



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

**EFFETTI DELLA GESTIONE DI INTERFILARI  
SU QUANTITÀ E QUALITÀ DEL CARBONIO  
ORGANICO NEI SUOLI DI DUE VIGNETI**

**Effects of Inter-row Management on the Quantity and Quality  
of Organic Carbon in the Soils of Two Vineyards**

TIPO TESI: sperimentale

Studente:  
ALESSIO GIARRUSSO

Relatore:  
PROF. COSTANTINO VISCHETTI

Correlatore:  
DOTT.SSA ARIANNA DE BERNARDI  
DOTT.SSA ENRICA MARINI

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

*A chi nella vita mi è sempre stato vicino,  
a voi che siete andati via troppo presto*

# SOMMARIO

Elenco delle Tabelle .....	4
Elenco delle Figure .....	5
1. INTRODUZIONE .....	7
1.1 Fertilità .....	8
1.2 Sostanza organica .....	17
1.2.1 Humus .....	19
1.2.2 Umificazione e mineralizzazione .....	22
1.3 Vita microbica nel suolo .....	24
1.4 L'inerbimento .....	26
1.4.1 La selezione delle essenze per gli inerbimenti .....	28
1.4.2 Tipi di inerbimento .....	31
1.4.3 Tecniche di gestione agronomica .....	32
1.5 Sovescio .....	33
1.5.1 Gestione inerbimento da sovescio .....	35
1.6 La lavorazione come tecnica di gestione degli interfilari .....	36
2. SCOPO .....	39
3. MATERIALI E METODI .....	40
3.1 Preparazione dei campioni .....	42
3.2 Analisi del Carbonio Organico Totale (TOC) .....	42
3.3 Respirazione microbica .....	44
3.4 Carbonio della biomassa .....	46
3.5 Analisi del Carbonio Totale Estraiabile (TEC) .....	47
3.5.1 Indici .....	49
4. RISULTATI E DISCUSSIONI .....	50
4.1 Sostanza organica: contenuto e composizione .....	50
4.2 Attività microbica .....	55
5. CONCLUSIONI .....	60
Ringraziamenti .....	61
Bibliografia e sitografia .....	64

## ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 3-1: Codici e relativa spiegazione dei campioni .....	41
Tabella 4-1: Valori TEC/TOC .....	51
Tabella 4-2: Parametri di fertilità dei campioni e indici dell'attività microbica. Lettere diverse indicano differenze statistiche rilevate secondo il test parametrico Kruskal Wallis e il Dunn post-hoc test. ( $\alpha$ level=0,05) .....	57
Tabella 4-3: Parametri e indici di umificazione. Lettere diverse indicano differenze statistiche rilevate secondo il test parametrico Kruskal Wallis e il Dunn post-hoc test. ( $\alpha$ level=0,05) .....	58

## ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1-1: Fertilizzazione, dal suolo alle piante passando dai microrganismi, (Sellitto, 2021) .....	8
Figura 1-2: Classi granulometriche della tessitura, UFC, Le proprietà fisiche e meccaniche del suolo, (Sidoli, 2024) .....	9
Figura 1-3: Struttura dei suoli, Il contadino ignorante (Galli, 2018) .....	10
Figura 3-1: Localizzazione dei vigneti oggetto di studio .....	40
Figura 3-2: Reazioni con acido solforico per titolazioni TOC .....	43
Figure 3-3; 3-4: Viraggio da viola a verde per titolazione con sale di Mohr .....	44
Figura 3-5: Sistemi ermetici per la respirazione microbica .....	45
Figura 3-6: Aggiunta di HCL 0.1 M fino al viraggio da fucsia a bianco .....	45
Figura 3-7: Campioni non fumigati e fumigati per carbonio della biomassa .....	47
Figura 3-8: Reazioni per estrazione carbonio della biomassa, destinati a titolazione ...	47
Figura 3-9: TEC estratto e separato .....	48
Figura 3-10: Colonnine estrazione acidi fulvici .....	48
Figura 3-11: Viraggio titolazione TEC a viola .....	49
Figura 3-12: Viraggio titolazione TEC a verde .....	49
Figura 4-1: Percentuale di sostanza organica. Lettere diverse indicano differenze statistiche rilevate secondo il test non parametrico Kruskal Wallis e il Dunn post-hoc test. ( $\alpha$ level=0,05) .....	50
Fig. 4-2: Contenuto di carbonio totale estraibile. Lettere diverse indicano differenze statistiche rilevate secondo il test parametrico Kruskal Wallis e il Dunn post-hoc test. ( $\alpha$ level=0,05) .....	52
Fig. 4-3: Contenuto di acidi umici. Lettere diverse indicano differenze statistiche rilevate secondo il test parametrico Kruskal Wallis e il Dunn post-hoc test. ( $\alpha$ level=0,05).....	53
Fig. 4-4: Contenuto di acidi fulvici. Lettere diverse indicano differenze statistiche rilevate secondo il test parametrico Kruskal Wallis e il Dunn post-hoc test. ( $\alpha$ level=0,05).....	54

Fig. 4-5: Contenuto di carbonio microbico. Lettere diverse indicano differenze statistiche rilevate secondo il test parametrico Kruskal Wallis e il Dunn post-hoc test. ( $\alpha$  level=0,05)..... 55

Fig. 4-6: Respirazione microbica cumulata ..... 56

# 1. INTRODUZIONE

In ambito agrario ed ecologico non si può fare a meno di focalizzarsi sulla possibilità di ottenere elevate produzioni nel rispetto della sostenibilità ambientale. L'intermediario di questo equilibrio è il suolo e riveste notevole importanza per i vari aspetti che lo caratterizzano: fisici (struttura, tessitura, porosità), chimici (pH, elementi nutritivi, acqua, ossigeno, anidride carbonica, sostanza organica), biologici (microrganismi). Attualmente, non esiste una definizione esatta e univoca per il termine "sostenibilità" che viene intesa come un'azione che mira a ridurre al minimo l'impatto negativo sull'ecosistema. Per questo motivo si fa riferimento allo "sviluppo sostenibile", che consiste nel promuovere uno sviluppo in grado di rispondere alle esigenze del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare le proprie necessità. (Bruntland, 1992). Si tratta quindi di un processo di trasformazione in cui l'utilizzo delle risorse, la gestione degli investimenti, l'indirizzo dello sviluppo tecnologico e le modifiche istituzionali sono tutti allineati, contribuendo a migliorare sia le capacità attuali che quelle future di rispondere alle necessità e ai desideri dell'umanità, lo sviluppo sostenibile è un processo in continua evoluzione che permette alle persone di esprimere il proprio potenziale e migliorare la qualità della loro vita, garantendo al contempo la protezione e il rafforzamento dei sistemi vitali della Terra. (Forum for the Future). In sintesi, esso si basa su cinque principi fondamentali: miglioramento della qualità della vita; giustizia ed equità; coinvolgimento e collaborazione; attenzione per l'ambiente e rispetto dei limiti ecologici, riconoscendo l'esistenza di "confini ambientali"; una visione orientata al futuro con l'applicazione del principio di precauzione. (Making London Work). L'ambiente deve essere salvaguardato per mantenere le funzioni vitali dell'ecosistema e garantire il benessere delle generazioni future. Le politiche ambientali ed economiche devono essere strettamente connesse. Riguardo all'importanza del suolo, esso gioca un ruolo cruciale nel mantenimento dei processi vitali degli organismi che lo abitano e attraversano, grazie alla sua interazione con l'acqua (idrosfera), l'aria (atmosfera) e lo strato roccioso sottostante (litosfera), da cui derivano i minerali attraverso processi di solubilizzazione o disgregazione.

## 1.1 Fertilità

È possibile indicare come fertile un suolo su cui è possibile allevare delle specie vegetali in grado di crescere e produrre frutti mediante l'effetto della presenza di vari fattori caratterizzanti. Si possono identificare tre sfere della fertilità in ambito agrario:

- Fisica
- Chimica
- Biologica



**Figura 1-1:** *Fertilizzazione, dal suolo alle piante passando dai microrganismi, (Sellitto, 2021)*

*Fertilità fisica* è la capacità del suolo di ospitare la porosità per l'aria e l'acqua nel giusto rapporto e continuativa nel tempo per permettere la vita sia per le radici delle piante sia per tutti gli organismi presenti. È influenzata da diversi fattori e viene valutata attraverso la determinazione della tessitura e della struttura

- Temperatura; in base ad essa si osservano i vari effetti, quali gelificazione e quindi incremento della disgregazione fisica (ad opera della formazione di ghiaccio per solidificazione dell'acqua ad occupare il 10% del volume in più). A queste condizioni sopravvivono esclusivamente i criofili, inoltre si possono manifestare danni meccanici agli apparati radicali. Eccessivo riscaldamento, si verifica nei casi in cui ci siano delle lunghe esposizioni a fonti di calore. Questo causerebbe la perdita di microrganismi importanti per le elevate temperature, ustioni alle radici

delle piante, ma anche purificazione e sterilizzazione dei terreni (tecnica della solarizzazione) e allontanamento naturale di malerbe e patogeni.

- Tessitura, variabile per dei valori tabellari, utilizzati dalla ISSS (Società internazionale della scienza del suolo) a differenziare varie classi granulometriche (figura 1-2).

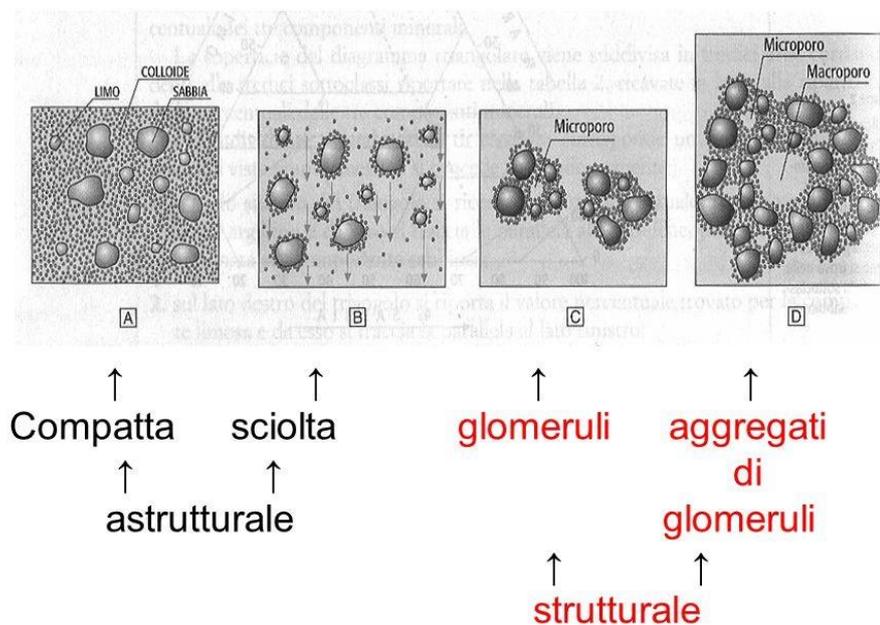
		ISSS	USDA	
SCHELETRO		> 2mm	> 2mm	
TERRA FINE	SABBIA	GROSSA	2 - 0,2 mm	
		FINE	0,2 - 0,05 mm	
	LIMO	0,02 - 0,002 mm	GROSSOLANO	0,05 - 0,02 mm
			FINE	0,02 - 0,002 mm
ARGILLA	< 0,002 mm	< 0,002 mm		

**Figura 1-2:** *Classi granulometriche della tessitura, UFC, Le proprietà fisiche e meccaniche del suolo, (Sidoli, 2024)*

Ognuna di queste ha delle proprietà legate alla dimensione che ne definisce caratteri positivi e negativi. La frazione sabbiosa non si lega in aggregati per cui restano molti spazi in un suolo in cui prevale, a favorire la macroporosità a discapito della microporosità; questa condizione fa sì che risulti scarsa la ritenzione idrica, facilita così la percolazione di acqua e la conseguente lisciviazione degli elementi nutritivi. Si definiscono suoli sabbiosi quelli in cui la percentuale di questa componente raggiunge circa il 75%. Bisogna considerare gli effetti positivi che ne provengono, quali l'aerazione del terreno, aumentando la presenza di aria tellurica (ricca in anidride carbonica, prodotta dai microrganismi del suolo) ed evitando l'asfissia in suoli eccessivamente argillosi. Si definiscono suoli argillosi quelli che posseggono circa il 25% o più di argilla; questa è utile per i terreni in quanto di dimensioni molto piccole (colloidali) per cui seguono le varie proprietà: ritenzione idrica, favorita da micropori che, contrariamente alla componente sabbiosa che è ricca in macropori, consentono il trattenimento di acqua che resta a

disposizione delle radici delle piante, che la assorbono assieme a elementi nutritivi in forma assimilabile.

- Struttura, organizzazione geometrico-dimensionale del suolo a formare degli aggregati, grazie alle proprietà di plasticità delle particelle argillose che si cementano tra loro a formare dei grumi strutturali, incidendo significativamente sulla loro posizione nel suolo e densità apparente, rappresentante il peso degli spazi vuoti. Questi sono rappresentati da micropori e macropori che per un suolo franco hanno una percentuale di circa il 60 % di macroporosità e 40 % invece di microporosità.



**Figura 1-3:** *Struttura dei suoli, Il contadino ignorante (Galli, 2018)*

*Fertilità chimica*, è riferita agli elementi nutritivi che vengono assorbiti dalle radici. Questi sono presenti nel suolo e, come accennato in precedenza, in acqua alla forma assimilabile. Prima di trovarsi in questa situazione, sono legati alle particelle argillose grazie all'ampia superficie specifica e alla capacità di scambio cationico (CSC) che ne regola la cessione per differenze di cariche delle particelle (le argille colloidali hanno carica negativa sulla superficie). Gli effetti negativi che scaturiscono dalla sua presenza si legano in particolar modo alla condizione asfittica che è critica per la vita della microfauna e

mesofauna, fondamentali per l'incremento di sostanza organica disponibile, da digestione di macroelementi come lignina e cellulosa. Da questa situazione si potrebbe generare una compattazione dei suoli che ostacolerebbe anche la crescita degli apparati radicali. Tra queste notevole importanza è imputata alle argille espandibili importanti nel rimescolamento dei suoli, a seguito di acquisizione e rilascio di acqua che con l'evapotraspirazione si contraggono e segue il rilassamento dall'avvento di altra acqua. In base alla loro importanza per crescita e sviluppo vegetale se ne identificano due grandi classi: macroelementi che includono carbonio, idrogeno, ossigeno, azoto, fosforo, potassio, zolfo, calcio e magnesio. I microelementi comprendono ferro, manganese, zinco, rame, boro, molibdeno e cloro. E microelementi, come cobalto, iodio, selenio, silicio, sodio e vanadio, sono essenziali solo per alcune specie. Ad eccezione del carbonio, dell'ossigeno e dell'idrogeno, che vengono assorbiti dall'aria, tutti gli altri elementi derivano dal terreno, la cui fertilità chimica dipende dalla capacità di contenerli in una forma che le piante possano assorbire. Nel suolo, infatti, i vari nutrienti possono esistere in forme non assimilabili o parzialmente assimilabili dalle piante. Per questo motivo è fondamentale considerare sia la forma in cui ogni elemento si trova nel terreno, sia la sua capacità di trasformarsi in una forma più facilmente utilizzabile dalle piante. Segue una breve spiegazione delle caratteristiche.

a. Macroelementi

*Azoto*, è presente principalmente in tre forme: elementare, organica e minerale. La forma elementare si trova sotto forma di molecole, essendo una componente dell'aria che circola nei macropori del suolo. Questa forma di azoto può essere resa disponibile per le piante attraverso un processo chiamato azotofissazione, che è facilitato da microrganismi in grado di convertire l'azoto molecolare in azoto ammoniacale. La fissazione dell'azoto è catalizzata dalla nitrogenasi, un enzima composto da proteine con ferro e molibdeno. I microrganismi azotofissatori sono divisi in due categorie: liberi (come *Azotobacter* e *Clostridium*) e simbiotici (come il *Rhizobium*, che vive sulle radici delle leguminose). I liberi apportano 10-20 kg di azoto per ettaro/anno, mentre le leguminose fissano quantità maggiori, fino a 250 kg/Ha/anno, sostituendo spesso le concimazioni azotate. L'azoto organico, che proviene da residui vegetali e animali, rappresenta la forma più comune nel suolo. È reso disponibile alle piante tramite mineralizzazione, che converte proteine in azoto

ammoniacale. Si origina anche per processi di deaminazione, che in base all'ambiente si distingue in: ossidativa, riduttiva, idrolitica o deaminativa. L'azoto può arrivare al terreno anche tramite precipitazioni atmosferiche, contribuendo con 10-20 kg/Ha/anno. Non bisogna dimenticare l'assorbimento di azoto ammoniacale e nitrico da parte delle piante (30-200 kg/Ha), la lisciviazione degli ioni nitrati e l'erosione, che rimuove lo strato superficiale del suolo, ricco di sostanza organica e azoto. I processi naturali legati all'azoto nel suolo si dividono in tre gruppi: quelli che aggiungono azoto (azotofissazione biologica e chimica, residui organici), quelli che lo rimuovono (denitrificazione, lisciviazione, erosione, assorbimento delle piante), e quelli che lo trasformano (mineralizzazione, nitrosazione, nitrificazione, immobilizzazione).

