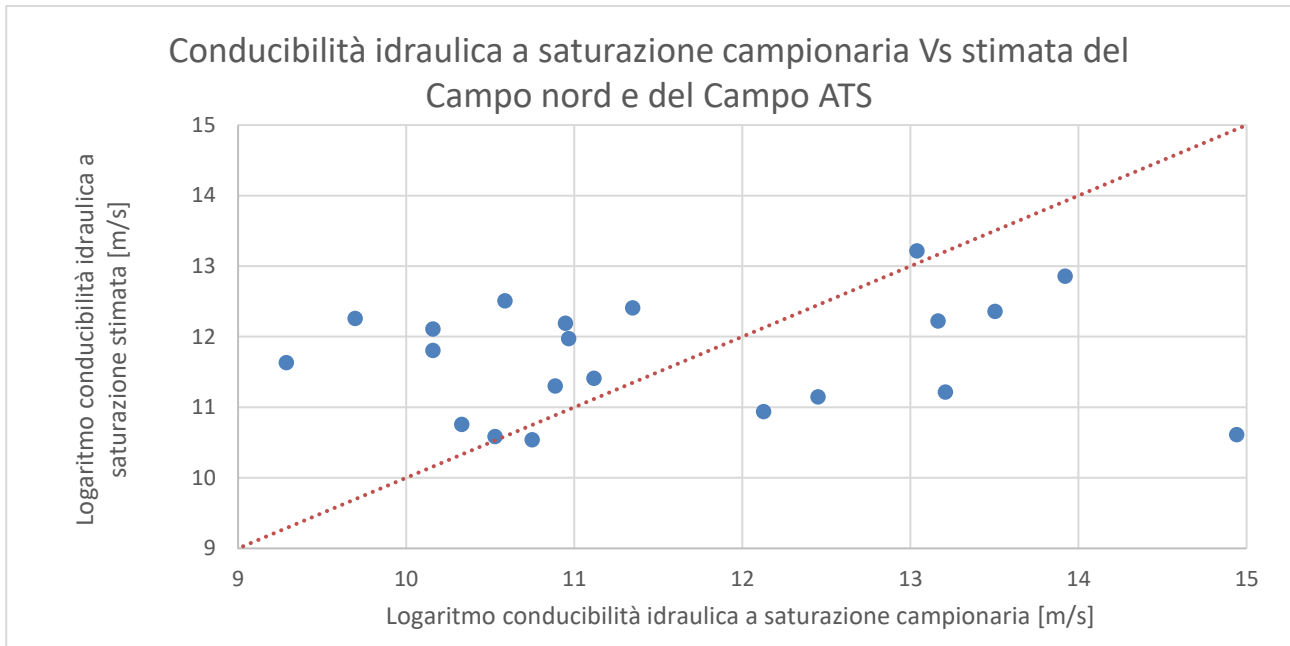


Figura 3.24, validazione incrociata dei punti del Campo ATS e del Campo nord; nell'asse delle ascisse sono presenti i valori logaritmici (in modulo) dei valori di conducibilità idraulica a saturazione campionaria, nelle ordinate sono presenti i valori logaritmici, sempre in modulo, stimati attraverso i Kriging di validazione. I punti sono confrontati con la bisettrice del primo e terzo quadrante, simbolo della perfetta correlazione tra i dati.

Ponendo l'attenzione sul Campo sud (Tab. 3.10), il coefficiente di correlazione lineare è pari al 26.2%, un valore più elevato del caso precedente ma comunque non in grado di offrire una stima ottimale dei valori di conducibilità idraulica a saturazione nelle aree non campionate.

In dettaglio, considerando i punti con un errore percentuale superiore il 10 %, si ha che solo tre punti (evidenziati in rosso nella Tabella 3.10) superano tale quota, producendo insieme più del 40 % dell'errore totale.

