



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Agraria e Medicina Veterinaria

Corso di Laurea Triennale in Scienze e Tecnologie Agrarie

Tesi di laurea

**Ritenzione Idrica della Sostanza
Organica del suolo**

Soil Organic Matter and Water Retention

Relatore

Prof. Carmelo Maucieri

Co-relatore

Dott. Gianmaria Barbieri

***Laureando: Boldrin Luca
Matricola n. 2007440***

Anno Accademico 2023/2024

Indice

Indice -----	4
Abstract -----	6
Abstract (English) -----	7
Introduzione -----	8
Obiettivi-----	9
1. La ritenzione idrica del suolo -----	10
1.1 Costanti idrologiche-----	11
1.2 Effetti delle lavorazioni-----	13
2. Effetti della sostanza organica -----	14
2.1 Da cosa è costituita la sostanza organica-----	14
2.2 Sostanza Organica e proprietà chimico-fisiche del terreno-----	15
2.2 Effetti sulla fertilità del suolo-----	16
2.4 Sostanza organica ed effetto tampone-----	17
2.5 Attività microbica come agente legante-----	18
2.6 Caratteristiche dell'humus ed effetto cementante-----	19
3. Sostanza organica e ritenzione idrica -----	20
3.1 Fattori da tenere in considerazione-----	20
3.2 Effetti sulla ritenzione idrica-----	21
3.3 Effetto della sostanza organica nei terreni italiani-----	23
3.4 Suoli a grana grossa reagiscono positivamente-----	24
3.5 Tipi di argilla differenti reagiscono in modo differente con la sostanza organica.-----	24
3.6 Flusso d'acqua all'interno del suolo-----	25
4. Carenza di sostanza organica nei suoli -----	27
4.1 Agenti che condizionano la sostanza organica e la struttura del suolo-----	27
4.1.1 I cicli di bagnato-secco-----	28
4.1.2 Lavorazione del terreno-----	28
4.1.3 Vegetazione-----	28
4.1.4 Mineralizzazione e umificazione-----	29
5. Come aumentare la sostanza organica del suolo -----	31
5.1 Lavorazioni del suolo-----	31
5.2 Concimazione organica e compost-----	31
5.3 Fertilizzanti e nutrienti-----	32
5.4 Gestione delle colture-----	32
5.4.1 Cover Crop-----	32
5.5 Minima lavorazione e acqua disponibile-----	34
6. Conclusioni -----	35
Bibliografia consultata -----	37

Abstract

I cambiamenti climatici e il progressivo aumento della temperatura globale hanno portato, negli ultimi decenni, al manifestarsi di periodi di siccità più intensi e frequenti. Congiuntamente, la capacità di mantenere acqua disponibile alla pianta nel suolo è diminuita con il peggioramento della salute dello stesso. Il ripristino del contenuto di sostanza organica nel suolo può aumentare la ritenzione idrica di quest'ultimo, migliorando così la disponibilità d'acqua per le piante. Tuttavia, l'efficacia di questo ripristino dipende da fattori come la tessitura del suolo e il contenuto iniziale di sostanza organica del suolo. La resilienza degli agroecosistemi al cambiamento climatico può essere supportata attraverso pratiche di agricoltura conservativa, il mantenimento di coperture vegetali e l'impiego di sistemi di coltivazione integrata. Queste strategie devono essere adattate alle specifiche condizioni pedoclimatiche locali. Ulteriori ricerche sono necessarie per comprendere meglio il legame tra l'aumento del contenuto di sostanza organica, l'acqua disponibile per le piante e la resistenza alla siccità in diverse colture e sistemi di coltivazione.

Abstract (English)

The text discusses the impact of global warming and soil degradation on the frequency and intensity of droughts in agroecosystems. Restoring soil organic matter (SOM) content can increase water retention, particularly at field capacity, thereby improving the available water capacity for plants. However, the effectiveness of this restoration depends on factors such as soil texture and initial soil organic matter content. Climate-resilient agroecosystems can be achieved through management practices like conservation agriculture, cover cropping, and integrated cultivation systems. These strategies need to be tailored to specific local conditions. Further research is needed to better understand the connection between increased organic matter content, plant-available water, and drought resilience in different crops and cultivation systems. In summary, restoring organic matter can enhance soil water retention, making agroecosystems more resilient to drought and climate change, but its effectiveness varies based on local conditions and requires further study.

Introduzione

Il riscaldamento globale, che ha portato ad un aumento di 1°C rispetto ai livelli preindustriali, ha intensificato la gravità delle siccità causate dal deficit di umidità nel terreno. Questo ha sbilanciato l'equilibrio dell'ecosistema del suolo, andando a squilibrare processi biologici, specialmente dopo prolungate siccità estive. Le attività umane, come deforestazione, lavorazione eccessiva del suolo, rimozione dei residui colturali, monocoltura continua, elevata densità di pascolamento, possono destabilizzare le riserve di carbonio organico del suolo generando emissioni di CO₂ e diminuendo la capacità del suolo di stoccare acqua (Feng, 2015). La ritenzione idrica nel suolo è cruciale per affrontare i crescenti rischi di siccità. Il cambiamento climatico sta anche aggravando la perdita di sostanza organica del suolo nelle coltivazioni agricole. La sostanza organica è un determinante critico della ritenzione idrica nel suolo, del quale però esiste la necessità di comprendere meglio la relazione tra il suo contenuto nel suolo e l'effetto di ritenzione. L'importanza della ritenzione idrica nel suolo per la produttività delle colture, specialmente in regioni aride e semiaride, non può essere sottostimata. Il contenuto di sostanza organica del suolo è un parametro chiave che influenza la sua qualità, la sua struttura e le proprietà idrologiche. È stato infatti affermato che ogni aumento "dell'1%" della materia organica nel suolo può permettere di immagazzinare una notevole quantità di acqua aggiuntiva (Bryant, 2015).

Obiettivi

Gli obiettivi di questo lavoro di tesi sono: discutere dell'impatto del contenuto di sostanza organica del suolo sulla ritenzione idrica, in particolare sulla capacità di stoccare acqua disponibile per le piante, identificando alcune pratiche di gestione che potrebbero incrementare il contenuto di sostanza organica, aumentare il contenuto di acqua disponibile per le piante e ridurre i rischi di stress idrico per le colture.

1. La ritenzione idrica del suolo

Per suolo si intende lo strato superficiale di crosta terrestre, interessato da una continua evoluzione data dall'interazione tra fattori pedologici, climatici e antropici. Tra le proprietà fisiche del suolo annoveriamo la tessitura, ovvero la composizione percentuale delle particelle solide che lo compongono, distinte per classi granulometriche. Questa proprietà è molto importante, in quanto la tessitura condiziona sensibilmente le proprietà fisico-chimiche e meccaniche del suolo, con effetti sulla dinamica dell'acqua, dell'aria, e condiziona le migliori pratiche agronomiche applicabili. Le frazioni granulometriche di un suolo si distinguono in: grossolana (sabbia), fine (limo), finissima (argilla). Quest'ultima è quella che è maggiormente in grado di interagire con le altre componenti del suolo, ed è quindi quella che influenza maggiormente le sue caratteristiche. Secondo la distinzione del Dipartimento dell'agricoltura degli Stati Uniti, le classi di diametro delle particelle di suolo sono:

- Argilla (diametro minore di 2 micron);
- Limo (diametro compreso tra 2 e 50 micron);
- Sabbia (diametro compreso tra 50 micron e 2 mm).

Le singole frazioni granulometriche interagiscono tra loro e con le altre componenti del suolo dando origine a quella che è la struttura del suolo. La struttura è una caratteristica molto importante del terreno. È influenzata dalle pratiche agronomiche e influenza la fertilità del suolo. A seconda del tipo di struttura del suolo, dipendono i rapporti tra fase solida, fase liquida e fase gassosa del terreno. La struttura va a determinare anche la porosità del suolo, cioè quella parte di volume di suolo vuota, caratterizzata dalla presenza di macropori. In un suolo sono presenti pori di diverse dimensioni: macropori (maggiori di 20 micrometri), e micropori (minori di 20 micrometri), che creano un vero e proprio serbatoio all'interno del suolo, permettendo il fluire di acqua e aria. La porosità del suolo risulta essere fondamentale per la sua capacità di ritenzione idrica.

I macropori, non riesco ad esercitare una forza di tensione sulla superficie del liquido, per cui vanno a contenere quell'acqua che è soggetta alla forza gravitazionale, acqua quindi che tende a percolare in un breve periodo e che non viene trattenuta. I micropori, esercitano invece una forza di tensione superficiale che sottrae l'acqua alla gravità, trattenendola nel suolo. A seconda della quantità di

micropori e dai minerali presenti nel terreno si possono definire delle costanti idrologiche.