**Fosforo**, il fosforo è presente nel terreno in una concentrazione media dello 0,05%. In un ettaro di suolo, che pesa milioni di chilogrammi, ci sarebbero circa 1500 kg di fosforo. Anche se un raccolto può rimuoverne dai 5 ai 35 kg di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (equivalenti a 2,2-15,3 kg di fosforo), questa quantità può risultare insufficiente perché la maggior parte del fosforo nel suolo si trova in forme insolubili, principalmente in composti organici e minerali, dove è sempre in stato di ossidazione +5. Il fosforo organico è legato soprattutto come estere dell'acido fosforico (in nucleotidi, fosfolipidi, acidi nucleici, fitina), anche se in alcuni casi può formare legami di anidridificazione, come in ADP e ATP. Tuttavia, non può essere direttamente assorbito dalle piante senza un processo di mineralizzazione, in cui le fosfatasi idrolizzano questi esteri, rilasciando acido fosforico. Il fosforo inorganico, invece, si trova prevalentemente sotto forma di fosfati di calcio, ferro e alluminio, spesso molto poco solubili, o fissato da ossidi e argille. Per questo motivo, le piante trovano difficoltà ad assimilare i fosfati solubili nel terreno, soprattutto a pH estremi. Solo a pH neutri i fosfati hanno una solubilità sufficiente per essere facilmente assorbiti dalle piante. Le piante, però, possono solubilizzare i fosfati emettendo secrezioni acide dalle radici, permettendo loro di sopravvivere anche in condizioni difficili. Dal punto di vista ambientale, la scarsa solubilità del fosforo nel suolo ne limita la mobilità, riducendo le perdite per lisciviazione, che sono quasi nulle rispetto a quelle dell'azoto. Le perdite di fosforo avvengono principalmente per erosione.

**Potassio.** Il contenuto totale di potassio nel suolo varia tra il 2% e il 35%, il che corrisponde a una quantità compresa tra 6.000 e 105.000 kg per ettaro, assumendo che un ettaro di terreno pesi milioni di chilogrammi. Il potassio nel suolo si trova sempre come ione  $K^+$ , quindi non si parla di potassio organico né di un processo di mineralizzazione. Tuttavia, il potassio presente nei residui organici viene rilasciato nel suolo durante il disfacimento delle cellule organiche che lo contengono. Il potassio minerale si presenta in quattro forme principali: primario, fissato, scambiabile e in soluzione. Il potassio primario è quello contenuto nei minerali della roccia madre, soprattutto nei feldspati e nelle miche macrocristalline. Il potassio fissato è invece quello intrappolato nelle strutture delle argille illitiche e vermiculitiche. Il potassio scambiabile è quello che si trova sulle superfici colloidali cariche negativamente ed è in equilibrio con il potassio in soluzione. Le forme di potassio effettivamente disponibili per le piante sono il potassio scambiabile e quello in soluzione, poiché il potassio primario si solubilizza molto lentamente, così come quello fissato, che può richiedere tempi pedogenetici molto lunghi. Tuttavia, il potassio può anche essere rilasciato nel suolo a seguito di eventi come incendi, quando il materiale organico o le sue ceneri vengono reintrodotti nel suolo. Le principali perdite di potassio derivano dall'assorbimento da parte delle colture, che può variare dai 15 kg per ettaro all'anno nelle colture normali fino a 80-120 kg per ettaro all'anno nelle colture che richiedono grandi quantità di potassio, come la patata, la barbabietola da zucchero e il tabacco. Le perdite per dilavamento sono in genere limitate dal potere adsorbente del suolo e sono significative solo nei terreni sabbiosi soggetti a forte dilavamento.

**Zolfo.** A differenza del fosforo, ma in modo simile all'azoto, la chimica dello zolfo nel suolo è influenzata dalla sua capacità di variare il numero di ossidazione. Nei minerali delle rocce primarie, soprattutto in quelle eruttive, lo zolfo si trova principalmente in forma ridotta, come solfuro (Zn, Cu, Pb, Fe) o come zolfo elementare. Tuttavia, nel suolo, quando c'è ossigeno, prevale la forma ossidata, con numero di ossidazione +6, mentre la forma ridotta si trova solo in condizioni estremamente riducenti, come nei suoli con idromorfia permanente. Anche la sostanza organica del suolo contiene zolfo con un numero di ossidazione -2, come nei composti terociclici e negli amminoacidi solforati. Durante il processo di mineralizzazione della sostanza organica, lo

zolfo viene rilasciato prima come acido solfidrico ( $H_2S$ ), che poi, grazie all'attività di batteri solfobatterici, si ossida a zolfo elementare e successivamente a solfato. Queste reazioni di ossidazione, essendo esoergoniche, forniscono energia ai batteri per la fissazione del carbonio ( $CO_2$ ). La quantità di zolfo presente nel suolo varia dallo 0,005% allo 0,04%, corrispondente a circa 150-1200 kg per ettaro, considerando che un ettaro di terreno pesa circa 3 milioni di kg. Lo zolfo può provenire non solo dai minerali e dalla sostanza organica, ma anche dall'atmosfera. Può arrivare sotto forma di goccioline di acqua marina vicino alle coste o come ossidi di zolfo derivanti dalla combustione di carbone fossile, che reagiscono con l'acqua piovana formando acido solforico (responsabile delle piogge acide). Le perdite di zolfo nel suolo avvengono principalmente attraverso l'assorbimento da parte delle piante (tra i 10 e i 50 kg/ha a seconda delle colture) e tramite dilavamento ed erosione della frazione organica superficiale.

**Calcio.** Il contenuto di calcio nel suolo può variare molto, oscillando tra lo 0,1% e il 25%. La disponibilità di calcio per le piante dipende dalla solubilità dei minerali che lo contengono, come carbonati, silicati e solfati, e dalla quantità di calcio adsorbito sul complesso di scambio del suolo. Il calcio può essere apportato al terreno tramite la decomposizione di sostanza organica, sia vegetale che animale, e attraverso le acque di irrigazione. Tuttavia, il rilascio di calcio dalla sostanza organica non è un vero processo di mineralizzazione, ma piuttosto una liberazione di ioni calcio dovuta al disfacimento delle cellule vegetali. Le perdite di calcio nel terreno avvengono principalmente a causa dell'assorbimento da parte delle colture, che ne contengono dallo 0,5% al 3% della loro sostanza secca, oltre che per dilavamento ed erosione.

**Magnesio.** Il contenuto di magnesio nel terreno varia generalmente dallo 0,1% allo 0,5% e proviene sia da minerali primari come olivina, anfiboli, pirosseni e biotite, sia da minerali secondari come clorite, serpentino, argille triottaedriche e dolomite. Grazie alla maggiore solubilità dei suoi composti rispetto a quelli del calcio, il magnesio è solitamente presente in quantità significative sia come ione Mg nel complesso di scambio, sia in soluzione. Gli apporti di magnesio derivano dal disfacimento della sostanza organica, che lo contiene in una proporzione dello 0,2%-0,5%, e dalla mineralizzazione, in

quanto il magnesio è parte integrante di importanti composti organici come la clorofilla e la fitina. Anche l'irrigazione può contribuire ad arricchire il terreno di magnesio. Le perdite di magnesio si verificano a causa dell'assorbimento da parte delle colture, oltre che per erosione e dilavamento.

b. Microelementi

**Ferro**, Il ferro è uno degli elementi più abbondanti nel suolo, con una presenza che varia dal 3% al 10%. Nei minerali primari e nei terreni idromorfi si trova principalmente in forma ridotta, mentre negli altri terreni prevale in forma ossidata, spesso come idrossido, che ha una bassissima solubilità. La sua solubilità diminuisce significativamente con l'aumento del pH, tanto che nei terreni calcarei le piante possono sviluppare clorosi a causa della difficoltà di assorbire ferro. Questo elemento è poco mobile nel terreno, a meno che non ci siano condizioni di forte acidità o la presenza di ligandi organici, come avviene nei terreni podsolici o in quelli trattati con materiali organici solubili, ad esempio fanghi di depurazione.

**Manganese**, è presente nel suolo in percentuali che variano tra lo 0,5% e l'1,5%, soprattutto come ossidi quasi insolubili. In condizioni di acidità, questi ossidi si riducono a forme solubili, rendendo il manganese facilmente assimilabile dalle piante.

**Zinco**, si trova nel terreno in un'unica forma di ossidazione ( $Zn^{2+}$ ) e in quantità che variano dallo 0,002% allo 0,02%. È presente sotto forma di silicati, carbonati e idrossidi, la cui solubilità dipende dal pH del suolo: è bassa a pH elevati e alta a pH bassi.

**Rame**, è presente nel terreno in quantità limitate, circa 0,002%. Si trova principalmente come  $Cu^{2+}$ , sotto forma di solfuro nei minerali primari o nei terreni idromorfi, e come idrossido o carbonato. La sua disponibilità, simile a quella dello zinco, è influenzata dal pH del suolo.

**Boro**, è presente nel suolo in quantità variabili tra 10 e 100 ppm, principalmente sotto forma di borosilicato e, in soluzione, come acido borico o come ione borato a pH elevati. Si trova in concentrazioni maggiori nei terreni

neutri, mentre nei terreni acidi può essere facilmente dilavato e in quelli basici tende a immobilizzarsi sotto forma di esteri o ossidi idrati.

**Molibdeno**, si trova nel terreno principalmente come ione molibdato ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ), sia in soluzione sia adsorbito sugli ossidi di ferro e alluminio, con concentrazioni che di solito si attestano intorno a 2 ppm.

**Cloro**, esclusi i terreni salini, il cloro è presente nel suolo in quantità limitata a causa dell'elevata solubilità in acqua di tutti i cloruri. (M. Businelli, 2009).

*Fertilità biologica*, riferita alla quantità e qualità della sostanza organica e delle produzioni energetiche della componente microbica da cui dipendono le dinamiche geobiochimiche degli elementi della nutrizione precedentemente affrontati. Si possono definire degli indicatori di fertilità biologica in un suolo come di seguito:

- La biomassa microbica e la respirazione basale sono indicatori chiave della salute del suolo e riflettono lo stato fisiologico delle comunità microbiche, influenzate da fattori ambientali o antropici, come inquinanti e pratiche agricole. L'ossidabilità della sostanza organica e la stima dell'azoto potenzialmente mineralizzabile sono essenziali per valutare la capacità del suolo di fornire azoto alle piante e il rischio di lisciviazione del nitrato.
- Le attività enzimatiche sono coinvolte nella dinamica degli elementi nutritivi e possono essere influenzate da inquinanti e tecniche agricole. La carica microbica e la struttura delle comunità microbiche variano in risposta a fattori di stress ambientale, con gruppi eco-fisiologici che mostrano diverse capacità di adattamento.
- La microfauna, come protozoi e nematodi, contribuisce alla disponibilità di nutrienti, mentre la mesofauna (collemboli e acari) e la macrofauna (lombrichi) risentono direttamente della presenza di inquinanti e delle pratiche colturali. Le piante bioindicatrici possono monitorare le proprietà chimiche e fisiche del suolo e rilevare inquinanti inorganici. (Università Reggio Calabria).

Per mantenere e preservare al meglio la fertilità biologica di un suolo si ritiene opportuno ricorrere a concimi di origine organica. I principali sono: letame, pollina, torba e alghe. Il letame è un concime organico derivato dalle deiezioni solide degli animali, mescolate a lettiera vegetale e lasciate maturare per un periodo variabile. Fornisce al terreno

nutrienti come azoto e potassio, ed è utilizzato in colture di pieno campo, orticoltura e frutticoltura. La pollina, proveniente dagli escrementi di volatili domestici, ha un effetto rapido, soprattutto quando fresca, grazie all'elevato contenuto di azoto, fosforo e calcio. Tuttavia, va applicata con cautela, in basse dosi, specialmente in orticoltura, ma è sconsigliata per le piante ornamentali. La torba, derivante dalla decomposizione millenaria di piante in ambienti acquatici chiusi, è povera di macroelementi, ma fondamentale per la sua capacità di migliorare l'assorbimento e il rilascio d'acqua del suolo, fornendo anche humus di qualità e favorendo l'attività radicale grazie alla sua struttura fibrosa. Le alghe, infine, ricche di aminoacidi, carboidrati e microelementi come il ferro, potenziano la salute delle piante, aumentandone la resistenza agli stress ambientali. (Agripiù)

Un focus sulla sostanza organica è descritto nel capitolo successivo.

## 1.2 Sostanza organica

La sostanza organica del suolo comprende i composti organici di origine animale e vegetale presenti nel terreno. Questo insieme, variegato per diverse caratteristiche, è principalmente parte della frazione solida e deriva in gran parte da processi biologici. La sostanza organica include:

1. Biomassa vivente: composta da tutti gli organismi presenti nel suolo, come animali, radici delle piante e microrganismi.
2. Biomassa morta: formata da resti e residui di organismi deceduti e materiali organici di origine biologica, che si trovano in vari stadi di decomposizione, come vegetazione secca, carcasse e fertilizzanti organici.
3. Humus: un eteropolimero creato dalla decomposizione microbica della sostanza organica, derivante da composti semplici e da lignine, che presenta una bassa biodegradabilità.

Le classi di sostanza organica si dividono in quattro categorie:

1. Edaphon: comprende la biomassa vivente, fondamentale per le trasformazioni nel suolo.
2. Sostanza organica non decomposta: costituita da biomassa morta. La sua composizione varia in base all'ambiente, per esempio:
  - a. Nei suoli forestali predominano i resti vegetali come rami e foglie.
  - b. Nei suoli erbacei prevalgono i residui delle radici.

- c. Nei suoli agricoli, la variabilità dipende dalle tecniche di coltivazione.
3. Sostanza organica in decomposizione: questa categoria è meno definita a causa della complessità dei processi di decomposizione, che variano con le condizioni ambientali.
4. Humus: prodotto finale delle trasformazioni della sostanza organica che non subisce mineralizzazione. Si distingue tra:
  - a. Humus stabile: legato alla frazione minerale del suolo.
  - b. Humus labile: non incorporato nella frazione minerale e separabile fisicamente.

Le funzioni e proprietà della sostanza organica determinano la sua importanza fisico-meccanica, come:

- Miglioramento della struttura del suolo: tramite la formazione di complessi argillo-umici, che favoriscono la creazione di aggregati ottimali.
- Ritenzione idrica: l'humus può assorbire fino a 20 volte il proprio peso in acqua.
- Permeabilità nei suoli argillosi: migliora la struttura e riduce la densità.
- Riduzione dell'erosione: grazie alla presenza di lettiera e aggregati stabili.
- Aumento della capacità portante: riduce i danni da compattazione causati da macchine e calpestio.

Tra le funzioni chimiche e fisico-chimiche della sostanza organica umificata, spicca il suo ruolo nelle dinamiche di disponibilità e assorbimento dei nutrienti:

- Capacità di ritenzione delle basi: l'humus aumenta la ritenzione di potassio, calcio e magnesio grazie alla sua elevata capacità di scambio cationico.
- Ritenzione del fosforo: si verifica attraverso l'adsorbimento anionico.
- Assorbimento biologico: la sostanza organica aiuta a trattenere elementi mobili come azoto e zolfo, e altri nutrienti, soprattutto in terreni con bassa capacità di scambio.
- Rallentamento della retrogradazione del fosforo: contribuisce a mantenere la disponibilità di questo nutriente.
- Protezione dei microelementi: grazie alla chelazione, previene la loro insolubilizzazione.
- Aumento del potere tampone: stabilizza il pH del suolo.
- Sequestro del carbonio: rende il suolo un importante serbatoio di carbonio atmosferico.

Queste funzioni sono fondamentali per la fertilità del suolo e hanno importanti implicazioni agronomiche. I benefici offerti dalla sostanza organica si riflettono non solo nelle pratiche di agricoltura sostenibile, come quella biologica, ma hanno anche rilevanza generale. Infatti, influiscono sui costi delle tecniche agricole, come concimazione, lavorazione del terreno e irrigazione. L'aumento di sofficità conferito da una buona dotazione di sostanza organica nei terreni argillosi porta a una minore tenacità e, quindi, a costi energetici inferiori per le lavorazioni. Inoltre, le tecniche di non lavorazione, sia in seminativi che in arboreti, migliorano le proprietà fisiche del suolo. I terreni ricchi di sostanza organica presentano migliori condizioni strutturali e una maggiore capacità di ritenzione idrica, riducendo le perdite per percolazione profonda e ruscellamento, specialmente in pendenza. Questo permette di gestire in modo più flessibile i turni di irrigazione. In ogni tipo di suolo la dinamica della sostanza organica è la risultante dei processi di umificazione e mineralizzazione, che si svolgono contemporaneamente sia pure con intensità differenti secondo le condizioni pedoclimatiche. Nei suoli naturali le condizioni ambientali sono sostanzialmente stabili, con eventuali variazioni periodiche nel corso dell'anno dovute alla successione delle stagioni; ciò conduce all'instaurazione di un equilibrio dinamico, dal quale scaturisce una determinata dotazione in sostanza organica che può essere alta o bassa in relazione alle condizioni pedologiche, climatiche e vegetazionali. L'alterazione di queste condizioni, come ad esempio un disboscamento, un incendio, uno sconvolgimento climatico genera un aggiustamento delle dinamiche fino al raggiungimento di un nuovo equilibrio, che in genere s'instaura su livelli più bassi. (Haddaway, et al. 2017; Angioni 1976; Sequi 1989; Giardini 1986; Belsito, et al. 1988; Giordano 1999; Magaldi 1991; Gisotti 1988).

