



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di Laurea in Tecnologie Forestali e Ambientali

**Caratterizzazione idraulica di suoli soggetti a pratiche
agronomiche sostenibili in condizione di falda ipodermica**

Docente di Riferimento:

Prof. Nicola Dal Ferro

Laureando:

Francesco Piamarta

Correlatrice:

Dott.ssa Marta Mencaroni

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

RIASSUNTO	4
ABSTRACT	5
1. INTRODUZIONE	6
1.1 L'ACQUA	6
1.2 IL SUOLO	8
1.3 LE POLITICHE AGROAMBIENTALI	17
1.4 PRATICHE AGRONOMICHE	21
1.5 IDROGEOLOGIA DELLA PIANURA VENETA	23
2. SCOPO DELLA TESI	25
3. MATERIALI E METODI	26
3.1 IL SITO SPERIMENTALE	26
3.2 DISEGNO SPERIMENTALE E CAMPIONAMENTO DEL SUOLO	28
3.3 ANALISI IDRAULICHE	29
4. RISULTATI E DISCUSSIONE	43
4.1 CONDUCEBILITÀ IDRICA SATURA	43
4.2 DENSITÀ APPARENTE	46
4.3 CURVA DI RITENZIONE IDRICA	47
5. CONCLUSIONI	60
BIBLIOGRAFIA	61

RIASSUNTO

Lo studio del deterioramento delle risorse naturali e, più in generale, del rapporto uomo-ambiente è sicuramente una delle tematiche più influenti e caratterizzanti di questo secolo, equilibrio messo alla prova principalmente dall'evoluzione della tecnica che velocizza i processi produttivi, consumando più di quello che il pianeta riesce a produrre. A partire dagli anni '90 la materia ambientale ha preso sempre più interesse comunitario, fino a diventare ai giorni nostri un tema cardine delle agende politiche, soprattutto per via degli eventi estremi e sempre più ricorrenti che si sono verificati negli ultimi anni. Lo studio in questione nasce dalla cooperazione tra due enti: la Regione Veneto, che predispone fondi in campo agro-forestale verso lo sviluppo sostenibile tramite il PSR e l'Università degli Studi di Padova, dip. DAFNAE, che mette in pratica prove sperimentali. Nel concreto, questo studio ha avuto l'obiettivo di determinare le caratteristiche fisico-idrauliche in differenti agroecosistemi (agricoltura convenzionale, conservativa e con colture di copertura) e in presenza o meno di falda ipodermica come tipicamente si osserva nei territori della bassa pianura Veneta.

Dal punto di vista sperimentale, campioni indisturbati di suolo prelevati a diverse profondità (15-21 cm, 27-33 cm, 57-63 cm e 97-103 cm) sono stati analizzati in laboratorio impiegando un permeometro per la determinazione della conducibilità idrica satura, e un ku-pF Apparatus combinato con un igrometro a punto di rugiada (WP4C Dewpoint PotentialMeter) al fine di determinare la curva di ritenzione idrica. Questa curva, caratteristica per ogni campione di suolo, rappresenta il risultato finale della prova sperimentale. Da essa si possono estrapolare informazioni importanti dal punto di vista agronomico, come la composizione fisica del terreno e il contenuto idrico disponibile alla pianta. Si tratta quindi di dati fondamentali allo sviluppo e impiego di un'agricoltura sostenibile e affine alle dinamiche naturali della bassa pianura Veneta.

ABSTRACT

The study of the deterioration of natural resources and, more generally, of the human-environment relationship is undoubtedly one of the most influential and characterizing issues of this century, a balance mainly tested by the evolution of technology that speeds up production processes, consuming more than the planet can produce. Since the 1990s, environmental issues have become increasingly of interest to the community, to the point of becoming a pivotal topic on political agendas in our days, mainly due to the extreme and increasingly recurring events that have occurred in recent years. This study comes from collaboration between the Veneto region and the DAFNAE department of the University of Padova, with the aim of determining the physical and hydraulic properties of agricultural soils that were managed according to conventional, conservation agriculture and permanent soil cover with cover crops, under shallow water table conditions that is typical of the low-lying Venetian plain. Undisturbed soil samples were taken at different depths (15-21 cm, 27-33 cm, 57-63 cm and 97-103 cm) and analyzed using a laboratory permeameter for the determination of saturated water conductivity, and a ku-pF Apparatus combined with a dew point hygrometer (WP4C Dewpoint PotentialMeter) to determine the water retention curve. This curve, characteristic for each soil sample, represents the final result of the experimental test. From it we can extrapolate important information from an agronomic point of view, such as the physical composition of the soil and the water content available to the plant. It is therefore fundamental data for the development and use of sustainable agriculture that is akin to the natural dynamics of the lower Venetian plain.

1. INTRODUZIONE

1.1 L'ACQUA

L'acqua è la sostanza essenziale per la vita ed è la componente dominante di tutti gli organismi viventi. Circa il 75-95% del peso di tutte le cellule viventi è costituito da acqua e non esiste processo fisiologico in cui l'acqua non abbia un'importanza fondamentale. Proprio per il fatto che è presente in enormi quantità, a livello ecosistemico globale distinguiamo gli ambienti e nello specifico quelli acquatici secondo diversi fattori, il primo fra tutti la salinità. Seguendo questo schema ci troviamo a suddividere questo insieme in due grandi categorie principali: ecosistemi marini (con acqua salata) ed ecosistemi d'acqua dolce. A livello locale questi ecosistemi si scompongono in molte e più ristrette sottocategorie che si differenziano per diverse caratteristiche come il substrato, la batimetria, l'idrodinamica e in base al tipo di organismi dominanti (solitamente piante). Ciò che rende unica questa sostanza è la sua continua trasformazione e dislocazione, resa possibile da un'altra componente del nostro pianeta, la radiazione solare. L'energia trasmessa dal sole verso la terra rende partecipi tutte queste masse d'acqua, così differenti, in un circuito globale chiamato *ciclo idrologico* o *ciclo dell'acqua*. Una molecola d'acqua è composta da un atomo di ossigeno e due atomi di idrogeno (Fig.1), questi ultimi disposti in posizione asimmetrica tra di loro, formando un angolo di 104.5° con l'atomo d'ossigeno posizionato nel mezzo. Questi tre atomi sono legati tra di loro per mezzo di un *legame covalente*, in cui ogni idrogeno condivide il proprio elettrone con l'ossigeno. Questo avviene poiché l'ossigeno possiede maggiore elettronegatività, riuscendo quindi ad attirare gli elettroni e completare il suo livello energetico più esterno garantendo stabilità all'intera molecola. Un'altra peculiarità sta nel fatto che gli atomi di idrogeno si trovano più vicini all'atomo di ossigeno rispetto che tra loro. Il risultato è una molecola con carica negativa sul lato dell'ossigeno e carica positiva sul lato degli idrogeni, formando un legame covalente polare. Grazie alla sua polarità, le molecole d'acqua riescono a legarsi tra loro tramite *legami idrogeno*, i quali, essendo più deboli dei legami

covalenti, sono più facili da rompere e da formare. Inoltre, tali legami rendono possibile anche l'interazione con altre molecole dotate di carica, risultando un solvente eccellente, in grado di portare in soluzione diverse sostanze (Smith, 2017).

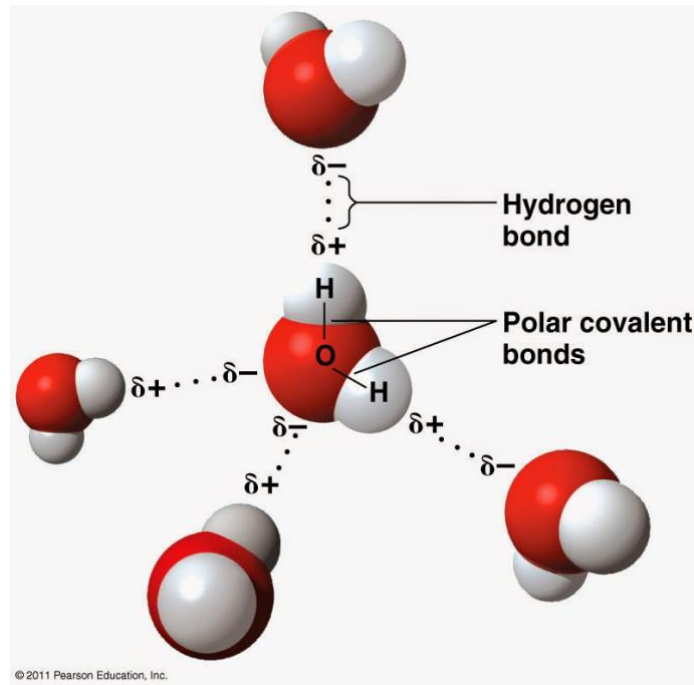


Figura 1: Legami caratteristici di una molecola d'acqua

1.2 IL SUOLO

Il suolo può essere definito come il prodotto dell'interazione tra litosfera-atmosfera-biosfera. Ciò definisce la formazione di un suolo, ovvero il lento processo della *pedogenesi* dovuto all'alterazione fisica, chimica e biologica di sedimenti e materiale roccioso. Per quanto concerne la disaggregazione fisico-meccanica, i soggetti che agiscono maggiormente sono: (i) l'acqua corrente, la quale trasporta a valle il materiale più fine; (ii) il vento tramite la corrosione causata dalle particelle trasportate; (iii) la temperatura, attraverso i fenomeni di *crioclastismo* (l'acqua che passa dallo stato liquido a quello solido, aumentando di volume, causa fratture sulla roccia) e *termoclastismo* (dovuto al coefficiente di dilatazione termica dei minerali in condizioni di forti escursioni termiche); (iv) l'alternanza tra periodi umidi e secchi, i quali aumentando le tensioni interne alla roccia e (v) la pressione esercitata dalla radici delle piante. I soggetti che agiscono sulla decomposizione chimica sono: (i) l'acqua, grazie alla sua duplice azione idrolizzante, con cui aumenta la friabilità delle rocce, e idratante, portando in soluzione alcuni componenti chimici e riducendo la coesione dei minerali; (ii) l'acqua, legata all'anidride carbonica, aiuta la solubilizzazione di molti composti grazie alla sua azione solvente; (iii) l'ossigeno, che in presenza di acqua riduce la coesione di alcuni composti con azione ossidante. Infine, troviamo gli agenti biologici (microrganismi) che aiutano la decomposizione del materiale organico, trasformandolo nuovamente in composti minerali, chiudendo il ciclo della pedogenesi. Tale processo richiede un tempo considerevole se si pensa che la formazione di un suolo ben sviluppato necessita da 2'000 a 20'000 anni fino a superare i 500'000 anni in alcuni suoli. Il suolo, nel suo insieme, è un ambiente complesso e per comprenderne al meglio i meccanismi, verranno di seguito analizzati gli aspetti fisici e chimici che lo caratterizzano (Smith, 2017).

1.2.1 ASPETTI FISICI

Dal punto di vista fisico, il terreno si distingue in tre fasi: (i) solida, di cui le caratteristiche agronomiche principali sono tessitura, porosità e struttura; (ii) liquida, ovvero l'acqua nei pori e le molecole disciolte in essa e (iii) gassosa (aria nei pori e gas emessi). Per avere un buon terreno le tre fasi devono trovarsi in equilibrio tra loro, con un rapporto ottimale di 50% solida, 25% liquida e 25% gassosa.

Tessitura

Anche chiamata granulometria, rappresenta la proprietà che classifica i suoli in base alle dimensioni delle particelle che lo compongono. La scala più impiegata è quella del siss (società internazionale di scienza del suolo) che differenzia il suolo come segue:

- frazione di particelle con diametro maggiore a 2 mm, detta scheletro
- frazione di particelle con diametro inferiore ai 2 mm, chiamata terra fine.

Di seguito è presente una tabella (Tabella 1) che rappresenta le varie frazioni granulometriche:

Frazioni	Classi granulometriche	Particelle
SCHELETRO ($\varnothing > 2$ mm)	Massi sassi o ciottoli ghiaia o ghiaino	> 200 mm 200 - 20 mm 20 - 2 mm
TERRA FINE ($\varnothing < 2$ mm)	sabbia grossa sabbia fine Limo sostanze argilliformi	2 - 0.2 mm 0.2 - 0.02 mm 0.02 - 0.002 mm 0.002 mm

Tabella 1: Frazioni granulometriche

Porosità

Contrapposta alla tessitura, che rappresenta la matrice di un suolo, troviamo la porosità che ne rappresenta invece gli spazi vuoti, ovvero, il volume complessivo di pori all'interno del suolo. In un terreno ottimale la porosità totale deve rappresentare circa il 50% del volume. La porosità si divide in due categorie: (i) *macroporosità*, cioè i pori di diametro maggiore a 10 μm , al cui interno si trovano aria ed acqua, libere di circolare. L'acqua all'interno dei macropori permane per poco tempo in quanto, percola per gravità negli strati più profondi; e la (ii) *microporosità* pori di diametro inferiore a 10 μm . Grazie a questa ridotta dimensione questi pori sono in grado di trattenere l'acqua per effetto della capillarità. La quantità d'acqua presente nei macro e micropori del suolo (e i legami che si creano con le particelle solide) influisce direttamente la disponibilità idrica per le piante, sui flussi idrici nel terreno stesso e molte altre caratteristiche del suolo, quali la composizione della soluzione acquosa, la consistenza, la resistenza alla compattazione, il colore e lo scambio gassoso. L'acqua è trattenuta nel terreno con forza crescente al diminuire del contenuto idrico, in funzione alla distribuzione dimensionale dei pori. Quindi all'interno di un suolo troviamo:

- *l'acqua gravitazionale o di percolazione*: caratterizza un suolo saturo o eccessivamente umido. Presenta una tensione compresa tra 0 e 10-35 kPa;
- *l'acqua capillare o di coesione*: comprende l'acqua che può essere assorbita dalle piante (tensione inferiore a 1500 kPa). Trattenuta nel suolo umido da 10-35 kPa fino ad oltre 3100 kPa;
- *l'acqua igroscopica*: presente nel suolo asciutto in equilibrio con l'umidità atmosferica. Tensione in generale compresa tra 30'000 – 100'000 kPa (Giordano,1999).

Struttura

La struttura rappresenta il modo in cui le diverse particelle del terreno si aggregano tra di loro. Questo concetto è importante soprattutto dal punto di vista agronomico perché in base alla struttura dipendono le pratiche agronomiche da applicare. Un terreno può essere strutturato, condizione in cui le componenti più fini creano legami tra le varie frazioni del suolo, creando elementi detti *aggregati*. Questa è la situazione ottimale per lo sviluppo di microrganismi e vegetazione perché i rapporti tra parte solida, liquida e gassosa sono ottimali. In alternativa un terreno può essere destrutturato, in cui il rapporto tra macropori e matrice non è ben equilibrato, presentandosi non aggregato e maggiormente compattato.

1.2.2 ASPETTI CHIMICI

La componente chimica del suolo è rappresentata da diversi elementi: sali minerali, reazione del terreno, sostanza organica, humus e colloidali. I sali minerali (cationi bi- e trivalenti) svolgono l'importante funzione di nutrire gli organismi presenti nel suolo e di controllo della struttura, ripristinandone l'aggregazione della matrice del suolo, aumentandone la stabilità. Il parametro chimico più importante del terreno è il pH, cioè il logaritmo della concentrazione di ioni H^+ presenti in soluzione. Bassi pH corrispondono a terreni acidi ($pH < 7$), mentre pH alti a terreni alcalini ($pH > 7$). La neutralità si ha a $pH=7$, cioè quando gli ioni H^+ e OH^- si equivalgono in concentrazione. La maggior parte dei suoli del mondo hanno un pH compreso tra 5.5 e 8.5.