Una situazione di questo tipo indica una più ampia variabilità riferita ai valori logaritmici di conducibilità idraulica a saturazione, con zone in cui il modello di stima ha un errore molto contenuto, ed altre zone che presentano valori altalenanti non stimabili attraverso il modello sviluppato.

Il punto più critico sotto questo aspetto è il test numero 115, il quale presenta un valore di conducibilità idraulica a saturazione (in metri al secondo) molto più basso rispetto alla media della zona circostante, risultando particolarmente significativo nello sviluppo del metodo di stima puntuale.

Infatti, trascurando il punto 115, cioè scartando il Kriging di validazione senza il punto 115 dallo sviluppo della validazione incrociata, si ottiene un coefficiente di correlazione pari al 50,32 %.

Sviluppando un grafico a dispersione relazionando i valori logaritmici, in modulo, della conducibilità idraulica a saturazione campionaria, con i medesimi valori stimati (Fig. 3.25) è possibile notare anche a livello visivo la distribuzione dei dati nell'intorno della retta di perfetta correlazione lineare, con coefficiente angolare pari a 1.

Tabella 3.10, valori necessari per lo sviluppo della validazione incrociata del Campo sud; nella prima colonna sono presenti i codici identificativi dei test infiltrometrici, nella seconda e nella terza colonna si hanno rispettivamente i valori logaritmici di conducibilità idraulica a saturazione campionari e stimati, nella quarta colonna è presente l'errore assoluto, nella quinta colonna sono presenti i valori percentuali dell'errore totale, nell'ultima colonna si ha il coefficiente di correlazione calcolato sui dati della seconda e della terza colonna.

Codice identificativo test infiltrometrici	Logaritmo della conducibilità idraulica a saturazione	Stima del logaritmo della conducibilità idraulica a saturazione	Errore assoluto	Errore totale percentuale	Coefficiente di correlazione
102	-10.3911	-10.5752	0.1841	1.1278	0.262
105	-11.0358	-10.7797	0.2561	1.5687	
107	-9.1369	-10.4358	1.2989	7.9557	
108	-12.6906	-11.6505	1.0401	6.3710	
110	-12.9137	-11.0130	1.9007	11.6419	
111	-9.3829	-10.0284	0.6455	3.9540	
113	-9.4126	-10.1476	0.7350	4.5017	
114	-9.9917	-9.3973	0.5945	3.6411	
115	-11.9967	-9.1126	2.8841	17.6655	
116	-8.8024	-10.3296	1.5272	9.3547	
11	-11.3729	-9.4386	1.9343	11.8478	
5	-9.6648	-10.0233	0.3585	2.1957	
8	-10.7976	-11.4258	0.6282	3.8476	
15	-9.7479	-10.4818	0.7339	4.4956	
18	-8.7095	-10.3146	1.6051	9.8312	