### 1.2.1 *Humus*

Come preannunciato, l'humus risulta essere il prodotto di diverse interazioni ambientali e attività microbiche svolte a livello del suolo, non facilmente identificabili e distinguibili. Nel corso del tempo, sono emerse diverse teorie per spiegare il processo attraverso il quale la sostanza organica presente nel suolo si trasforma in humus. Tra le teorie più riconosciute, spicca quella di Walksman del 1936, che proponeva l'idea che i diversi componenti della sostanza organica presentassero livelli di degradabilità differenti. Alcuni carboidrati e proteine venivano rapidamente degradati dai microrganismi, che li utilizzavano come fonte di energia, mentre altre sostanze, come la lignina, molto più stabili, non venivano degradate. Queste ultime costituivano i punti di aggregazione su cui i microrganismi depositavano i prodotti del loro metabolismo e le proprie spoglie, contribuendo così alla

formazione dell'humus. Un'altra teoria suggeriva che le macromolecole umiche potessero formarsi attraverso reazioni di condensazione e polimerizzazione abiotica di zuccheri riducenti e aminoacidi derivati dalla degradazione dei residui vegetali. In seguito, si è dovuto riconoscere che anche la lignina veniva degradata, portando alla conclusione che l'humus è composto da sostanze di neoformazione (Kononova, 1963). Poiché l'humus è un polimero amorfo con un peso molecolare elevato (da 200 a 300.000 Dalton), la ricerca scientifica ha cercato di identificare i monomeri da cui deriva. Attualmente, vi è un consenso sul fatto che le sostanze polifenoliche e chinoniche siano i principali monomeri che, attraverso polimerizzazione, danno origine alla molecola dell'humus. Per quanto riguarda i meccanismi di questa polimerizzazione, non ci sono informazioni definitive, a eccezione di quelle ottenute mediante la tecnica dell'ESR (Risonanza di Spin Elettronico), che ha rivelato la presenza di composti paramagnetici negli estratti umici, caratterizzati da elettroni non accoppiati, noti come radicali liberi. Questi radicali liberi, noti per la loro elevata reattività, sono considerati da alcuni autori (Schnitzer, 1986) responsabili delle reazioni che portano alla formazione dell'humus, attraverso la trasformazione dei polifenoli e dei chinoni in semichinoni che originano il polimero Humus. Le componenti chimiche dell'humus si possono classificare come di seguito:

- C= 52-58%
- H= 3,4-4,8%
- O= 34-39%
- N= 3,8-4,1%

L'humus consente di stabilire livelli di fertilità chimica più elevati, riducendo al contempo le perdite per dilavamento di azoto e fosforo, specialmente in suoli con scarsa capacità di assorbimento. I rapporti tra alcuni elementi presenti nell'humus e nei residui vegetali rivestono un'importanza particolare. Tra questi, il rapporto C/N (carbonio/azoto) ha un ruolo significativo: per l'humus, i valori ottimali si collocano tra 8 e 13, risultando simili a quelli delle leguminose (circa 15), ma molto più distanti rispetto a quelli degli stocchi di mais (circa 30) e delle paglie (circa 80). Questa diminuzione del rapporto è dovuta al fatto che molti componenti dei residui (principalmente carboidrati e lipidi, e in misura minore le proteine) vengono utilizzati dai microrganismi del suolo per soddisfare le loro esigenze energetiche, trasformandosi quindi in CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. La perdita di carbonio porta a un aumento percentuale dell'azoto, che spiega la diminuzione del valore del rapporto C/N. Questo rapporto è considerato un indicatore caratteristico dell'humus; infatti, un

valore superiore a quello ottimale suggerisce che il processo di umificazione non si è svolto in modo adeguato.

Un altro rapporto che aumenta nell'humus rispetto a quello dei composti organici di partenza è il rapporto O/H (ossigeno/idrogeno). Anche questa osservazione è logica, in quanto l'humus si forma attraverso processi di ossidazione, oltre che di polimerizzazione.

Dall'humus è possibile identificare tre componenti acide principali:

- Acidi fulvici (FA), frazione di humus estratto solubile in alcali e non in acidi, componente delle sostanze umiche con il peso molecolare più basso, che varia da circa 1.000 a 10.000 Dalton. Durante il frazionamento delle sostanze umiche, gli acidi fulvici sono facilmente distinguibili ad occhio nudo grazie al loro colore giallo. Questa loro reattività li rende particolarmente importanti nei processi di scambio ionico e nella disponibilità di nutrienti per le piante, oltre a favorire la capacità del suolo di trattenere e rilasciare elementi nutritivi essenziali.
- Acidi umici (AU), frazione di humus estratto solubile sia in alcali che in acidi, presentano un colore bruno-nerastro e sono tra le principali componenti estraibili dal suolo. Queste sostanze sono costituite da percentuali variabili di carboni aromatici e alifatici, con una struttura complessa in cui predominano i legami aromatici. Gli acidi umici, infatti, tendono ad avere un numero maggiore di anelli benzenici rispetto agli acidi fulvici. Questo conferisce loro una maggiore stabilità chimica e resistenza alla decomposizione. La presenza di queste strutture aromatiche è una delle ragioni per cui gli acidi umici contribuiscono in modo significativo alla stabilizzazione del carbonio nel suolo e alla formazione di complessi con minerali, migliorando la fertilità e la struttura del terreno. (Pettit, 2004)
- Umina (U), frazione di humus non estraibile, la sua particolarità è attribuibile al suo forte legame con le particelle argillose presenti nel suolo, formando i cosiddetti complessi argillo-umici. Questi legami stabilizzano ulteriormente l'umina e ne aumentano la resistenza alla decomposizione e solubilizzazione. È caratterizzata da un colore nero e presenta una struttura simile a quella degli acidi umici, ma con un peso molecolare più elevato rispetto alle altre classi di sostanze umiche, come confermato da Kononova nel 1966. Questa combinazione di alta massa molecolare e legami forti con le particelle minerali del suolo la rende una componente chiave nella stabilità e fertilità dei suoli, poiché contribuisce al miglioramento della

struttura del suolo e alla sua capacità di trattenere acqua e nutrienti. (Kononova, 1966)

Le sostanze organiche presenti nel suolo, durante il processo di umificazione, si differenziano in base alla loro massa molecolare. Le molecole con massa molecolare elevata, come gli acidi umici, tendono a precipitare poiché risultano meno solubili. Questo avviene perché, con l'aumento della massa molecolare, diminuisce la loro capacità di rimanere disciolte in acqua.

Al contrario, le molecole con massa molecolare più bassa, come gli acidi fulvici, nonostante la diminuzione della loro polarità, riescono a rimanere in soluzione; quindi, si caratterizzano per una maggiore solubilità rispetto agli acidi umici, e per questo rimangono disciolti nel suolo, contribuendo a una maggiore mobilità e capacità di trasporto di nutrienti all'interno dell'ecosistema del suolo. (Businelli, 2009).

### 1.2.2 *Umificazione e mineralizzazione*

L'umificazione è un insieme complesso di reazioni che portano alla formazione di macromolecole come acidi fulvici, umici e l'umina, che si allontanano progressivamente dalla struttura originaria della materia organica. La velocità di degradazione è influenzata sia dalla resistenza delle molecole organiche sia dalla loro interazione con la frazione minerale, che può proteggere la materia organica dall'azione microbica o accelerare certe reazioni. È ampiamente riconosciuto che l'humus si origina da composti di neoformazione, principalmente sostanze polifenoliche (molecole contenenti diversi gruppi fenolici, in cui un gruppo ossidrilico -OH è direttamente legato a un atomo di carbonio dell'anello benzenico) e sostanze chinoniche (composti aromatici derivati dal benzene, in cui un numero pari di gruppi -CH= è sostituito da un numero equivalente di gruppi -C(=O)-). Questo è vero soprattutto per quanto riguarda la struttura fondamentale della molecola. (Businelli, 2009)

Il processo di umificazione può essere schematicamente diviso in due fasi principali. La prima fase riguarda la decomposizione dei residui organici in composti più semplici, insieme a quella porzione che viene completamente degradata. Questo avviene grazie a un'ampia gamma di enzimi ossidanti prodotti dai microrganismi. La seconda fase implica la sintesi delle molecole umiche, attraverso processi di resintesi cellulare, condensazione e polimerizzazione per addizione nucleofila dei composti derivati dalla degradazione. Queste trasformazioni comprendono sia reazioni chimiche, che non coinvolgono organismi viventi, sia reazioni biochimiche, con un forte contributo da parte dei microrganismi nella fase finale dell'umificazione. La resintesi coinvolge alcuni metaboliti cellulari che vengono

rilasciati all'esterno della cellula per svolgere funzioni nell'ambiente del microrganismo e contribuire alla sintesi delle macromolecole di humus. Tra questi metaboliti si trovano proteine (principalmente enzimi extracellulari), carboidrati e diverse sostanze fenoliche, tutte di provenienza dal plasma microbico. La condensazione è un tipo di polimerizzazione in cui, durante l'unione dei composti, si forma non solo un dimero e poi un polimero, ma si libera anche acqua o un'altra specie chimica a basso peso molecolare. Nel processo di umificazione, la condensazione avviene principalmente attraverso la formazione di semichinoni radicalici molto reattivi, che possono derivare da sostanze polifenoliche e chinoniche. (Businelli, 2009)

La mineralizzazione della sostanza organica avviene principalmente in ambienti ben ossigenati e con alta attività biologica. Durante questo processo, i microrganismi eterotrofi, che richiedono energia e fonti di azoto per le loro attività vitali e la sintesi di composti, decompongono la materia organica. Questo porta alla sua trasformazione in anidride carbonica e acqua, mentre l'azoto viene riutilizzato in cicli biologici, riducendo il rapporto tra carbonio e azoto complessivo. ([Assessorato territorio, ambiente e opere pubbliche, 2024](#)). Il termine “mineralizzazione” riferito alla sostanza organica (SO), soprattutto in ambito agronomico, si riferisce al processo mediante il quale i residui organici, composti da organismi viventi, e le sostanze non umiche vengono decomposte fino a essere trasformate in elementi inorganici (minerali) come anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), acqua (H<sub>2</sub>O) e nutrienti essenziali come azoto, fosforo e zolfo. Questo processo è essenziale per la disponibilità di nutrienti per le piante e viene compiuto principalmente da microrganismi presenti nel suolo. La mineralizzazione vera e propria riguarda anche la decomposizione delle molecole umiche, ovvero le componenti più resistenti della sostanza organica come gli acidi umici e gli acidi fulvici. Tuttavia, è importante notare che, anche se queste molecole sono più stabili e complesse, nessuna sostanza organica può resistere indefinitamente alla degradazione microbica. Le molecole umiche e non umiche vengono degradate dai microrganismi del suolo mediante processi come l'idrolisi enzimatica, in cui gli enzimi rilasciati dai microrganismi scindono i legami chimici nelle molecole organiche. Anche se le molecole umiche sono più resistenti e richiedono tempi più lunghi per essere completamente degradate, esse non sono immuni alla decomposizione nel lungo periodo.

In sintesi, la mineralizzazione nel contesto della sostanza organica si riferisce alla conversione dei materiali organici in nutrienti disponibili per le piante, sia che si tratti di composti semplici o complessi come le molecole umiche, che nel tempo sono comunque soggette alla decomposizione microbica. (Sequi, 1989) La degradazione include tutti i

processi che portano alla formazione di monomeri, non solo quelli idrolitici. Inizialmente, i residui organici vengono frammentati, aumentando la superficie disponibile per l'attacco dei microrganismi, grazie all'azione della mesofauna, che svolge anche una funzione digestiva. Successivamente, la degradazione avanza grazie agli enzimi prodotti dalla microflora. In una fase successiva, la microfauna actinomicetica diventa predominante, agendo sulle componenti organiche più facilmente degradabili. Durante la decomposizione del substrato, si sviluppano prima colonie fungine, seguite da popolazioni batteriche. (Kononova, 1966) Con il progredire del processo, si generano ulteriore biomassa (aumento della popolazione microbica), CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, piccole quantità di ammonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, per lo più riciclato), prodotti solforati inorganici, acidi organici e altri composti intermedi parzialmente ossidati. La perdita di componenti in questa fase è principalmente dovuta alla produzione di CO<sub>2</sub>, che porta a una significativa diminuzione del rapporto C/N, diventando così un indicatore del grado di mineralizzazione della sostanza organica. I tempi necessari per i processi di degradazione dipendono dal tipo di substrato iniziale, dalla consistenza fisica di questa matrice organica, dalle sue caratteristiche fisiche e dalle condizioni climatiche. Le condizioni di aerobiosi o anaerobiosi giocano un ruolo cruciale; infatti, in assenza di ossigeno, la degradazione avviene in modo molto più lento. (Businelli, 2009).

### 1.3 Vita microbica nel suolo

Come già accennato nei capitoli precedenti, risultano fondamentali, affinché si verifichi la buona condizione per ottenere sostanza organica nel terreno, la presenza di microfauna e mesofauna. La presenza di questi organismi nei terreni agricoli è fondamentale per la fertilità biologica, una condizione che richiede l'adozione di tecniche agronomiche specifiche per essere mantenuta e migliorata. Queste tecniche comprendono sicuramente la fertilizzazione, ma è essenziale anche avere una comprensione approfondita delle funzioni del microbiota del suolo, delle dinamiche delle popolazioni microbiche e dei fattori, sia ambientali che umani, che possono influenzarle. Iniziamo con una definizione di microbiota: esso rappresenta l'insieme di microrganismi (batteri, funghi, protozoi, alghe, virus) che colonizzano un determinato ambiente in un certo periodo. Il termine microbioma, spesso usato in modo intercambiabile, si riferisce invece all'intero patrimonio genetico presente nel microbiota. Il microbiota del suolo agricolo riveste una grande importanza per vari motivi. I microrganismi svolgono un ruolo cruciale nel ciclo del carbonio, contribuendo sia alla mineralizzazione, che consente il rilascio di nutrienti dalla sostanza organica, sia all'umificazione, che porta alla creazione di sostanza organica stabile e

migliora le caratteristiche fisiche del suolo. Inoltre, una diversità microbica nel terreno favorisce un migliore stato fitosanitario delle colture. La capacità di un terreno di immagazzinare carbonio dipende dal bilancio tra umificazione e mineralizzazione della sostanza organica, che oltre a rendere disponibili per le piante gli elementi nutritivi in essa contenuti (Azoto organico in particolare), rilascia CO<sub>2</sub> nell'ambiente. Il clima e le tecniche agronomiche applicate (tra cui la concimazione), modificando gli equilibri nella composizione del microbiota, influenzano pesantemente questo bilancio, che ha implicazioni dirette sulla fertilità chimica e su quella fisica del suolo. Molti microrganismi del suolo alternano stati di attività e di quiescenza. Alcuni di essi, anche durante la quiescenza sono in grado di utilizzare le loro riserve energetiche per metabolizzare il carbonio organico del suolo, contribuendo comunque al ciclo della biomassa del terreno anche se a ritmi più lenti. La disponibilità di acqua ha un impatto significativo sulla capacità dei microrganismi di mineralizzare la sostanza organica nel suolo. Durante periodi di stress idrico, i microrganismi che riescono a resistere a tali condizioni, come quelli capaci di produrre sostanze polimeriche extracellulari, diventano predominanti. Queste sostanze creano un microambiente idratato attorno alle cellule, facilitando così le loro attività metaboliche anche in condizioni di scarsa disponibilità d'acqua. Tre parametri sono fondamentali per garantire la stabilità del microbiota di un suolo. La resistenza si riferisce alla capacità di mantenere la stabilità nonostante un disturbo. La resilienza indica invece la capacità di ripristinare una condizione stabile dopo un evento di disturbo. Infine, la ridondanza funzionale si riferisce al mantenimento dei profili funzionali del microbiota, anche in presenza di cambiamenti nella composizione tassonomica:

- a. **Resistenza:** viene generalmente valutata attraverso i cambiamenti nei profili filogenetici e funzionali in risposta a stress, che a loro volta possono influenzare le dinamiche dell'ecosistema. Per esempio, l'aumento della temperatura del suolo può modificare sia l'abbondanza che la composizione dei microrganismi coinvolti nell'ossidazione dell'ammoniaca, trasformandola in nitrati. Per affrontare gli stress, i microrganismi attuano vari meccanismi di adattamento fisiologico. Questi includono l'ispessimento delle pareti cellulari per resistere alla siccità e le modifiche alla membrana cellulare per tollerare esposizioni a metalli tossici come il rame. I microbioti più resistenti tendono a mostrare una notevole plasticità funzionale, adattando i loro profili metabolici in base alle condizioni ambientali. (Agribios, 2022).

- b. **Resilienza:** subisce l'influenza di vari fattori, tra cui spicca la prevalenza: microrganismi che sono molto abbondanti o ampiamente distribuiti hanno minori probabilità di essere eliminati da uno stress. Alcuni microbi resilienti possono entrare in uno stato di dormienza durante periodi di stress, attendendo condizioni più favorevoli. La resistenza e la resilienza sono frequentemente collegate tra loro da relazioni sia dirette che inverse. Le funzioni che dipendono da enzimi ampiamente distribuiti tendono ad avere una maggiore resistenza ma una minore resilienza, mentre quelle che si basano su enzimi con distribuzione ristretta, come la degradazione di polisaccaridi complessi, mostrano una minore resistenza ma una maggiore resilienza. Un'altra differenza tra resistenza e resilienza riguarda l'esposizione precedente a uno stress: quest'ultima spesso riduce i tassi di resilienza a un nuovo stress, mentre la resistenza di solito risulta potenziata. (Agribios, 2022).
- c. **Ridondanza funzionale:** I profili funzionali di una comunità microbica possono mantenere resistenza o resilienza anche in presenza di cambiamenti nei profili tassonomici. È stato osservato che cicli di disidratazione e umidificazione possono modificare la composizione delle comunità microbiche, ma le funzioni, come l'attività enzimatica extracellulare, l'ossidazione del metano e il ciclo del carbonio, spesso restano inalterate. In altre parole, anche se le abbondanze relative dei vari membri di una comunità funzionale possono variare in base alla loro suscettibilità allo stress, il tasso dei processi metabolici continua a rimanere stabile. (Agribios, 2022).