Suoli acidi

La predominanza di ioni H^+ in questi suoli è dovuta a diversi fattori, tra cui ricordiamo: (i) carenza di ioni Ca^{2+} e Mg^{2+} (detta acidità fisiologica); (ii) decomposizione veloce di sostanza organica con accumulo di acidi humici (α -humus e acidi fulvici), eventi che accadono frequentemente in terreni

sciolti di climi freddi e umidi; (iii) uso eccessivo di concimi che rilasciano residui acidi nel terreno; (iv) cause naturali, come CO_2 disciolta in H_2O o radici di piante che rilasciano ioni H^+ nel terreno.

Terreni alcalini

In questi terreni gli ioni prevalenti sono Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} . Sono cationi poco utilizzati dalle piante e di conseguenza si accumulano dando basicità al terreno. Queste tipologie di terreni sono suddivise in due gruppi: (i) terreni alcalini costituzionali, ovvero terreni calcarei naturalmente ricchi in cationi di calcio e magnesio e sono terreni fertili; (ii) terreni alcalini di assorbimento, sono suoli ricchi di ioni Na^+ , derivanti da acque marine, eccessive concimazioni o da accumuli di sali nello strato attivo a causa del clima arido. Lo ione sodio demolisce la struttura del terreno, diminuendone la fertilità.

Sostanza organica (SO)

Si tratta della componente “viva” di un terreno, ed è formata da un qualsiasi composto di origine biologica. Anche gli elementi vivi presenti nel terreno fanno parte della SO, come ad esempio microfauna o apparati radicali e coprono un 2% della SO totale. La SO è ricca di elementi nutritivi, in porzione variabile. Questi elementi vengono via via mineralizzati nel tempo da microrganismi decompositori o processi fisico-chimici, che li trasformano in composti minerali solubili utilizzabili dalla flora. Come tutte le componenti del suolo anche la SO gioca un ruolo importante, ed è fondamentale per la fertilità di un terreno, aumentandone l'aereazione e migliorandone le proprietà idrauliche. La massa della SO in un suolo varia dal 2-2.5% nei terreni agricoli fino ad un 5% ed oltre nei terreni forestali. Questa differenza è dovuta al diverso sfruttamento delle risorse da parte dell'uomo. In un sistema completamente naturale gli input e gli output di SO sono in pari, mentre in un sistema antropizzato gli output prevalgono, risultando in un calo di sostanza organica. La SO si può misurare, attraverso diversi *coefficienti isoumici*: (i) k_1 che corrisponde alla quantità di materiale organico che viene trasformato dopo un dato periodo in humus stabile; (ii) k_2 che invece corrisponde alle perdite annuali dovute alla mineralizzazione dell'humus. Quest'ultimo fattore è notevolmente

influenzato dal clima: infatti, in climi subartici il valore è minore dell'1%, mentre in zone a clima tropicale il valore supera il 10%. Le funzioni della SO sono molteplici e di diversa natura. Esistono diverse funzioni della SO: (i) fisico-meccanici, per cui la SO favorisce la formazione della struttura e incrementa la capacità di ritenzione capillare dell'acqua; (ii) aspetti chimici, per cui la SO apporta al suolo macro e microelementi, grazie alla formazione dell'humus. Inoltre, si comporta da riserva di sostanze nutritive cedute lentamente agli organismi, stimola l'attività delle piante grazie a composti presenti in essa che agiscono in modo simile agli ormoni vegetali, e svolge una funzione di effetto tampone sul pH del terreno proteggendolo da fattori esterni; (iii) proprietà biologiche ed ecologiche di sostentamento per i microrganismi edafici; (iv) aspetti energetici, per cui l'energia immagazzinata dalle piante attraverso la fotosintesi torna al terreno sotto forma di residui organici e trasformata in humus stabile. L'humus, per via delle sue caratteristiche colloidali trattiene l'acqua e diminuisce la perdita di nutrienti per lisciviazione frenando la velocità dell'acqua di percolazione. Per di più, grazie al colore più scuro dei terreni ricchi di SO, viene diminuito l'albedo sulla superficie del suolo aumentandone la capacità di assorbire onde infrarosse provenienti dalla radiazione solare.

Humus

L'humus è la componente della sostanza organica di colore bruno formata dai derivati della decomposizione di residui organici da parte dei microrganismi edafici. Presenta un rapporto carbonio-azoto (C/N) ottimale e costante pari a 9/11. Le macromolecole di humus sono ricche di gruppi funzionali acidi (gruppi -COOH) nello specifico si differenzia in due frazioni: gli *acidi umici*, insolubili, e gli *acidi fulvici*, solubili. L'humus può essere diviso in: (i) α -humus presente nel terreno come precipitato, esso proveniente da reazione neutra o sub-alcina del terreno e con buone disponibilità di Ca^{2+} e Mg^{2+} ; (ii) β -humus presente in soluzione nel terreno, quest'ultimo derivante da una reazione acida del terreno che limita l'alterazione dei residui organici. Una caratteristica comune a questi due elementi è la possibilità di aggregarsi a colloidali minerali del suolo (come

l'argilla) tramite legami idrogeno, grazie al fatto che anche essi sono dei colloidi idrofili ed elettronegativi, aumentando la coesione del terreno.

Colloidi

I colloidi sono delle soluzioni, ovvero miscugli di sostanze che non si possono definire né omogenei (1 nm) e né eterogenei (1 µm) per via della loro dimensione intermedia. Questa loro caratteristica è chiamata appunto *proprietà colloidale*. Si dividono per le diverse origini in: (i) colloidi organici, rappresentati dall'humus nelle sue varie forme; e (ii) colloidi minerali, in cui ricordiamo l'argilla (elettronegativa) e gli idrossidi di ferro e alluminio (Fe_2O_3 e Al_2O_3), che presentano una carica elettropositiva e tendono a legarsi all'humus creando complessi metallo-humici solubili o insolubili a seconda della condizione. Le particelle colloidali hanno caratteristiche particolari, tra cui:

- Elevata stabilità grazie ai legami idrogeno che formano glomeruli, donando resistenza contro i fenomeni erosivi che tendono a separali;
- Sono carichi elettricamente, il che rende possibile la repulsione tra colloidi di uguale carica, impedendo l'aggregazione tra particelle.

I colloidi si possono trovare in due forme: (i) in stato di sol detta (dispersione colloidale), in cui le molecole che compongono il colloide sono isolate tra di loro per via della repulsione di carica, risultando in una maggiore dilavabilità della molecola. Oppure, (ii) come gel (precipitazione), nella quale il colloide continua ad aggregare altre particelle. Tale fenomeno può essere reversibile.

1.2.3 POTERE ASSORBENTE DEL SUOLO

L'assorbimento di molecole da parte del suolo può essere di tipo meccanico, biologico, chimico o chimico-fisico. Nel primo caso, il terreno per sua natura agisce come filtro e di conseguenza trattiene tutte le componenti fisiche al suo interno, indipendentemente dalla loro natura. Nell'assorbimento

biologico, operato da microrganismi che assimilano l'azoto e altri elementi nutritivi, risulta essere importante nel trattenere e mineralizzare sostanze inquinanti ed evitare il loro dilavamento. L'assorbimento chimico si ha quando una specie passa da una forma solubile ad una insolubile, che precipita, mentre l'assorbimento chimico-fisico (o di scambio), meglio noto come *adsorbimento*, agisce per mezzo delle particelle colloidali. Si distingue un *adsorbimento cationico* e un *adsorbimento anionico*, che seguono meccanismi differenti di seguito descritti.

Scambio cationico

La capacità di scambio cationico (CSC), espressa generalmente in cmol/kg, è la somma dei cationi (idrogeno + cationi metallici) che un suolo può fissare mediante i suoi colloidali minerali e organici (Greenland e Hayes, 1978; Sequi, 1989). Ciò avviene in base alla concentrazione degli ioni: più sono presenti e più vengono assorbiti, ma non in modo proporzionale. In base alla loro concentrazione e alla loro carica ionica, gli ioni possono sostituirsi tra loro. Ad esempio, un catione con carica ionica +4 avrà maggiore possibilità rispetto ad un catione con carica +3/+2/+1 di sostituirsi o di resistere ad una sostituzione da parte di cationi con carica minore. In generale, la CSC aumenta con il grado di humificazione e dipende dal grado di ossidazione della SO, che a sua volta dipende dal pH.

Scambio anionico

Questa tipologia di adsorbimento è molto più rara rispetto allo scambio cationico, dovuto al fatto che i colloidali del suolo hanno una natura elettronegativa. Esempi in cui avvengono questi assorbimenti riguardano l'alluminio, per la componente minerale, e gruppi amminici, per la componente organica in condizioni di pH estremamente bassi. Queste molecole generano cariche positive che possono produrre scambi di anioni. In altre condizioni standard a pH medi, queste reazioni sono praticamente inesistenti (Bocchi, 2012).

Potere tampone

Il potere tampone è la capacità di un suolo di opporsi ad una variazione di pH causata da acidi o basi forti. Possedendo questa caratteristica il suolo riesce a mantenere un pH stabile, altrimenti ogni piccola variazione, sia antropica che naturale, renderebbe il terreno instabile. La capacità tampone di un suolo è tanto più elevata quanto maggiore è la capacità di scambio e varia con il variare del tasso di saturazione basica, raggiungendo un massimo quando il terreno è saturo di basi per il 50% della sua capacità di scambio. In terreni calcarei l'effetto tampone è esercitato da carbonati e bicarbonati, mentre nei terreni neutri e acidi sono i colloidi che esercitano questo potere comportandosi da acidi deboli.

1.3 LE POLITICHE AGROAMBIENTALI

Elementi così complessi come l'acqua e il suolo sono molto resilienti ai fattori avversi in condizioni naturali. Tale resilienza si riduce quando si aggiunge l'azione della componente antropica ai fattori ambientali. Negli ultimi decenni con l'avvento della globalizzazione e lo sfruttamento eccessivo delle risorse, si è notato come questi due beni non sono considerabili come beni illimitati. Anzi, il suolo viene spesso considerato come bene non rinnovabile per il semplice fatto che in tempi più o meno lunghi è destinato ad esaurirsi, velocizzati dal continuo e sempre maggior consumo a scopi umani (es. suolo agricolo sovra sfruttato, terreni edificabili, suoli contaminati da attività industriali). La consapevolezza di dover agire a livello politico per cercare di ridurre lo sfruttamento delle risorse naturali prese piede già all'inizio degli anni '70, con la Dichiarazione di Stoccolma sull'ambiente umano (ONU 1972). Da qui si definì per la prima volta l'impegno per la salvaguardia delle risorse naturali e, più in generale, della biosfera e la conservazione degli habitat naturali. Questa conferenza, e molte altre svolte nei decenni successivi hanno spinto gli Stati a velocizzarsi nel produrre leggi in materia di ambiente. Ad esempio, in Italia le prime norme specifiche per la protezione dell'acqua

dall'inquinamento risalgono al 1976, mentre la prima legge sulla difesa del suolo è stata emanata nel 1989. I cambiamenti più significativi a livello europeo si sono visti con l'introduzione della PAC, acronimo di Politica Agraria Comune. Gli obiettivi della PAC, ai sensi dell'articolo 39 del Trattato sul Finanziamento dell'Unione europea, sono i seguenti: (i) incrementare la produttività dell'agricoltura; (ii) assicurare un tenore di vita equo alla popolazione agricola; (iii) stabilizzare i mercati; (iv) garantire la sicurezza degli approvvigionamenti; (v) assicurare prezzi ragionevoli ai consumatori (Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali, 2021). È in questo contesto che si inserisce il PSR, Programma di Sviluppo Rurale, ovvero il documento programmatico che ogni Stato/Regione dell'UE redige per poter utilizzare le risorse finanziarie che l'Unione Europea assegna per l'ammodernamento delle zone rurali. Gli obiettivi sono il miglioramento della competitività delle imprese e la sostenibilità ambientale, la tutela e la salvaguardia del territorio e del paesaggio rurale, la riduzione del divario in termini di servizi e di opportunità di occupazione delle aree svantaggiate. Questo documento ha validità di sette anni (l'ultimo emanato ha validità 2014-2020) e si articola in Priorità e Focus, che vanno perseguite attraverso delle specifiche Misure. La Misura che interessa questo progetto è la decima di tredici complessive, ovvero i "Pagamenti agro-climatico-ambientali". Questa manovra viene definita come una "Misura che comprende interventi e impegni che contribuiscono in modo diversificato ed articolato al raggiungimento e delle priorità dell'UE in materia di sviluppo rurale" (Veneto agricoltura, 2015). All'interno di questa Misura sono previste diverse tipologie di interventi, suddivise in più sezioni. Di seguito vengono elencate e descritte quelle maggiormente di interesse.

Tecniche agronomiche a ridotto impatto ambientale

Tale intervento sostiene gli impegni per l'introduzione o il mantenimento di tecniche di agricoltura conservativa. In particolare, l'impiego di tecniche di non lavorazione (No-Tillage) e di minima lavorazione (Minimum Tillage) consistono, in una gestione agronomica volta a preservare e migliorare il suolo, di aumentare la quantità di acqua che si infila nel terreno favorendo il sequestro

di carbonio organico e contrastando in tal modo l'erosione. Un importante vantaggio di tali tecniche è il miglioramento della fertilità biologica che rende i terreni più resilienti ai fenomeni di cambiamento climatico. Tali condizioni si raggiungono solo con l'adozione di specifiche tecniche agronomiche per un periodo protratto nel tempo.

Ottimizzazione ambientale delle tecniche agronomiche ed irrigue

L'intervento sostiene l'adozione di tecniche colturali e soluzioni irrigue che rispondono agli obiettivi ambientali di adattamento al cambiamento climatico, mantenimento e raggiungimento di uno stato qualitativo "buono" dei corpi idrici superficiali e di riqualificazione paesaggistica delle aree agricole. L'obiettivo consiste nel ridurre gli impatti originati sulla risorsa acqua dalle pratiche agricole intensive relative alle colture seminative.

Gestione attiva di infrastrutture verdi

La gestione attiva di "infrastrutture verdi" è la tematica di questa misura (fasce tampone, siepi e boschetti, fasce inerbite e canali erbosi). Lo scopo è migliorare la qualità delle acque, potenziare le connessioni ecologiche e sostenere la biodiversità in aree agricole a gestione tipicamente intensiva, ridurre i fenomeni di erosione superficiale ed aumentare la capacità di fissazione della CO₂ atmosferica e il suo immagazzinamento nel suolo, nonché riqualificare i paesaggi agrari semplificati.

Gestione sostenibile di prati, prati semi-naturali, pascoli e prati-pascoli

Obiettivo è il recupero e il mantenimento delle superfici investite a prati stabili, prati-pascoli, pascoli in zone montane con finalità produttiva, ambientale e paesaggistica. Tali aree, subendo spesso fenomeni di scarsa o eccessiva utilizzazione e concimazione, possono essere soggette a perdita di valore naturalistico riguardo alle specie vegetali presenti, o subire fenomeni di degrado per il mancato utilizzo delle superfici a prato e a pascolo. L'azzeramento degli input di origine chimica in tutte le tre azioni qui proposte riveste un ruolo essenziale per la salvaguardia della qualità dei corpi idrici.