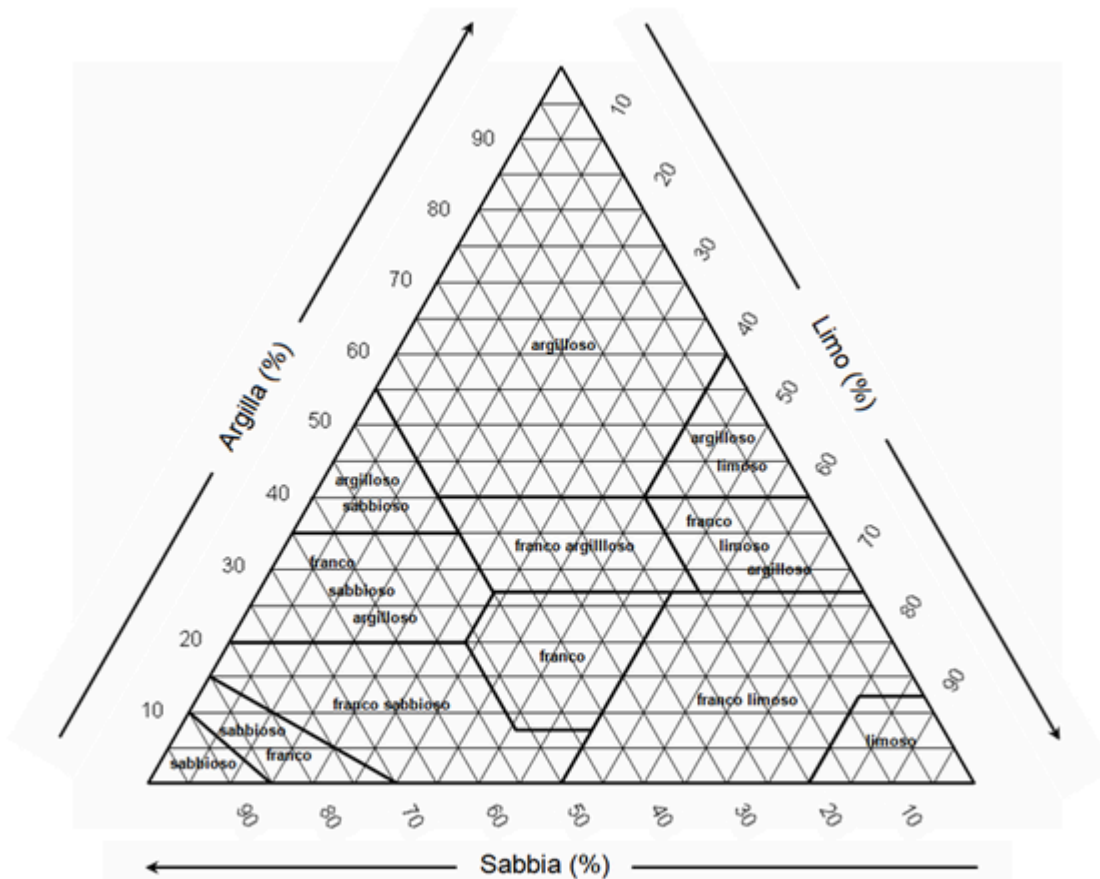


Figura 1: Triangolo della tessitura secondo USDA (Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti)

1.1 Costanti idrologiche

Le costanti idrologiche ci permettono di capire la quantità ed il tipo di acqua che il suolo può trattenere e, in funzione della distribuzione dei macro- e micropori, è possibile stimare un valore di quantità d'acqua disponibile per la coltura.

La capacità idrica massima è una costante che va ad indicare l'umidità del suolo presente quando tutta la porosità è saturata di acqua: il volume d'acqua contenuto nei macropori soggetto alla gravità, tenderà a percolare in poche ore.

La Capacità di campo è una costante che indica l'umidità del suolo quando i macropori sono vuoti ma la microporosità è completamente riempita di acqua. L'acqua non è più soggetta alla gravità, il processo di percolazione termina e il suolo

può perdere umidità per effetto della evapotraspirazione. Alla capacità di campo il suolo si presenta nelle condizioni ottimali per quanto riguarda il rapporto tra aria ed acqua nel terreno.

Il coefficiente di avvizzimento indica quella percentuale di umidità del suolo presente quando tutta la porosità è priva di umidità, e dunque, l'acqua non è disponibile per le piante. Rimane una piccola percentuale di umidità residua corrispondente all'acqua igroscopica della componente solida, trattenuta a tensioni molto alte negli interstizi dei colloidi argillosi.

L'intervallo di umidità fra capacità di campo e coefficiente di avvizzimento è l'acqua disponibile che la pianta riesce ad assorbire esercitando una depressione a livello radicale. Un aspetto importante da tenere in considerazione è che, nel corso del suo esaurimento, l'acqua disponibile residua è trattenuta con tensioni via via più alte, che fanno scendere il potenziale idrico da $-0,1/-0,3$ bar a -15 bar.

Ogni terreno presenta una propria dotazione di micropori, in relazione alla granulometria e alla struttura, e questo comporta una diversa tensione esercitata sul contenuto idrico del terreno. Tra i fattori che influenzano la ritenzione annoveriamo il tipo e la qualità delle argille presenti e il contenuto in sostanza organica: quest'ultima grazie alla diversa carica elettronegativa può attrarre le particelle di acqua, oppure creare aggregazioni, formando numerosi micropori nel suolo. Anche il modo in cui viene coltivato e gestito il suolo può alterare le costanti idrologiche: viene infatti modificato il profilo interno del suolo, con maggiore o minore compattamento e capacità drenante. Le proprietà fisiche del suolo, il mantenimento di una buona struttura, la stabilità degli aggregati, la capacità di trattenere l'acqua, l'aerazione, e il rapporto tra macro e micropori, sono legati al contenuto di sostanza organica del suolo. Per questo motivo l'incorporazione della sostanza organica nel terreno è una delle pratiche più comuni per migliorare le proprietà fisiche del suolo.

1.2 Effetti delle lavorazioni

Diversi metodi di lavorazione del terreno possono influenzare gli attributi fisici del suolo legati all'umidità, come la posizione e la distribuzione dei pori in eventuali aggregati specifici, la porosità totale, l'infiltrazione, la densità apparente. In effetti, tutti questi attributi fisici del suolo determinano la quantità di acqua disponibile alle piante all'interno del suolo. Una dimensione media dei pori più elevata è stata riportata in seguito a pratiche di gestione conservativa del suolo rispetto alla lavorazione convenzionale, determinando un maggiore capacità di campo (Benetti, 2023). Il tipo e la frequenza delle pratiche di lavorazione esercitano un'influenza preminente sul sistema poroso del suolo e di conseguenza sulla distribuzione delle dimensioni dei pori. Questo effetto si è osservato essere fortemente correlato alle proprietà del suolo come aggregazione, tessitura del suolo, contenuto di sostanza organica, rotazione colturale (Benetti et al., 2023). La capacità di stoccaggio idrico di un profilo di suolo dipende dalla profondità del suolo e dalla capacità del suolo di trattenere l'acqua contro le perdite derivanti dal drenaggio gravitazionale e dall'evapotraspirazione. La relazione tra la forza con cui l'acqua è trattenuta nel suolo e il contenuto volumetrico di umidità è rappresentata dalla curva di ritenzione idrica del suolo.

2. Effetti della sostanza organica

Il contenuto di sostanza organica del suolo gioca un ruolo cruciale nel funzionamento degli agroecosistemi. Il carbonio organico costituisce il punto di partenza e di arrivo del ciclo del carbonio, influenzando direttamente la fertilità del suolo e la sua capacità di sostenere colture e mantenere allo stesso tempo in esso la biodiversità. Attualmente, a causa dell'intensificazione delle produzioni e dell'aumento delle temperature medie, si osserva uno squilibrio evidente nel bilancio del ciclo della sostanza organica, con una marcata inclinazione verso la mineralizzazione, a discapito dell'accumulo e della fase di umificazione. È essenziale, in questo contesto, preservare in ambito agricolo un equilibrio tra l'accumulo (dato dalle piante, che sono fissatrici di carbonio attraverso la fotosintesi, e dagli apporti esogeni) e il consumo di sostanza organica, poiché questo equilibrio è fondamentale per non compromettere le condizioni di fertilità del terreno nel lungo periodo.

2.1 Da cosa è costituita la sostanza organica

La sostanza organica è costituita da una varietà di componenti, tra cui residui di piante, microrganismi e sostanze sintetizzate dalla popolazione vivente del terreno. La frazione organica si compone quindi di biomasse vegetali, animali e microbiche, nonché di necromasse in varie fasi di decomposizione delle strutture cellulari. Include anche molecole semplici che si liberano dalle biomasse e molecole umiche che si formano attraverso una serie di reazioni biochimiche durante il processo di umificazione. In funzione delle caratteristiche pedoclimatiche del suolo, la sostanza organica subisce diversi processi di trasformazione che riguardano la mineralizzazione e umificazione. Quest'ultimo è il processo più importante che avviene ad opera dei microrganismi che decompongono e trasformano la sostanza organica in humus stabile, una materia dal colore bruno scuro, poroso e dalla consistenza spugnosa. È all'humus che si attribuiscono le principali proprietà strutturali e nutritive della frazione organica del suolo.

2.2 Sostanza Organica e proprietà chimico-fisiche del terreno

Le proprietà fisiche del suolo, come la struttura, la resistenza meccanica, la ritenzione idrica, il colore e la capacità termica, sono strettamente correlate alla quantità e alla qualità della sostanza organica. A livelli quantitativi iniziali molto bassi, un aumento di sostanza organica può influire significativamente sulle caratteristiche fisiche del suolo, con variazioni, anche minime che provocano cambiamenti sostanziali (De Nobili e Maggioni, 1993). La presenza di sostanza organica si manifesta principalmente attraverso la modifica della struttura del terreno, dando luogo a fenomeni di aggregazione tra le particelle di argilla o limo con la formazione di glomeruli. L'effetto cementante della sostanza organica si evidenzia anche con quantità appena superiori allo 0,5%. La stabilità dei microaggregati è notevolmente influenzata dal contenuto di acidi umici e fulvici (Schwartzman et. al 1994), che possono legare le particelle di argilla così come gli ossidi e gli idrossidi di ferro e alluminio. Gli agenti organici che svolgono la funzione di legante possono essere classificati in base alla durata della loro azione cementante. Si distinguono:

- agenti leganti transienti: costituiti principalmente da polisaccaridi esterni alle strutture vegetali e agli organismi animali;
- agenti leganti temporanei: radici, ife e micorrize;
- agenti leganti persistenti: rappresentati dalle sostanze umiche, spesso stabilizzate ulteriormente attraverso l'associazione con cationi polivalenti (De Nobili e Maggioni, 1993).

L'acqua trattenuta dalla sostanza organica influisce notevolmente sul regime di temperatura del suolo a causa della sua elevata capacità termica. I terreni ricchi di sostanza organica si riscaldano e si raffreddano più lentamente quando il contenuto di acqua è elevato. Inoltre, il colore scuro derivante dalla presenza di sostanza organica influisce ulteriormente sul regime termico del suolo.