#### 1.4 L'inerbimento

L'inerbimento è una pratica agronomica sempre più utilizzata negli ultimi decenni, specialmente in viticoltura e frutticoltura in diverse aree d'Italia. Questa tecnica di gestione del suolo, caratterizzata da un basso impatto ambientale, viene impiegata principalmente per il controllo delle erbe infestanti tra le file degli arboreti. (Padana sementi, 2020). Quando l'inerbimento viene applicato all'interno di un arboreto, può essere considerato una forma di consociazione tra le specie vegetali coltivate. Ciò implica che si instaurano diverse interazioni tra le specie coinvolte, con effetti sia positivi che negativi sul sistema agricolo. (Baldini, 1988). A tal proposito se ne possono elencare in gran numero.

- a. *Vantaggi*
- Incremento della sostanza organica, con una mineralizzazione ridotta rispetto al terreno lavorato.

- Diminuzione dei processi erosivi, grazie alla protezione fisica contro la pioggia, a riparare il terreno dal suo “*effetto splash*” e al miglior trattenimento del suolo, oltre al ruolo della sostanza organica nell'accumulo.
- Miglioramento delle caratteristiche fisiche del suolo, come la struttura, per l'aumento di sostanza organica e la presenza delle radici erbacee che favoriscono la formazione di aggregati.
- Agevolazione del passaggio dei mezzi in campo, riducendo la compattazione grazie a una maggiore elasticità del terreno e dunque, evitamento dei fenomeni di slittamento delle macchine in caso di piogge.
- Maggiore capacità idrica del suolo, migliorando anche la capacità di infiltrazione dell'acqua.
- Maggiore movimento di fosforo e potassio in profondità, con le erbacee che facilitano l'assorbimento degli elementi nutritivi e li rilasciano sotto forma di composti assimilabili dalle piante arboree.
- Ridotti rischi ambientali legati all'inquinamento da molecole usate per concimazione e trattamenti fitosanitari.
- Abbassamento della temperatura del suolo, con un effetto di riduzione del vigore nelle piante arboree.
- Riequilibrio e aumento delle popolazioni di organismi terricoli, incrementando la biodiversità nel suolo.

(Mez, 1965; Baldini, 1988; Lal, 2004; Giardini, 2004; Badalucco et al., 2005 Bocchi et al., 2018).

b. *Svantaggi*

L'inerbimento può generare alcuni svantaggi, tra cui l'aumento della competizione per i nutrienti e, soprattutto, per l'acqua tra le piante erbacee e quelle arboree. Questo problema può essere in parte mitigato attraverso l'installazione di un sistema di fertirrigazione. Inizialmente, dopo l'introduzione del cotico erboso, si può osservare una riduzione della produttività dell'arboreto, ma con l'aumento progressivo della sostanza organica nel suolo, i problemi legati alla competizione tendono a diminuire, grazie alla maggiore capacità del terreno di trattenere acqua e nutrienti. Un altro effetto è lo sviluppo più superficiale dell'apparato radicale delle colture arboree, dovuto all'assenza di lavorazioni meccaniche che normalmente favorirebbero un approfondimento delle radici, particolarmente utile in situazioni di scarsità idrica. Come alternativa a questo inconveniente, sarebbe opportuna l'introduzione di un inerbimento solo dopo alcuni anni di gestione del suolo tramite

lavorazione, oppure optare per un inerbimento parziale prima di adottare una copertura totale. (Mez, 1965; Sansavini et al., 2012).

#### 1.4.1 *La selezione delle essenze per gli inerbimenti*

La selezione delle specie per l'inerbimento dipende dalle condizioni pedoclimatiche del luogo e dalle necessità agronomiche della coltura, oltre che dall'obiettivo specifico dell'inerbimento stesso. Tuttavia, i requisiti imprescindibili per un buon inerbimento includono la capacità di adattamento delle specie scelte e le loro basse esigenze in termini di acqua e nutrienti (Mez, 1965). I requisiti tecnici per un buon inerbimento dell'arboreto includono diversi aspetti fondamentali. Prima di tutto, è importante che vi sia un'elevata velocità di insediamento, affinché le specie scelte possano colonizzare rapidamente il terreno. Le specie devono avere basse esigenze idriche e nutrizionali per non competere eccessivamente con le piante arboree. Inoltre, è preferibile che l'apparato radicale sia ben sviluppato, ma superficiale, in modo da favorire l'approfondimento delle radici delle piante arboree. La bassa taglia e il contenuto vigore delle specie inerbenti permettono una crescita lenta, facilitandone il controllo. Un altro aspetto rilevante è la buona attitudine rinettante, cioè la capacità di contenere le infestanti, così come una buona resistenza al calpestio. Le specie scelte dovrebbero anche avere un ciclo vitale perenne, sebbene nei miscugli siano ammesse anche specie annuali, oltre a possedere una capacità di ricaccio adeguata e una buona longevità. Infine, è importante che le specie presentino una ridotta attività durante il periodo estivo. (Sansavini et al., 2012; Silvestroni et al., 2004; Mez, 1965)

Di seguito un elenco delle specie che vengono principalmente utilizzate negli inerbimenti per le interfile dei vigneti in Italia.

##### a. *Medicago*

*Medicago* è un genere di leguminose che, sebbene risulti poco comune negli inerbimenti controllati di arboreti, è spesso presente nella vegetazione spontanea dei vigneti. La ragione principale della sua limitata diffusione negli inerbimenti controllati è la sua elevata competitività per le risorse idriche. Tra le specie di *Medicago*, una delle più comuni è *Medicago lupulina*, che si caratterizza per un apparato radicale profondo e una buona capacità di fissazione dell'azoto. Queste caratteristiche possono contribuire positivamente alla fertilità del suolo, ma la sua forte competizione per acqua e nutrienti la rende meno adatta per situazioni in cui le risorse idriche sono limitate. Pertanto, pur essendo una specie interessante dal punto di vista agronomico, la sua introduzione in inerbimenti controllati deve essere valutata attentamente in relazione alle condizioni pedoclimatiche e alle esigenze delle colture arboree. (Silvestroni et al., 2004). L'unica specie che si è dimostrata

valida per l'uso in vigneto, in base a ricerche scientifiche, è *Medicago polymorpha*. Questa leguminosa è particolarmente adatta al clima delle zone mediterranee costiere e si distingue per la sua tolleranza ai suoli calcarei. È anche nota per la sua elevata attitudine rinettante, contribuendo così a controllare le infestanti e a migliorare la qualità del suolo. Tuttavia, nonostante i suoi numerosi vantaggi, *Medicago polymorpha* presenta una scarsa competitività nei confronti della vite e una limitata persistenza nel tempo. Dopo un breve periodo, infatti, la sua capacità di mantenersi nel vigneto diminuisce, il che può rendere necessarie ulteriori strategie di gestione per garantire un'efficace copertura del suolo e il controllo delle infestanti. Questo aspetto deve essere preso in considerazione dagli agricoltori che valutano l'implementazione di questa specie nei loro impianti viticoli. (Santilocchi, 2015)

b. *Festuca*

*Festuca rubra* si articola in due sottospecie: *F. rubra rubra* e *F. rubra commutata*. Tra queste, la prima è particolarmente interessante per la sua caratteristica botanica di avere rizomi-stoloni, ossia rizomi superficiali che, durante l'estate, possono disseccarsi e riportarsi in superficie. Questa adattabilità consente alla specie di sopravvivere in condizioni di forte siccità, evitando fenomeni di competizione con altre piante (Croce et al., 2006). La sua capacità di gestire le risorse idriche la rende una scelta valida per l'inerbimento, soprattutto in contesti agronomici dove la disponibilità di acqua può essere limitata.

La *Festuca arundinacea*, ha un'elevata capacità di adattamento alle condizioni pedologiche, ai regimi termici e di umidità la rende estremamente rustica e competitiva, sia nei confronti di altre erbacee sia nei confronti delle piante arboree, specialmente in situazioni di scarsa fertilità del suolo. Sebbene sia molto adattabile e presenti notevoli velocità d'insediamento e resistenza al calpestio (Croce et al., 2006), questa specie risulta davvero efficace solo se integrata con un impianto di fertirrigazione. In alternativa, l'uso di varietà a taglia bassa si è dimostrato più utile, specialmente se mescolato con loietto e altre graminacee. Queste combinazioni possono contribuire a una gestione equilibrata della vegetazione erbacea, ottimizzando la coesistenza con le colture arboree e garantendo una copertura del suolo più sostenibile. (Silvestroni et al., 2004; Sansavini et al., 2012).

*Festuca ovina*, è una delle graminacee coltivate più resistenti al freddo, tuttavia, durante il periodo estivo, mostra una scarsa attività vegetativa e risulta poco competitiva, in parte a causa del suo apparato radicale piuttosto superficiale. Questa caratteristica le consente di formare un feltro che riduce l'azione compattante causata dal passaggio delle macchine

agricole, ma al contempo la rende poco persistente; di conseguenza, è soggetta a rapida sostituzione da parte di specie infestanti.

Una valida alternativa è la *Festuca pseudovina*, una sottospecie nordeuropea di *F. ovina*. Questa sottospecie presenta vantaggi gestionali significativi, richiedendo solo un taglio all'anno, e mostra una buona persistenza nel tempo. È competitiva nei confronti delle altre erbacee, ma le sue esigenze idriche e nutrizionali non entrano in conflitto con quelle delle colture arboree, rendendola una scelta interessante per l'inerbimento in contesti agrari.

#### c. *Trifolium*

Il *Trifolium* è stato introdotto nei vigneti, soprattutto in miscugli, per le capacità di fissare l'azoto e per le limitate esigenze idriche. Tra le specie più comuni troviamo *Trifolium repens*, spesso presente nella vegetazione spontanea dei vigneti. Le varietà annuali sono particolarmente vantaggiose per la loro abbondante produzione di biomassa in primavera, contribuendo così ad aumentare il contenuto di sostanza organica nel suolo, che è succulenta e facilmente degradabile.

Alcune specie di *Trifolium*, in particolare quelle autoriseminanti e sotterranee, sono state testate in condizioni di scarsa disponibilità d'acqua e si sono dimostrate adattabili e diffuse. Queste caratteristiche fanno in modo che sia un'ottima scelta per l'inerbimento nei vigneti, contribuendo a migliorare la salute del suolo e la sostenibilità delle pratiche agricole (Sansavini et al., 2012; Silvestroni et al., 2004).

Il *Trifolium repens*, comunemente noto come trifoglio bianco, è una pianta erbacea perenne ampiamente diffusa in vari ambienti su tutti i continenti, spesso presente come specie spontanea. Si distinguono diverse varietà, tra cui la *sylvestre* (nana), la *hollandicum* (media) e la *giganteum*, o trifoglio “ladino”, caratterizzato da foglie larghe. Questa specie ha un'ottima capacità di diffondersi grazie agli stoloni, che le consentono di colonizzare rapidamente il terreno. I capolini globosi sono sostenuti da peduncoli eretti, il che contribuisce alla sua visibilità e adattabilità. Il trifoglio bianco prospera in climi temperati e umidi, adattandosi bene a terreni con fertilità e tessitura variabili, preferendo quelli che non sono eccessivamente sciolti e con pH lievemente acidi. La sua resistenza al calpestio e la capacità di fissare l'azoto la rendono particolarmente utile nell'agricoltura e nella gestione del suolo. Grazie alle sue modalità di diffusione e alla natura perenne, il trifoglio bianco è anche efficace nel contrastare l'erosione del suolo, migliorando la sua struttura e contribuendo a mantenere la sua integrità ecologica. (Baldoni et al., 1974)

Di origine mediorientale, il *Trifolium alexandrinum*, viene ampiamente coltivato in Egitto come foraggio, e oggi è molto diffuso nei paesi affacciati sul Mediterraneo. Questa

specie ha un ciclo vitale annuale e presenta un apparato radicale fittonante con steli poco ramificati. Le infiorescenze terminali a capolino allungato sono caratterizzate da fiori con corolla bianca. Adatta a climi temperato-caldi, si semina in autunno nelle regioni con inverni miti e in primavera nelle zone con temperature invernali più rigide. La specie mostra una buona adattabilità pedologica, pur preferendo terreni non acidi; tollera bene anche condizioni di tessitura argillosa. Il suo sviluppo è rapido, ma la capacità di ricaccio varia tra le diverse forme: la varietà "*Miskawi*", la più comune in Italia, consente di ottenere un numero maggiore di tagli, mentre la forma "*Fahl*" produce solo un taglio all'anno (Baldoni et al., 1974). Questo la rende una scelta interessante per le pratiche di inerbimento nei vigneti, contribuendo sia al miglioramento del suolo che alla produzione di biomassa.

Le specie di legumi sotterranei, come *Trifolium subterraneum* e *Trifolium brachycalycinum*, sono particolarmente diffuse negli ambienti più caldi e con limitata piovosità. *Trifolium subterraneum* è un'annuale caratterizzata da una folta rete di steli prostrati che proteggono la maturazione dei semi all'interno del suolo, conferendole una notevole capacità antierosiva. Questa caratteristica la rende adatta a terreni tendenzialmente acidi. D'altra parte, *Trifolium brachycalycinum* preferisce condizioni di pH neutro o leggermente alcalino, ma si dimostra meno competitivo rispetto a *Trifolium subterraneum*, poiché ha uno sviluppo più tardivo. Queste piante leguminose non solo contribuiscono a migliorare la struttura del suolo e la fertilità grazie alla loro capacità di fissare l'azoto, ma svolgono anche un ruolo importante nella prevenzione dell'erosione, rendendole utili per le pratiche di inerbimento nei vigneti e negli arboreti.

La loro capacità di adattamento a condizioni ambientali sfavorevoli e la produzione di biomassa li rendono ottimi alleati nella gestione sostenibile del suolo (Rivera, 1952; Santilocchi, 2022).

#### 1.4.2 *Tipi di inerbimento*

Esistono diverse tipologie di inerbimento, che vengono riportate e descritte di seguito.

*Artificiale*; i cui vantaggi includono una rapida copertura del suolo, la possibilità di selezionare specie vegetali adatte alle specifiche esigenze agronomiche e gestionali dell'agricoltore e il controllo ecologico delle erbe infestanti. Gli svantaggi, invece, comprendono i costi di impianto, la difficoltà nello scegliere le specie ideali e la complessa preparazione del letto di semina, che può interferire con le pratiche colturali dell'arboreto.

*Naturale*; offre diversi vantaggi, tra cui l'assenza di costi di impianto, l'adattamento spontaneo delle specie vegetali al microclima specifico e una maggiore biodiversità vegetale. Tuttavia, presenta anche alcuni svantaggi, come la lenta copertura del suolo e la

presenza di specie vegetali altamente competitive. La rapidità con cui il cotico erboso naturale si stabilisce dipende in gran parte dalla dotazione di semi presenti nel suolo.

*Permanente*; rimane sul terreno tutto l'anno e per diversi anni, senza necessità di essere rinnovato. Tuttavia, questa modalità non esclude interventi come la trasemina, per mantenere la densità del cotico, o la scarificazione, per migliorare l'aerazione del suolo e favorire la crescita delle piante.

*Temporaneo*; permane sul terreno per un periodo limitato, solitamente non oltre un anno, ed è principalmente utilizzato per apportare residui vegetali al suolo, su cui il microbiota opera azioni di degradazione accompagnata alla pratica del sovescio, può anche servire per la pacciamatura. Al termine del periodo, il cotico erboso temporaneo può essere rinnovato o lasciato decadere, a seconda delle necessità dell'anno successivo. (Silvestroni et al. 2004; Bocchi et al., 2018).

#### 1.4.3 *Tecniche di gestione agronomica*

Adottare l'inerbimento permanente, sia a tutto campo che solo nell'interfilare, è consigliabile per vigneti su terreni a basso rischio di siccità. Se le erbe spontanee presenti hanno apparati radicali superficiali e basse esigenze idriche e nutritive, come le graminacee (poe, festuche, setarie, bromi), la semina potrebbe non essere necessaria; altrimenti, sarà opportuno distribuire miscugli di sementi adeguati. Durante i primi tre o quattro anni, bisogna considerare le maggiori necessità di acqua e concimi, soprattutto azotati, per evitare un indebolimento del vigneto. Nei periodi primaverili-estivi, con rischio di siccità, sarà importante tagliare l'erba più frequentemente, evitando che cresca troppo (40-50 cm), per ridurre il suo fabbisogno di acqua e nutrienti. Nella fase di impianto dell'inerbimento, è preferibile non transitare sul terreno subito dopo le piogge, per evitare la formazione di profonde carreggiate difficili da rimediare. Una soluzione interessante è inerbire filari alterni e, dopo uno o due anni, estendere l'inerbimento all'intero vigneto, in modo da ridurre i rischi legati alla siccità. Infine, in assenza di irrigazione e su terreni leggeri, è fondamentale che il vigneto abbia almeno quattro o cinque anni prima di procedere con l'inerbimento completo. (Corazzina, 2021)

Per quanto riguarda la semina delle erbacee, è fondamentale seguire le pratiche agronomiche standard, similmente a quanto si farebbe con qualsiasi altra specie. È consigliabile garantire che il terreno sia in uno stato di tempera adeguato per poter effettuare le lavorazioni necessarie, che possono includere una o più erpicature e una rullatura pre-semine. Questi passaggi sono cruciali per preparare un letto di semina ottimale. La distribuzione della semente nell'interfilare può essere realizzata mediante una

seminatrice a file da interfilare o, in alternativa, utilizzando una semina meccanica a spaglio nel caso di inerbimenti totali. Anche la semina manuale a spaglio è un'opzione praticabile, soprattutto in situazioni più controllate o su piccole aree. La quantità di semente da utilizzare deve essere calcolata in base alla densità finale desiderata, che varia a seconda delle dimensioni dei semi, della loro purezza e germinabilità, della mortalità stimata e della manutenzione prevista per il tappeto erboso. In generale, si stima che la densità ideale per le leguminose dovrebbe aggirarsi attorno alle 300-400 piante per metro quadrato, mentre per le graminacee si prevede una densità di circa 600-800 piante per metro quadrato. Questi valori consentono di ottenere una copertura adeguata del terreno, garantendo così un buon sviluppo delle piante e una competizione efficace contro le infestanti. (Santilocchi, 2015). La profondità di semina per le specie di tappeto erboso non dovrebbe superare 1-2 cm, a causa delle piccole dimensioni dei semi. I tappeti erbosi destinati a usi non tecnici vengono coltivati con tecniche per prevenire la compattazione del terreno e l'infeltrimento, come il topdressing (riporto di materiale sabbioso e torba) e il verticutting (taglio verticale del tappeto). Anche se queste tecniche possono essere applicate agli inerbimenti d'arboreto, si tende a evitare costi aggiuntivi, sacrificando aspetti estetici e ottimizzando la coltivazione. Drenaggio, concimazione e irrigazione sono generalmente considerati complementi alle pratiche per la coltura arborea, eccezion fatta per l'irrigazione di soccorso in situazioni particolari. Le cure più comuni per l'inerbimento includono il rinfittimento, tramite trasemina, e la rianimazione, effettuata con scarificazione, che favorisce anche il rinnovo radicale delle piante arboree. Per quanto riguarda l'utilizzo dell'inerbimento, la trinciatura è la pratica preferita. Questa tecnica, sebbene porti a perdite di azoto per volatilizzazione, consente di utilizzare i residui per pacciamare il suolo sotto la fila, contribuendo all'apporto di nutrienti. Da un cotico di graminacee, si possono recuperare annualmente dalle 15 alle 20 unità di azoto per ettaro. I residui di potatura, come i sarmenti di vigneti, si decompongono rapidamente, incrementando ulteriormente i nutrienti. In alternativa, lo sfalcio può essere utilizzato per pacciamare l'interfila (Santilocchi 2015; Croce et al., 2006; Sansavini et al., 2012; Silvestroni et al., 2004).