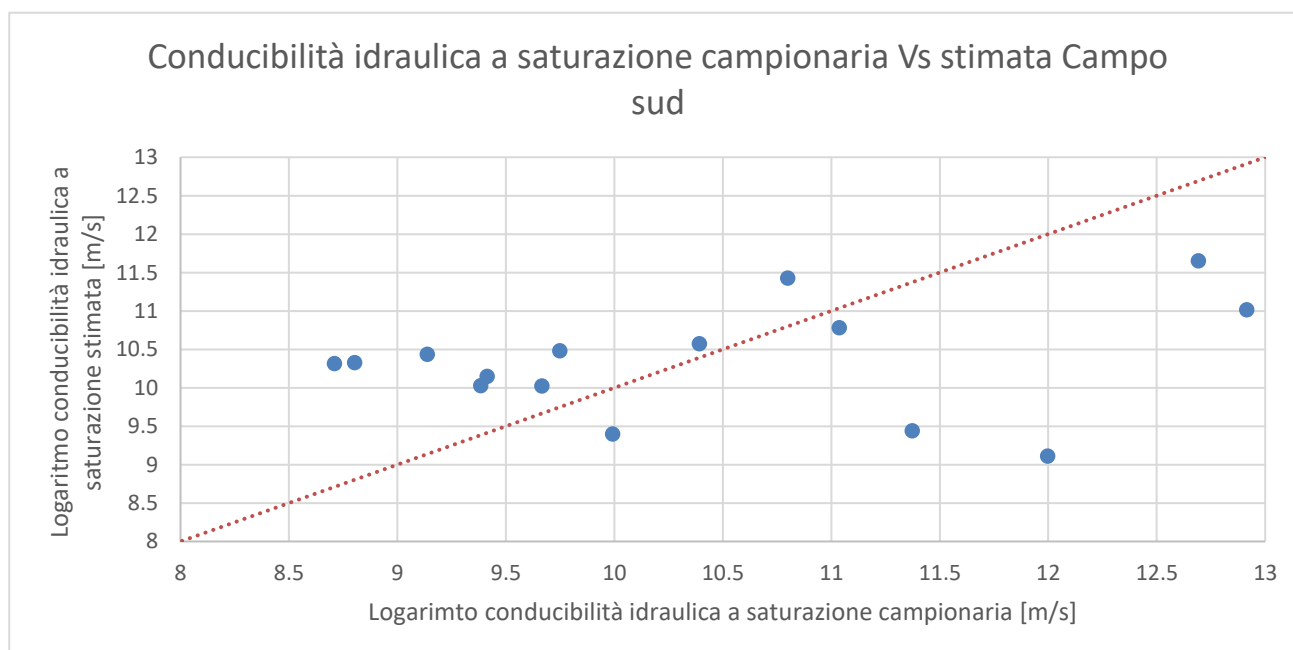


Figura 3.25, validazione incrociata dei punti localizzati nel Campo sud; asse delle ascisse con valori logaritmici in modulo del valore di conducibilità idraulica a saturazione campionaria, mentre nell'asse delle ordinate sono presenti i valori logaritmici di conducibilità stimati con il Kriging di validazione.

Applicando il metodo della validazione incrociata a tutti i test infiltrometrici svolti, si ottiene un coefficiente di correlazione pari al 32,7 % (Tab. 3.11), e con solo quattro punti (evidenziati in rosso) con un errore percentuale totale maggiore del 5 %.

L'errore più elevato è dovuto al test infiltrometrico numero 19, il quale da solo frutta il 9% dell'errore totale.

Si nota una distribuzione degli errori molto più omogenea, infatti non esistono specifici punti con errori molto elevati (escludendo il test 19), ma piuttosto, si hanno molti punti, di preciso 21 test su 36, con errori percentuali compresi tra 2 e il 6 %.

Pertanto, si è in presenza di un modello in grado di stimare con una precisione costante tutta l'area di studio, senza quindi aree particolarmente critiche, ma con una precisione di stima piuttosto bassa, attribuendo alla stima puntuale ottenuta una ridotta validità.

Realizzando un grafico a dispersione con asse delle ascisse pari al valore di conducibilità idraulica a saturazione campionaria e asse delle ordinate pari al valore di conducibilità stimato (Fig. 3.26), è possibile visualizzare in modo ottimale la correlazione dei dati, cioè la loro distribuzione nell'intorno della bisettrice del primo e del terzo quadrante.