Miglioramento della qualità dei suoli agricoli e riduzione delle emissioni climalteranti

L'adozione di sistemi di gestione dei fertilizzanti azotati (sia effluenti di allevamento che concimi di sintesi chimica) in grado di determinare effetti positivi sulla qualità dell'aria e delle acque e di concorrere al miglioramento delle caratteristiche dei suoli agricoli. L'apporto delle matrici organiche viene realizzato attraverso un modello gestionale innovativo in termini di attrezzature e organizzazione dei cantieri, in funzione del basso impatto sui terreni.

Tutela ed incremento degli habitat seminaturali

L'intervento sostiene l'aumento della complessità ecosistemica e paesaggistica e il ripristino di condizioni di naturalità diffusa, attraverso la conservazione di prati umidi e la semina di colture a perdere. Inoltre, con l'azione di conversione a prato delle superfici seminate si intende concorrere al miglioramento della qualità delle acque superficiali e sotterranee.

Biodiversità, allevatori e coltivatori custodi

Sostegno per l'allevamento di nuclei di animali iscritti ai libri genealogici e registri anagrafici delle razze locali autoctone minacciate di abbandono e la coltivazione di specie vegetali agrarie a rischio di erosione genetica. L'intervento è finalizzato alla salvaguardia della diversità genetica nonché alla diminuzione o all'azzeramento del rischio di estinzione delle principali razze e cultivar autoctone del Veneto.

Interventi di conservazione e uso sostenibile delle risorse genetiche in agricoltura

La realizzazione di progetti di conservazione delle risorse genetiche in agricoltura da parte degli enti pubblici. I progetti riguarderanno tre principali azioni. Azioni mirate: conservazione ex situ e in situ,

caratterizzazione, raccolta e utilizzazione delle risorse genetiche in agricoltura, nonché compilazione di inventari, attività di conservazione delle risorse genetiche in situ (nell'azienda agricola), sia delle collezioni ex situ e delle banche dati. Azioni concertate: promozione dello scambio di informazioni nell'Unione Europea. Azioni di accompagnamento: informazione, diffusione e consulenza, corsi di formazione e preparazione di rapporti tecnici.

1.4 PRATICHE AGRONOMICHE

“L'agricoltura è la pratica di coltivare il suolo allo scopo di ottenere prodotti utili all'alimentazione dell'uomo e degli animali e materie prime indispensabili per numerose industrie” (Treccani, 2013). Nel corso dei millenni l'agricoltura è cresciuta con l'uomo e viceversa, un legame indissolubile che ha condizionato la storia dell'umanità. L'introduzione delle macchine ad energia fossile, che hanno facilitato il lavoro dell'uomo, è stato il cambiamento più significativo apportato al settore agricolo a partire dal dopoguerra. Un'ulteriore spinta al settore è stata data dall'utilizzo massiccio dei fertilizzanti di origine sintetica, di pesticidi, dell'irrigazione, aumentando le rese a livelli impensabili solo pochi anni prima, ma con una drammatica riduzione delle varietà colturali impiegate e della biodiversità. Tale processo ha portato ad un aumento quasi esponenziale dell'energia investita, il che ha significato un aumento dell'impatto ambientale delle attività agricole (es. trasformazione del territorio, perdita della biodiversità, perdita della fertilità del suolo, immissione di sostanze tossiche nell'ambiente). Tale impatto continua ad essere ancora oggi non contabilizzato nei costi di produzione, ma esternalizzato sulla società (Gomiero e Paoletti, 2009). Per ridurre l'impatto dell'agricoltura sull'ambiente, negli ultimi anni hanno preso piede diverse tecniche agronomiche, come l'adozione dell'agricoltura *conservativa* al posto di un'agricoltura di tipo *convenzionale*, e l'utilizzo di *colture di copertura*.

1.4.1 AGRICOLTURA CONVENZIONALE

Per agricoltura convenzionale si intende la coltivazione tramite le pratiche classiche consolidate nei decenni passati, ovvero l'utilizzo massiccio di lavorazioni pesanti con mezzi meccanici, l'impiego di elevate dosi di fertilizzanti e trattamenti fitosanitari, il sovrasfruttamento della risorsa suolo e la scarsa rotazione delle colture o l'adozione di monoculture.

1.4.2 AGRICOLTURA CONSERVATIVA

L'agricoltura conservativa rappresenta un innovativo sistema integrato di gestione per aumentare la sostenibilità della produzione di alimenti e fibre attraverso la conservazione del suolo, dell'acqua e dell'energia. Si basa su un set di principi e pratiche che possono contribuire a un'intensificazione sostenibile della produzione. Questi principi sono: (i) minimo disturbo del suolo, che consiste nell'evitare le arature e utilizzare la semina diretta su sodo; (ii) copertura organica permanente del terreno con residui, colture di copertura, ecc.; (iii) rotazioni colturali diversificate nel caso di colture annuali o consociazioni nelle colture perenni.

1.4.3 UTILIZZO DI COLTURE DI COPERTURA

Le colture di copertura meglio note in inglese come *cover crops*, sono definite come colture utilizzate specificamente come copertura del terreno, nei periodi che intercorrono tra la raccolta e la successiva semina delle colture redditizie principali, al fine di proteggere il suolo dall'erosione e dalla perdita di nutrienti attraverso i fenomeni di lisciviazione e ruscellamento. Le *cover crops* sono essenzialmente rotazioni a breve termine. Tradizionalmente, le colture di copertura erano rivoltate e incorporate tramite un sovescio prima di seminare la coltura da reddito in agricoltura convenzionale. Tuttavia, la maggiore enfasi sulla gestione dei residui come mezzo per ridurre l'erosione del suolo ha portato ad

un maggiore uso delle colture di copertura anche nei sistemi a lavorazione conservativa. Nei sistemi di gestione dei residui, una coltura di copertura deve soddisfare alcuni requisiti: (i) essere facile da stabilire; (ii) avere un tasso di crescita rapido in modo da fornire rapidamente la copertura del terreno; (iii) produrre una quantità sufficiente di materia secca per il mantenimento dei residui; (iv) essere resistente alle malattie e non fungere da ospite per le malattie della coltura da reddito; (v) essere facile da estirpare; (vi) essere economicamente redditizia. Il grado in cui una coltura di copertura soddisfa questi requisiti dipende dal tipo di terreno, dal clima e dalla coltura da reddito successiva, così come dalle caratteristiche della coltura di copertura stessa (Pisante, 2013).

1.5 IDROGEOLOGIA DELLA PIANURA VENETA

Il sistema idrogeologico della Pianura Veneta è complesso, vista l'elevata diversità all'interno del suo territorio sia in termini di tessitura che di contenuti idrici. Per questo motivo l'area è suddivisa in tre parti: l'alta pianura, la media pianura e la bassa pianura.

Alta pianura

L'alta pianura, come dice il nome stesso, è ubicata nella zona più settentrionale della Pianura Veneta, a ridosso delle Prealpi Venete. È formata dall'accumulo di detriti minerali trasportati dai fiumi verso valle, questa sovrapposizione di materiale tipicamente grossolano è detto conoide di deiezione ed è caratteristico delle zone montuose dove fiumi e torrenti trovando una zona pianeggiante in cui si apre la valle, scaricano il materiale proveniente da monte, dando continuità alla pedogenesi. Proprio per la sua composizione fisica-strutturale, in cui è presente materiale spesso e poco coeso, questa zona è caratterizzata da un'elevata permeabilità, determinando una area di ricarica dell'intero sistema idrogeologico (ricarica degli acquiferi).

Media pianura

La media pianura si differenzia dall'alta per la dimensione sempre più fine, da monte verso valle, del materiale costituente il suolo. Infatti, al suo interno si trovano frazioni granulometriche sempre più di ridotte dimensioni come ghiaie e sabbie, fino ad arrivare a componenti limose ed argillose. Grazie a questa composizione, l'area della media pianura è ricca di sistemi di falde sovrapposte, tutte riconducibili ad un'unica falda freatica posta a monte. Quando questi sistemi di falde trovano uno strato argilloso impermeabile, tendono a risalire formando delle sorgenti dette *risorgive* o *fontanili*. Il particolare fenomeno è dovuto al fatto che le falde più profonde si trovano in pressione e non trovando sfogo nel sottosuolo, spingono verso l'alto creando piccoli corsi d'acqua.

Bassa pianura

La zona di bassa pianura trova un'altra composizione granulometrica, in questa parte della pianura i depositi ghiaiosi sono praticamente inesistenti. Il terreno è composto da diversi materiali di frazioni fine: sabbie limose, ma principalmente limi e argille; questa composizione rende il terreno poco permeabile, ma la portata e l'estensione ridotta delle falde evita il fenomeno delle risorgive (ARPAV, 2011). “Interessante è notare come i suoli della bassa pianura spesso siano caratterizzati da falde ipodermiche, le quali comportano una certa vulnerabilità degli agroecosistemi per diversi motivi: da un lato, è più probabile che il movimento dei nutrienti e di altri contaminanti (es. pesticidi) a causa dei fenomeni di lisciviazione determini il raggiungimento e la contaminazione della falda che si trova in prossimità del piano campagna. D'altro canto, studi recentemente condotti nella Regione Veneto hanno dimostrato come siano più probabili anche i fenomeni di deflusso preferenziale proprio dove più superficiale è la falda ipodermica. Questo avviene a causa di un'alterazione della struttura del terreno e la presenza di più macropori a discapito dei micropori (Mencaroni et al., 2021).”

2. SCOPO DELLA TESI

L'importanza di studiare gli effetti dell'agricoltura conservativa e l'utilizzo di colture di copertura sul sistema suolo sta diventando via via sempre più urgente, vista la sua crescente diffusione a livello mondiale ed europeo. Risulta quindi di rilevanza lo studio delle suddette pratiche anche nella zona della bassa pianura Veneta, una zona dalla forte vocazione agricola, dove le condizioni peculiari di falda superficiale (< 1 m dal piano campagna) la rendono un'area particolarmente soggetta a fenomeni di lisciviazione di contaminanti verso la falda. La tesi vuole quindi studiare l'impatto delle diverse pratiche agronomiche (convenzionale, conservativa e utilizzo di colture di copertura) accoppiate alla presenza o meno di falda ipodermica sulle caratteristiche fisico-idrauliche del suolo in questione. La prova sperimentale è stata finanziata dalla Regione Veneto secondo il Piano di Sviluppo Rurale (PSR Regione Veneto 2014-2020).

3. MATERIALI E METODI

3.1 IL SITO SPERIMENTALE

Il sito sperimentale in cui è stata condotta la prova si trova presso l'azienda agraria sperimentale dell'Università degli Studi di Padova "Lucio Toniolo", nel campus Agripolis di Legnaro (PD). È composto da venti lisimetri a drenaggio controllato con un volume di 1,5 m³ una profondità di 1,5 m e un'area di 1 m², dotati di un sistema di controllo del drenaggio e di un tetto scorrevole al fine di preservare il sito da eventi distruttivi e controllare le diverse condizioni di campo a piacimento. Le vasche sono sporgenti 5 cm dal terreno così che sia possibile contenere eventuali fenomeni di intensa precipitazione. I lisimetri sono riempiti di suolo di tipo franco-limoso (35% di sabbia, 48% limo, 17% argilla) fino a 130 cm di profondità, prelavato dalla stessa azienda. Questo tipo di suolo è rappresentativo delle condizioni della bassa pianura veneta, caratterizzata anche dalla presenza di una falda freatica superficiale, da un pH sub alcalino e da un basso contenuto di carbonio organico. Le proprietà chimico-fisiche del suolo in questione sono riportate in Tabella 2:

Proprietà chimiche del suolo	Profondità 0-130 cm
Sabbia (%)	35
Limo (%)	48
Argilla(%)	17
pH	8.1
Azoto Totale (%)	10
Carbonio Organico (%)	0.9
Sostanza Organica (%)	1.5
C/N	7.4
Carbonati totali (%)	20.1
Carbonati solubili (%)	4.1
Salinità (mS cm ⁻¹)	0.28
P disponibile (mg kg ⁻¹)	9
K scambiabile (mg kg ⁻¹)	128

Tabella 2: Proprietà chimico-fisiche del suolo

Il sistema di controllo del drenaggio è costituito da una tubatura che collega il fondo tronco-piramidale del lisimetro ad una valvola idraulica, che permette lo scarico dell'acqua in eccesso per abbassare la linea di falda al livello desiderato, mentre dall'altra parte ad un piezometro che indica l'altezza di falda, secondo il principio dei vasi comunicanti. Sul fondo del lisimetro, superiormente alla condotta, è presente uno strato di ghiaia spesso 20 cm che facilita il drenaggio ed evita le perdite di suolo per percolazione. Inoltre, in ogni lisimetro sono installati dei sistemi (Fig. 3) per il controllo di diverse variabili, tra cui: umidità, temperatura e altezza del livello di falda. La misura dell'umidità del suolo avviene a tre diverse profondità (15, 30 e 60 cm) in cui sono installati dei tensiometri elettronici (sonde T4e, UMS GmbH, Monaco - Germania) per il controllo del potenziale matriciale e delle sonde TDR – Time Domain Reflectometry – (sonde CS610, Campbell Sci. Inc., Lincoln Nebraska – USA) per la misura del contenuto idrico alla data profondità. La temperatura viene misurata alle profondità 15 e 30 cm attraverso un impianto con termocoppie (CR-1000, Campbell Sci. Inc., Lincoln Nebraska – USA). Il livello di falda viene misurato elettronicamente utilizzando un sistema di pressostati posizionati all'interno dei piezometri dei lisimetri. Oltre al sistema di monitoraggio in continuo, è presente un impianto di microlisimetri a suzione (coppe porose SPE-20, UMS GmbH, Monaco – Germania) alle stesse profondità di tensiometri e TDR, usati per campionare la soluzione circolante nel terreno, sulla base dei valori di potenziale matriciale misurati dai tensiometri elettronici. Per estrarre l'acqua è necessario applicare quindi una suzione che avviene con l'azionamento automatico di una pompa a vuoto che pone in depressione il sistema e mantiene i microlisimetri in una condizione di vuoto per il tempo di campionamento necessario (Grillo, 2019).



Figura 3: Vista del sistema di sonde presente nel sito sperimentale

3.2 DISEGNO SPERIMENTALE E CAMPIONAMENTO DEL SUOLO

Il disegno sperimentale del sito prende in considerazione due variabili: i trattamenti colturali e il livello di falda. I trattamenti colturali sono di tre tipologie:

- Agricoltura convenzionale, indicata con la sigla “CV”;
- Agricoltura conservativa, con sigla “CA”;
- Utilizzo di colture di copertura (*cover crops*), con la sigla “CC”.

Per ogni trattamento colturale sono stati presi in esame tre livelli di falda:

- Suolo con falda ipodermica a 60 cm di profondità dal piano di campagna, denominato “GW 60”;

- Suolo con falda ipodermica a 120 cm di profondità dal piano di campagna, denominato “GW 120”;
- Suolo con falda non controllata, a drenaggio libero, denominato “FD”.

In ogni lisimetro è stato eseguito un campionamento di suolo tramite carotaggio, a quattro profondità crescenti (15-21, 27-33, 57-63 e 97-103 cm). I campioni di suolo sono stati prelevati manualmente nell'estate 2020 con l'aiuto di una trivella per campionamento indisturbato e dei cilindri cavi in pvc, con un diametro interno di 7 cm ed un'altezza di 6,1 cm (volume interno di 234,76 cm³). Inoltre, i cilindri erano provvisti di due fori sovrapposti e disposti a distanza nota l'uno dall'altro di 3 cm per sottoporre i campioni all'analisi idraulica. Infine, ogni campione di suolo è stato chiuso con dei dischetti in vetroresina ai lati e rivestito da scotch plastico per evitare la dispersione del materiale più fine. I campioni sono stati mantenuti in congelatore fino alla preparazione per la successiva analisi (Fig. 4) (Cubalchini, 2019).