### 1.5 Sovescio

Il sovescio è una tecnica agricola che prevede la semina di una coltura specifica, successivamente interrata una volta raggiunto uno stadio di crescita adeguato, come la fioritura, al fine di migliorare la fertilità del suolo. Benefici del sovescio:

- *Fertilizzazione del terreno*: Le leguminose utilizzate nel sovescio arricchiscono il terreno di azoto, grazie ai rizobi che fissano l'azoto atmosferico, rendendolo disponibile per le piante. Inoltre, alcune leguminose e crucifere, grazie alle loro radici profonde, rendono più accessibili i nutrienti come fosforo e potassio, migliorando la fertilità complessiva del suolo (locciagricoltura)
- *Protezione del suolo*: Il sovescio crea una copertura naturale che limita l'erosione, specialmente durante le piogge intense o nei terreni esposti. Questa protezione contro l'erosione idrica ed eolica è essenziale per mantenere l'integrità dei terreni agricoli, soprattutto in contesti biologici, dove si punta a preservare lo strato fertile del suolo. (Locciagricoltura)

La scelta delle essenze e la corretta gestione del sovescio sono fondamentali per raggiungere obiettivi come la fertilità del suolo, la biodiversità e la produzione. Spesso, per contenere i costi, si usano semi aziendali, ma questo potrebbe limitare la rotazione delle colture e impoverire l'ecosistema. È consigliabile variare le specie, come colza e senape, per migliorare la mobilizzazione del fosforo e controllare infestanti difficili. Per il sovescio, si può aumentare la quantità di seme del 10-20% rispetto alle colture pure, evitando però di eccedere per non limitare la crescita delle piante a causa della competizione. È cruciale bilanciare bene le piante nei miscugli per evitare che una specie prevalga sulle altre. Il sovescio non solo produce biomassa, ma apporta benefici attraverso le radici, che migliorano la struttura del terreno, il contenuto organico e l'azoto, oltre a mobilizzare il fosforo. Coprire il terreno con piante in ogni periodo dell'anno protegge dall'erosione, favorisce la biodiversità e riduce la lisciviazione dei nitrati. (Locciagricoltura)

I sovesci possono essere realizzati con diverse tipologie di piante, ognuna con caratteristiche specifiche:

- *Graminacee (come avena, orzo, segale, loietto)* hanno un apparato radicale fascicolato, che esplora ampie aree superficiali. Producono elevate quantità di humus grazie al rapporto C/N alto, che aumenta con la maturazione. Tuttavia, se seminate in purezza, possono causare una "fame di azoto". La semina è semplice, utilizzando seminatrici da frumento.
- *Leguminose (come veccia, favino, trifoglio)* hanno radici fittonanti, capaci di raggiungere gli strati profondi del suolo e riportare elementi nutritivi in superficie.

Rompono la suola di lavorazione, drenano l'acqua in eccesso e fissano azoto, se ben nodulate. Forniscono basse rese di humus ma aiutano la formazione di aggregati temporanei. Si adattano a vari terreni e climi.

a. *Favino da sovescio*, leguminosa comunemente utilizzata nel sovescio, la biomassa trinciata deve essere lasciata essiccare sul terreno prima dell'interramento. Il tempo di essiccazione varia in base a condizioni climatiche, temperatura e tipo di terreno. Per favorire l'azione biocida, l'interramento dovrebbe essere eseguito tempestivamente. L'interramento del sovescio deve essere superficiale e omogeneo, evitando arature profonde che potrebbero ostacolare l'assorbimento dei nutrienti e favorire fermentazioni anaerobiche dannose. Se il sovescio viene interrato correttamente, può migliorare la struttura del terreno e bilanciare il contenuto idrico, contribuendo alla fertilità complessiva. (Locciagricoltura).

- *Brassicacee* (come colza, senape, *Brassica carinata* e *Brassica juncea*) anch'esse con radici fittonanti, contribuiscono al drenaggio e migliorano la struttura del suolo. Hanno un rapporto C/N intermedio, bilanciando humus e sostanze immediatamente disponibili. Alcune specie offrono anche un'azione biocida contro nematodi e funghi parassiti. La semina può essere effettuata con seminatrici o spandiconcime. (Locciagricoltura)

#### 1.5.1 *Gestione inerbimento da sovescio*

Dalle tecniche agronomiche impiegate nella realizzazione di una coltura da sovescio, è possibile distinguere tra sovescio totale e sovescio parziale. *Nel sovescio totale*, si interra l'intera vegetazione della coltura, mentre nel sovescio parziale si procede solo all'interramento dei residui colturali, ovvero delle parti della pianta che non sono destinate alla raccolta. *Nel sovescio parziale* sono previste pratiche di incoltura come la semina su sodo, poiché, per essere considerata una tecnica di sovescio, la porzione vegetale deve essere necessariamente interrata, il che implica un intervento sul suolo. (Mez, 1965). È fondamentale seguire le buone pratiche della rotazione culturale. Infatti, gli agricoltori dovrebbero evitare di utilizzare esclusivamente leguminose o di seminare ripetutamente graminacee sulla stessa area, per prevenire attacchi di parassiti specifici di queste famiglie. Per mitigare tali problemi, è consigliabile adottare un mix di colture di copertura, in modo

da ottenere benefici agronomici superiori a quelli offerti dalla singola coltura (Bartoli, 2017).

### 1.6 La lavorazione come tecnica di gestione degli interfilari

La coltivazione della vite richiede interventi costanti durante l'anno, con particolare attenzione allo spazio tra i filari. Questo spazio, l'interfila, deve essere gestito per favorire le operazioni agricole, mantenere il suolo sano, controllare le erbe infestanti e garantire un buon equilibrio tra crescita vegetativa e produzione. Ci sono tre metodi principali per gestire l'interfila: lavorazione del terreno, inerbimento o non lavorazione con tecniche alternative al diserbo meccanico. La scelta del metodo dipende dalle condizioni del suolo e del clima. In alcuni casi, è possibile combinare entrambe le tecniche. Le opzioni principali in questo caso sono:

1. Inerbimento dell'interfila e lavorazione sottofila;
2. Lavorazione del terreno in estate e inerbimento in inverno;
3. Alternanza di lavorazione e inerbimento tra i filari.

Una volta scelta la strategia, è fondamentale utilizzare l'attrezzatura agricola adatta per garantire la corretta esecuzione di queste tecniche.

#### a. *Trinciatura residui di potatura*

Prima di iniziare le lavorazioni primaverili ed estive, è essenziale liberare il terreno dai tralci residui della potatura invernale. A tal fine, si utilizza il trinciasarmenti, una macchina progettata per triturare questi residui, riducendoli in piccoli pezzi che possono essere interrati per migliorare la fertilità del suolo oppure lasciati in superficie come copertura pacciamante per proteggerlo. Il cuore del trinciasarmenti è un rotore orizzontale dotato di un numero variabile di mazze trincianti. L'attrezzo può essere personalizzato con diversi accessori, come una piccola trincia laterale retraibile o un disco con lama rotante per operare anche sotto i filari. Questo disco, collegato alla trasmissione principale, può essere regolato in altezza e inclinazione per adattarsi al profilo del terreno, e il suo movimento è controllato idraulicamente. Nei vigneti giovani, le piante sono ancora in competizione con la vegetazione circostante. Per gestire al meglio questa fase, è consigliato l'uso di trinciasarmenti con scarico laterale, che depositano i residui triturati nel sottofila. Questo crea uno strato pacciamante che aiuta a mantenere l'umidità e protegge il suolo, favorendo così lo sviluppo delle radici delle giovani viti.

b. *Macchine per lavorazione interfilare*

Nei vigneti già avviati, le tecniche più utilizzate sono la vangatura o la ripuntatura, che risultano meno costose rispetto all'uso dell'aratro e richiedono meno potenza. Le vangatrici e gli estirpatori sono particolarmente efficaci per interrare i residui di inerbimento temporaneo. Nei terreni sabbiosi, invece, si preferisce l'uso di dischiere, che si adattano meglio a queste condizioni del suolo. Le lavorazioni ordinarie del suolo nei vigneti variano a seconda della stagione. In primavera ed estate, sono meno profonde, mentre a fine estate si raggiungono profondità fino a 25 centimetri. Alternando l'uso di diversi attrezzi – come estirpatori, erpici e zappatrici rotative – e variando la profondità di lavoro, si può prevenire la formazione della suola di lavorazione, uno strato compatto che limita lo sviluppo delle radici. Gli estirpatori, simili ai coltivatori per il minimum tillage, utilizzano coltelli di diverse forme per smuovere il terreno senza rivoltarlo, concentrandosi sullo strato superficiale. Grazie ai tastatori, si evitano danni a tronchi e pali di sostegno, e se dotati di rulli posteriori, possono anche livellare il terreno. Gli erpici a dischi, formati da uno o più ranghi di dischi bombati (lisci o dentati), rimescolano il suolo e i residui vegetali fino a una profondità di 15-20 centimetri. Gli erpici rotanti, invece, utilizzano più rotori equipaggiati con coltelli verticali e vengono azionati dalla presa di potenza del trattore per affinare e rimescolare il suolo in modo efficiente.

c. *Lavorazioni sottofila*

Le lavorazioni del sottofila nei vigneti possono essere meccanizzate, ma a determinate condizioni. Per prima cosa, i ceppi delle viti devono essere distanziati adeguatamente, avere una certa altezza e trovarsi su filari con una pendenza trasversale moderata. Le attrezzature specifiche per lavorare tra i ceppi, montate posteriormente o ventralmente al trattore, includono sempre tastatori che preservano i fusti e i pali di sostegno. Esistono erpici rotanti progettati per sminuzzare le radici delle erbe infestanti. Questi attrezzi lavorano a una profondità fino a 10 cm utilizzando uno o due rotori verticali azionati idraulicamente, che ruotano indipendentemente. In condizioni di terreno pianeggiante, le lame intercetto tagliano orizzontalmente il suolo nel sottofila, rompendo la crosta superficiale e portando in superficie le radici tagliate delle infestanti. Gli scalzarincalzatori, attrezzi molto versatili, utilizzano un rotore orizzontale con dischi che, girando in un senso, scalzano il terreno attorno alle piante, e nell'altro, rinalzano i

ceppi per proteggerli dal freddo durante l'autunno e l'inverno. Gli attrezzi interceppo possono operare su uno o due sottofila contemporaneamente e possono essere combinati con altre attrezzature per svolgere più operazioni in un unico passaggio, riducendo così il numero di interventi tra i filari, il consumo di carburante e il compattamento del suolo. Infine, piccole frese, dotate di rotori orizzontali con zappette, puntoni o denti, lavorano tra i ceppi lasciando un miscuglio di terreno lavorato e infestanti estirpate.

I vantaggi generali di questi metodi includono un ridotto compattamento del terreno, un miglior sviluppo delle radici della vite e una minore competizione per l'acqua e i nutrienti (Agronotizie, 2023).

## 2. SCOPO

Il presente lavoro di tesi è parte del progetto bandito dal MISE (Ministero dello Sviluppo Economico, oggi chiamato Ministero delle Imprese e del Made in Italy), dal titolo “Agrifood” svolto dal dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali (D3A) e che prevede la collaborazione di vari gruppi di Ricerca, tra cui quello di Chimica Agraria con il quale è stata realizzata la tesi. Lo scopo è valutare gli effetti delle diverse gestioni degli interfilari con o senza lavorazioni superficiali (fino a un massimo di 20 cm di profondità) sull’evoluzione della sostanza organica e la sua stabilità, oltre alla crescita e all’attività della biomassa microbica. Nello specifico, due vigneti della provincia di Ancona, (Camerano e Rosora) sono stati interessati da interfilari a inerbimento naturale o traseminati con orzo e favino e nell’ultimo anno *Phacelia tanacetifolia*.

Lo studio si concentra su un'analisi approfondita delle proprietà chimiche e biologiche del suolo, con particolare attenzione alla sostanza organica e alla sua evoluzione ed alla crescita della biomassa microbica. Sono state effettuate misurazioni specifiche, come la determinazione del carbonio organico, del carbonio totale estraibile, e il frazionamento di quest’ultimo in acidi umici e fulvici, componenti fondamentali per la fertilità del suolo. Per monitorare l'attività biologica del suolo, è stato analizzato il carbonio della biomassa microbica, un indicatore chiave della mineralizzazione della sostanza organica e della respirazione del suolo, processi vitali per il ciclo della materia organica.

Lo scopo finale è stato quello di valutare quale sia stata la soluzione migliore tra quelle adottate rispetto al tipo di inerbimento, alle essenze utilizzate ed alla presenza o assenza di lavorazione dell’interfilare. Le analisi svolte mirano a individuare gli effetti di queste tecniche gestionali sulla fertilità chimica e biologica del suolo di vigneto confrontando i valori ottenuti dalle diverse gestioni per evidenziare eventuali incrementi di sostanza organica e di attività microbica.

### 3. MATERIALI E METODI

#### DESCRIZIONE DEL SITO E DELLA CAMPAGNA DI CAMPIONAMENTO

Le ricerche hanno interessato due vigneti situati nelle colline della provincia di Ancona. Il primo si trova a Camerano, (codice **C**, coordinate: 43°32'17.6"N, 13°34'08"E), mentre il secondo si trova a Rosora (codice **R**, coordinate: 43°29'13"N, 13°02'48"E). Di seguito le immagini dei rispettivi siti.

I vigneti oggetto dello studio sono classificati nel macro-bioclima Temperato, con variante Sub-Mediterranea, secondo il World Bioclimatic Classification System. Entrambi sono condotti con metodi biologici.



**Camerano**



**Rosora**

**Figura 3-1:** Localizzazione dei vigneti oggetto di studio

I campioni di suolo sono stati prelevati il 20 marzo 2024.

Nel vigneto situato a Rosora sono state campionate quattro tesi, descritte nel dettaglio come segue:

- **TESI 1:** gestione con trasemina. La cronistoria di questa tesi include 3 anni di trasemina con orzo e favino, seguiti da un anno in cui è stato seminato un mix con *Phacelia tanacetifolia* e una letamazione.
- **TESI 2:** gestione con inerbimento permanente naturale. Questa interfila è interessata da inerbimento naturale dagli ultimi 6 anni e sono solo state effettuate delle trinciature.
- **TESI 3:** gestione con trasemina come TESI 1 ma con lavorazione superficiale.

- TESI 4: gestione con inerbimento naturale come TESI 2 ma con lavorazione superficiale.

Nel vigneto di Camerano invece i prelievi hanno interessato:

- TESI 2: gestione con inerbimento permanente naturale, mantenuto con interventi di trinciatura.
- TESI 5: gestione con inerbimento permanente naturale dove, per un anno, è stato seminato su sodo il *Trifolium alexandrinum* L. (trifoglio alessandrino). Questa pianta si è sviluppata molto bene, con 3 trinciature effettuate e la produzione di semi, anche se non ha rigenerato spontaneamente l'anno successivo.

Per ciascuna tesi, in entrambi i vigneti, sono stati identificati cinque punti di prelievo lungo l'interfila (denominati a, b, c, d, e). Come anticipato sono stati prelevati per ognuno dei punti di campionamento dei campioni a due profondità, rispettivamente di topsoil a 0-20 cm (codice campione **T**) e deepsoil dai 20 ai 40 cm di profondità (codice campione **D**).