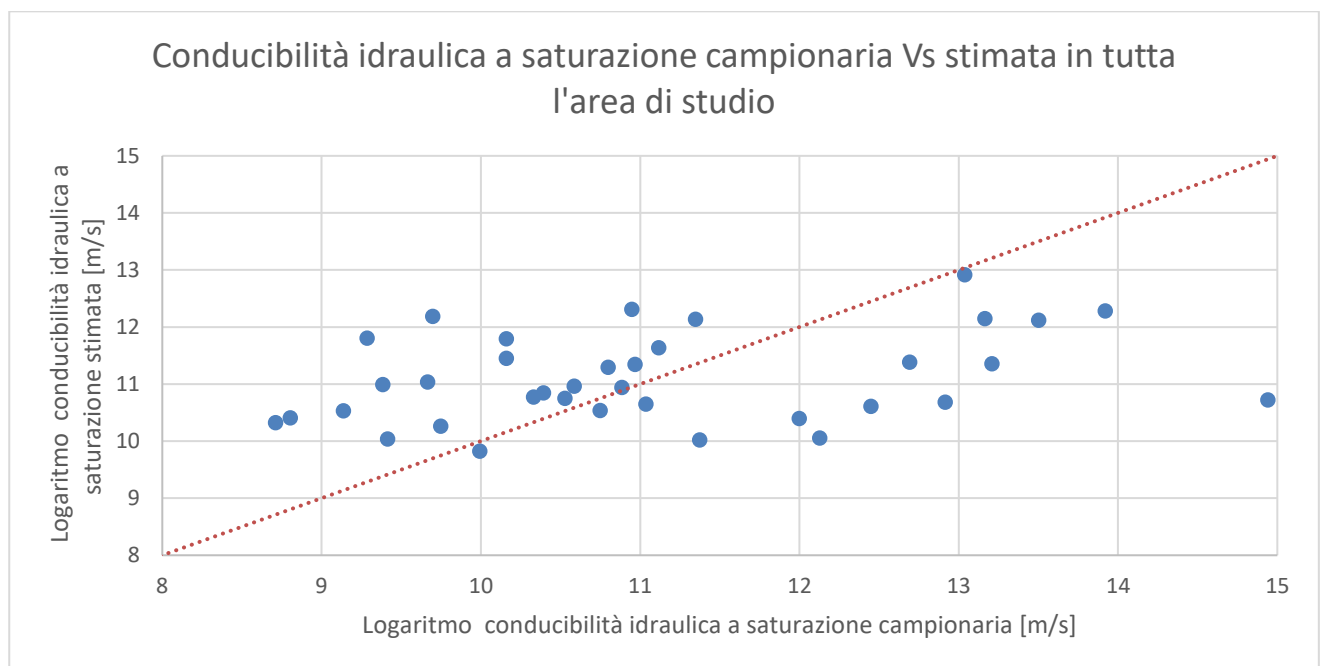


Figura 3.26, validazione incrociata su tutta l'area di studio; sull'asse delle ascisse sono presenti i valori logaritmici in modulo di conducibilità idraulica a saturazione campionari, mentre sull'asse delle ordinate sono presenti i valori di conducibilità idraulica a saturazione stimati attraverso il Kriging di validazione. La retta rossa è la bisettrice del primo e del terzo quadrante ed indica la perfetta (e quindi massima) correlazione lineare possibile tra i dati.

Tabella 3.11, validazione incrociata di tutta l'area di studio; nella prima colonna sono presenti i codici identificativi dei test, nella seconda e nella terza colonna si hanno rispettivamente i valori logaritmici di conducibilità idraulica a saturazione campionaria e stimata, nella quarta colonna si è calcolato l'errore assoluto, nella quinta colonna è presente l'errore percentuale totale, nell'ultima colonna è presente il coefficiente di correlazione riferito ai valori nella colonna due e tre.