I terreni arricchiti di sostanza organica mostrano una maggiore resistenza ai fenomeni erosivi, (erosione intesa come dispersione di glomeruli del terreno e perdita di struttura superficiale) che si manifestano sempre più con maggiore intensità. Tuttavia, grazie all'azione assorbente della sostanza organica e all'effetto protettivo e di aggregazione che essa determina, fenomeni erosivi possono essere

limitati. I gruppi funzionali, costituenti della sostanza organica, possono facilmente formare complessi stabili come i chelati. Un complesso chelato si forma quando due o più gruppi funzionali, appartenenti ad una stessa molecola organica, chiamata chelante, si legano ad un metallo. Sono soprattutto i gruppi funzionali acidi (-COOH e -OH fenolici) e i gruppi funzionali basici (N-amminico), presenti in gran numero nella sostanza organica umificata, a permettere la formazione dei chelati.

Il contenuto di sostanza organica rappresenta uno dei principali fattori che influenzano il potenziale di ossidoriduzione di un suolo, agendo sia in modo diretto che indiretto. La presenza di una quantità significativa di sostanza organica contribuisce a mantenere una struttura del suolo ben definita, caratterizzata da adeguata porosità. Questo, a sua volta, favorisce condizioni ottimali di aerazione e drenaggio, impedendo il verificarsi di condizioni asfittiche. In situazioni di anaerobiosi, i microrganismi anaerobi facoltativi possono utilizzare molecole alternative all'ossigeno, ad esempio nitrati, ossidi e idrossidi di manganese e ferro, come accettori finali di elettroni. Le trasformazioni significative, come la modifica del pH e della conducibilità, nonché i processi di rilascio e fissazione del fosforo, sono tutti fenomeni il cui grado di intensità dipende strettamente dalla disponibilità di sostanza organica, oltre al contenuto di aria nel suolo.

2.2 Effetti sulla fertilità del suolo

Le proprietà fisiche del suolo sono strettamente legate alla quantità e alla qualità della sostanza organica. Anche variazioni minime nel suo contenuto possono causare significativi cambiamenti nelle caratteristiche fisiche del suolo (Jastrow, 1996). La presenza di sostanza organica, interagendo con gli altri componenti del suolo, contribuisce alla formazione di una struttura del suolo favorevole a promuovere un adeguato ricambio dell'aria e una maggiore facilità di drenaggio dell'acqua, soprattutto nei suoli argillosi. Inoltre, migliora la penetrazione delle radici, aumenta la resistenza del suolo alla compattazione e alla polverizzazione, favorendo così condizioni ottimali per lo sviluppo e l'attività della biomassa vegetale. La sostanza organica influisce notevolmente sulla densità apparente del suolo: anche una piccola variazione nel suo contenuto, ad esempio dal 1% al 3%, porta a una diminuzione del 50% della densità apparente del suolo. Questo è dovuto all'aumento della porosità derivante dalla formazione di nuovi aggregati (Périé e Ouimet, 2008).

La sostanza organica influenza la capacità di ritenzione idrica del terreno non solo attraverso la sua influenza sulla struttura e la porosità, ma anche grazie all'effetto diretto delle sostanze umiche, che possono trattenere acqua fino a venti volte il loro peso (Businelli, 2009). Nella nutrizione delle piante, la sostanza organica svolge un ruolo cruciale. Gli elementi nutritivi presenti in essa, come azoto, fosforo, potassio, magnesio, ferro, zolfo e microelementi, costituiscono una riserva assimilabile a lungo termine nel suolo. La sostanza organica è chimicamente reattiva: rappresenta fino al 46% della superficie specifica del suolo ed è la frazione nella quale avvengono la maggior parte delle reazioni chimiche tra la fase solida e liquida. Presenta inoltre un'elevata capacità di scambio cationica, contribuendo in media al 50% in più rispetto ai costituenti minerali (Businelli, 2009), con variazioni in base alla copertura vegetale, alle condizioni climatiche e al tipo di suolo (De Nobili e Maggioni, 1993). La sostanza organica riveste un ruolo cruciale nel regolare la disponibilità dei microelementi. La solubilità di metalli quali ferro, zinco, nichel, cobalto e manganese è influenzata dalla formazione di complessi tra gli ioni metallici e le frazioni solubili della sostanza organica. In alcuni casi, possono svilupparsi complessi particolarmente stabili, noti come chelati, i quali esercitano un controllo significativo sulla disponibilità del metallo per le piante. La sostanza organica è in grado di formare composti più o meno stabili e solubili con ioni metallici quali il ferro, il rame ed altri micronutrienti favorendone l'assorbimento radicale, preservando la loro solubilizzazione.

2.4 Sostanza organica ed effetto tampone

La capacità tampone del suolo, ovvero la sua capacità di resistere alle variazioni di pH, è attribuibile anche alla presenza di sostanza organica, specialmente alla frazione ricca di gruppi carbossilici e ossidrilici fenolici. Questo contribuisce a mantenere valori di pH ottimali nel terreno, favorendo la realizzazione di molte reazioni chimiche e processi biologici. In modo indiretto, la sostanza organica influisce sul potenziale di ossidoriduzione del suolo, poiché contribuisce a preservare una struttura del suolo di qualità e una porosità adeguata. Ciò permette condizioni ottimali di aerazione e drenaggio del suolo, impedendo lo svilupparsi di condizioni asfittiche (Carter, 2002)

2.5 Attività microbica come agente legante

Durante l'umificazione vengono liberate numerose sostanze extracellulari che agiscono come agenti leganti sui glomeruli del suolo. Il ruolo dei carboidrati nel miglioramento della struttura del suolo è variabile in relazione alla fonte di carbonio. I carboidrati prodotti dall'attività microbica tendono ad essere molto fini e, legandosi alle argille e ai limi, resistono alla decomposizione. I polisaccaridi possono formare legami chimici tra le particelle del suolo, svolgendo un ruolo importante nella creazione di una struttura aggregata. Essendo fortemente adsorbiti dalle superfici minerali fungono da ponti e permettono legami tra le particelle di suolo. La loro natura adesiva li rende essenziali nella formazione e nella stabilità degli aggregati.

Le molecole fenoliche sono molecole organiche che possono complessare cationi e agire come ponti tra le particelle del suolo. I fenoli sono precursori delle sostanze umiche e ne favoriscono l'aggregazione. Una minore aggregazione delle particelle di suolo può essere causa di carenza di fenoli all'interno dei residui colturali, come per esempio nel caso della soia, nei cui residui si è osservato un basso contenuto fenolico, mentre un'elevata aggregazione è spesso associata a piante ad alto contenuto di fenoli (Martens, 2000). La lignina è una componente della parete cellulare delle piante ed è una molecola complessa. La sua lenta decomposizione fornisce una fonte di materiale organico resistente che può contribuire alla stabilità degli aggregati. I lipidi possono essere una parte della frazione organica del suolo, e la loro presenza può influenzare la stabilità degli aggregati. La loro natura idrofoba può contribuire a respingere l'acqua e aumentare la coesione tra le particelle del suolo (Dinel, 1997; Pare, 1999). L'efficacia dei lipidi nel migliorare la stabilità degli aggregati può essere correlata alla mineralogia dell'argilla: i lipidi svolgono un ruolo più importante nei terreni contenenti illite, rispetto ai terreni con maggiore abbondanza di caolinite o smectite (Dinel et al., 1997). Questi agenti di aggregazione possono interagire tra loro e rispondere a variazioni ambientali e pratiche di gestione del suolo. La conoscenza di come questi agenti operano all'interno di un determinato sistema di suolo può aiutare a migliorare la gestione del suolo per preservare o migliorare la sua struttura aggregata (Pare, 1999).

2.6 Caratteristiche dell'humus ed effetto cementante

L'humus, o la materia organica decomposta, rappresenta la parte più attiva della sostanza organica del suolo: esso interagisce con la frazione minerale e con la soluzione circolante, influenzando le proprietà chimiche e fisiche del terreno. L'humus lo si può identificare come un'associazione di molecole di origine biologica con peso molecolare relativamente basso. È in grado di comportarsi come un colloide idrofilo, con capacità di flocculare in suoli leggermente acidi, mentre nei suoli alcalini è allo stato disperso. L'humus interagisce con le componenti minerali del terreno formando complessi organo-minerali, agendo come cementante, legando gli aggregati primari (formati dai minerali argillosi) in modo da legare aggregati strutturali secondari (processo regolato dal pH del suolo e dalla presenza di calcio). L'humus è in grado, inoltre, di interagire con i macropori, andando a creare strutture più complesse, con maggiore microporosità, rendendo gli spazi vuoti più piccoli e aumentando l'area superficiale specifica con un incremento dell'elettronegatività all'interno degli agglomerati del suolo. Come un colloide idrofilo, l'humus ha la proprietà intrinseca di legare le molecole dell'acqua sulla sua superficie. Di conseguenza l'humus ha una notevole capacità di ritenzione idrica. Va precisato che la tensione matriciale dell'acqua nell'humus ha valori più bassi: perciò, perché avvenga l'assorbimento dell'acqua attraverso l'apparato radicale, sarà necessario esercitare una depressione maggiore da parte delle piante per vincere tale tensione (D'Acqui 1999)

3. Sostanza organica e ritenzione idrica

La sostanza organica ha una grande influenza sulla struttura degli aggregati del suolo e sulla sua porosità, quindi anche sulla sua capacità di ritenzione idrica. L'effetto della sostanza organica nel suolo, il differente contenuto di umidità, il punto di avvizzimento, dipendono da una serie di fattori, tra cui proprietà intrinseche del suolo, uso del suolo, clima e gestione.