**Tabella 3-1:** Codici e relativa spiegazione dei campioni

Codice campione	Descrizione
C2T	Vigneto Camerano Tesi 2 (inerbimento naturale) Topsoil
C2D	Vigneto Camerano Tesi 2 (inerbimento naturale) Deepsoil
C5T	Vigneto Camerano Tesi 5 (inerbimento naturale + <i>T.alessandrinum</i> ) Topsoil
C5D	Vigneto Camerano Tesi 5 (inerbimento naturale + <i>T.alessandrinum</i> ) Deepsoil
R1T	Vigneto Rosora Tesi 1 (trasemina orzo+favino + <i>P.tanacetifolia</i> ) Topsoil
R1D	Vigneto Rosora Tesi 1 (trasemina orzo+favino + <i>P.tanacetifolia</i> ) Deepsoil
R2T	Vigneto Rosora Tesi 2 (inerbimento naturale) Topsoil
R2D	Vigneto Rosora Tesi 2 (inerbimento naturale) Deepsoil
R3T	Vigneto Rosora Tesi 3 (trasemina orzo+favino + <i>P.tanacetifolia</i> e lavorazioni) Topsoil

R3D	Vigneto Rosora Tesi 3 (trasemina orzo+favino + <i>P.tanacetifolia</i> e lavorazioni) Deepsoil
R4T	Vigneto Rosora Tesi 4 (inerbimento naturale e lavorazioni) Topsoil
R4D	Vigneto Rosora Tesi 4 (inerbimento naturale e lavorazioni) Deepsoil

### 3.1 Preparazione dei campioni

I campioni raccolti sono stati sottoposti a una serie di trattamenti preliminari: essiccazione all'aria, macina e setacciatura con una maglia di 2 mm per ottenere la "terra fine", che è stata utilizzata per le analisi. Per assicurare rappresentatività nei risultati, le cinque repliche (a, b, c, d, ed e) di ciascuna tesi sono state miscelate in parti uguali, mantenendo separate le due profondità (Topsoil T e Deepsoil D). Questo processo ha prodotto dei "macro-campioni" che, per il sito di Rosora, sono otto in totale, e per quello di Camerano quattro.

I macro-campioni ottenuti, sono stati sottoposti alle analisi descritte nei capitoli che seguono.

### 3.2 Analisi del Carbonio Organico Totale (TOC)

Il contenuto totale di carbonio organico (TOC) serve come indicatore essenziale della qualità del suolo. La sua determinazione segue il metodo di Walkley e Black del 1934, che implica l'ossidazione della sostanza organica attraverso una soluzione acida di bicromato di potassio ( $K_2Cr_2O_7$ ) 1 N in eccesso, in presenza di acido solforico. Dopo 30 minuti, la reazione viene bloccata con acqua deionizzata, seguita dall'aggiunta di acido ortofosforico ( $H_3PO_4$ ) e difenilammina, un indicatore blu-viola ossido-riduttivo, per facilitare il cambiamento di colore nella titolazione. La quantità di bicromato in eccesso, non coinvolta nell'ossidazione del carbonio organico, viene quindi titolata con solfato ferroso ammonico (noto come sale di Mohr) 0,5 N fino al punto di viraggio, visibile come passaggio da viola a verde. In parallelo, una prova in bianco effettuata in beute con i soli reagenti, senza suolo, aiuta a calcolare il fattore di correzione, che corregge l'ossidazione spontanea del ferro e la

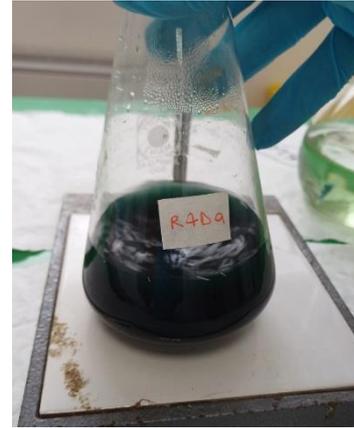
variabilità del sale di Mohr. Attraverso calcoli e il principio di equivalenza chimica, è quindi possibile derivare la percentuale di carbonio organico tramite la formula:

$$C (\%) = [(20 - ml * f) * 0,5 * 3] / 10$$

- Il valore **20 ml** teorici di Sale di Mohr a 0.5 N rappresenta il volume teorico richiesto per completare la reazione con il bicromato di potassio ( $K_2Cr_2O_7$ ) utilizzato come ossidante.
- Il volume effettivo di Sale di Mohr usato nella titolazione è misurato e registrato durante l'analisi. Indicato come **ml**, questo è il volume realmente consumato per raggiungere il punto finale della reazione.
- Il fattore di correzione **f** è dato dal rapporto tra i ml teorici e i ml reali di Sale di Mohr. Serve per correggere la differenza tra il volume teorico e quello reale
- Il valore **0.5** è la normalità (N) del Sale di Mohr utilizzato per la titolazione. Questo parametro è fondamentale per calcolare correttamente il rapporto stechiometrico tra i reagenti.
- Il peso equivalente del carbonio (**C**) si ottiene dividendo il peso atomico del carbonio (**12**) per la valenza del carbonio in questa reazione redox (**4**)
- Il valore **10** è usato per convertire il risultato in una percentuale, moltiplicando per 100 e dividendo per 1000 per esprimere il risultato in mg/Kg.
- Per ottenere la percentuale di sostanza organica totale (SO), si tiene conto che il carbonio rappresenta circa il 58% della sostanza organica. Pertanto, si applica il fattore 1.72 per convertire la percentuale di carbonio nella percentuale di SO (%)  
 $= C (\%) \times 1.72$



**Figura 3-2:** Reazioni con acido solforico per titolazioni TOC



**Figura 3-3:** Viraggio da viola a verde per titolazione con sale di Mohr (**Figura 3-4**).

### 3.3 Respirazione microbica

Per l'esecuzione di questa analisi è stato seguito il procedimento di Bloem et al. (2008). Per questa analisi vengono utilizzati 30 grammi di suolo secco, che deve essere umidificato fino a raggiungere il 40-60% della sua capacità di ritenzione idrica. Durante l'incubazione in un sistema a chiusura ermetica, la CO<sub>2</sub> prodotta viene catturata da una soluzione di NaOH (0.2 M), che successivamente viene titolata con HCl (0.1 M) dopo l'aggiunta di BaCl<sub>2</sub> al 20% (0.75 N) e dell'indicatore fenolftaleina all'1%. Parallelamente, si esegue la stessa procedura per i campioni di controllo contenenti solo NaOH. Le titolazioni, caratterizzate da un viraggio dal fucsia (dato dalla fenolftaleina) a bianco-trasparente, vengono ripetute regolarmente, con una frequenza maggiore nelle prime due settimane (ogni tre giorni) e successivi intervalli più lunghi, fino alla stabilizzazione dei valori. L'intera prova di respirazione dura circa 30-40 giorni. I risultati vengono espressi in mg di carbonio respirato per grammo di suolo e si calcolano come segue:

$$\text{mg C respirato / Kg} = \frac{[(B - C) * N * 6] * 1000}{P}$$

- **B** = ml HCl usati per i bianchi
- **C** = ml HCl usati nel campione
- **N** = normalità del titolante (HCl)
- **6** = peso equivalente Carbonio (peso atomico 12 / valenza 2)
- **1000** = fattore percentuale per convertire in mg/Kg
- **P** = peso in grammi di campione secco

I risultati sono rappresentati tramite una curva cumulativa e servono per calcolare il quoziente metabolico ( $qCO_2$ ) e il quoziente di mineralizzazione ( $qM$ ). Le formule applicate per questi calcoli sono:

- $qCO_2 = C_{bas} \text{ (respirazione basale)} / CB \text{ (carbonio biomassa)}$
- $qM = C_{cum} \text{ (respirazione cumulativa)} / TOC \text{ (carbonio organico totale)}$

Questi parametri offrono informazioni utili per comprendere l'efficienza e l'attività metabolica della biomassa microbica nel suolo.



**Figura 3-5:** Sistemi ermetici per la respirazione microbica.



**Figura 3-6:** Aggiunta di HCL 0.1 M fino al viraggio da fucsia a bianco.

### 3.4 Carbonio della biomassa

Il protocollo per la determinazione del carbonio della biomassa, basato su Vance et al. (1987), prevede il calcolo della differenza tra il carbonio organico solubile in solfato di potassio presente in un campione di suolo sottoposto a fumigazione (F) e quello rilevato nello stesso campione non fumigato (NF) (Setia et al., 2012). La fumigazione viene condotta con cloroformio, che agisce come agente biocida, in essiccatori a vuoto mantenuti per almeno 16 ore. Il processo inizia con l'umidificazione graduale dei campioni di suolo fino a raggiungere tra il 40 e il 60% della loro capacità di ritenzione idrica. Successivamente, ai campioni fumigati (F) e non fumigati (NF) si aggiunge una soluzione estraente di solfato di potassio ( $K_2SO_4$ ) 0.5 M, e poi si procede con centrifugazione e filtrazione. Dall'estratto si preleva un volume noto, a cui vengono aggiunti acido fosforico ( $H_3PO_4$ ), bicromato di potassio ( $K_2Cr_2O_7$ ) 0.4 N in eccesso e acido solforico ( $H_2SO_4$ ). I campioni vengono poi riscaldati per 30 minuti a  $120^\circ C$  e successivamente la reazione di ossidoriduzione viene bloccata con acqua deionizzata. Parallelamente viene svolta una prova in bianco usando solo la soluzione estraente senza il suolo. Nella fase finale, si aggiunge un indicatore (fenantrolina-ferro solfato) per titolare il bicromato in eccesso con il ferro del sale di Mohr (0.033 N). Durante la titolazione, l'indicatore permette di osservare una serie di variazioni cromatiche: dall'arancione al giallo, verde, azzurro, grigio e trasparente, fino a un colore finale rosa. Il carbonio biomassa è espresso in mg C/Kg e si ottiene dalla differenza in g C/Kg tra il campione F e NF, moltiplicata per un fattore di correzione empirico di 2.64. Segue la formula per il calcolo:

$$\text{mg C biomassa / Kg} = [(C - F) * f * N * 3 * D] * 1000 / P$$

- C indica i millilitri teorici di Sale di Mohr che dovrebbero essere consumati.
- F è il volume reale, in millilitri, di Sale di Mohr effettivamente usato nella titolazione del campione fumigato (F) o non fumigato (NF).
- f è il fattore di correzione, calcolato come il rapporto tra i millilitri teorici e quelli reali di Sale di Mohr.
- N rappresenta la normalità della soluzione di Sale di Mohr.
- Il valore 3 si riferisce al peso equivalente del carbonio, ottenuto dividendo il peso atomico del carbonio per la sua valenza.
- D è il fattore di diluizione, calcolato come il rapporto tra il volume totale della soluzione estraente usato per campione (25 ml) e il volume dell'estratto usato nella titolazione (8 ml).

- **1000** è un fattore di conversione, usato per esprimere il risultato in mg per kg di campione.
- **P** rappresenta il peso del campione di suolo utilizzato, espresso in grammi (10 g).



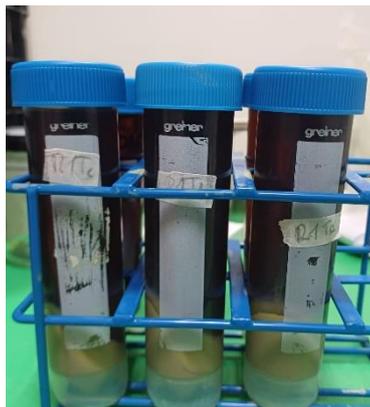
**Figura 3-7:** *Campioni non fumigati e fumigati per carbonio della biomassa.*



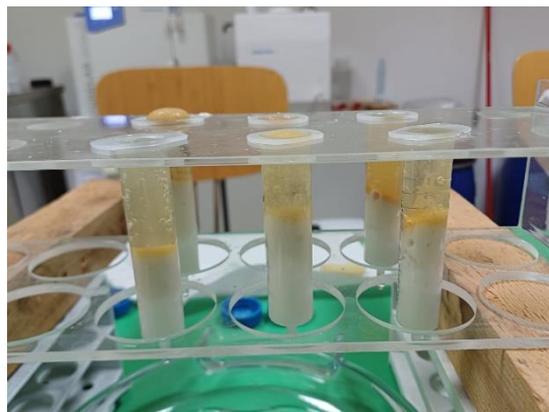
**Figura 3-8:** *Reazioni per estrazione carbonio della biomassa, destinati a titolazione.*

### **3.5 Analisi del Carbonio Totale Estraiibile, Acidi Umici e Acidi Fulvici**

Il carbonio totale estraibile (TEC) indica la percentuale di carbonio organico che non è legato a strutture stabili e comprende sia la frazione non umificata (NH) sia quella umificata (HA + FA). La metodologia utilizzata è quella proposta da Schnitzer nel 1983. Per determinare il TEC, il suolo secco e setacciato a 0,5 mm viene trattato con una soluzione estraente contenente 0,1 M di pirofosfato di sodio ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) e idrossido di sodio (NaOH), come descritto da Marinari et al. nel 2007. Dopo il trattamento, si procede con centrifugazione e filtrazione del liquido; l'estratto risultante rappresenta quindi il carbonio totale estraibile, come in figura.



**Figura 3-9:** TEC estratto e separato.



**Figura 3-10:** Colonnine estrazione acidi fulvici.

L'estrazione permette di ottenere una notevole quantità di humus, circa l'80%, mentre la parte rimanente rimane legata alle componenti minerali del suolo, formando l'umina. Una porzione di questo estratto viene conservata a 4°C per la successiva titolazione del carbonio totale estraibile (TEC), mentre il resto viene sottoposto a frazionamento per determinare le componenti umiche e fulviche. Il frazionamento si basa sulla diversa solubilità degli acidi umici (HA) e degli acidi fulvici (FA) in un ambiente acido. Aggiungendo H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 50% all'estratto fino a raggiungere un pH compreso tra 1 e 2, si neutralizzano i gruppi funzionali acidi, causando la precipitazione degli acidi umici; gli acidi fulvici, invece, rimangono in sospensione insieme alle impurità organiche e formano il liquido surnatante. Per ottenere una purificazione degli acidi fulvici (FA), l'estratto passa attraverso resine di polivinilpirrolidone (PVP), che selezionano esclusivamente questa frazione. Gli acidi fulvici vengono poi recuperati tramite lisciviazione con una soluzione di NaOH (0.5 M). Successivamente, si procede a determinare le tre frazioni isolate (carbonio totale estraibile - TEC, acidi umici - HA e acidi fulvici - FA) utilizzando la titolazione con sale di Mohr, applicando lo stesso metodo usato per il carbonio organico totale. Per calcolare le quantità di TEC, HA e FA, si utilizza la formula seguente:

$$\text{TEC o HA o FA (g/Kg)} = [(10 - \text{ml} * f) * 0.5 * 3 * D] / 10$$

- **10** rappresenta i millilitri teorici di Sale di Mohr a concentrazione 0.5 N.
- **ml** è il volume effettivo di Sale di Mohr utilizzato durante la titolazione.
- **f** è il fattore di correzione, calcolato come rapporto tra i millilitri teorici e quelli reali di Sale di Mohr.
- **0.5** è la normalità (N) del Sale di Mohr.
- **3** è il peso equivalente del carbonio (ottenuto dal peso atomico del carbonio diviso la sua valenza).

- **D** è il fattore di diluizione, pari a 10, calcolato come rapporto tra i 100 ml totali della soluzione estraente e i 10 ml effettivamente titolati.



**Figura 3-11:** Viraggio titolazione TEC a viola.



**Figura 3-12:** Viraggio TEC a verde.

### 3.5.1 Indici

Mediante queste analisi è necessario ricorrere, per determinare i risultati, a dei parametri fondamentali nel processo di umificazione. Segue un breve elenco con esposizione delle loro funzioni.

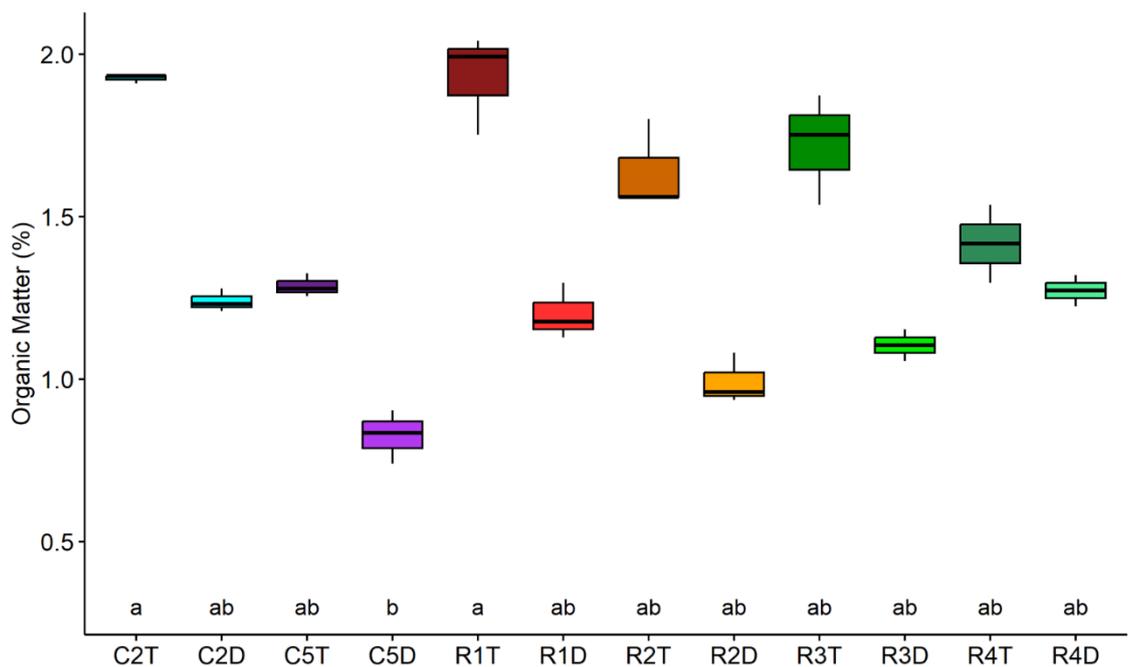
- **Indice di Umificazione (HI)**, è il rapporto tra non umificato e umificato ( $NH/HA+FA$ ) consente di valutare quanto le sostanze non umificate incidano sul TEC; assume valori prossimi allo zero quando la sostanza organica del suolo risulta quasi del tutto umificata. Pertanto, un valore inferiore dell'indice delinea una maggiore predominanza dei processi di umificazione rispetto a quelli di mineralizzazione.
- **Grado di umificazione (DH)**, rappresenta la percentuale di sostanze umiche ( $HA+FA$ ) sul totale del carbonio estraibile (TEC); un valore elevato di questo indice suggerisce una maggiore capacità del suolo di convertire la sostanza organica disponibile in forme umificate.
- **Rapporto tra acidi umici e acidi fulvici (HA/FA)**, è un indicatore importante della qualità delle sostanze umiche. Un valore superiore a uno indica una prevalenza di acidi umici (HA), che sono considerati essenziali per migliorare la fertilità del suolo e favorire l'attività microbica (Senesi et al., 2018).