Codice identificativo test infiltrometrici	Logaritmo della conducibilità idraulica a saturazione	Stima del logaritmo della conducibilità idraulica a saturazione	Errore assoluto	Errore totale percentuale	Coefficiente di correlazione
101	-10.5270	-10.7516	0.2246	0.5202	0.327
103	-10.7483	-10.5365	0.2118	0.4907	
104	-12.4485	-10.6123	1.8362	4.2529	
106	-13.5016	-12.1218	1.3798	3.1957	
109	-13.0374	-12.9192	0.1182	0.2737	
112	-11.1159	-11.6362	0.5203	1.2052	
0	-13.2076	-11.3573	1.8503	4.2854	
180	-10.1582	-11.4533	1.2951	2.9995	
1	-10.3301	-10.7723	0.4422	1.0241	
2	-10.8852	-10.9435	0.0583	0.1351	
4	-11.3464	-12.1377	0.7913	1.8327	
6	-13.9192	-12.2848	1.6344	3.7854	
7	-10.5858	-10.9672	0.3814	0.8833	
9	-13.1625	-12.1487	1.0138	2.3481	
10	-10.9462	-12.3146	1.3684	3.1693	
14	-12.1261	-10.0543	2.0718	4.7984	
16	-9.6963	-12.1912	2.4949	5.7784	
12	-10.1586	-11.7943	1.6357	3.7885	
20	-10.9662	-11.3472	0.3810	0.8824	
3	-9.2855	-11.8067	2.5212	5.8393	
19	-14.9405	-10.7262	4.2143	9.7609	
102	-10.3911	-10.8470	0.4559	1.0560	
105	-11.0358	-10.6517	0.3841	0.8896	
107	-9.1369	-10.5335	1.3966	3.2346	
108	-12.6906	-11.3875	1.3031	3.0182	
110	-12.9137	-10.6828	2.2309	5.1669	
111	-9.3829	-10.9932	1.6103	3.7297	
113	-9.4126	-10.0402	0.6276	1.4535	
114	-9.9917	-9.8249	0.1669	0.3865	
115	-11.9967	-10.3988	1.5979	3.7009	
116	-8.8024	-10.4116	1.6092	3.7272	
11	-11.3729	-10.0245	1.3484	3.1230	
5	-9.6648	-11.0368	1.3720	3.1776	
8	-10.7976	-11.2944	0.4968	1.1506	
15	-9.7479	-10.2624	0.5145	1.1918	
18	-8.7095	-10.3263	1.6168	3.7446	

La validazione incrociata ha permesso di individuare l'accuratezza delle stime puntuali sviluppate per le aree d'interesse, evidenziando come il solo modello di stima, con la conseguente mappa (Fig. 3.19) del Campo centrale gestito da Alto Trevigiano Servizi, sia in grado di predire i valori di conducibilità idraulica a saturazione con una discreta validità.

Il coefficiente di correlazione riferito al Campo sud, al Campo ATS insieme al Campo nord e a tutta l'area di studio, ha invece sottolineato l'inefficacia dei modelli di stima così sviluppati, i quali producono delle previsioni sui valori di conducibilità idraulica a saturazione poco sicuri.

Esiste però una differenza sostanziale nei casi di scarsa correlazione tra i dati, associabile al tipo di area presa in considerazione e al valore degli errori presenti.

La scarsa correlazione tra i valori campionari e i valori stimati tramite il Kriging di validazione del Campo sud e del Campo ATS con i punti del Campo nord, è dovuta alla presenza di alcuni valori fuori scala, troppo diversi rispetto alla media della zona, e che causano, una volta eliminati nell'*i*-esimo Kriging di validazione, un elevato errore assoluto (o percentuale).

Emblematici risultano essere i casi del test numero 115 e 19 rispettivamente per la validazione incrociata del Campo sud e del Campo ATS-nord, causa di una riduzione di circa 20 punti percentuali del coefficiente di correlazione del proprio insieme di dati.

Il basso valore del coefficiente di correlazione di tutta l'area di interesse, non è dovuto alla presenza di pochi punti con un elevato errore percentuale, ma al contrario, dipende dall'elevato numero di punti con un errore percentuale medio.

Questa condizione deriva dall'eterogeneità dei dati in possesso, e dunque dall'incapacità di generare un unico modello idoneo alla descrizione completa della conducibilità idraulica a saturazione su tutta l'area di interesse.