3.1 Fattori da tenere in considerazione

La sostanza organica nel suolo va a migliorare la struttura e la sua aggregazione, che è organizzata in macro e micropori, e va ad aumentare lo spazio tra i microaggregati e tra gli aggregati. La formazione di aggregati di dimensioni maggiori migliora la quantità di pori che trattengono l'acqua al di sotto di pressioni di 0,33 bar. I residui colturali, che andranno a formare materia organica attraverso la decomposizione, si legheranno alle particelle del terreno andando a formare agglomerati di maggiori dimensioni, aumentando così l'aria all'interno del suolo e il volume dei pori. La distribuzione delle dimensioni dei pori del suolo viene ampiamente influenzata dalla sostanza organica andando a evidenziare cambiamenti significativi nelle curve di ritenzione idrica nell'intervallo di acqua disponibile per le piante (Kaldivko e Nelson, 1979; Olness et al 2005). La relazione tra la ritenzione idrica del suolo e il contenuto di carbonio organico è influenzata dalle proporzioni dei componenti minerali, che sono fattore di variabilità. Per esempio, l'aggiunta di sostanza organica in suoli con una percentuale di argilla elevata va, da un lato, ad aumentare la porosità, la permeabilità e a diminuire la densità apparente, ma non è evidente un effetto tangibile sulla ritenzione idrica (Rawls, 2003). I micropori, che trattengono l'acqua ad una pressione superiore, sono costituiti dagli spazi tra i fasci di piastrine di argilla. L'aggiunta di materia organica non può differire dall'organizzazione di tali pori: le particelle di argilla hanno un'elevata elettronegatività e formano una struttura molto rigida, dove l'aggiunta di

sostanza organica risulta influente. Pertanto, si è riscontrato cambiamenti relativamente piccoli a livelli di depressione di 15 bar (Rawls, 2003).

I micropori contribuiscono fino al 35% alla porosità totale nei terreni argillosi e riescono ad esercitare una idrofilia a livello superficiale molto elevata, responsabile della ritenzione di acqua attorno al punto di avvizzimento. Una risposta relativamente più elevata di questi tipi di pori ai trattamenti di materia organica può essere attribuita alla formazione di complessi di argilla e materia organica (Rawls, 2003).

3.2 Effetti sulla ritenzione idrica

L'effetto pronunciato della sostanza organica del suolo sul contenuto di acqua disponibile, suggerisce che la sostanza organica del suolo deve essere considerata un fattore chiave nella produttività agricola e può avere un effetto positivo sulla conservazione e sull'efficientamento dell'utilizzo dell'acqua. La sostanza organica può trattenere fino a venti volte il suo peso di acqua: le particelle della sostanza organica hanno una superficie carica elettronegativa che attrae l'acqua in modo da aderire sulla superficie come un adesivo statico. È possibile, infatti, notare che la ritenzione idrica di un terreno limo-argilloso, contenente il 4% di sostanza organica in peso, è più del doppio di quello di uno stesso terreno contenente l'1% di sostanza organica in peso (Hudson, 1994). I cambiamenti e gli effetti più evidenti della sostanza organica sulla curva di ritenzione idrica sono stati osservati nelle prossimità punto di avvizzimento (pressione di -15 bar) e al di sopra della capacità di campo (pressione - 0,33 bar) (Uygur, 2005). I risultati osservati variano a seconda della tessitura, e dai microelementi presenti nel suolo. In un campione di terreno, con dotazione bassa di argilla, un aumento della sostanza organica dallo 0,30% al 2,5%, è in grado di incrementare la sua capacità di ritenzione idrica fino ad un 5% di acqua gravimetrica. Invece, in terreni agrari con tessitura a medio impasto, con contenuto di argilla pari o minore del 40%, la stessa variazione di carbonio organico permette un aumento del contenuto di acqua disponibile di oltre il 10% (Olness et al., 2005). L'effetto dell'aumento del contenuto di acqua disponibile con l'aumento del contenuto di carbonio organico cessa a circa il 40% del contenuto di argilla. Si nota una diminuzione della ritenzione idrica nei suoli già ben strutturati, dal contenuto di argilla dal 40 al 60%. Un aumento consistente della sostanza organica può portare ad una eccessiva presenza di macropori, influenzando la struttura già capace di

un'ottima ritenzione idrica, peggiorando, in certi casi, questa proprietà in prossimità del punto di avvizzimento. Mentre, con contenuti di argilla superiori al 60%, l'aumento della sostanza organica risulta essere molto favorevole, andando ad aumentare i macropori, e quindi il flusso d'aria all'interno del suolo, favorire l'attività microbica, diminuendo la densità apparente, rendendo il suolo più lavorabile e gestibile a livello agronomico e soprattutto incrementando la capacità di campo (Hudson, 1994). Se parliamo di contenuti elevati di sostanza organica, superiori al 5%, non si notano effetti negativi in nessuna tipologia di tessitura. L'aumento di capacità di ritenzione idrica si riscontra in terreni diversi, anche argillosi con aumento della macro e microporosità. In generale la sostanza organica ha effetto strutturante a livello del suolo, contribuendo maggiormente all'aumento della capacità di campo (-33 kPa) rispetto al punto di avvizzimento (-1500 kPa) (Rawls, 2003).

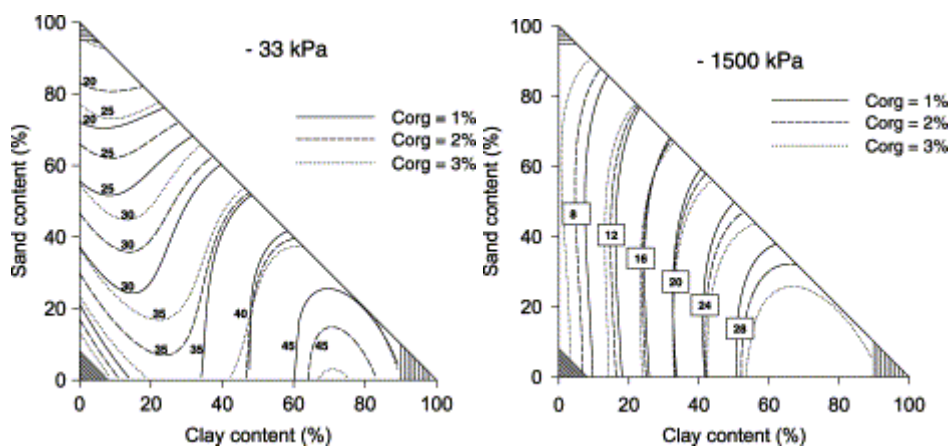


Figura 1: Isolinee del contenuto idrico del suolo a -33 kPa e -1500kPa nel triangolo tessiturale a diversi contenuti di carbonio organico. Non erano disponibili dati per le aree d'angolo escluse del triangolo.

In figura 1 si può notare che per la stessa proporzione di argilla e sabbia, la ritenzione idrica aumenta principalmente all'aumentare del contenuto di carbonio organico, fatta eccezione per i suoli con tessitura fine. Vengono rappresentati con delle isolee il contenuto idrico del suolo a -33kPa e -1500kPa nel triangolo della tessitura a diversi contenuti di carbonio organico.

3.3 Effetto della sostanza organica nei terreni italiani

Un recente studio (Bonfante, 2020) ha preso in esame 6 suoli italiani, per confrontare e analizzare la situazione di determinati suoli a livello di sostanza organica e ritenzione idrica (Tabella 1 e Tabella 2).

Tabella 1: La tessitura varia da sabbia limosa a limo argilloso, mentre i contenuti di sostanza organica negli orizzonti superficiali sono relativamente bassi, compresi tra lo 0,34% e il 2,60%. Tutti i suoli selezionati si trovano in un ambiente di pianura alluvionale, cinque nella regione Campania (P1, P2, P3, P5 e P6; nel sud Italia) e uno nella regione Lombardia (P4; nel nord Italia). Durante la stagione di crescita del mais (da aprile a settembre), il clima per i suoli della regione Campania è caratterizzato da una media mensile di precipitazioni di 47 mm \pm 26 e una temperatura media dell'aria di 19,7°C \pm 4,3, mentre per il suolo P4 nella regione Lombardia il clima è caldo e temperato, con una media mensile di precipitazioni di 73 mm \pm 9 e una temperatura media dell'aria di 19,4°C \pm 3,8.

ID	Classificazione	Carbonio Org.	Argilla	Limo	Sabbia
P1	Franco Limoso Argilloso	0.3	32.4	53.9	13.7
P2	Franco Argilloso	2.3	35.4	43.0	21.6
P3	Franco Limoso Argilloso	2.6	32.8	57.1	10.1
P4	Franco	1.4	17.9	32.6	49.5
P5	Franco	2.6	10.5	38.5	51.0
P6	Sabbioso Franco	1.7	4.1	18.6	77.3

Tabella 2: Variazione della ritenzione idrica al variare della percentuale di sostanza organica.

S.O.	Contenuto di acqua (0 - 80 cm) (mm)					
	P1 (0,3%)	P2 (2,3%)	P3 (2,6%)	P4 (1,4%)	P5 (2,8%)	P6 (1,7%)
attuale	97,1	99,6	85,3	89,0	120,0	107,1
2%	97,3	100,0	86,0	89,6	118,4	108,8
4%	91,2	97,8	83,6	91,3	122,2	120,1

Come anticipato nei paragrafi precedenti, la sostanza organica influisce con più incidenza su quelli che sono i terreni tendenzialmente più sciolti, avendo dei riscontri positivi anche su quelli che sono gli scenari futuri di cambiamento climatico in alcune

zone del sud Italia, a rischio desertificazione del suolo. Come si vede da queste analisi, non si sono riscontrati effetti positivi rilevanti in seguito all'aggiunta di sostanza organica, se non su terreno sabbioso. Addirittura, nei terreni tendenzialmente più argillosi, l'aggiunta di sostanza organica ha portato ad una minore capacità di ritenzione idrica. Una prima analisi potrebbe far pensare che l'aumento della sostanza organica nel terreno comporti un effetto negativo (se non quello di rallentare l'evapotraspirazione e preservare l'umidità). In realtà comporta un cambiamento nella curva di ritenzione idrica che conseguentemente agevola la modalità di assorbimento dell'acqua da parte dell'apparato radicale della pianta.