## 4. RISULTATI E DISCUSSIONE

### 4.1 Sostanza organica: contenuto e composizione

Il contenuto di sostanza organica totale nelle diverse tesi è riportato di seguito in figura 4-1.

Non sono state riscontrate differenze significative tra le tesi e ciò era prevedibile visto che ciascuna tecnica apporta comunque materiale organico circa alla stessa quantità. I valori medi negli strati superficiali sono pressoché simili nei due vigneti, soprattutto rispetto alle tecniche adottate ed in generale tali valori risultano sempre più elevati rispetto a quelli negli strati profondi, anche e soprattutto grazie alla presenza degli apparati radicali delle essenze erbacee.



**Figura 4-1:** Percentuale di sostanza organica. Lettere diverse indicano differenze statistiche rilevate secondo il test non parametrico Kruskal Wallis e il Dunn post-hoc test. ( $\alpha$  level=0,05).

Il contenuto di sostanza organica riscontrato nelle diverse tesi analizzate risulta simile a quello trovato in prove effettuate le 2023 negli stessi vigneti e notevolmente più basso di quello riscontrato negli stessi suoli inerbiti per 15 e 30 anni (Canuti, 2023) indicando che 4 anni di pratiche di inerbimento non sono sufficienti a raggiungere contenuti di sostanza organica ottimali in un regime di agricoltura biologica quale è quello del presente esperimento.

Per una analisi più approfondita degli effetti delle differenti tecniche di inerbimento sulla qualità della sostanza organica fresca e/o umificata, bisogna osservare i dati relativi al carbonio estraibile e a quello degli acidi umici e fulvici, riportati rispettivamente nelle figure 2, 3, 4.

Il carbonio estraibile (TEC, Total Extractable Carbon) rappresenta in gran parte il carbonio umificato, più quello estratto relativo a piccole molecole organiche polari (proteine, carboidrati, acidi organici ecc.) che rappresentano le cosiddette impurezze.

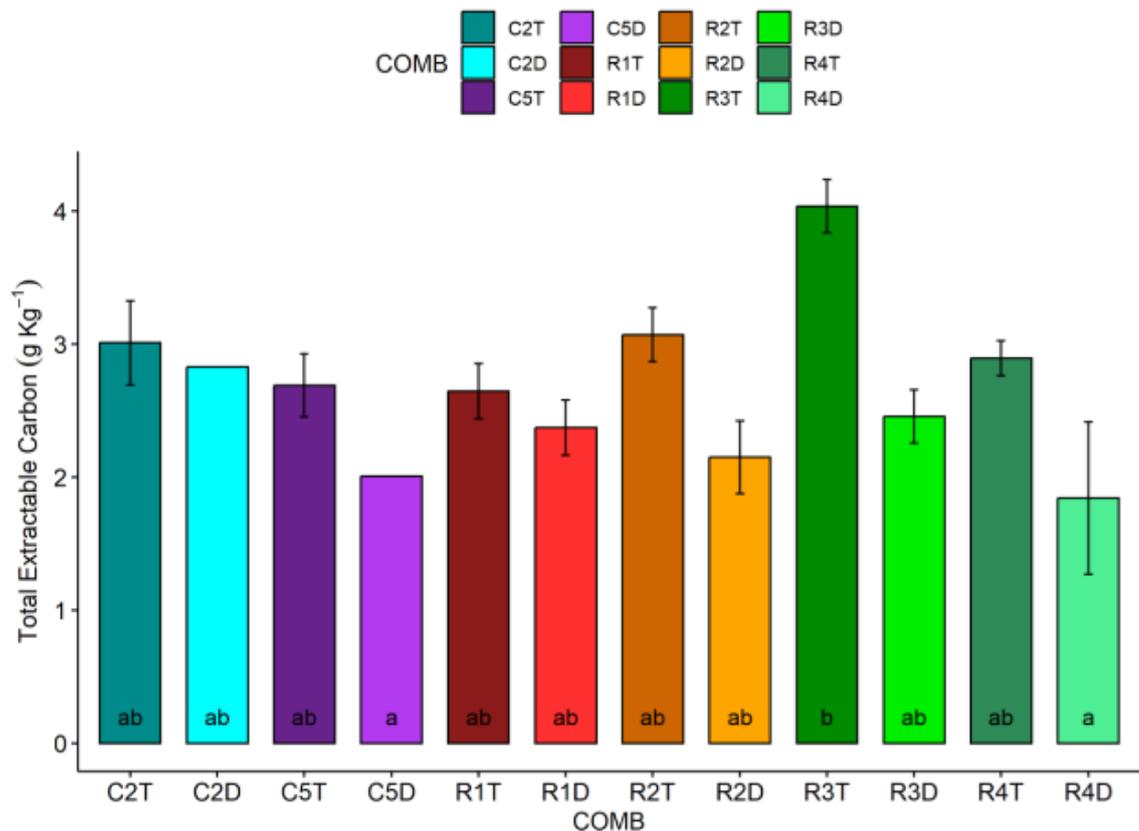
La prima cosa da controllare è la percentuale di TEC rispetto al TOC che fornisce una idea di quanto è il carbonio che non viene estratto e che è intimamente legato alla componente inorganica del suolo. (Tabella 4-1)

**Tabella 4-1: Valori TEC/TOC**

	TEC/TOC
TRT	%
C2T	26,89
C2D	39,28
C5T	35,98
C5D	41,84
R1T	23,55
R1D	33,97
R2T	32,20
R2D	37,28
R3T	40,40
R3D	38,33
R4T	35,10
R4D	24,88

Nel suolo superficiale, la percentuale di TEC rispetto al TOC varia dal 23,55% in R1T al 41,84% in C5D. I con variazioni contenute e comunque percentuali basse indicando che le pratiche di conservazione non avevano avuto un impatto significativo su questa forma di carbonio organico. Francaviglia et al. (2017) hanno osservato un rapporto TEC/TOC compreso tra il 71% e l'81% nei suoli superficiali di vigneti con diverse modalità di gestione, come lavorazione del suolo e inerbimento, evidenziando una scarsa presenza di umina, ossia la frazione di carbonio organico legata ai minerali del suolo. D'altro canto, Saviozzi et al. (2001) hanno riportato valori più bassi, intorno al 18%, in suoli prativi e forestali superficiali, indicando che una parte considerevole del carbonio organico era incorporata nei componenti organo-minerali del suolo, proteggendola dalla degradazione e dalla trasformazione in CO<sub>2</sub>. Diversi studi, inoltre, hanno dimostrato l'importanza della frazione minerale nel catturare e stabilizzare il carbonio organico (Giannetta et al., 2019).

La Figura 4-2 riporta i valori di TEC per i vari campioni di suolo a due profondità.



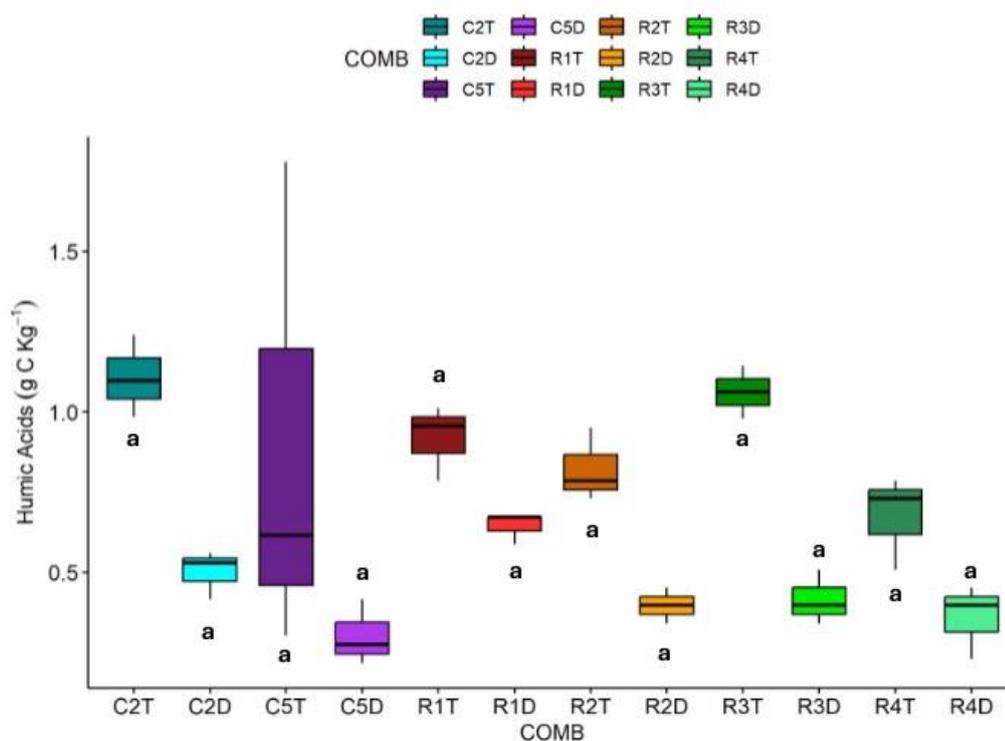
**Fig. 4-2:** *Contenuto di carbonio totale estraibile. Lettere diverse indicano differenze statistiche rilevate secondo il test parametrico Kruskal Wallis e il Dunn post-hoc test. ( $\alpha$  level=0,05).*

Negli strati superficiali dei vari campioni non si rilevano differenze significative tra le tesi, indicando che sia i tipi di essenze presenti sia l'effettuazione di lavorazioni superficiali non influenzano il contenuto di carbonio estraibile, cosa che avviene anche per gli strati profondi.

La presenza di acidi umici ed acidi fulvici nel carbonio estraibile è riportata nelle figure 4-3 e 4-4.

Gli acidi umici sono i principali responsabili della fertilità del suolo in quanto svolgono al meglio tutte le funzioni dell'humus già descritte in precedenza.

I valori riscontrati negli strati superficiali non sono risultati differenti ma sempre più elevati rispetto a quelli degli strati profondi. R3T (trasemina + lavorazioni) ha valore più alto.



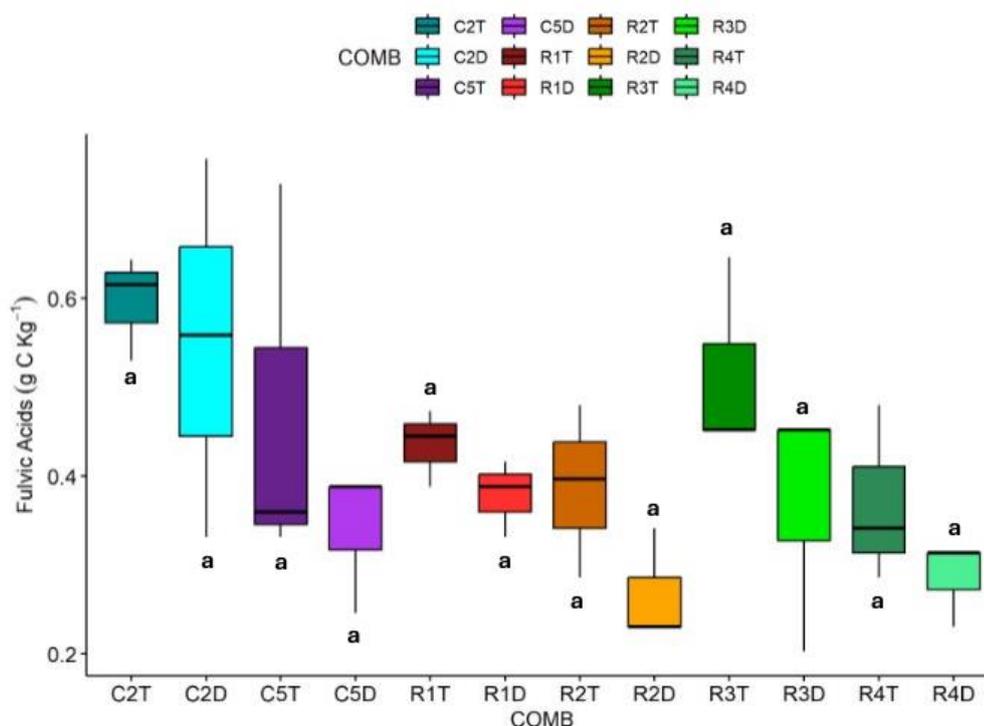
**Fig. 4-3:** *Contenuto di acidi umici. Lettere diverse indicano differenze statistiche rilevate secondo il test parametrico Kruskal Wallis e il Dunn post-hoc test. ( $\alpha$  level=0,05).*

Valori più elevati di HA si riscontrano in C2T (naturale) e R3T (trasemina + lavorazioni) e se confrontati con i valori delle capezzagne campionate l'anno precedente possiamo dire

che gli acidi umici sono aumentati e si avvicinano ai suoli inerbiti da 15 e 30 anni. (Canuti, 2024)

Un periodo prolungato di copertura del suolo senza lavorazioni permette una evoluzione della sostanza organica verso forme resilienti come gli acidi umici, come alcuni autori hanno riscontrato in prati permanenti rispetto a suoli forestali (Filip and Tesarova, 2004). In questo lavoro non si riscontrano differenze nel contenuto di acidi umici tra suolo indisturbato e suolo lavorato, probabilmente a causa della lavorazione superficiale relativamente leggera, senza particolari disturbi della componente microbica.

Anche la profondità può influire sull'evoluzione della sostanza organica in humus e ciò è risultato evidente in questo lavoro, con valori differenti tra strati superficiali e profondi. Lavori effettuati su questo aspetto indicano invece una differente distribuzione degli acidi umici in prati permanenti di 25 anni, con valori più elevati in profondità rispetto a quelli superficiali (Banach-Szott and Dziamski, 2022), ma anche in questo caso si può affermare che i quattro anni passati dall'inizio della prova hanno permesso una umificazione accettabile solo nello strato superficiale dove l'attività microbica è stata più attiva.



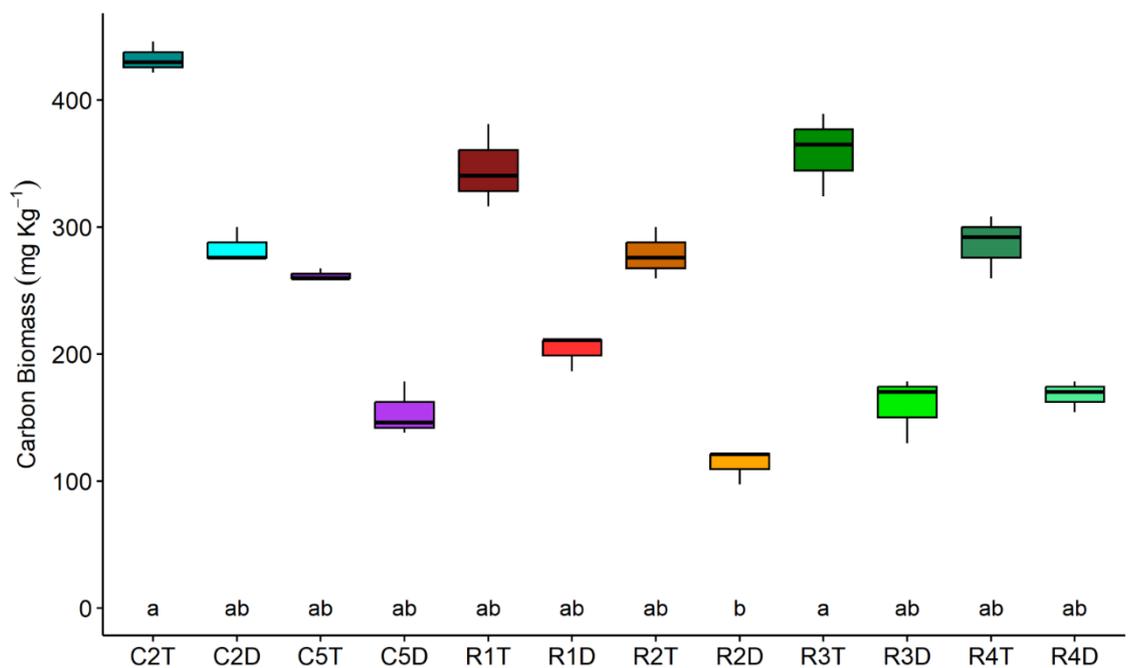
**Fig. 4-4:** *Contenuto di acidi fulvici. Lettere diverse indicano differenze statistiche rilevate secondo il test parametrico Kruskal Wallis e il Dunn post-hoc test. ( $\alpha$  level=0,05).*

Se confrontiamo i dati del 2023 nelle tesi C2, R1 e R2 sembra che gli acidi fulvici siano rimasti stabili nel tempo.

Una conferma indiretta di queste considerazioni si può avere osservando il contenuto in acidi fulvici riportato nella figura 4-4.