3.4 Conclusioni

In questo lavoro di tesi si è discussa la caratterizzazione idraulica del suolo, agricolo e non agricolo, all'interno di un'area di salvaguardia delineata attorno a un'opera di presa da pozzo per l'estrazione di acqua potabile. Lo studio, che si è sviluppato in due fasi, una sperimentale, svolta sul campo tramite test infiltrometrici, e una di analisi, attraverso modelli d'infiltrazione e strumenti geostatistici, è volto allo sviluppo di una valutazione preliminare di quella che potrebbe essere la vulnerabilità dell'area di studio, il Campo Pozzi di Settolo, all'infiltrazione dei prodotti fitosanitari usati in agricoltura.

I valori di conducibilità idraulica a saturazione, ricavati a partire dai test infiltrometrici svolti nell'area, hanno evidenziato una grande variabilità spaziale della proprietà idraulica, fino a tre ordini di grandezza. L'analisi statistica sviluppata sui valori ottenuti mostra che la media dei valori di conducibilità idraulica a saturazione è più elevata nel vigneto presente nel Campo sud, e nell'area comprendente sia il Campo ATS che il vigneto a nord. Tale risultato mostra che la conducibilità idraulica a saturazione è in genere maggiore in presenza dei vigneti.

Ciò può costituire un problema per la preservazione della qualità della risorsa idrica, in questo caso la falda freatica, usata per l'approvvigionamento del sistema acquedottistico.

Questo perché, considerando l'infiltrazione dell'acqua come fattore determinante per l'infiltrazione delle sostanze chimiche nel terreno, una maggiore conducibilità idraulica degli strati superficiali del terreno aumenta il rischio che i prodotti fitofarmaci per la difesa delle piante usati in agricoltura possano infiltrarsi e raggiungere la falda.

Un ulteriore risultato riguarda la variabilità dei valori di conducibilità idraulica a saturazione osservati in aree in cui sono presenti diversi vigneti.

Nel campo a sud del pozzo, è presente una variabilità maggiore, infatti la varianza è dell'ordine di 10^9 , mentre risulta essere di un ordine di grandezza inferiore sia analizzando il campo gestito da Alto Trevigiano Servizi, sia considerando tutti i test infiltrometrici svolti nel campo ATS e nel campo Nord.

La maggior variabilità presente nei vigneti è associabile all'eterogeneità spaziale del processo di infiltrazione dell'acqua. Alcuni vigneti presentano terreni con conducibilità idraulica a saturazione più elevata mentre altri sono caratterizzati da terreni con valori più contenuti.

Si delineano pertanto delle aree d'infiltrazione preferenziali che potrebbero alimentare l'eventuale immissione in falda di sostanze chimiche presenti sulla superficie dei vigneti.

Considerata l'elevata variabilità dei valori di conducibilità idraulica a saturazione osservati, si è ritenuto non sufficiente stimare le proprietà del terreno attraverso la media calcolata sull'intera area o sulle sue suddivisioni.

Al fine di stimare i valori di conducibilità idraulica a saturazione nelle zone non campionate comprese tra i punti sperimentali, è stata sviluppata un'analisi geostatistica, sfruttando la distribuzione spaziale dei valori osservati.

Anche i risultati ottenuti mediante lo studio geostatistico, e la successiva realizzazione di un modello di stima puntuale dei valori di conducibilità idraulica a saturazione in tutto il sito di studio, mostrano che tutta l'area a sud del pozzo, dove sono collocati i vigneti, è caratterizzata da valori di conducibilità più elevata.

I coefficienti di correlazione ottenuti dal confronto tra i valori stimati e quelli osservati, hanno consentito un'analisi più accurata dei risultati ottenuti, evidenziando come l'unico modello di stima puntuale valido, cioè con un coefficiente di correlazione elevato, sia quello riferito al campo centrale non coltivato, ossia la zona in cui è collocato il pozzo.

In quest'area, di proprietà di Alto Trevigiano Servizi, il terreno non è mai stato utilizzato per scopi diversi da quelli di gestione delle strutture e delle opere di presa per cui le sue proprietà pedologiche sono rimaste inalterate.