Figura 4: Campioni prelevati dal congelatore, pronti per la preparazione

3.3 ANALISI IDRAULICHE

In questa sezione del capitolo verrà trattata la parte pratica di laboratorio affrontata tra i mesi di maggio e settembre 2021, seguita da una parte di elaborazione dati che continuerà nel capitolo dedicato a risultati e discussione. Le analisi si sono svolte nel laboratorio di fisica del suolo del centro DAFNAE ubicato nel campus Agripolis a Legnaro (PD). Le caratteristiche idrauliche del suolo

analizzate nei diversi campioni raccolti sono state: la conducibilità idraulica a saturazione, la densità apparente e la curva di ritenzione.

3.3.1 CONDUCEBILITÀ IDRAULICA A SATURAZIONE

La capacità di drenare l'acqua è una proprietà del suolo molto sito specifica e utile a comprendere con che velocità l'acqua si muove in direzione verticale all'interno dei pori del suolo. Tale proprietà viene identificata con la misura della conducibilità idraulica satura (K_s) ed esprime la permeabilità del suolo, in condizioni di saturazione, e la sua capacità di essere attraversato da un flusso d'acqua in unità di tempo.

La base di questo principio è la legge di Darcy che definisce il movimento dell'acqua all'interno del suolo:

$$\frac{Q}{At} = -K_s * \frac{dH}{dz}$$

Dove Q rappresenta la portata, data dal flusso d'acqua che attraversa perpendicolarmente la sezione A nel tempo t . K_s è la conducibilità idrica satura, dH/dz il gradiente idraulico, ovvero la forza all'origine del movimento dell'acqua nel terreno. Risulta quindi che K_s è l'inverso della resistenza della matrice del suolo al flusso d'acqua. La conducibilità idraulica in condizioni di saturazione ha il pregio di essere costante, mentre in situazioni di non-saturazione perde tale proprietà. In particolare, la conducibilità idraulica a saturazione può variare di molto a seconda di diversi fattori: principalmente dalla geometria e dalle dimensioni dei pori e dei canali che sono presenti all'interno del campione analizzato, in funzione anche della tessitura e della struttura del suolo. Infatti, l'abbondante presenza di macropori nel terreno può creare flussi preferenziali considerevoli, aumentando a sua volta i valori di K_s di molto. Ecco perché la conducibilità idraulica è un parametro altamente sito-specifico ma che comunque può essere notevolmente informativo. Altri fattori

importanti che determinano ampie variazioni di K_s sono le caratteristiche intrinseche della soluzione del suolo (viscosità e densità), la quantità di sostanza organica presente nel suolo in analisi, la compattezza e fenomeni di espansione e contrazione. L'analisi del K_s dei vari orizzonti del terreno è stata ottenuta mediante l'utilizzo di un permeametro da laboratorio (Eijkelkamp). Il permeametro (Fig. 5) permette di misurare la quantità d'acqua che in un deciso intervallo di tempo attraversa il campione di suolo. Tale strumento è composto da due vasche: la prima contiene l'acqua che verrà pompata dentro la seconda nella quale vengono immersi i campioni di suolo e mantenuti a saturazione. Un sistema di tubature e burette permette di determinare i volumi d'acqua drenati per unità di tempo, mentre un filtro e un regolatore di livello vengono usati per controllare l'altezza dell'acqua all'interno della seconda vasca. Infine, un ponte misuratore (ponte a punto unico) permette di misurare il livello d'acqua della vasca.



Figura 5: Permeametro da laboratorio Eijkelkamp

Preparazione dei campioni

I campioni sono stati prelevati dalla cella di refrigerazione, chiusi all'estremità inferiore da una garza per evitare la perdita di suolo. Si è proseguito con la saturazione graduale dei campioni con una soluzione di acido bórico (H_3BO_3) al 5% per circa una settimana. Successivamente si sono posti i campioni – ancora immersi nella soluzione di saturazione - all'interno di un essiccatore (Fig. 6) che, creando una pressione negativa fa in modo che l'aria ancora presente nei pori venga spinta fuori dalla soluzione che tenderà ad entrare.



Figura 6: Campioni posti nell'essiccatore per rimuovere aria dai micropori

Una volta terminata la fase di saturazione, i campioni sono inseriti all'interno di apposite strutture assieme ad un filtro a disco metallico per proteggere l'estremità superiore dalla dispersione di materiale (Fig. 7), e posti capovolti all'interno del permeametro per ricreare la condizione naturale in cui l'acqua s'infiltra dagli strati più superficiali verso quelli più profondi del suolo.

Constant head method

Questo metodo è usato praticamente con qualsiasi terreno, a parte i terreni scarsamente permeabili come l'argilla e la torba. Si inseriscono i sifoni con una “gamba” all'interno del porta-campione (Fig. 8) e con l'altra nel tubo plastico numerato, corrispondente alla buretta del campione analizzato, permettendo così che si stabilisca un flusso costante attraverso il campione. Viene poi misurata dalla buretta il volume di acqua che scorre attraverso il campione nel tempo. Durante la misurazione, una differenza di livello costante (h) dovrebbe essere mantenuta all'interno e all'esterno del porta-campione. Questo varia, a seconda della permeabilità del terreno, tra 2 mm per terreni altamente permeabili e 20 mm per terreni poco permeabili. La differenza di livello misurata viene usata per ogni campione per calcolare il coefficiente di permeabilità satura, secondo la seguente equazione:

$$V = K * \frac{h}{L} * A * t$$

Dove:

- K = coefficiente di permeabilità (K_s) (cm/d)
- h = differenza di altezza del livello d'acqua tra l'interno e l'esterno del campione (cm)
- L = lunghezza del campione di suolo (cm)
- V = volume d'acqua drenato dal campione (cm³)
- A = area del campione attraversato dall'acqua (cm²)
- t = tempo impiegato dal volume d'acqua per attraversare il campione (d)

Falling head method

Questo metodo è solitamente usato per misurare la bassa permeabilità in campioni contenenti argilla o torba. In questo caso il sifone non viene utilizzato. La differenza fondamentale con l'altro metodo è che qui la variazione della differenza di livello dell'acqua (h) è misurata durante un certo intervallo

di tempo (t) e non il volume di acqua drenata. Poiché l'acqua nel contenitore è a diretto contatto con l'aria, si deve considerare un certo grado di evaporazione, utilizzando l'equazione come segue:

$$K = \frac{a * L}{A * (t_2 - t_1)} * \ln \frac{h_1}{h_2} + \frac{x * a * L}{A * \sqrt{(h_1 * h_2)}}$$

Dove:

- K = coefficiente di permeabilità (K_s) (cm/d)
- a = area del porta-campione (cm²)
- L = lunghezza del campione di suolo (cm)
- A = area del campione attraversata dall'acqua (cm²)
- t = tempo tra l'inizio (t₁) e la fine (t₂) delle misurazioni (d)
- h = differenza del livello d'acqua dentro e fuori il porta-campione (h₁ e h₂) (cm)
- x = fattore di evaporazione (0.0864 cm/d)

3.3.2 CURVA DI RITENZIONE

Per determinare la curva di ritenzione idrica sono stati impiegati due strumenti di laboratorio: il ku-pF Apparatus MP10 (ICT) che lavora in un intervallo di tensione tra 0 e 90 kPa, e il Dewpoint PotentialMeter WP4C (METER Group) con una capacità di lavoro compresa tra 0 e 300'000 kPa.

Ku-pF Apparatus

Il ku-pF Apparatus (Fig.9) è uno strumento di laboratorio per la determinazione della curva di tensione dell'acqua (pF) secondo il metodo della condensazione. Il funzionamento è basato sul gradiente risultante dalla condensazione sulla superficie libera del terreno, il quale è misurato da due tensiometri differenziati in top e bottom. I tensiometri vengono inseriti nel campione ad una distanza

verticale predefinita di 3 cm (all'altezza dei fori predisposti nei cilindri in pvc). Queste sonde sono composte da una coppa porosa in materiale ceramico, una testa acrilica contenente acqua deareata e un trasduttore di pressione per registrare il dato. Nel sistema è integrata una bilancia tecnica per misurare il peso lordo del campione e quindi determinare la variazione di quantitativo d'acqua in funzione del tempo.

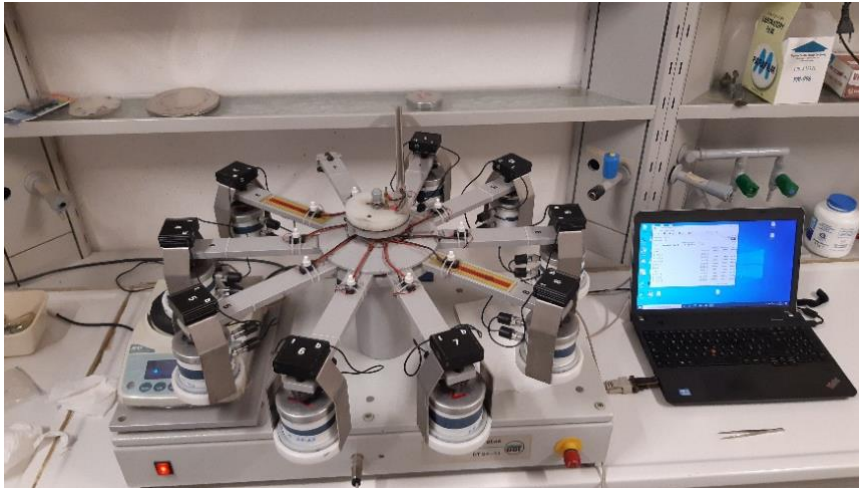


Figura 9: ku-pF Apparatus in funzione

Il primo passo è la calibrazione dei tensiometri. Per questa procedura si porta ad ebollizione dell'acqua demineralizzata per rimuovere l'aria all'interno. Dopo aver riempito d'acqua deareata la testa acrilica, si va a creare una condizione di vuoto nella testa del tensiometro al fine di eliminare bolle d'aria ancora presenti nelle cavità della testa acrilica. I tensiometri vengono collegati ad un computer per effettuare la calibrazione tramite software dello strumento. Per la calibrazione (Fig. 10) si utilizza una pompa meccanica che crea una condizione di vuoto e si osserva al computer la rapidità del tensiometro nel tornare in uno stato di pressione normale. Se il ritorno avviene in pochi istanti, la calibrazione è avvenuta con successo. In caso contrario, può essere necessario rimuovere le bolle d'aria eventualmente ancora presenti e ripetere il procedimento.

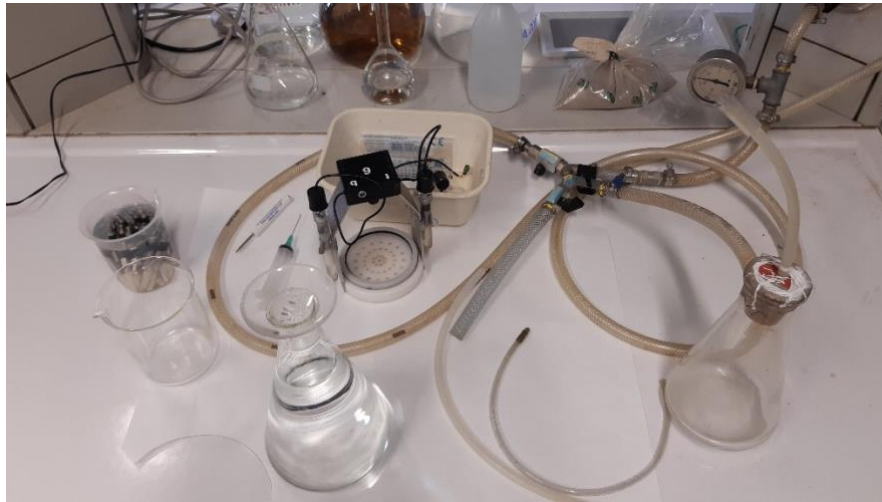


Figura 10: Calibrazione dei tensiometri

Una volta completata la procedura di calibrazione si passa alla preparazione dei campioni. I campioni, ancora saturi, vengono prelevati dal permeametro e pesati per avere il peso a saturazione. Si posiziona il singolo campione su di una base metallica, provvista di un supporto laterale atto alla pratica di due fori (dove successivamente verranno inseriti i tensiometri, Fig. 11) della profondità di pochi centimetri (circa 3-4 cm). Una volta praticati i fori si torna a pesare il campione.



Figura 11: Tensiometro in primo piano, in secondo piano presenti supporto campioni e strumento WIND

Ora si possono disporre i campioni sui loro supporti (10 in tutto), inserendo con cura i tensiometri. I campioni vengono coperti con dei coperchi metallici per evitare l'evaporazione nella prima fase di analisi e permettere che le letture dei tensiometri si stabilizzino. Ciò avviene quando viene mantenuto un gradiente negativo di pressione dall'alto verso il basso. A questo punto, è possibile rimuovere i coperchi ed azionare le ventole poste sopra ai campioni in modo tale da velocizzare l'evaporazione. Una volta stabilizzata la differenza di tensione tra i due tensiometri, si spengono le ventole e vengono posti sui campioni dei filtri forati in nylon per stabilizzare la velocità di evaporazione. Il processo si arresta quando la differenza tra i due tensiometri risulta maggiore a 5 kPa. I campioni vengono poi rimossi, pesati ed estratti 3 sotto-campioni dal peso di circa 5-7 grammi, prelevati dalla parte superficiale, centrale e basale del campione (Fig.12). Il restante suolo viene posto in stufa a 105°C per 48 ore per misurare il peso secco. Da questo processo si passa all'utilizzo del WP4C.



Figura 12: Campioni pesati e pronti per l'analisi tramite WP4C

WP4C Dewpoint PotentiaMeter

Il WP4C (Fig. 13) è un igrometro che utilizza la tecnica del punto di rugiada a specchio raffreddato per misurare il potenziale d'acqua di un campione. In concreto, porta all'equilibrio l'acqua liquida presente nel campione e quella presente in forma di vapore nella camera dove è alloggiato il campione e tramite uno specchio misura la condensazione.

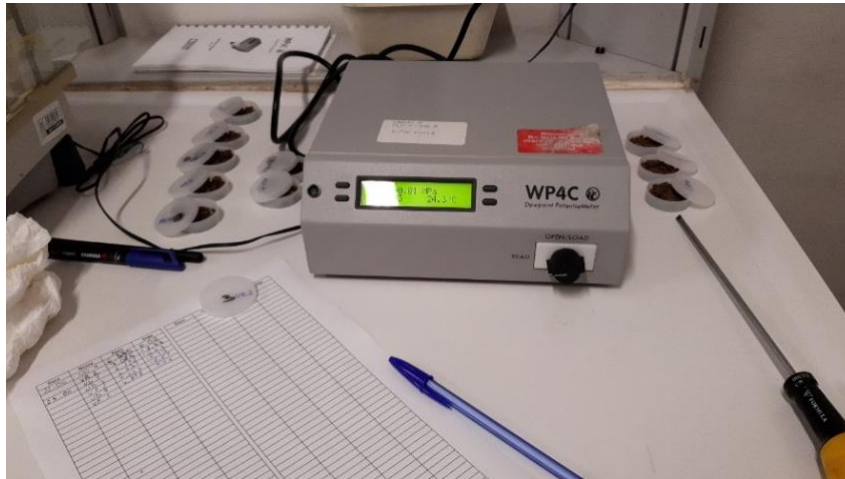


Figura 13: WP4C durante la lettura dei campioni in capsule

La procedura iniziale di calibrazione è la seguente: si attende che lo strumento raggiunga la temperatura interna di 25°C e si inserisce nella camera un campione contenente una soluzione di cloruro di potassio (KCl) a 0.5 M. La calibrazione termina quando il WP4C raggiunge un valore di -2.22 ± 0.05 MPa. L'intervallo utile di misurazione dei campioni varia tra -0.5 e -1.5 MPa, soglia sotto la quale si raggiunge il punto di avvizzimento. Il potenziale idrico di un suolo si può trovare indirettamente mettendo in relazione la lettura del potenziale idrico del campione con la pressione di vapore saturo dell'aria, tramite la seguente equazione:

$$\Psi = \frac{RT}{M_w} \ln \frac{e_s(T_d)}{e_s(T_s)}$$

Dove:

- Ψ = potenziale idrico del campione (Pa)
- R = costante dei gas (8.31 J/mol K)
- T = temperatura del campione (K)
- M_w = massa molecolare dell'acqua (18.01528 g/mol)
- $e_s(T_d)$ = pressione di vapore satura dell'aria alla temperatura del punto di rugiada (K)
- $e_s(T_s)$ = pressione di vapore satura alla temperatura del campione (K)

Ad analisi avvenuta, le capsule di suolo sono state messe in stufa a 105°C per 48 ore.