3.4 Suoli a grana grossa reagiscono positivamente

I benefici dell'apporto di sostanza organica si notano maggiormente in terreni con tessitura grossolana, che di per sé hanno una dotazione molto povera di micropori, e hanno minime capacità di trattenere l'acqua gravitazionale. I suoli grossolani o generalmente sabbiosi rispondono positivamente all'aggiunta di sostanza organica: si vengono a creare agglomerati molto utili per la ritenzione idrica, andando a formare una struttura più fine all'interno delle particelle sabbiose, aumentando anche quella che è la superficie igroscopica del suolo, questi suoli tendono generalmente a contenere più composti alchilici (e meno carboidrati e proteine) conferendo idrofobicità (Capriel et al., 1995). Nei terreni generalmente più fini e argillosi, con capacità elettronegative maggiori e una dotazione di micropori considerevole, l'aggiunta di sostanza organica ha un effetto mitigato (Rawls, 2003).

L'effetto delle modifiche nel contenuto di carbonio organico sulla capacità di ritenzione idrica dipende dalla proporzione della frazione granulometrica della tessitura del suolo e dalla quantità di carbonio organico inizialmente presente. Nei suoli dalla tessitura grossolana, con bassi livelli di carbonio, un apporto minimo di sostanza organica va a determinare un evidente aumento della ritenzione idrica.

3.5 Tipi di argilla differenti reagiscono in modo differente con la sostanza organica.

L'effetto della materia organica del suolo sulla capacità di ritenzione idrica disponibile (AWHC) varia a seconda dei minerali e sul tipo di argilla con cui entra in contatto.

Suoli con più del 40% di argilla, all'interno dei quali possono essere distinte due tipologie predominanti di minerali argillosi, la caolinite e la smectite, hanno dimostrato una reazione differente all'aggiunta di materia organica al suolo. In media, un aumento dell'1% nella materia organica ha causato un incremento dell'AWHC dello 0,23% (volume) in suoli con prevalenza di smectite, rispetto all'1,03% in suoli con prevalenza di caolinite. La stretta associazione tra la materia organica umificata e l'argilla colloidale, come rivestimenti organici, suggerisce che la struttura e la funzione della materia organica del suolo possano variare in base alla composizione mineralogica. Le proprietà dei suoli con smectite, come la loro capacità di contrarsi ed espandersi, a seguito di variazioni di umidità, e l'alta capacità di scambio cationico, amplificano gli effetti benefici dell'apporto di materia organica suolo sull'AWHC (Libohova, 2018).

3.6 Flusso d'acqua all'interno del suolo

La tessitura del suolo gioca un ruolo cruciale nella formazione degli aggregati e nei tipi di legami presenti all'interno di essi. All'interno del suolo vengono a crearsi delle forze attrattive date dalla granulometria del terreno. Ad esempio, i legami ionici argillosi, molto resistenti grazie alla elettronegatività dell'argilla, non subiscono elevate modificazioni della loro struttura da parte di lavorazioni meccaniche agricole o fattori ambientali. Su piano territoriale, la tessitura del suolo è un fattore fortemente correlato alla capacità di accumulare acqua, con diversi valori di acqua gravitazionale e matriciale. Sia prove di laboratorio che di pieno campo hanno evidenziato che le dimensioni della granulometria influenzano direttamente la capacità dell'acqua di aderire alle superfici, la sua trasmissione gravimetrica e la capacità di consentire l'innalzamento capillare (Franzluebbers, 2001). L'acqua capillare è quella frazione idrica su cui agiscono le forze di tensione superficiale, che penetra e si muove all'interno della microporosità del terreno. Una parte non è disponibile alla pianta perché tenuta legata dalle tensioni matriciali, mentre quella contenuta nei capillari con diametro 0.5-10 micron è disponibile, pur muovendosi con relativa lentezza. Il fenomeno della capillarità è dovuto all'azione combinata delle forze di adesione e di coesione dell'acqua. Questo è particolarmente rilevante quando esiste un intervallo ottimale di dimensioni delle particelle che favorisce l'adesione igroscopica dell'acqua, agevolato notevolmente dalle componenti

organiche che fungono da attrattori dell'acqua (Rajkai, 2015). Questo fenomeno risulta essere un grande vantaggio per le piante e il loro apparato radicale, perché la capillarità consente di agevolare l'assorbimento dell'acqua da parte delle radici.

Le tendenze idrofile dei colloidali mantengono un film d'acqua all'interno dei complessi aggregati e quindi contribuiscono alla trasmissione dell'acqua. Anche lo spazio dei pori nel suolo è modificato dalla composizione della sostanza organica: l'idrofobicità di alcuni elementi agisce per ostruire selettivamente i pori del suolo. Dall'orientamento delle molecole di carbonio, piccoli cambiamenti nella matrice organica all'interno degli aggregati possono alterare il flusso d'acqua dall'esterno e all'interno delle molecole e degli aggregati (Bryant, 2015).

4. Carenza di sostanza organica nei suoli

Date le crescenti preoccupazioni legate ai cambiamenti climatici globali, si osserva un crescente interesse a livello mondiale verso il raggiungimento della neutralità del carbonio. Preservare l'umidità e la sostanza organica del suolo, con la costante aumento delle temperature medie, risulta essere sempre più un punto fondamentale da tenere in considerazione dal punto di vista della sostenibilità della produzione agricola. In tutto il mondo, la riserva di sostanza organica generalmente aumenta al diminuire della temperatura annua, ma l'aumento delle concentrazioni di gas serra nell'atmosfera prospettano un'accelerazione del tasso di riscaldamento globale, che condurrà inevitabilmente alla modifica quelli che sono i processi pedogenetici e biochimici del suolo. Ciò porterebbe, in seguito alla stimolazione dei processi di mineralizzazione della sostanza organica, alla perdita ulteriore di carbonio dal terreno con conseguente emissione di ulteriore CO₂ (Kirschbaum, 2000). La diminuzione della sostanza organica nel suolo può essere causata da diversi fattori: la ridotta presenza di macro e microorganismi responsabili della decomposizione della sostanza organica, l'accelerazione del processo di mineralizzazione dovuta ad alterazioni dei fattori naturali (come l'aumento della temperatura) o antropogenici (come l'uso intensivo di terreni agricoli), ecc.... Il degrado della sostanza organica nel suolo può comportare la perdita di fertilità, la diminuzione della capacità del terreno di trattenere acqua e nutrienti, l'aumento del rischio di erosione e la compromissione della salute generale del suolo. Pertanto, la gestione sostenibile dei suoli e il mantenimento della sostanza organica sono essenziali per garantire la produttività agricola e la salvaguardia dell'ecosistema agrario.

4.1 Agenti che condizionano la sostanza organica e la struttura del suolo

Il clima ha un impatto significativo sulla formazione degli aggregati del suolo. I cambiamenti nella temperatura e nell'umidità, i cicli di bagnato-secco e i cicli di gelo-scioglimento possono influenzare la disposizione delle particelle nel suolo e migliorare l'aggregazione (Singer et al., 1992; Geroy, 2011). Le temperature più elevate aumentano l'attività biologica di respirazione cellulare dei microrganismi nel

suolo, mentre le temperature più basse portano a una maggiore concentrazione di carbonio organico del suolo. Nei suoli freddi e umidi, il carbonio organico del suolo tende ad essere meno disponibile rispetto ai suoli caldi e secchi (Franzluebbers, 2001). I cambiamenti climatici stanno portando il clima e gli eventi meteorologici ad essere più imprevedibili, conducendo spesso a periodi prolungati di siccità, a piogge molto forti, creando fenomeni di erosione, causando l'allontanamento delle particelle più leggere (come minerali argillosi e molecole organiche) dal campo (Amezqueta, 1999).

I terreni a tessitura fine, come l'argilla, hanno una maggiore capacità di trattenere sostanza organica, nutrienti e acqua, rendendo le condizioni favorevoli per la crescita delle piante. I terreni a tessitura grossolana sono meglio aerati e permettono una più rapida decomposizione della sostanza organica.

4.1.1 I cicli di bagnato-secco

Questo può influenzare la formazione degli aggregati. Nei suoli con argille che si espandono durante l'umidità, i cicli di bagnato-secco possono rompere gli aggregati poiché le particelle di argilla si separano da altre particelle, diminuendo la stabilità degli aggregati. Tuttavia, nei suoli con argille non espansive, i cicli di bagnato-secco possono avere un effetto positivo iniziale sulla formazione di aggregati (Singer et al., 1992).

4.1.2 Lavorazione del terreno

La lavorazione del terreno aumenta la circolazione dell'ossigeno e la temperatura del suolo, accelerando la decomposizione della sostanza organica. Tuttavia, le lavorazioni e l'erosione possono portare alla perdita di sostanza organica dalla superficie del suolo, anche dovuta alla maggiore velocità di mineralizzazione. Le coltivazioni possono anche contribuire meno alla sostanza organica rispetto alla vegetazione naturale a causa della rimozione della biomassa prodotta e, talvolta, dei residui colturali ().

4.1.3 Vegetazione

La vegetazione, come prati, foreste e colture, possono contribuire in modo significativo all'apporto di sostanza organica del suolo. Le radici delle piante e la loro

rizosfera provocano alterazioni fisiche, chimiche e biologiche che influenzano l'aggregazione, grazie anche al rilascio di essudati radicali con capacità cementante sulle particelle del suolo (Rillig et al., 2002). Questo effetto tende ad aumentare con l'aumento della densità e della lunghezza delle radici, le associazioni microbiche e la percentuale di copertura influenza la stabilizzazione degli aggregati. La rizosfera ospita una vasta popolazione di microrganismi che contribuiscono all'aumento o alla perdita della sostanza organica, relazionata al tipo di argilla e dalla dimensione degli aggregati (Mendes et al., 1999). In generale la vegetazione è una fonte importante di sostanza organica, specialmente in prati e terreni boschivi. La gestione del suolo, compreso il mantenimento o la rimozione dei residui colturali, influisce sull'apporto di sostanza organica da parte delle coltivazioni.