L'analisi geostatistica è stata quindi in grado di prevedere con una certa precisione, come indicato dal coefficiente di correlazione, la distribuzione spaziale della conducibilità idraulica a saturazione. Al contrario, l'implementazione del Kriging considerando i valori calcolati nel campo centrale e nel

vigneto a nord insieme ha prodotto una mappa con un grado di correlazione inferiore al 10 %, anche se 16 punti su 21 sono i medesimi del modello valido descritto precedentemente.

La scarsa capacità del modello di predire i valori di conducibilità idraulica a saturazione nei punti non campionati in quest'area (Area Nord), è dovuto all'introduzione dei punti calcolati nel vigneto a nord, influenzati dalla manipolazione antropica del terreno, e quindi non più legati al solo sviluppo geologico della zona.

Le zone limitrofe al campo centrale, adibite alla coltivazione della vite, hanno subito infatti dei processi di manipolazione che hanno modificato le principali caratteristiche fisiche del terreno. In altri termini, il coefficiente di correlazione è molto basso nell'area composta dal Campo ATS e dal Campo nord, perché si sono considerate in un'unica analisi due zone caratterizzate da un diverso grado di lavorazione del suolo.

Un simile risultato è stato ottenuto analizzando i valori osservati nel campo a sud del pozzo, sebbene si sia ottenuto un coefficiente di correlazione più alto.

Questo perché le modifiche antropiche dovute all'attività agricola hanno sì interessato la distribuzione spaziale delle caratteristiche fisiche, ma mantenendo però una certa direzionalità.

Infatti, la direzione principale del variogramma nel Campo sud si sviluppa lungo la direzione di coltivazione dei vigneti.

Per ottenere delle stime puntuali efficienti anche nel vigneto a sud e nel vigneto a nord del pozzo, è necessario sviluppare un'ulteriore analisi geostatistica non solo basata sulla distribuzione spaziale dei valori di conducibilità, ma implementata mediante l'utilizzo di ulteriori parametri capaci di fornire nuove indicazioni strutturali della coltivazione.

Un possibile miglioramento dell'efficienza dei modelli di stima puntuale all'interno dei campi coltivati, potrebbe essere ottenuto considerando i seguenti fattori:

- Tipo di piantagione, compresi lo sviluppo delle radici, la zona di influenza di ogni arbusto e dunque la loro interazione con la zona radicale.
- Larghezza del filare, in modo da capire in base alle radici delle piante, quali sono le zone con più o meno presenza vegetativa.
- Metodi di coltivazione e di trattamento, per individuare come avviene il ripristino della piantagione ogni anno, se si procede alla movimentazione del terreno e in quale zona avviene, se in tutto il filare o solo in specifiche aree.
- Età della coltivazione, capire quando è stato realizzato il vigneto in modo da associare l'ultima grande movimentazione del terreno coincidente con l'inseminazione delle piante.

In conclusione, i risultati ricavati hanno permesso di ottenere una mappa capace di stimare, con una certa precisione, i valori di conducibilità idraulica a saturazione nell'intero campo gestito da Alto Trevigiano Servizi in cui è presente l'area di tutela assoluta e parte della zona di rispetto.

Con tali valori di conducibilità idraulica a saturazione, e con la relativa distribuzione spaziale, è possibile implementare una mappa del rischio di contaminazione della falda, ponendo in

corrispondenza dei maggiori valori di conducibilità idraulica a saturazione il più alto rischio di contaminazione a causa del moto d'infiltrazione dell'acqua.

I modelli di stima puntuale della conducibilità idraulica a saturazione determinati per il vigneto a sud e a nord del pozzo, consentono di stimare con grado di precisione molto inferiore le proprietà idrauliche del suolo nelle aree non campionante.

La mappa di stima puntuale delle aree in cui sono presenti i vigneti potrebbe essere migliorata attraverso l'introduzione, in aggiunta ai parametri fisici misurati, di parametri legati alla gestione dei vigneti stessi.