3.3.3 DENSITÀ APPARENTE

L'immissione in stufa dei campioni serve a determinare la quantità d'acqua presente nei campioni a saturazione, sottraendo al peso saturo del suolo il peso netto di terreno ottenuto dall'essiccazione a 105°C. Rapportando poi il peso dell'acqua al volume del campione si ottiene il contenuto idrico a saturazione. Il peso secco del suolo a sua volta viene diviso per il volume del campione di terreno per ottenere la densità apparente:

$$BD = \frac{P}{V}$$

Dove:

- BD = bulk density o densità apparente (g/cm³)
- P = peso secco del campione (g)
- V = volume del campione (cm³)

3.4 ANALISI DEI DATI

Il software RETC (Fig. 14), permette di interpolare i dati sperimentali ricavati dal ku-pF Apparatus e dal WP4C risalendo alla curva di ritenzione idrica e ai parametri che la definiscono. Il software si basa sul modello di Van Genuchten (1990) e Mualem (1976). Di seguito l'equazione secondo Van Genuchten:

$$\theta_{(h)} = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{(1 + (\alpha|h|)^n)} \right]^m$$

Dove:

- $\Theta_{(h)}$ = contenuto idrico (cm^3/cm^3) al potenziale h (cm)
- Θ_r = contenuto idrico residuo (cm^3/cm^3)
- Θ_s = contenuto idrico a saturazione (cm^3/cm^3)
- α = potenziale di entrata dell'aria (1/cm)
- n = misura della distribuzione della dimensione dei pori nella curva di ritenzione (-)
- m = parametro empirico che descrive la forma della curva di ritenzione (-)

L'equazione di Mualem determina la conducibilità idrica:

$$K_{(\theta)} = k_s S_e^l * \left\{ 1 - \left[1 - (S_e)^{1/(1-\frac{1}{n})} \right]^{(1-\frac{1}{n})^2} \right\}$$

Dove:

- $K_{(\theta)}$ = conducibilità idraulica in funzione del contenuto idrico (cm/d)
- k_s = conducibilità idraulica satura (cm/d)
- S_e = rappresenta il grado di saturazione (cm^3/cm^3)
- l = connettività e tortuosità del suolo (-)

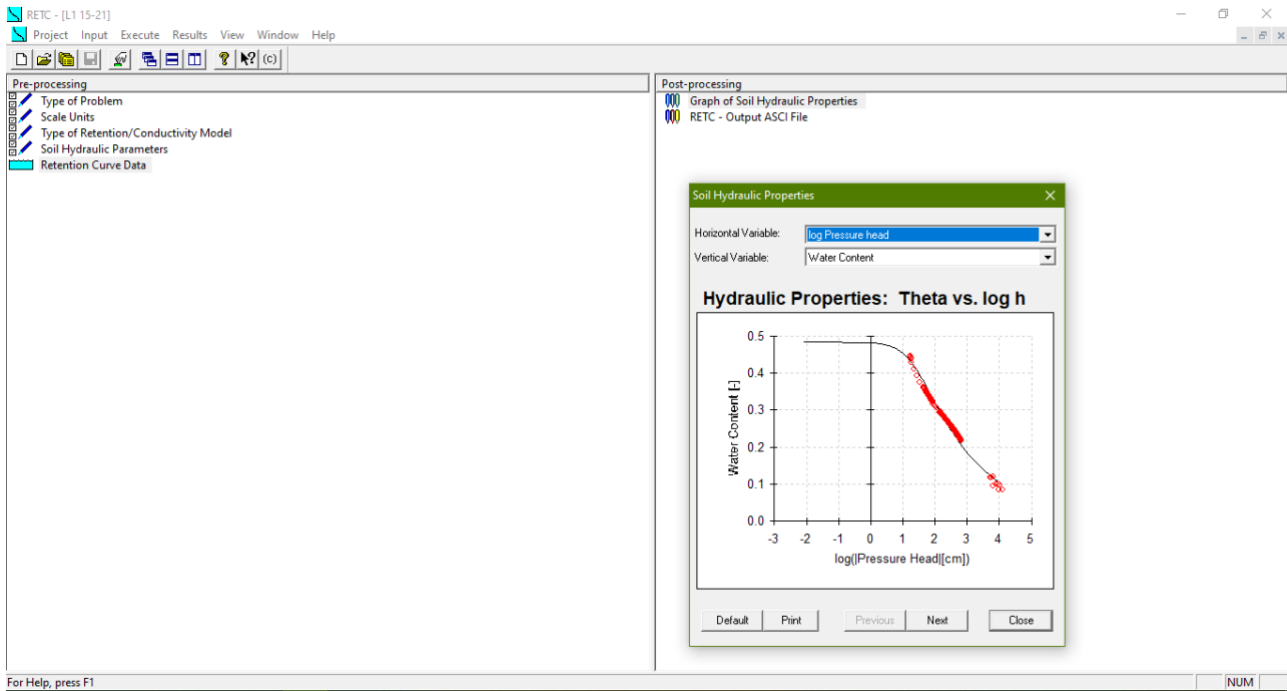


Figura 14: Software RETC. A destra dati da processare, a sinistra i risultati grafici e numerici

RETIC permette quindi di descriverne la curva di ritenzione idrica di un suolo usando il metodo non lineare dei minimi quadrati così da minimizzare gli scarti tra il dato sperimentale e quello stimato. In questo caso specifico al modello viene chiesto di stimare i valori di potenziale d'entrata dell'aria (α), il parametro che dà la forma alla curva (n), il contenuto idrico residuo (θ_r), e se serve il valore del contenuto idrico a saturazione (θ_s). I dati in input necessari al modello sono quelli di tessitura del suolo, K_s e θ_s . I dati di pressione e contenuto idrico sperimentali, sono stati quindi preliminarmente puliti e filtrati al fine di migliorare la stima della curva e equilibrare il peso dei dati all'interno del modello (Cavasso, 2021).

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

Vengono riportati di seguito i risultati ottenuti dalle diverse analisi effettuate: la conducibilità idrica a saturazione, la densità apparente e le curve di ritenzione.

4.1 CONDUCEBILITÀ IDRICA SATURA

I dati riportati in Tabella 3 rappresentano i risultati espressi in cm/giorno, ottenuti tramite permeametro nella valutazione della conducibilità idrica a saturazione (K_s). Il confronto tra i dati viene fatto sulla base della gestione agronomica (CV, CC e CA) e della profondità del livello di falda (FD, GW120 e GW 60).

Livello di falda/Gestione agronomica	CA	CV	CC	Profondità (cm)	Media
GW120	909.1	112.6	1127.2	15-21	716.3 ± 308.4
	321.6	93.9	526.5	27-33	314 ± 124.9
	117.9	82.1	463.0	57-63	221 ± 121.4
	161.3	145.3	208.7	97-103	171.8 ± 19
GW60	279.7	340.8	839.9	15-21	486.8 ± 177.4
	143.5	67.4	205.2	27-33	138.7 ± 39.9
	76.9	100.2	3.1	57-63	60 ± 29.3
	149.2	16.9	9.6	97-103	58.6 ± 45.4
FD	1656.8	1255.2	278.6	15-21	1063.5 ± 409.2
	978.9	708.9	180.5	27-33	622.8 ± 234.5
	761.4	907.4	92.3	57-63	587 ± 250.9
	14.4	64.3	13.7	97-103	30.8 ± 16.8
Media	464.2 ± 145.5	324.6 ± 117.5	329 ± 102		

Tabella 3: Conducibilità idrica a saturazione, suddivisa per profondità di prelievo

I dati rappresentati sulla colonna di destra mettono a confronto i diversi livelli di falda. Si osserva un calo graduale dei valori di K_s con tutti i livelli di falda in relazione all'aumento della profondità di campionamento. Questo risultato è probabilmente dovuto al fatto che gli strati profondi tendono a essere tendenzialmente più compatti a causa della mancata lavorazione e del peso del suolo sovrastante rispetto ad uno strato superficiale, quindi, a parità di volume, potremmo trovare una

quantità di macropori inferiore, i quali sono quelli principalmente coinvolti nella conducibilità idrica satura. Inoltre, il motivo per il quale troviamo una conducibilità maggiore negli orizzonti superficiali è anche ascrivibile al fatto che la componente biotica del terreno, le piante con il loro apparato radicale e la fauna edafica, esplorano il suolo proprio negli strati più superficiali garantendo un continuo rimescolamento e la formazione di pori di notevoli dimensioni. Anche per quanto riguarda l'errore standard troviamo lo stesso andamento decrescente, un errore elevato è sinonimo di risultati discordanti tra loro. A profondità elevate ciò che differenzia maggiormente la K_s è la composizione granulometrica e la struttura, avendo lo stesso terreno per tutti i lisimetri è difficile trovare frazioni molto distanti tra loro o una struttura incostante, mentre a livelli superficiali struttura ha giocato probabilmente un ruolo fondamentale, determinando possibili formazioni di canali preferenziali in taluni casi e non in altri, determinando repliche di campioni che manifestano risultati molto distanti tra loro. Si è inoltre notata una maggiore conducibilità idrica a saturazione per i lisimetri gestiti a drenaggio libero (FD), con uno divario molto elevato (nell'ordine di 300-500 cm/giorno) fino ad una profondità di 57-63 cm. I lisimetri gestiti a drenaggio controllato con falda ipodermica a 60 cm (GW60) dal piano di campagna sono risultati quelli con valori di K_s più bassi. In termini di sistemi colturali, valori più elevati sono stati osservati con l'agricoltura conservativa (464.2 cm/giorno), seguiti dall'agricoltura con colture di copertura (329 cm /giorno). Ciononostante, i dati sono poco differenti tra di loro e dello stesso ordine di grandezza, rendendo poco variabile la K_s tra agroecosistemi contrastanti. Alcuni valori più elevati ottenuti in CA potrebbero essere ricondotti alla non lavorazione del suolo (l'impiego limitato di mezzi pesanti nella fase di preparazione del terreno evita la compattazione). L'utilizzo di macchinari pesanti come trattrici, la rimozione dei residui vegetali e l'aratura profonda, utilizzati nell'agricoltura convenzionale, sono tutti indici di compattazione del terreno e di conseguenza generano una riduzione della K_s . In questo contesto tale fenomeno non è stato osservato, sia per la caratteristica del sito sperimentale (lisimetri e non pieno campo), sia per la fase transitoria di passaggio tra convenzionale e conservativa (< 5 anni) che

l'esperimento rappresenta. In CC i valori più elevati potrebbero essere ricondotti all'azione svolta dall'apparato radicale delle colture di copertura che aumentano la porosità del terreno. Di seguito osserviamo in Tabella 4 i risultati relativi alla gestione agronomica in relazione alla profondità dei campioni.

Profondità (cm)	Gestione agronomica		
	CA	CC	CV
15 -21	565.7	278.6	237.9
	1252.5	1540	121.3
	2013.3	1242.5	1183.6
	1300.3	714.4	443.8
	264.8	437.3	103.8
	294		1326.8
Media	948.4 ± 282	842.6 ± 239	569.5 ± 223
27 - 33	286	180.5	63.4
	357.2	598.2	123
	743.8	222	745
	1214.1	454.7	71.4
	156	188.5	64.8
	131		672.8
Media	481.4 ± 172	328.8 ± 84	290.1 ± 133
57 - 63	216	92.3	91.4
	19.7	523.1	112.4
	1070	3.1	657.7
	452.7	402.9	108.9
	115.7	3.1	51.8
	38		1157
Media	318.7 ± 164	204.9 ± 108	363.2 ± 184
97 - 103	209.9	13.7	29.6
	112.7	6.6	282.8
	5.78	2.7	8.99
	22.9	410.8	4.2
	26.4	16.5	7.8
	272		119.7
Media	464.2 ± 38	366.6 ± 66	324.6 ± 38

Tabella 4: Media Ks per le diverse gestioni agronomiche

4.2 DENSITÀ APPARENTE

Di seguito in Tabella 5 vengono riportati i risultati relativi alla densità apparente, espressi in g/cm^3 , calcolata come rapporto tra il peso secco di terreno e il volume del cilindro.

Livello di falda/Gestione agronomica	CA	CV	CC	Profondità (cm)	Media
GW120	1.32	1.30	1.31	15-21	1.31 ± 0.007
	1.38	1.42	1.40	27-33	1.40 ± 0.012
	1.46	1.40	1.46	57-63	1.44 ± 0.022
	1.52	1.54	1.47	97-103	1.51 ± 0.021
GW60	1.39	1.27	1.36	15-21	1.34 ± 0.036
	1.53	1.50	1.48	27-33	1.50 ± 0.015
	1.40	1.43	1.58	57-63	1.47 ± 0.056
	1.49	1.47	1.56	97-103	1.51 ± 0.028
FD	1.30	1.32	1.17	15-21	1.26 ± 0.046
	1.36	1.38	1.36	27-33	1.37 ± 0.007
	1.43	1.46	1.49	57-63	1.46 ± 0.018
	1.53	1.54	1.55	97-103	1.54 ± 0.006
Media	1.424 ± 0.023	1.417 ± 0.026	1.431 ± 0.034		

Tabella 5: Densità apparente dei singoli campioni analizzati

Osservando questa tabella si possono fare diverse considerazioni. Ricollegandoci a quanto discusso nel paragrafo precedente, si conferma un aumento della densità apparente (ridotta porosità) con la profondità, che determinerebbe una diminuzione della conducibilità idrica satura. Analizzando nel suo complesso la tabella 5, infatti, si osserva che a parità di gestione agronomica e livello di falda, mediamente, la densità apparente è aumentata con la profondità del campione. Per quanto riguarda il confronto tra i diversi livelli di falda, non si riscontrano notevoli differenze, sintomo che la sola riduzione della porosità e l'aumento della densità apparente non sono in grado di spiegare completamente la variazione di K_s osservata precedentemente. Ciononostante, i campioni prelevati dai lisimetri con drenaggio libero hanno mostrato valori minimi lievemente inferiori rispetto ai campioni gestiti a drenaggio controllato, nell'ordine di $0.05\text{-}0.08 \text{ g/cm}^3$. I lisimetri a drenaggio controllato (GW 120 e GW 60) hanno mostrato valori di densità apparente simili tra loro. Per quanto riguarda la gestione agronomica, in tutti i casi si è riscontrata una variabilità dei dati molto

pronunciata a tutte le profondità di riferimento. Anche osservando le medie, i valori si differenziano solo di 0.007-0.016 g/ cm³. Quindi, in conclusione, non è presente una correlazione tra tipologia di gestione e densità apparente.