4.1.4 Mineralizzazione e umificazione

L'umificazione è un insieme di processi enzimatici, dovuti a batteri e funghi, attraverso cui la sostanza organica in decomposizione subisce un processo di rielaborazione. L'umificazione avviene più intensamente negli strati superficiali del terreno e subisce l'influenza dei fattori esterni che agiscono, su microrganismi, quali temperatura, umidità e acidità del terreno. La mineralizzazione è un insieme di processi demolitivi, con formazione di composti inorganici, sotto forma di acqua, anidride carbonica e sali minerali. La facilità con cui vengono decomposti i residui colturali, dipende da molti fattori, in particolar modo il clima, le dimensioni dei residui e la loro composizione. Tipologie di componenti dei residui come (azoto, fosforo, zolfo) possono favorire la crescita di determinati microrganismi, giocando un ruolo fondamentale sulla velocità di decomposizione della materia organica e sulla struttura del suolo. Altro fattore determinante è il rapporto carbonio/azoto (C/N) il cui valore è influenzato principalmente dall'elevato contenuto di lignina. La materia organica del suolo viene attaccata e degradata tanto più velocemente quanto è ricca di azoto, in quanto favorisce la crescita dei microrganismi decompositori. Le dimensioni degli aggregati del suolo e la tipologia e quantità di residui colturali vanno a determinare l'attività dei microrganismi intesi come funghi e batteri (Mendes, 1999; Schutter e Dick 2002). Gli aggregati del suolo vanno a determinare il rapporto batteri/funghi, più basso nei macroaggregati rispetto ai microaggregati. L'attività batterica tende a dominare le micro-aggregazioni mentre l'attività fungina favorisce

le formazioni dei microaggregati (Schutter e Dick, 2002; Tisdall e Oades,1982). Le ife di funghi e funghi micorrizici migliorano in generale la stabilità della struttura del suolo, andando a riordinare e favorire la compatibilità dei microaggregati, favorendo la loro unione formando aggregati complessi.

5. Come aumentare la sostanza organica del suolo

L'aumento della sostanza organica è correlato ad un aumento dell'aggregazione tra le componenti del suolo, migliorandone la struttura. Le proprietà chimiche della sostanza organica vanno a determinare quelle che sono le modalità di aggregazione, e di decomposizione dei residui colturali (Schulten e Leinweber, 2000; Jastrow, 1996). Nella gestione del suolo per migliorare la struttura e l'aggregazione del suolo, sono importanti diverse pratiche;

5.1 Lavorazioni del suolo

Le lavorazioni tradizionali del suolo, (come ad esempio l'aratura), vanno ad alterare quelle che sono le caratteristiche pedologiche del suolo interferendo con la microflora e microfauna, importanti per una struttura del suolo, e andando ad esporre maggiormente la sostanza organica portandola a mineralizzare più velocemente (Filho et al., 2002). Interrando i residui in profondità si va a perdere quell'effetto spugna che invece potrebbe rivelarsi vantaggioso durante eventi meteorologici consistenti, accentuando la perdita di struttura superficiale e nutrienti. In generale, nei sistemi di gestione senza aratura (no-till) si hanno aggregati più stabili con più carbonio organico nello strato coltivabile del suolo rispetto ai sistemi di coltivazione tradizionali (Logan et al., 1991; Warkentin, 2001). La riduzione della lavorazione può anche favorire la formazione di macropori e biocanali nel terreno, migliorando quella che è la gestione dei residui colturali per avere un aumento della sostanza organica, influenzando il movimento e la disponibilità dell'acqua nel suolo.

5.2 Concimazione organica e compost

L'uso di fertilizzanti organici come il letame può migliorare la struttura del suolo aumentando la macro-aggregazione e la resistenza allo sbriciolamento. Tuttavia, potrebbe diminuire la stabilità degli aggregati andando a creare fenomeni di dispersione (particelle terrose individuali che si disperdono a causa di forze elevate di repulsione tra le particelle di argilla), promosse da alte concentrazioni di particelle di sodio scambiabile: Na^+ è un agente altamente dispersivo (Qadir e Oster, 2002). L'aumento del carbonio organico nel suolo dovuto all'applicazione di letame aumenta la porosità del suolo e l'attività microbica, che influisce sulla stabilità degli aggregati.

L'attività microbica risulta, inoltre, fondamentale nella tempistica di trasformazione dei residui colturali in sostanza organica (Schlesinger, 1990; Viaud et. al 2011).

5.3 Fertilizzanti e nutrienti

L'uso di fertilizzanti può influenzare la struttura del suolo in modi complessi. Ad esempio, i fertilizzanti fosfatici possono promuovere l'aggregazione attraverso la mobilizzazione di alluminio e la precipitazione di fosfato di alluminio come agente cementante per formare aggregati stabili. Gli effetti del P possono essere anche indiretti, poiché la disponibilità del fosforo, influenza la crescita e l'espansione delle radici e favorisce la colonizzazione dei funghi micorrizici incentivando l'attività microbiologica del suolo (Facelli e Facelli, 2002).

5.4 Gestione delle colture

La scelta delle coltivazioni e delle rotazioni colturali assume un ruolo fondamentale offrendo differenti contributi al tenore della sostanza organica. Su questo concetto si basa la tradizionale distinzione, fra colture miglioratrici e depauperanti. L'uso di colture di copertura può influenzare la dinamica degli aggregati del suolo influenzando l'attività microbiologica. Le colture di copertura, ad esempio, possono aumentare l'input di carbonio nel suolo, ridurre l'erosione e migliorare la stabilità degli aggregati. Questi effetti dipendono dalla composizione chimica delle colture, dalla struttura radicale e dalla capacità di modificare le proprietà chimiche e biologiche del suolo. Le radici trattengono e allineano le particelle del terreno e rilasciano essudati che provocano un'alterazione fisica. La stabilità dell'aggregato risulta essere maggiore nella rizosfera (porzione di suolo esplorato dalle radici), rispetto al suolo non interessato dalle radici (Caravaca et al., 2002). Inoltre, la rizosfera ospita una vasta popolazione di microrganismi e microrganismi che contribuiscono all'accumulo di sostanza organica.

5.4.1 Cover Crop

L'utilizzo delle cover crop risulta essere una pratica molto efficace per fissare carbonio, ed è sempre più utilizzata in Italia. Anche l'Unione Europea si sta orientando nel rendere l'agricoltura sempre più sostenibile sia a livello territoriale, sia

a livello di biodiversità. La nuova PAC (politica agraria comune) incentiva proprio l'utilizzo delle cover crop per preservare la sostanza organica ed il suolo, che risulta sempre più una risorsa non rinnovabile. L'utilizzo di cover crop è una pratica sostenibile di coltivazione del terreno che aiuta la fertilità del suolo e migliora la sua struttura. Vengono seminate durante il periodo di maggese del terreno e nel periodo invernale: la loro presenza sul terreno va a diminuire la percolazione dell'acqua e di conseguenza anche la lisciviazione dei nitrati contenuti nel suolo. Gli effetti combinati delle colture di copertura e mantenimento dei residui possono avere un impatto significativo sulla salute e sulle funzioni del suolo. I residui delle colture principali e delle colture di copertura contribuiscono alla sostanza organica del suolo e alla liberazione di azoto, migliorando la fertilità per le colture successive. Le colture di copertura brassicacee, graminacee e leguminose (quest'ultime fissatrici di azoto nel terreno), arricchiscono il suolo di concime verde (materia organica non decomposta). Inoltre, le cover crop possono contribuire alla conservazione idrica migliorando l'infiltrazione, riducendo il deflusso superficiale, l'evapotraspirazione e il drenaggio del terreno. Sia le colture di copertura che i residui contribuiscono in modo diverso al miglioramento della struttura e della stabilità del suolo, favorendo l'aggregazione tramite agenti leganti rilasciati dalle radici e aumentando l'input di carbonio organico nel suolo. Le cover crop, agiscono inoltre come un ostacolo all'evaporazione dell'acqua dal suolo e permettono una migliore penetrazione dell'acqua nel profilo del suolo. Inoltre, l'utilizzo di colture di copertura influenza significativamente il contenuto di umidità nel suolo, influenzando la disponibilità di acqua per la coltivazione successiva. L'uso delle colture di copertura ha mostrato un'importante conservazione dell'umidità del suolo, tuttavia, durante la loro crescita, potrebbero limitare l'acqua disponibile per le colture successive. Nonostante ciò, il loro effetto positivo sull'umidità del suolo dopo la terminazione della coltura da reddito suggerisce un miglioramento nell'uso efficiente dell'acqua e una maggiore produttività delle colture. (Dann, 2021; Paye, 2022; Souza, 2016). Tuttavia, l'interazione tra colture di copertura, gestione dei residui e il loro impatto sui rendimenti delle colture principali e sui redditi agricoli rimane incerta. Allo stesso modo, sebbene la diversità delle rotazioni colturali sia incoraggiata per una migliore produzione agricola nella conservazione del suolo, mancano valutazioni complete delle colture di copertura e dei livelli di mantenimento dei residui in diversi sistemi di rotazione.

5.5 Minima lavorazione e acqua disponibile

La pratica della minima lavorazione ha dei benefici, oltre che sugli aggregati, anche sulle attività agronomiche. Una variabile molto importante da tenere in considerazione sono i residui colturali. Questi, prima di essere trasformati in sostanza organica, devono essere attaccati dai microorganismi. Ma il mantenimento dei residui colturali può portare degli svantaggi. Un terreno coltivato, in cui vengono interrati i residui colturali, potrà trattenere più acqua, con una maggiore capacità di campo, ma avrà un punto di avvizzimento più alto: i residui colturali, infatti, non riescono a cedere la loro umidità facilmente nel suolo. In generale il suolo presenta minori micropori. In caso di una coltura coltivata su terreno lavorato tradizionalmente e con elevata quantità di residui colturali, come per esempio una coltura di secondo raccolto (ad esempio preceduta da una coltivazione del frumento), avrà meno acqua a disposizione nei primi centimetri di suolo, con più probabilità di stress idrico, e con maggiore dispendio di energia per approfondire l'apparato radicale. (Dann, 2021). A seguito di pratiche di minima lavorazione, o di semina su sodo, i residui colturali sono mantenuti in superficie, gestiti diversamente rispetto alle pratiche tradizionali, il terreno presenta una migliore struttura, maggiori micropori, diminuendo quelli che sono gli effetti negativi. e limitando l'evapotraspirazione del suolo. Quindi da un punto di vista agronomico, conoscere la velocità di decomposizione dei residui, e programmare le successive semine, rappresenta sicuramente un vantaggio, nella gestione delle eventuali irrigazioni, e nella programmazione ottimale delle lavorazioni per gestire al meglio i residui colturali.