Appendice

Tabella A.1: la prima colonna i codici identificativi dei test infiltrometrici, la seconda e la terza colonna contengono le coordinate nel nuovo sistema di riferimento rototraslato, rispettivamente per l'asse x e y, la quarta e la quinta colonna contengono le coordinate geografiche dei test infiltrometrici nel sistema di riferimento originario (Roma Monte Mario, Italy I).

Codice ID	XRT	YRT	XMM-i	YMM-i
101	14.161	81.712	1731046.689	5085650.797
103	42.174	101.249	1731080.840	5085650.416
104	41.952	61.468	1731057.541	5085618.172
106	62.050	80.039	1731084.689	5085621.604
109	92.402	101.969	1731122.134	5085621.812
112	129.351	82.982	1731141.168	5085584.887
0	116.327	94.188	1731137.082	5085601.576
180	146.210	79.173	1731152.674	5085571.990
1	23.885	98.427	1731064.317	5085658.749
2	20.861	64.825	1731042.327	5085633.161
4	44.333	80.113	1731070.314	5085631.961
6	67.294	97.493	1731099.100	5085632.761
7	66.779	61.753	1731077.910	5085603.975
9	92.998	115.849	1731130.685	5085632.761
10	91.832	76.204	1731106.696	5085601.176
14	117.020	58.820	1731117.091	5085572.390
16	143.889	113.381	1731170.666	5085601.176
12	118.794	131.323	1731160.671	5085630.362
20	165.357	58.264	1731156.105	5085543.847
3	51.051	116.513	1731096.935	5085657.679
19	172.108	96.323	1731183.717	5085570.896
102	20.445	49.049	1731032.821	5085620.564
105	30.293	25.534	1731027.169	5085595.705
107	65.856	48.758	1731069.607	5085593.937
108	41.438	0.262	1731021.552	5085568.661
110	75.645	5.518	1731052.444	5085553.059
111	110.218	44.268	1731103.099	5085564.501
113	125.402	10.568	1731095.870	5085528.252
114	148.328	20.613	1731120.365	5085523.103
115	168.552	37.932	1731146.889	5085525.444
116	174.625	10.635	1731135.967	5085499.700
11	88.186	41.240	1731083.410	5085574.841
5	42.134	43.668	1731047.344	5085603.581
8	60.933	23.162	1731050.726	5085575.968
15	104.627	21.127	1731085.101	5085548.919
18	136.269	38.877	1731121.166	5085544.974

Riferimenti bibliografici

1. Bird, B.R., Lightfoot, E.N., Stewart, W.E. (2007). *Transport Phenomena*. (2nd ed.). Wiley, New York (U.S.A.), p. 905.
2. Botter, G., *Idrologia*. Corso di laurea triennale in ingegneria per l'ambiente ed il territorio, Università degli studi di Padova (ITA), p. 76.
3. Boucher, A., Remy, N., e Wu, J. (2009). *Applied Geostatistics with SGeMS. A user's guide*. Cambridge, New York (U.S.A.), p. 264.
4. Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1988), *Applied hydrology*, McGraw-Hill Book Co., New York (U.S.A.), p. 572.
5. De Iaco, S., Posa, D., (2009). *Geostatistica, Teoria ed applicazioni*. G. Giappichelli Editore, Torino (ITA), p. 244.
6. Gomez-Hernandez, J.J. *Geostatistics*. Università politecnica di Valencia (SPA), p. 26.
7. Levine, D.M., Szabat, K. A., Stephan, D. F. (2018). *Statistics* (7th ed.). Pearson, Londra (U.K.), Arabia, G., Ragozini, G., Reinhold, H.J., *Statistica* (7th ed.). Pearson Italia, Milano (ITA), p. 468.
8. 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" (ITA), p. 96.
9. Trevisani, S., (2004). *Geostatistica nel contesto idrogeologico ed ambientale*. Tesi di dottorato in Scienze della Terra XVII ciclo, Università degli studi di Padova (ITA), p. 179.