4.3 CURVA DI RITENZIONE IDRICA

I dati sperimentali di potenziale matriciale e contenuto idrico volumetrico ottenuti attraverso il ku-pF Apparatus e l'igrometro a punto di rugiada (WP4C Dewpoint PotentialMeter) sono stati interpolati tramite il software RETC per poter modellare le curve di ritenzione idrica. In Tabella 6, sono presenti i parametri delle curve di ritenzione ottenuti per le varie tesi. Il contenuto idrico residuo Θ_r , nella maggior parte dei casi, è risultato essere pari a 0.058 cm³/cm³. Un parametro interessante è Θ_s , che rappresenta il contenuto idrico a saturazione. In tutti i lisimetri il dato cala con l'aumentare della profondità, proprio come K_s , mentre la densità apparente cresce in profondità. Una densità apparente elevata lascia pochi spazi liberi in un determinato volume, di conseguenza avremo un contenuto idrico a saturazione limitato. I lisimetri CC, presentano i valori con range più ampi: a livello superficiale si sono riscontrati valori molto alti (massimo 0.506 cm³/cm³), mentre negli strati più profondi troviamo i valori minimi di tutta la serie di dati. Questo ampio dislivello può essere dovuto alla presenza di una copertura costante del suolo che limita l'evaporazione dell'acqua negli strati superficiali. I dati che subiscono una minore variazione tra i diversi strati di prelievo risultano essere quelli ottenuti in CV. In questo caso la motivazione può derivare dal fatto che, non essendoci una copertura del suolo costante durante l'anno, i valori nel profilo di suolo tendono a rimanere costanti. Il parametro α , che rappresenta il potenziale di entrata dell'aria, tendeva a calare con l'aumento della profondità mediamente per tutti i lisimetri, suggerendo la presenza di un minor potenziale negativo dell'aria in grado di permettere uno svuotamento dei pori del terreno. Il parametro n , che definisce l'inclinazione della curva e quindi la distribuzione della porosità, ha seguito un andamento opposto ad α e tendeva a crescere con l'aumento della profondità. Infine, il coefficiente di determinazione R^2 , presentava sempre valori maggiori a 0.95, suggerendo la bontà del modello nel descrivere i dati sperimentali.

Tesi	profondità (cm)	Θ_r	Θ_s	α	n	R ²
CC FD	15-21	0.058	0.483	0.05	1.25	0.98
	27-33	0.018	0.442	0.06	1.22	0.99
	57-63	0.058	0.419	0.01	1.23	0.98
	97-103	0.058	0.374	0.03	1.18	0.99
CV FD	15-21	0.037 ± 0.007	0.459 ± 0.008	0.025 ± 0.002	1.262 ± 0.006	0.9916 ± 0.002
	27-33	0.07 ± 0.005	0.466 ± 0.015	0.053 ± 0.008	1.267 ± 0.04	0.9945 ± 0.001
	57-63	0.008 ± 0.013	0.467 ± 0.001	0.058 ± 0.017	1.212 ± 0.013	0.9912 ± 0.006
	97-103	0.058	0.459	0.01	1.22	0.99
CA FD	15-21	0.008	0.440	0.06	1.21	1.00
	27-33	0.058	0.433	0.05	1.21	0.99
	57-63	0.006	0.466	0.03	1.22	0.98
	97-103	0.058	0.399 ± 0.013	0.012 ± 0.001	1.238 ± 0.013	0.993 ± 0.00005
CC GW 120	15-21	0.021	0.506 ± 0.016	0.087 ± 0.022	1.237 ± 0.011	0.9872 ± 0.017
	27-33	0.056 ± 0.011	0.482 ± 0.019	0.068 ± 0.021	1.293 ± 0.012	0.9949 ± 0.001
	57-63	0.058 ± 0.017	0.435 ± 0.001	0.026 ± 0.005	1.189 ± 0.018	0.9788 ± 0.004
	97-103	0.058	0.387 ± 0.017	0.005 ± 0.002	1.29 ± 0.03	0.9931 ± 0.002
CV GW 120	15-21	0.058	0.497	0.05 ± 0.008	1.23 ± 0.025	0.99 ± 0.004
	27-33	0.058	0.465 ± 0.02	0.056 ± 0.015	1.203 ± 0.005	0.98 ± 0.0002
	57-63	0.058	0.443 ± 0.005	0.023 ± 0.001	1.2 ± 0.007	0.97 ± 0.01
	97-103	0.058	0.452 ± 0.015	0.04	1.20	1 ± 0.016
CA GW 120	15-21	0.058	0.462 ± 0.009	0.059 ± 0.003	1.177 ± 0.014	0.99 ± 0.003
	27-33	0.058	0.787 ± 0.165	2.59	1.19	0.97 ± 0.01
	57-63	0.058	0.442 ± 0.017	0.014 ± 0.002	1.186 ± 0.026	0.97 ± 0.008
	97-103	0.058	0.405 ± 0.001	0.006 ± 0.001	1.281 ± 0.008	0.97 ± 0.001
CC GW 60	15-21	0.058	0.468 ± 0.003	0.03 ± 0.052	1.231 ± 0.031	0.9941 ± 0.003
	27-33	0.059 ± 0.005	0.444 ± 0.018	0.03 ± 0.001	1.311 ± 0.025	0.9867 ± 0.004
	57-63	0.058	0.363 ± 0.002	0.014 ± 0.003	1.188 ± 0.038	0.9813 ± 0.001
	97-103	0.058	0.372 ± 0.001	0.01 ± 0.001	1.203 ± 0.009	0.9811 ± 0.002
CV GW 60	15-21	0.006	0.502	0.15	1.16	1 ± 0.003
	27-33	0.058	0.448 ± 0.015	0.035 ± 0.014	1.18	0.98 ± 0.007
	57-63	0.058	0.44 ± 0.008	0.02	1.20	0.95 ± 0.008
	97-103	0.058	0.411 ± 0.005	0.006 ± 0.002	1.273 ± 0.022	0.98 ± 0.001
CA GW 60	15-21	0.058	0.454	0.033 ± 0.001	1.21 ± 0.005	0.99 ± 0.001
	27-33	0.058	0.434 ± 0.01	0.04	1.16	1 ± 0.011
	57-63	0.058	0.463 ± 0.004	0.02	1.24	0.99 ± 0.004
	97-103	0.058	0.421	0.014 ± 0.007	1.31 ± 0.035	0.97 ± 0.011

Tabella 6: Parametri delle curve di ritenzione secondo l'equazione di van Genuchten ± l'errore standard

La parte conclusiva di questo elaborato consiste nell'analisi delle curve di ritenzione idrica, riportate nelle seguenti Figure (15-26). I grafici presentano sull'asse delle ordinate il VWC (cm^3/cm^3) che esprime il contenuto idrico del suolo, mentre sull'asse delle ascisse si trova il pF, ovvero il logaritmo in base dieci del potenziale matriciale del suolo. La scala. La scala varia da 0 a 7, con un intervallo compreso tra 2 (capacità di campo, FC) e 4.2 (punto di appassimento permanente, PWP) che risulta interessante dal punto di vista agronomico poiché rappresenta la riserva idrica massima utilizzabile da una coltura in assenza di stress idrico (Giordano, 1999). L'analisi delle curve avviene a gruppi, suddivisi in base alla profondità di prelievo del campione, nella quale viene comparata la differente conduzione agronomica e il livello di falda.

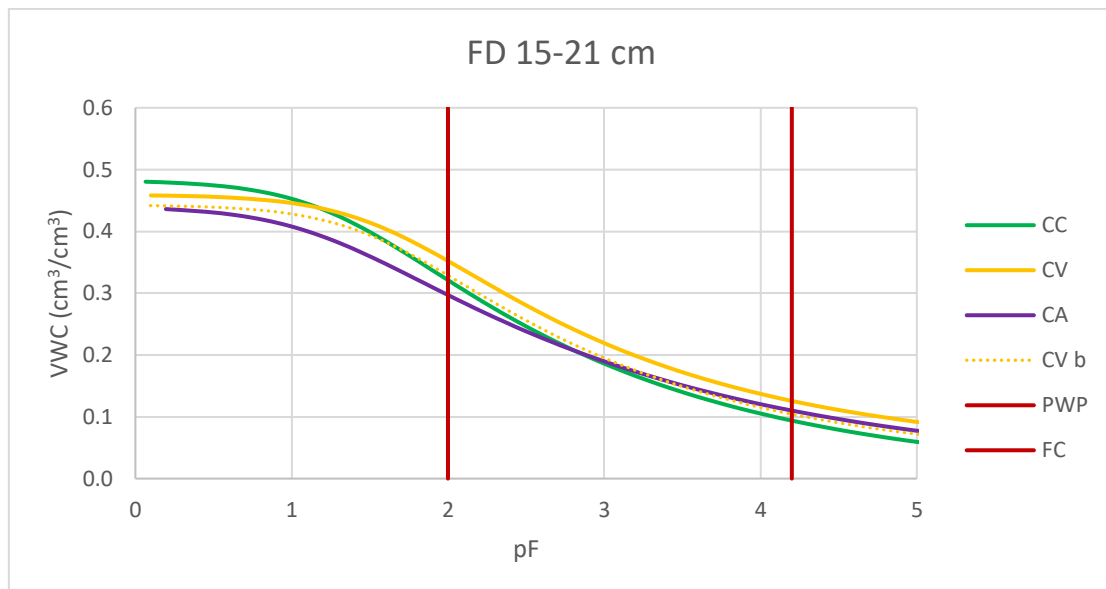


Figura 15: Curva di ritenzione idrica, con drenaggio libero

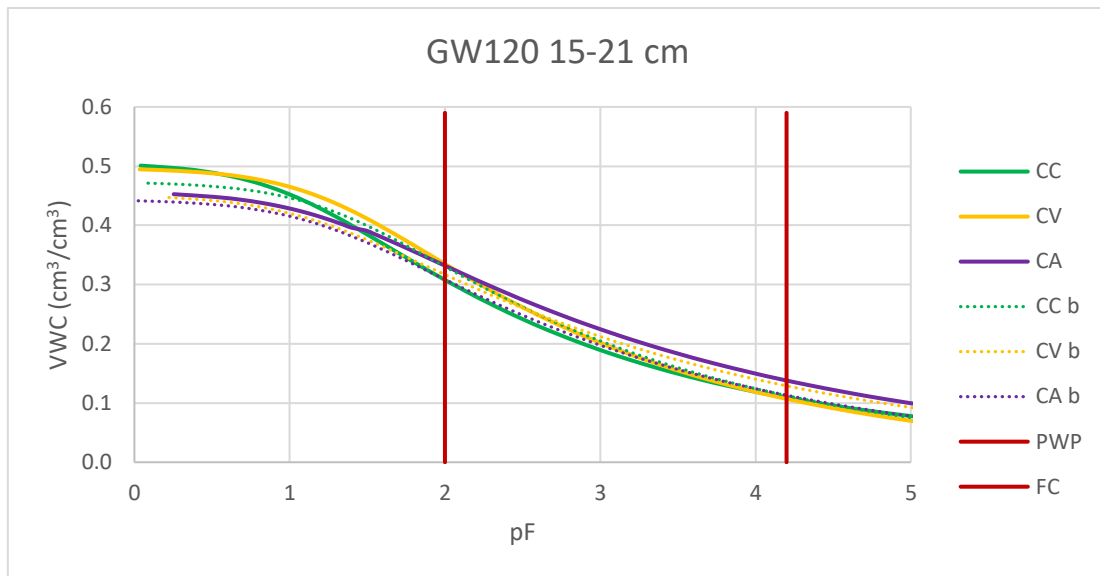


Figura 16: Curva di ritenzione idrica, con drenaggio controllato a 120 cm

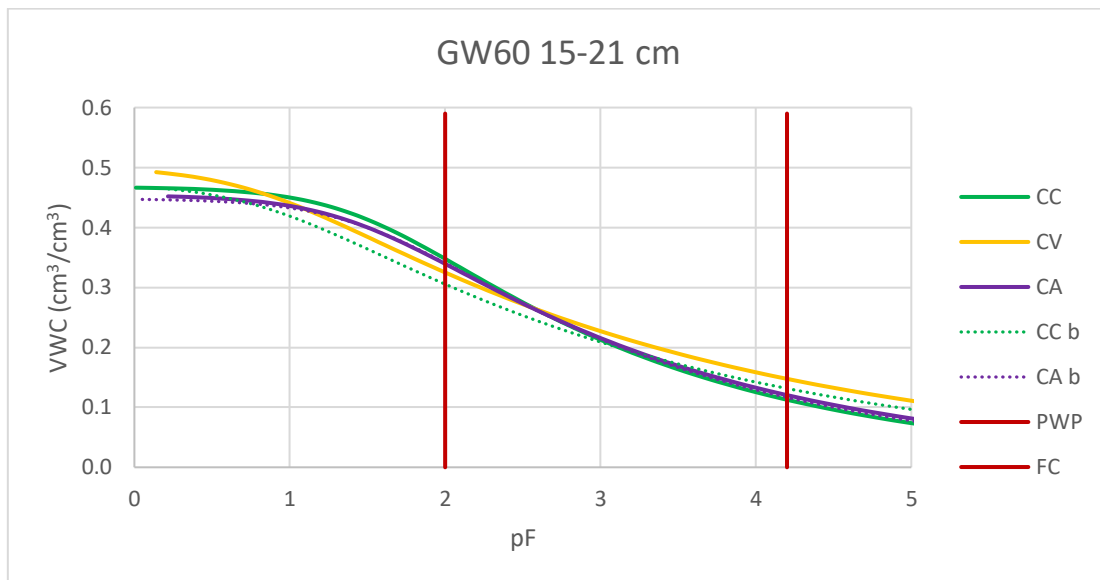


Figura 17: Curva di ritenzione idrica, con drenaggio controllato a 60 cm

FD 15-21				GW 120 15-21				GW 60 15-21					
	FC (%)	PWP (%)	H ₂ O disp (%)		FC (%)	PWP (%)	H ₂ O disp (%)		FC (%)	PWP (%)	H ₂ O disp (%)	Media trattamenti	Media
CC	32	9.9	22.1	CC	30.3	11	19.3	CC	34.4	11.5	22.9	21.4	20.6
CV	35.2	12.7	22.5	CV	33.5	11.2	22.3	CV	32.5	14.8	17.7	20.8	
CA	29.5	11.4	18.1	CA	33	14.1	18.9	CA	33.8	12.1	21.7	19.6	
			20.9				20.2				20.8		

Tabella 7: Acqua disponibile alle piante (H₂O disp), relativa a profondità 15-21 cm

Questa prima serie di grafici (Figure 15, 16 e 17) rappresenta la profondità di prelievo compresa tra i 15 e 21 cm. Ad ogni Figura corrisponde una diversa gestione della falda acquifera. Una prima considerazione riguarda la pendenza della curva tra la capacità di campo e il punto di appassimento. Più il divario sarà ampio e maggiore sarà la capacità del terreno di trattenere l'acqua. In Figura 15 e 16, i campioni gestiti con tecniche agronomiche convenzionali risultano essere quelli con una maggiore capacità di stoccaggio dell'acqua in condizione di falda profonda o drenaggio libero (Tabella 7; FD: 22.5% e GW120: 22.3%), mentre i campioni in agricoltura conservativa sono risultati quelli con una minore capacità idrica (FD: 18.1% e GW120: 18.9%). Una situazione opposta è stata trovata in Figura 17, dove i risultati più elevati sono stati osservati nei campioni gestiti con colture di copertura (GW60: 22.9%). La situazione osservata precedentemente è cambiata osservando nel complesso le gestioni agronomiche senza includere il fattore falda nell'analisi. Infatti, è stata stimata una media di 21.4% per i campioni gestiti con colture di copertura (CC), ridotta a 20.8% nei campioni coltivati con tecniche di agricoltura convenzionale (CV) e a 19.6% per le tecniche di agricoltura conservativa (CA). Nel confronto tra campioni gestiti con diversi livelli di falda si è notata una differenza inferiore all'unità percentuale (FD: 20.9%; GW120: 20.2%; GW60: 20.8%).