6. Conclusioni

La combinazione di siccità prolungate ed ondate di calore costituisce una minaccia significativa per l'agricoltura globale. Questo scenario ambientale può portare a una ridotta disponibilità di acqua nel suolo (siccità pedologica) e alla diminuzione dell'acqua nella zona radicale delle colture, specialmente durante fasi critiche di crescita come la fioritura (siccità agronomica). Quanto riportato in questa tesi sottolinea l'impatto positivo del miglioramento del contenuto di sostanza organica del suolo nel mitigare la siccità o nel ridurre la gravità e la durata, potenziando la capacità di ritenzione di acqua disponibile per le piante nella zona radicale (Sullivan, 2002).

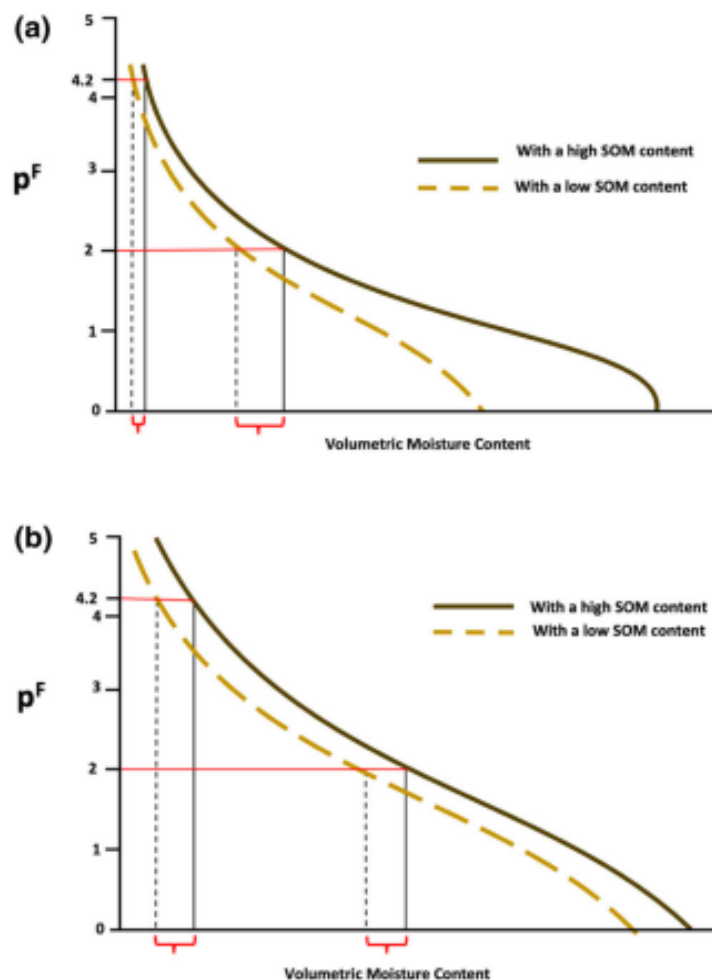


Figura 2: Curva di ritenzione idrica in terreno sabbioso (a) e in terreno di medio impasto (b).

Un aumento della sostanza organica migliora la salute del suolo, aumenta la quantità di acqua disponibile per la coltura e quindi permette una maggiore

resistenza alla siccità, riduce i tassi di evaporazione e potenzialmente riduce la necessità di irrigazioni aggiuntive.

Studi evidenziano l'importanza che anche un piccolo aumento della sostanza organica nello strato superficiale di terreno potrebbe garantire un migliore substrato di crescita per le piante, tale da ridurre la tolleranza allo stress idrico in oltre il 70% delle aree coltivate nel mondo, specialmente nelle zone aride (Izumi, 2019).

Un aumento del contenuto di sostanza organica del suolo aumenta la capacità idrica disponibile per le piante, sebbene con differenze tra le diverse tipologie di terreno (Figura 2). Queste caratteristiche possono venire in aiuto in quella che è la gestione aziendale delle irrigazioni: l'acqua distribuita sarà stoccata nel terreno per più tempo, con minore percolazione, e assorbita con più efficienza da parte delle piante. Risulta un fattore di aiuto per le aziende, che possono diminuire il numero di interventi irrigui, ed eventualmente aumentare quella che è la dose di acqua grazie alla maggiore quantità di acqua trattenuta dal terreno.

L'aumento del contenuto di sostanza organica porta un incremento della capacità di ritenzione dell'acqua ed è influenzata dalle proporzioni della granulometria del suolo. A basso contenuto di carbonio un aumento del contenuto di carbonio porta un aumento della ritenzione idrica nei terreni grossolani, e a una diminuzione della ritenzione idrica nei terreni a tessitura fine. Ad alti contenuti di carbonio, un aumento del contenuto di carbonio si traduce in un aumento della ritenzione idrica in tutte le tessiture. L'aumento dell'acqua disponibile mediante l'aumento del contenuto di sostanza organica è attribuito a un aumento relativamente maggiore della capacità di campo rispetto a quella al punto di avvizzimento.

Il ripristino del contenuto di sostanza organica in suoli degradati e impoveriti può conservare le risorse idriche creando suoli resilienti alla siccità. L'aumento del contenuto di sostanza organica può anche migliorare la tolleranza alle siccità di breve durata durante la stagione di crescita.

Ulteriori ricerche devono essere incoraggiate per comprendere meglio i meccanismi e i processi del suolo che portano all'aumento dell'acqua disponibile in associazione con l'aumento del contenuto di sostanza organica.

Bibliografia consultata

Ankenbauer, K. J., & Loheide, S. P. (2017). The effects of soil organic matter on soil water retention and plant water use in a meadow of the Sierra Nevada, CA. *Hydrological Processes*, 31(4), 891–901. <https://doi.org/10.1002/hyp.11070>

Aspetti, G. Paolo., & Iannetta, Massimo. (2006). La sostanza organica e la desertificazione: aspetti sperimentali e modellistica: valutazione della risposta al rischio di desertificazione da parte di indicatori agrobiocchimici. ENEA.

Amezketta, E., 1999. Soil aggregate stability: a review. *J. Sustain. Agric.* 14, 83 – 151

Benetti. (2023). *INTRODUZIONE GESTIONE DEL SUOLO IN AGRICOLTURA CONSERVATIVA*.

Berg, A., & Sheffield, J. (2018). Climate Change and Drought: the Soil Moisture Perspective. In *Current Climate Change Reports* (Vol. 4, Issue 2, pp. 180–191). Springer. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0095-0>

Bhadha, J. H., Capasso, J. M., Khatiwada, R., Swanson, S., & LaBorde, C. (2017). Raising Soil Organic Matter Content to Improve Water Holding Capacity. *EDIS*, 2017(5). <https://doi.org/10.32473/edis-ss661-2017>

Bonfante, A., Basile, A., & Bouma, J. (2020). Exploring the effect of varying soil organic matter contents on current and future moisture supply capacities of six Italian soils. *Geoderma*, 361. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114079>

Borrelli, L., Farina, R., Bazzoffi, P., Carroni, A. M., Ruda, P., Salis, M., Carnevale, S., Rocchini, A., VirzÀ, N., Intrigliolo, F., Palumbo, M., Cambrea, M., Platania, A., Sciacca, F., Licciardello, S., Troccoli, A., Russo, M., Speroni, M., Cabassi, G., ... Colauzzi, M. (2015). Environmental effectiveness of GAEC cross-compliance standard 2.2 “Maintaining the level of soil organic matter through crop rotation” and economic evaluation of the competitiveness gap for farmers. *Italian Journal of Agronomy*, 10(s1). <https://doi.org/10.4081/ija.2015.689>

Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: A review. In *Geoderma* (Vol. 124, Issues 1–2, pp. 3–22). <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>

Bryant, L. (2015). Organic matter can improve your soil’s water holding capacity. NRDC Expert Blog. Retrieved from <https://www.nrdc.org/experts/lara-bryant/organic-matter-can-improveyour-soils-water-holding-capacity>

Businelli, D., Massaccesi, L., Said-Pullicino, D., & Gigliotti, G. (2009). Long-term distribution, mobility and plant availability of compost-derived heavy metals in a landfill covering soil. *Science of the Total Environment*, 407(4), 1426–1435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.052>

Carter, M. R. (2002). Soil Quality for Sustainable Land Management. *Agronomy Journal*, 94(1), 38–47. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.3800>

CHAPLOT, V., & SMITH, P. (2023). Cropping leads to loss of soil organic matter: How can we prevent it? *Pedosphere*, 33(1), 8–10. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.06.002>

Capriel, P., Beck, T., Borchert, H., Gronholz, J., & Zachmann, G. (1995). Hydrophobicity of the organic matter in arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 27(11), 1453–1458. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00068-P](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00068-P)

Cristensen, 1996, B.T. Carbonio nei complessi organo minerali primari e secondari. M.R. Carter, B.A. Stewart (a cura di), Struttura e stoccaggio della materia organica nei suoli agricoli, Lewis Publishers, Boca Raton (1996), pp. 97-165

Caravaca, F., Hernandez, T., Garcia, C., Roldan, A., 2002. Improvement of rhizosphere aggregate stability of afforested semiarid plant species subjected to mycorrhizal inoculation and compost addition. *Geoderma* 108, 133 – 144

De Nobili M., Maggioni A. (1993): "Influenza della sostanza organica sulle proprietà fisiche del suolo". In: Nannipieri P. (Ed.), Ciclo della sostanza organica nel suolo. Aspetti agronomici, chimici, ecologici, selvicolturali. Patron Editore, Bologna, pp. 43-54.