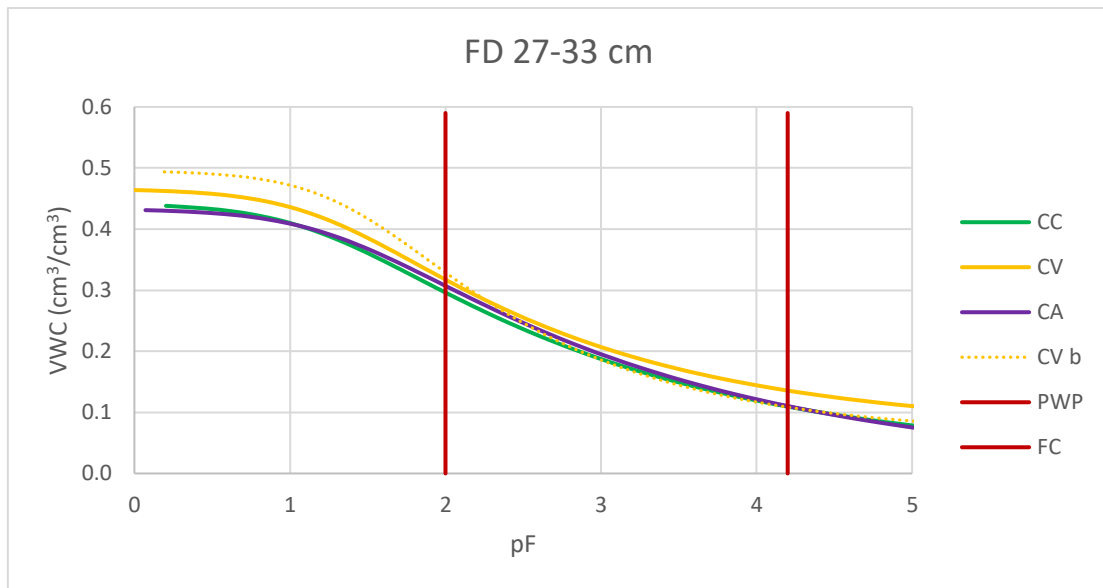


Figura 18: Curva di ritenzione idrica, con drenaggio libero

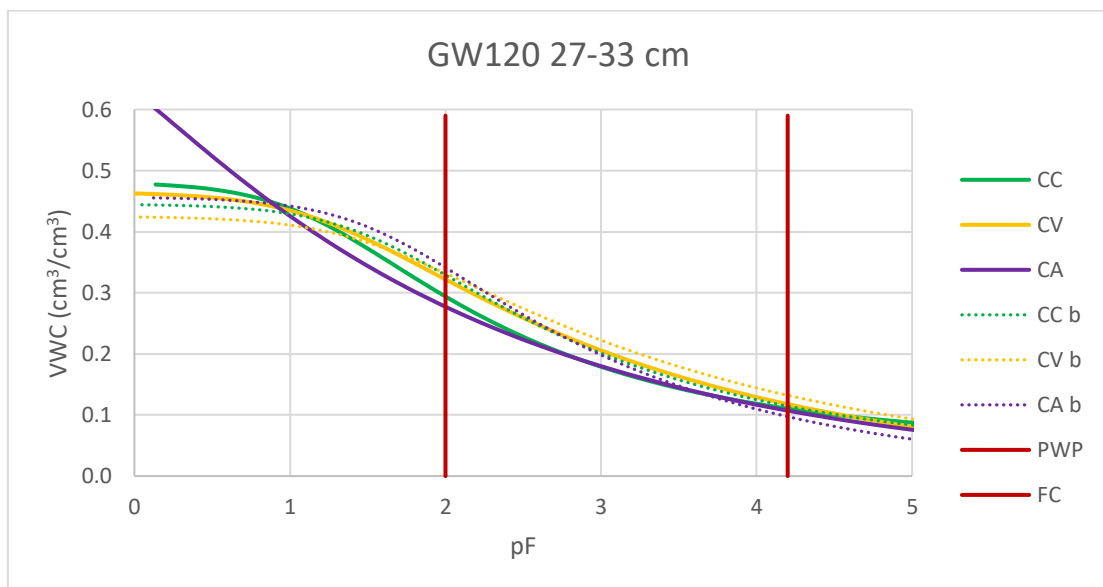


Figura 19: Curva di ritenzione idrica, con drenaggio controllato a 120 cm

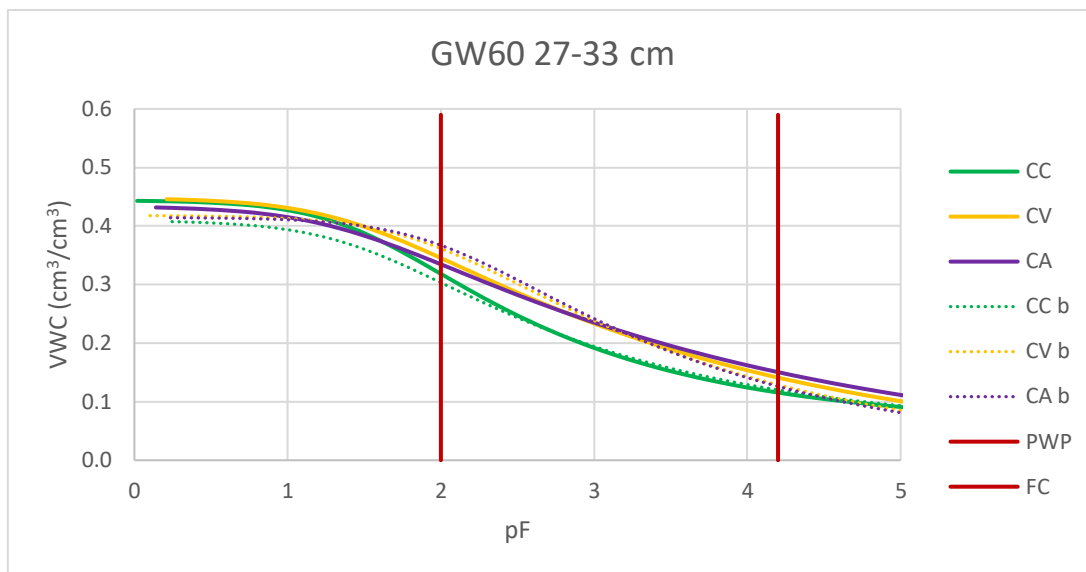


Figura 20: Curva di ritenzione idrica, con drenaggio controllato a 60 cm

FD 27-33				GW 120 27-33				GW 60 27-33				Media	
	FC (%)	PWP (%)	H ₂ O disp (%)		FC (%)	PWP (%)	H ₂ O disp (%)		FC (%)	PWP (%)	H ₂ O disp (%)	trattamenti	Media
CC	29.5	11.3	18.2	CC	29	11.2	17.8	CC	31.8	11.8	20	18.7	18.6
CV	31.7	13.9	17.8	CV	31.8	11.9	19.9	CV	34.3	14.2	20.1	19.3	
CA	30.5	11.1	19.4	CA	27.3	11.2	16.1	CA	33.2	15.1	18.1	17.9	
			18.5				17.9				19.4		

Tabella 8: Acqua disponibile alle piante (H₂O disp), relativa a profondità 27-33 cm

La seconda serie di grafici (Figure 18, 19 e 20) corrisponde al gruppo di campioni prelevati ad una profondità compresa tra 27 e 33 cm. Rispetto ai dati superficiali i risultati sono cambiati notevolmente, con (Figura 18) un quantitativo d'acqua disponibile massimo per l'agricoltura conservativa e il minimo per la gestione ad agricoltura convenzionale (Tabella 8; FD: 19.4% e 17.8%). Per quanto riguarda le Figure 19 e 20, invece, troviamo il massimo nell'agricoltura convenzionale (GW120: 19.9% e GW60: 20.1%), mentre il minimo è stato stimato nella gestione conservativa, sia con falda superficiale che profonda (GW120: 16.1% e GW60: 18.1%). Osservando

nel suo insieme le medie dei dati per le diverse gestioni agronomiche, è evidente una riduzione dei valori rispetto al profilo 15-21 cm che mediamente si è attestata sul 2%. L'agricoltura convenzionale è risultata essere quella con un contenuto idrico maggiore, pari a 19.3%, mentre il contenuto idrico colturale minore è stato trovato per l'agricoltura conservativa (18.7%). Anche a livello di falda si sono osservati valori inferiori alle medie della serie precedente.

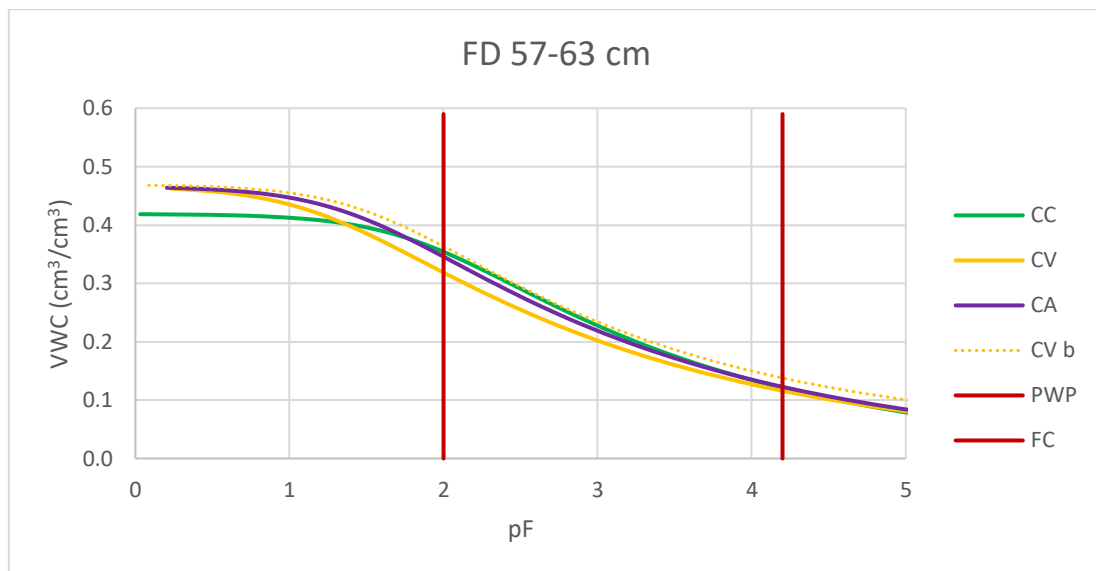


Figura 21: Curva di ritenzione idrica, con drenaggio libero

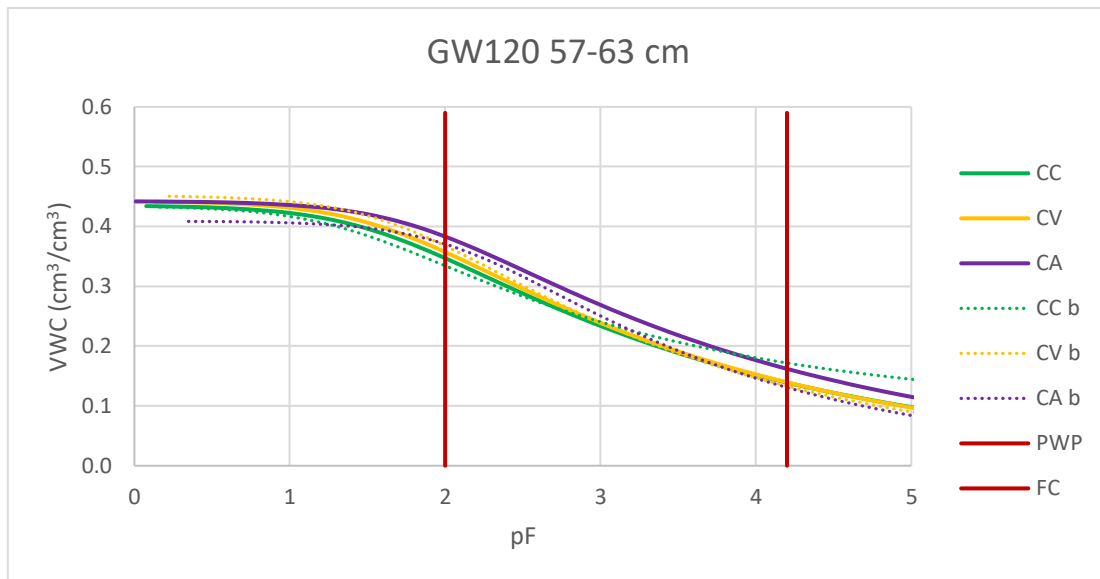


Figura 22: Curva di ritenzione idrica, con drenaggio controllato a 120 cm

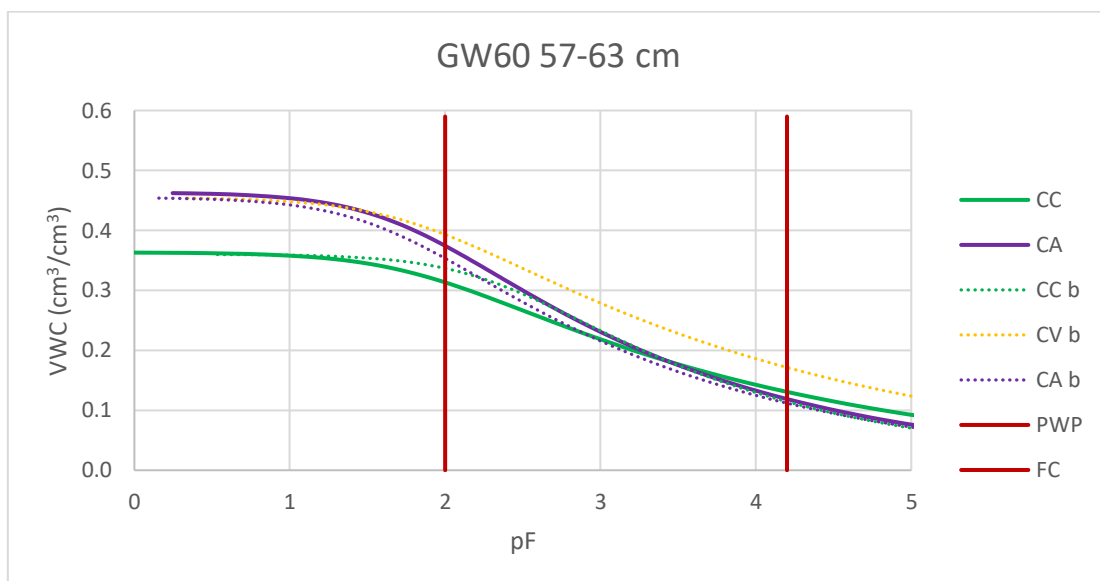


Figura 23: Curva di ritenzione idrica, con drenaggio controllato a 60 cm

FD 57-63				GW 120 57-63				GW 60 57-63				Media trattamenti	
	FC (%)	PWP (%)	H ₂ O disp (%)		FC (%)	PWP (%)	H ₂ O disp (%)		FC (%)	PWP (%)	H ₂ O disp (%)		Media
CC	35	12.4	22.6	CC	34.6	14.2	20.4	CC	31.2	13.4	17.8	20.3	21.4
CV	31.7	12	19.7	CV	35.7	14	21.7	CV	39	17.2	21.8	21.1	
CA	34.4	12.3	22.1	CA	37.9	16.3	21.6	CA	37.4	12.3	25.1	22.9	
			21.5				21.2				21.6		

Tabella 9: Acqua disponibile alle piante (H₂O disp), relativa a profondità 57-63 cm

La terza serie di grafici (Figure 21, 22 e 23) corrisponde al gruppo di campioni prelevati ad una profondità compresa tra 57 e 63 cm. In questo gruppo, in riferimento a tutti gli elementi di confronto, si riscontrano valori simili alla prima serie corrispondente al profilo 15-21 cm. In Figura 21 il contenuto massimo d'acqua si trova nel lisimetro gestito con colture di copertura, mentre il minimo nella gestione convenzionale (Tabella 9; FD: 22.6% e 19.7%). In Figura 22 si evidenzia una situazione opposta, nella quale il valore massimo è stato stimato per CV mentre il minimo per CC (GW120: 21.7% e 20.4%). Infine, in condizioni di falda ipodermica a 60 cm (Figura 23), è stato stimato il massimo di quantitativo d'acqua disponibile per le colture gestite ad agricoltura convenzionale e il minimo per la tecnica con colture di copertura (GW60: 25.1% e 17.8%). La media complessiva dei valori in riferimento alla gestione agronomica ha visto CA = 22.9% contro CC=20.3%. Per i valori medi di contenuto idrico in relazione al livello di falda non si riscontrano differenze sostanziali, con un intervallo sempre inferiore all'unità percentuale (0.4%) che suggerisce un non effetto della profondità di falda (FD: 21.5%; GW120: 21.2 e GW60: 21.6%).

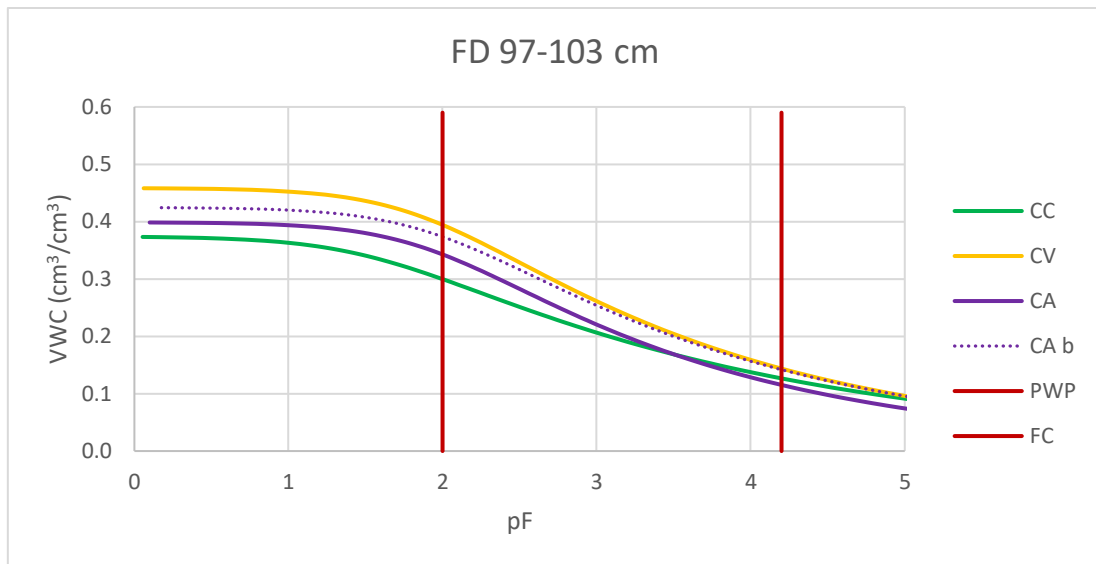


Figura 24: Curva di ritenzione idrica, con drenaggio libero

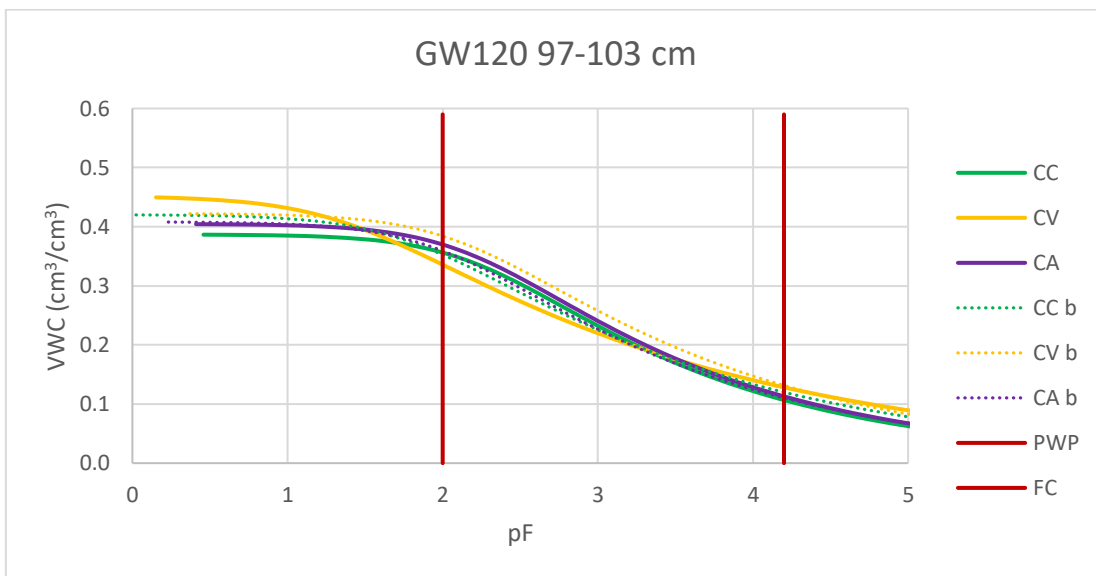


Figura 25: Curva di ritenzione idrica, con drenaggio controllato a 120 cm

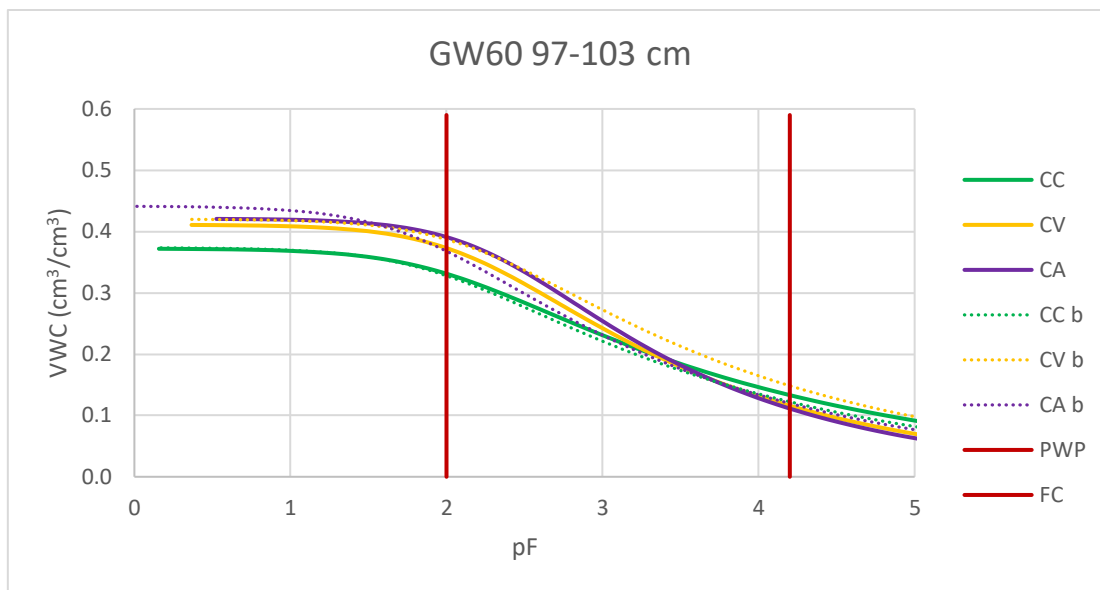


Figura 26: Curva di ritenzione idrica, con drenaggio controllato a 60 cm

FD 97-103				GW 120 97-103				GW 60 97-103					
	FC (%)	PWP (%)	H ₂ O disp (%)		FC (%)	PWP (%)	H ₂ O disp (%)		FC (%)	PWP (%)	H ₂ O disp (%)	Media trattamenti	Media
CC	29.8	13	16.8	CC	35.5	11	24.5	CC	33.1	13.7	19.4	20.2	22.9
CV	39.3	14.5	24.8	CV	33.2	12.9	20.3	CV	36.9	11.8	25.1	23.4	
CA	34.2	11.8	22.4	CA	36.8	11.6	25.2	CA	39.1	11.2	27.9	25.2	
			21.3				23.3				24.1		

Tabella 10: Acqua disponibile alle piante (H₂O disp), relativa a profondità 97-103 cm

L'ultima serie di grafici (Figure 24, 25 e 26) corrisponde al gruppo di campioni prelevati ad una profondità compresa tra 97 e 103 cm. Anche in questa serie, come in quella relativa al profilo 27-33 cm, riscontriamo dei valori che si differenziano tra le tipologie di falda, con un generale aumento dell'acqua disponibile al diminuire della profondità di falda ipodermica. Per quanto riguarda le pratiche agronomiche, in Figura 24 (FD) il contenuto massimo d'acqua si trova nel lisimetro gestito ad agricoltura convenzionale, mentre il minimo nella gestione con colture di copertura (Tabella 10; FD: 24.8% e 16.8%). In Figura 25 il valore massimo appartiene alla gestione conservativa mentre il

minimo per l'agricoltura convenzionale (GW120: 25.2% e 20.3%). Infine, per quanto riguarda la Figura 26 troviamo il picco massimo nella gestione conservativa e il picco minimo nella tecnica con colture di copertura (GW60: 27.9% e 19.4%). Da notare che in questa serie di dati alle profondità più elevate i singoli valori si differenziano tra loro, suggerendo come siano estremamente variabili le condizioni del suolo -elevata variabilità sito-specifica- indipendentemente dalle pratiche agronomiche che, evidentemente, a tali profondità non hanno effetto.

Gestione agronomica (%)		Livello di falda (%)	
CC	20.2	FD	20.5
CV	21.1	GW120	20.7
CA	21.4	GW60	21.5

Tabella 11: Valori medi complessivi della gestione agronomica e del livello di falda

Per concludere il paragrafo 4.3, osserviamo in Tabella 11 le medie relative alle due tesi prese in esame. Per quanto riguarda la gestione agronomica i valori delle tre diverse tecniche si attestano in un intervallo di 1.2 punti percentuali. Rispettivamente troviamo: CA = 21.4%; CV = 21.1% e CC 20.2%. Nonostante CC risulti essere la tecnica con una media complessiva più bassa, è quella che nei diversi profili presenta valori più costanti, questa condizione potrebbe essere dovuta alla presenza di una copertura vegetale costante che limita la traspirazione del suolo. Infatti, osservando il profilo più superficiale CC presenta i valori massimi per la serie. Anche per il livello di falda si osservano discrepanze minime tra le diverse conduzioni, nell'ordine di 1 punto percentuale, troviamo: FD = 20.5%; GW120 = 20.7% e GW60 = 21.5%. In entrambe le tesi di studio troviamo i valori più bassi nel profilo di profondità 27-33 cm. La causa potrebbe essere associata ad una maggiore lisciviazione dell'acqua a basse profondità.

5. CONCLUSIONI

L'insieme dei dati raccolti nelle diverse prove sperimentali ci forniscono parametri fisico-idraulici utili all'analisi del rapporto suolo-acqua. La particolarità di questo progetto sta nel confronto di diverse tecniche agronomiche applicate in diverse situazioni di livello di falda, con il fine agronomico-ambientale di verificare quale tipologia di conduzione agronomica garantisce miglior disponibilità idrica alla pianta e al tempo stesso limita la lisciviazione di sostanze inquinanti verso la falda, in un contesto particolare come quello della pianura Veneta, spesso soggetta a falda ipodermica. Nel Capitolo 4 sono stati riportati i risultati dei campioni secondo le diverse tesi sperimentali a confronto, osservando una certa influenza della diversa profondità di falda rispetto al drenaggio libero in termini di conducibilità idrica satura. Tale risultato suggerisce una probabile presenza di macropori maggiormente presenti con falda libera rispetto a sistemi a drenaggio controllato. Per contro, si è notata una lieve riduzione della disponibilità idrica superficiale nei sistemi conservativi fino a una profondità di circa 30 cm, sebbene questa differenza non si sia riscontrata in tutti i lisimetri. Da un lato, maggiori profondità non sono influenzate da una differenza tra suolo lavorato e suolo non lavorato; d'altro canto, si ipotizza che il sistema sperimentale a confronto non abbia ancora raggiunto una fase di stabilizzazione nella struttura del suolo. Il sistema, pertanto, si definisce ancora in transizione, presupponendo la necessità di investigare le proprietà fisico-idrauliche nel medio-lungo periodo (> 5 anni) per poter confermare o meno il ruolo che l'agricoltura conservativa potrebbe avere nel modificare la struttura del suolo, e implicarne una gestione differente.

BIBLIOGRAFIA

- ARPAV, *Valutazione della permeabilità e del gruppo idrologico dei suoli del Veneto*, Servizio Regionale Suoli, 2011.
- Bocchi S. *et al.*, *Produzioni vegetali. Agronomia generale e meccanizzazione*, Milano, Poseidonia scuola, 2012.
- Cavasso A., *Influenza di alcune proprietà chimiche e idrauliche sui processi di adsorbimento e movimento di glifosate in suoli di alta e bassa pianura veneta*, Tesi di laurea, Università degli Studi di Padova, 2021.
- Cubalchini A., *Dinamica dei flussi di gas climalteranti e ammoniaca in agricoltura conservativa e convenzionale con cover crops*, Tesi di laurea, Università degli Studi di Padova, 2019.
- Enciclopedia Treccani, 2013.
- Giordano A. *Pedologia*, Torino, UTET, 1999.
- Grillo F., *Vulnerabilità della falda freatica a seguito della terminazione di cover crops con Glifosate*, Tesi di laurea, Università degli Studi di Padova, 2019.
- Mencaroni, M., Dal Ferro, N., Radcliffe, D. E., & Morari, F., *Preferential solute transport under variably saturated conditions in a silty loam soil: Is the shallow water table a driving factor?*. *Journal of Hydrology*, 602,126733, 2021.
- Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali, 2021.
- Paoletti M., Gomiero T., *Agroenergie, territorio e biodiversità*, Padova, 2009

- Pisante M., *Agricoltura sostenibile. Principi, sistemi e tecnologie applicate all'agricoltura produttiva per la salvaguardia dell'ambiente e la tutela climatica*, Milano, Edagricole, 2013.
- Smith T.M. – Smith R.L., *Elementi di ecologia. Nona edizione*, Milano – Torino, Pearson, 2017.
- Veneto Agricoltura, 2015.