Dann, C. E., Cabrera, M. L., Thapa, R., Mirsky, S., Tully, K., Reberg-Horton, C., Hitchcock, R., & Morari, F. (2021). Modeling water potential of cover crop residues on the soil surface. *Ecological Modelling*, 459. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109708>

D'Acqui, L.P., Churchman, G.J., Janik, L.J., Ristori, G.G., Weissmann, D.A., 1999. Effect of organic matter removal by lowtemperature ashing on dispersion of undisturbed aggregates from a tropical crusting soil. *Geoderma* 93, 311 – 324.

Pare, T., Diné, H., Moulin, A.P., Townley-Smith, L., 1999. Organic matter quality and structural stability of a Black Chernozemic soil under different manure and tillage practices. *Geoderma* 91, 311 – 326.

Défosse, P., Richard, G., Boizard, H., & O'Sullivan, M. F. (2003). Modeling change in soil compaction due to agricultural traffic as function of soil water content. *Geoderma*, 116(1–2), 89–105. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00096-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00096-X)

Feng, H., & Zhang, M. (2015). Global land moisture trends: Drier in dry and wetter in wet over land. *Scientific Reports*, 5. <https://doi.org/10.1038/srep18018>

Facelli, E., Facelli, J.M., 2002. Soil phosphorus heterogeneity and mycorrhizal symbiosis regulate plant intra-specific competition and size distribution. *Oecologia* 133, 54 – 61.

Logan, T.J., Lal, R., Dick, W.A., 1991. Tillage systems and soil properties in North-America. *Soil Tillage Res.* 20, 241 – 270.

Franzluebbers, A. J. (2001). Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth.

Geroy, I. J., Gribb, M. M., Marshall, H. P., Chandler, D. G., Benner, S. G., & Mcnamara, J. P. (2011). Aspect influences on soil water retention and storage. *Hydrological Processes*, 25(25), 3836–3842. <https://doi.org/10.1002/hyp.8281>

Gu, X., Zhang, Q., Li, J., Singh, V. P., Liu, J., Sun, P., & Cheng, C. (2019). Attribution of global soil moisture drying to human activities: A quantitative viewpoint. *Geophysical Research Letters*, 46(5), 2573–2582. <https://doi.org/10.1029/2018GL080768>

Hudson, B. D. (1994). Soil organic matter and available water capacity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49(2), 189. <http://www.jswconline.org/content/49/2/189.abstract>

Iizumi, T., & Wagai, R. (2019). Leveraging drought risk reduction for sustainable food, soil and climate via soil organic carbon sequestration. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55835-y>

Jastrow, J.D., 1996. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biol. Biochem.* 28, 665 – 676

Kaye, J. P., & Quemada, M. (2017). Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. In *Agronomy for Sustainable Development* (Vol. 37, Issue 1). Springer-Verlag France. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0410-x>

Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5), 3265–3277. <https://doi.org/10.1002/agj2.20282>

Lehman, R. M., Cambardella, C. A., Stott, D. E., Acosta-Martinez, V., Manter, D. K., Buyer, J. S., Maul, J. E., Smith, J. L., Collins, H. P., Halvorson, J. J., Kremer, R. J., Lundgren, J. G., Ducey, T. F., Jin, V. L., & Karlen, D. L. (2015). Understanding and enhancing soil biological health: The solution for reversing soil degradation. *Sustainability (Switzerland)*, 7(1), 988–1027. <https://doi.org/10.3390/su7010988>

Libohova, Z., Seybold, C., Wysocki, D., Wills, S., Schoeneberger, P., Williams, C., Lindbo, D., Stott, D., & Owens, P. R. (2018). Reevaluating the effects of soil organic matter and other properties on available water-holding capacity using the National Cooperative Soil Survey Characterization Database. *Journal of Soil and Water Conservation*, 73(4), 411–421. <https://doi.org/10.2489/jswc.73.4.411>

Loveland, P. J., Webb, J., & Bellamy, P. (2001). Critical levels of soil organic matter: The evidence for England and Wales. In R. M. Rees, B. C. Ball, C. D. Campbell, & C. A. Watson (Eds.), *Sustainable management of soil organic matter* (pp. 23–33). Wallingford, UK: CAB International.

Minasny, B., & McBratney, A. B. (2018). Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 39–47. <https://doi.org/10.1111/ejss.12475>

Martens, D.A., 2000. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biol. Biochem.* 32, 361 – 369.

Olness, Alan; Arciere, Davide. EFFETTO DEL CARBONIO ORGANICO SULL'ACQUA DISPONIBILE NEL SUOLO. *Scienza del suolo* 170(2):p 90-101, febbraio 2005.

Paye, W. S., Ghimire, R., Acharya, P., Nilahyane, A., Mesbah, A. O., & Marsalis, M. A. (2022). Cover crop water use and corn silage production in -semi-arid irrigated conditions. *Agricultural Water Management*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107275>

Périé, C., & Ouimet, R. (2008). Organic carbon, organic matter and bulk density relationships in boreal forest soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 88(3), 315–325. <https://doi.org/10.4141/CJSS06008>

Plaza-Bonilla, D., Álvaro-Fuentes, J., & Cantero-Martínez, C. (2014). Identifying soil organic carbon fractions sensitive to agricultural management practices. *Soil and Tillage Research*, 139, 19–22. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.006>

Olness, A., & Archer, D. (2005). Effect of organic carbon on available water in soil. *Soil Science*, 170, 90–101. <https://doi.org/10.1097/00010694-200502000-00002>

Tisdall, J.M., Oades, J.M., 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33, 141 – 163.

Rajkai, K., Tóth, B., Barna, G., Hernádi, H., Kocsis, M., & Makó, A. (2015). Particle-size and organic matter effects on structure and water retention of soils. *Biologia (Poland)*, 70(11), 1456–1461. <https://doi.org/10.1515/biolog-2015-0176>

Rawls, W. J., Pachepsky, Y. A., Ritchie, J. C., Sobecki, T. M., & Bloodworth, H. (2003). Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, 116(1–2), 61–76. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00094-6)

Reeves, D. W. (1997). The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. In *soil& Tillage Research Soil & Tillage Research (Vol. 43)*.

Ruisi, P., Giambalvo, D., Saia, S., di Miceli, G., Frenda, A. S., Plaia, A., & Amato, G. (2014). Conservation tillage in a semiarid Mediterranean environment: Results of

20 years of research. *Italian Journal of Agronomy*, 9(1), 1–7.
<https://doi.org/10.4081/ija.2014.560>

Rillig, M.C., Wright, S.F., Eviner, V.T., 2002. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species. *Plant Soil* 238, 325 – 333.

Schlesinger, W. H. (1990). Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 348(6298), 232-234.

Schomberg, H. H., White, K. E., Thompson, A. I., Bagley, G. A., Burke, A., Garst, G., Bybee-Finley, K. A., & Mirsky, S. B. (2023). Interseeded cover crop mixtures influence soil water storage during the corn phase of corn-soybean-wheat no-till cropping systems. *Agricultural Water Management*, 278.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108167>

Souza, J. V. R. S., Saad, J. C. C., Sánchez-Román, R. M., & Rodríguez-Sinobas, L. (2016). No-till and direct seeding agriculture in irrigated bean: Effect of incorporating crop residues on soil water availability and retention, and yield. *Agricultural Water Management*, 170, 158–166.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.01.002>

Singer, M.J., Southard, R.J., Warrington, D.J., Janitzky, P., 1992. Stability of synthetic sand clay aggregates after wetting and drying cycles. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 1843 – 1848

Stewart, B. A., & Lal, R. (2018). Managing water to enhance global cereal yields. In *Journal of Soil and Water Conservation* (Vol. 73, Issue 2, pp. 49A-52A). Soil Conservation Society of America. <https://doi.org/10.2489/jswc.73.2.49A>

Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., McBratney, A. B., Courcelles, V. de R. de, Singh, K., Wheeler, I., Abbott, L., Angers, D. A., Baldock, J., Bird, M., Brookes, P. C., Chenu, C., Jastrow, J. D., Lal, R., ... Zimmermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. In *Agriculture, Ecosystems and Environment* (Vol. 164, pp. 80–99). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>

Schwartzman, D.W., Shore, S.N., Volk, T., McMenamin, M., 1994. Self-organization of the earths biosphere—geochemical or geophysiological. *Orig. Life Evol. Biosph.* 24, 435 – 450.

Uygun, V., Mujdeci, M., & Simsek, S. (2019). THE EFFECTS OF ORGANIC AMENDMENTS ON SOIL WATER RETENTION CHARACTERISTICS UNDER CONVENTIONAL TILLAGE SYSTEM.
<https://www.researchgate.net/publication/330674797>

Schutter, M.E., Dick, R.P., 2002. Microbial community profiles and activities among aggregates of winter fallow and cover-cropped soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 142 – 153

Yang, Y., Zhong, M., Bian, X., You, Y., & Li, F. (2023). Preparation of carbon-based material with high water absorption capacity and its effect on the water retention characteristics of sandy soil. *Biochar*, 5(1).
<https://doi.org/10.1007/s42773-023-00260-8>

Zavattaro, L., Costamagna, C., Grignani, C., Bechini, L., Spiegel, A., Lehtinen, T., Guzmán, G., Krüger, J., D'Pose, T., Pecio, A., van Evert, F. K., & ten Berge, H. F. M. (2015). Long-term effects of best management practices on crop yield and nitrogen surplus. *Italian Journal of Agronomy*, 10(1), 47–50.
<https://doi.org/10.4081/ija.2015.643>

Warkentin, B.P., 2001. The tillage effect in sustaining soil functions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science (Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde)* 164, 345 – 350

Qadir, M., Oster, J.D., 2002. Vegetative bioremediation of calcareous sodic soils: history, mechanisms, and evaluation. *Irrig. Sci.* 21, 91 – 101.

Viaud, Valérie, et al. "Response of organic matter to reduced tillage and animal manure in a temperate loamy soil." *Soil use and management* 27.1 (2011): 84-93.