In questo caso non si riscontrano differenze significative né nel contenuto di acidi fulvici delle varie tesi, né tra strati superficiali e profondi. Essendo gli acidi fulvici considerati da molti autori come precursori degli umici, si potrebbe dedurre che negli strati profondi la evoluzione in acidi umici è più lenta e in 4 anni non si è ancora ottenuto un risultato soddisfacente per cui non si riscontrano differenze nel contenuto di questa parte di humus tra strati superficiali e profondi. I valori di acidi fulvici riscontrati risultano simili a quelli rilevati nell'esperimento dell'anno precedente.

#### 4.2 Attività microbica

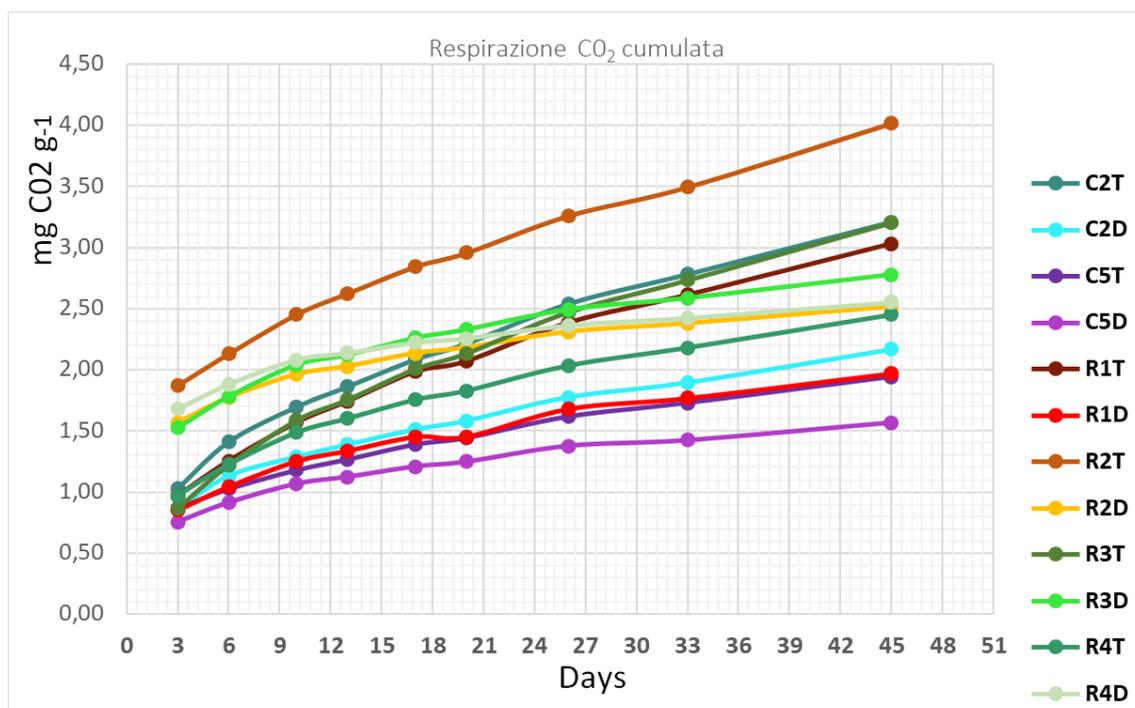


**Fig. 4-5:** *Contenuto di carbonio microbico. Lettere diverse indicano differenze statistiche rilevate secondo il test parametrico Kruskal Wallis e il Dunn post-hoc test. ( $\alpha$  level=0,05).*

Il contenuto di carbonio biomassa nei suoli studiati e nelle varie tesi è comparabile a quello rilevato in altri suoli a gestione simile (Leone, 2023). In ogni caso sia la trasemina sia l'inerbimento permanente hanno dato risultati simili nello strato superficiale in entrambi i suoli e in tutte le tesi. Ciò probabilmente indica che la presenza di biomassa microbica è legata soprattutto alle gestioni conservative dell'interfilare, a prescindere se si tratti di trasemina di una sola essenza o di miscugli di inerbimento permanente e non è

sostanzialmente influenzata da lavorazioni leggere nei primi 20 cm di suolo. I valori negli strati superficiali sono risultati più elevati rispetto agli strati profondi anche se non significativamente differenti.

Il contenuto in biomassa microbica dei due suoli sotto le due gestioni dell'interfilare risulta comunque elevato e confrontabile con i risultati di altri lavori riportati per diversi vigneti (Leone, 2023). Tali risultati sono la conseguenza di una gestione oculata, anche se per analizzare appieno gli effetti sulla fertilità bisognerà valutare l'attività della biomassa microbica. I valori più elevati di carbonio microbico si sono riscontrati proprio nei campioni con più alto contenuto di carbonio organico e di carbonio estraibile (C2T e R3T) confermando che la biomassa microbica si sviluppa meglio in presenza di carbonio organico necessario al suo metabolismo.



**Fig. 4-6:** *Respirazione microbica cumulata.*

La misura della respirazione microbica fornisce indicazioni sulla attività della biomassa microbica. La semina annuale e l'inerbimento permanente non sono strettamente connessi all'aumento della biomassa microbica, mentre influenzano positivamente la sua attività, come mostrato anche da altri autori (Saviozzi et al., 2001; Monaci et al., 2017). Per questo è necessario condurre indagini sulla respirazione microbica del suolo.

I risultati della respirazione microbica cumulata per 45 giorni, riportati in Figura 6, mostrano valori maggiori nello strato superficiale se paragonato al corrispettivo strato profondo e, in generale, la respirazione è risultata decisamente più elevata nei primi 20 cm della 2T di Rosora, cioè nello strato superficiale del suolo a inerbimento permanente e non lavorato, dove nessun tipo di disturbo ha permesso alla flora microbica di svolgere una maggiore attività.

L'analisi della respirazione microbica ha permesso di calcolare una serie di indici che semplificano la comprensione dei dati ottenuti, fornendo un quadro generale completo dell'attività della biomassa microbica. Tali parametri (C<sub>bas</sub>, C<sub>cum</sub>, qCO<sub>2</sub>, qM) sono riportati nella tabella 4-2.

	CCUM	CBAS (bSR)	QM (nSR)	qCO <sub>2</sub>
COMB	Mean ± sd	Mean ± sd	Mean ± sd	Mean ± sd
C2T	874,67 ± 4,16 a	8,97 ± 0,32	7,81 ± 0,02	0,87 ± 0,03
C2D	590,67 ± 26,00 ab	5,69 ± 2,00	8,20 ± 0,47	0,84 ± 0,32
C5T	529,33 ± 5,29 ab	4,46 ± 0,41	7,08 ± 0,26	0,71 ± 0,06
C5D	427,33 ± 4,16 b	3,03 ± 0,32	8,96 ± 0,98	0,83 ± 0,17
R1T	826,67 ± 4,00 ab	8,77 ± 0,31	7,41 ± 0,65	1,06 ± 0,06
R1D	536,67 ± 11,55 ab	4,21 ± 0,89	7,72 ± 0,68	0,88 ± 0,25
R2T	1094,67 ± 86,33 a	10,92 ± 6,66	11,56 ± 1,59	1,65 ± 1,02
R2D	686,00 ± 8,33 ab	2,87 ± 0,64	11,95 ± 1,03	1,05 ± 0,12
R3T	873,33 ± 19,29 ab	9,85 ± 1,48	8,79 ± 0,84	1,16 ± 0,28
R3D	757,33 ± 2,00 ab	4,00 ± 0,15	11,81 ± 0,50	1,07 ± 0,23
R4T	668,00 ± 3,06 ab	5,64 ± 0,24	8,15 ± 0,69	0,82 ± 0,08
R4D	695,33 ± 5,03 ab	2,67 ± 0,39	9,41 ± 0,40	0,67 ± 0,14

**Tabella 4-2:** Parametri di fertilità dei campioni e indici dell'attività microbica. Lettere diverse indicano differenze statistiche rilevate secondo il test parametrico Kruskal Wallis e il Dunn post-hoc test. ( $\alpha$  level=0,05).

La respirazione cumulata riflette l'andamento di quella basale con valori più elevati nelle tesi C2T e R2T.

I valori di qCO<sub>2</sub> risultano minori dell'unità in quasi tutti i casi studiati indicando una attività microbica ottimale e senza sofferenze particolari. Valori maggiori dell'unità si riscontrano nelle tesi R2T e R3T indicando che in queste tesi la biomassa ha una notevole attività che può anche portare a una certa sofferenza. I valori di QM sono ottimali ed in linea con quelli riportati per terreni simili e con gestione simile dell'interfilare (De Bernardi

et al., 2024), indicando un'efficiente attività microbica nella metabolizzazione del carbonio organico del suolo.

**Tabella 4-3:** Parametri e indici di umificazione. Lettere diverse indicano differenze statistiche rilevate secondo il test parametrico Kruskal Wallis e il Dunn post-hoc test. ( $\alpha$  level=0,05).

	NH	DH (%)	HR (%)	HI	HF(CHA/CFA)
COMB	Mean $\pm$ sd	Mean $\pm$ sd	Mean $\pm$ sd	Mean $\pm$ sd	Mean $\pm$ sd
C2T	1,31 $\pm$ 0,18	56,7 $\pm$ 1,5	15,22 $\pm$ 1,28	0,76 $\pm$ 0,05	1,87 $\pm$ 0,30
C2D	1,78 $\pm$ 0,17	37,2 $\pm$ 5,9	14,57 $\pm$ 2,20	1,74 $\pm$ 0,47	1,05 $\pm$ 0,53
C5T	1,32 $\pm$ 0,55	50,5 $\pm$ 21	18,49 $\pm$ 9,06	1,19 $\pm$ 0,74	2,50 $\pm$ 2,57
C5D	1,36 $\pm$ 0,03	32,1 $\pm$ 1,6	13,49 $\pm$ 1,64	2,12 $\pm$ 0,16	0,99 $\pm$ 0,62
R1T	1,29 $\pm$ 0,24	51,4 $\pm$ 6,2	12,08 $\pm$ 0,26	0,96 $\pm$ 0,23	2,13 $\pm$ 0,43
R1D	1,35 $\pm$ 0,12	43,1 $\pm$ 0,7	14,66 $\pm$ 1,09	1,32 $\pm$ 0,04	1,71 $\pm$ 0,08
R2T	1,86 $\pm$ 0,31	39,6 $\pm$ 6,3	12,81 $\pm$ 2,36	1,57 $\pm$ 0,44	2,22 $\pm$ 0,63
R2D	1,48 $\pm$ 0,39	31,8 $\pm$ 10	11,65 $\pm$ 2,76	2,34 $\pm$ 0,93	1,51 $\pm$ 0,20
R3T	2,46 $\pm$ 0,21	39,2 $\pm$ 2,4	15,91 $\pm$ 1,99	1,56 $\pm$ 0,16	2,13 $\pm$ 0,54
R3D	1,67 $\pm$ 0,37	32,4 $\pm$ 10,1	12,14 $\pm$ 2,89	2,36 $\pm$ 1,28	1,23 $\pm$ 0,41
R4T	1,85 $\pm$ 0,09	36 $\pm$ 1,7	12,77 $\pm$ 1,91	1,78 $\pm$ 0,13	1,97 $\pm$ 0,80
R4D	1,20 $\pm$ 0,68	39,5 $\pm$ 22,4	8,79 $\pm$ 2,41	2,08 $\pm$ 1,51	1,24 $\pm$ 0,22

In riferimento all'indice di umificazione HI i valori negli strati superficiali mostrano la presenza di una frazione non umificata non troppo elevata e comunque inferiore a quella umificata, cosa che non avviene per gli strati profondi dove spesso NH risulta più del doppio dell'umificato. Ciò sta ad indicare come sia difficile in queste condizioni l'umificazione negli strati profondi anche nel terreno lavorato.

I valori del grado di umificazioni DH sono in linea con quelli di HI e raggiungono il 50% e oltre negli strati superficiali delle tesi C2T, C5T e R1T.

I valori di CHA/CFA sono sempre uguali o superiori all'unità indicando una buona o ottima presenza di humus di alta qualità che deriva dalle pratiche conservative adottate in questo esperimento con punte di 2,50 e 2,22 e 2,13 in alcuni campioni degli strati superficiali dove gli acidi umici arrivano ad essere più del doppio dei fulvici.

## 5. CONCLUSIONI

Le pratiche conservative di gestione dell'interfilare di vigneto apportano sostanza organica al suolo a prescindere dal tipo di inerbimento, dalle essenze e dalla presenza o meno di lavorazione superficiale. Il processo di umificazione sembra essere avvenuto in modo ottimale con una notevole conversione della sostanza organica in humus e con un humus di ottima qualità, come dimostrato dal rapporto tra HA e HF. La ottima presenza di C microbico indica inoltre una buona attività di mineralizzazione di so e l'assenza quasi totale di sofferenza di questa componente.

## RINGRAZIAMENTI

Come preannuncia il titolo, questo capitolo sarà dedicato a tutti coloro che meritano un grazie speciale e che hanno svolto un ruolo importantissimo durante tutto quello che è stato il percorso svolto.

Ringrazio in primis le persone che mi hanno sostenuto fin dall'inizio, che hanno sempre creduto in me, dimostrando entusiasmo e gioia ad ogni traguardo raggiunto e non, che hanno fatto in modo di farmi giungere a questo risultato, quindi un grazie a mia madre, a mia sorella, ai miei nonni, ai miei zii e cugini.

Ricordo ancora il giorno in cui ho deciso di iscrivermi all'università, ad Ancona, lo dissi a mia madre che, con scetticismo e tanta forza d'animo, in quel caldo luglio mi disse: "tu non ci vai!" ma in fondo sapeva che avrei fatto tutto il possibile per renderla orgogliosa del mio percorso, e ne era molto felice, il figlio studiava per diventare "dottore". Nonostante tutto, sempre pronta a prepararmi le migliori delizie al mio ritorno a casa, perché mangiassi le cose buone, visto che la mia cucina si basa su esperimenti e fagioli. Grazie per tutto quello che hai fatto in questi anni. Mia sorella, che nel corso degli anni si è prestata sempre disponibile, interessata al mio percorso ogni volta che ci ho parlato, curiosa su tutti i miei esami. I miei nonni che, non appena hanno saputo che mi sarei iscritto all'università, hanno gioito e si sono complimentati con me. Nonno mi disse: "ue! Mo' diventerai un dottore agrario! Visto che stai iscritto, mo' mi devi dire come devo fare per far togliere il nero dalle arance e dai limoni in campagna, i pomodori perché sono di meno quest'anno?". Per non dimenticare di tutte le volte che mi ha portato su e giù per le varie stazioni, perché non viaggiassi in pullman che come sa io detesto. Nonna, invece: "ma mo' con questa laurea, che diventi? E che potrai fare?". Al primo esame che feci, quello di inglese, era ansiosa di sapere come fosse andato, appena scoprii l'esito glielo dissi, era un 28, non male al primo esame, e lei: "28, non potevi prendere 30?". Poi le spiegai che era un bel voto. I miei zii, Sandra e Alessandro, che mi sono sempre stati vicini in questo percorso, dimostrando di potermi sempre aiutare, assieme a mio cugino Giovanni. Ogni volta che son tornato ho sempre potuto contare su tutti voi, soprattutto quando tornavo a sorpresa e ci organizzavamo di nascosto per non farlo sapere agli altri.

Un ringraziamento va a voi che non ci siete più, che avete sempre avuto fiducia in me, chiamandomi “dottore” già dal giorno in cui vi ho parlato della mia iscrizione all’università. La zia Diana, ne andava orgogliosa per il suo paese a dire a tutti: “mio nipote si è iscritto all’università, diventerà un dottore!”. Lo zio Pasquale, con cui discutevo dell’agricoltura del Salento, dei loro sistemi agricoli, per non dimenticare i discorsi sull’Inter e su come Conte la stesse portando in alto.

Graziella, che fino all’ultimo incontro che abbiamo avuto mi ha sempre dato parole di conforto, dicendomi che con calma tutto si poteva fare, che prima o poi avrei finito, passato anche gli esami più difficili, avrei voluto che tutti poteste vedere quanto sono riuscito a fare.

Voglio ringraziare te, Michi, per essermi stata sempre vicino, nei momenti belli e brutti, per la costante presenza in quelli più importanti, per il supporto e la forza che hai suscitato in me nei momenti di sconforto. Grazie perché non mi hai mai fatto percepire la distanza che ci separa, per aver sempre fatto in modo di vederci e passare del tempo insieme, nonostante gli impegni di entrambi, tra i saluti in stazione e le promesse di rivederci presto. Mi sei stata sempre vicino, da quando ci siamo conosciuti, prima di ogni esame e dopo, che andasse male o bene. Ho tante bellissime cose per cui ringraziarti, ripensando a tutti i momenti vissuti insieme è difficile sceglierne uno che sia superiore agli altri, visto che sono tutti splendidi. L’unica cosa certa è che mi hai sempre aiutato ad affrontare paure e difficoltà, dimostrandomi con la tua forza e determinazione che anche io posso essere in grado di raggiungere traguardi, ti ringrazio per essere stata tra dei cardini di questo traguardo, nella speranza di averti con me anche in molti altri. Grazie.

Grazie a tutti i miei amici per tutto quello che fanno e hanno sempre fatto per me e con me, è proprio per queste loro azioni che meritano di essere così chiamati, persone stupende che spero di non perdere mai; per tutti i bei momenti che sono stati creati, per tutte le belle emozioni e per le giornate passate assieme, per aver sempre festeggiato con me e per la vicinanza nei momenti difficili. Per non dimenticare tutte le risate e l’aiuto che non mi avete mai risparmiato, grazie.

Gianluca, che ho conosciuto assieme ad Alfredo, Sandrino (detto Aleandro), Antonio, Cristian, Diego, Leonardo, per destino si può dire, ma un destino buono, rivelandosi tra le migliori persone che in casa e come vicini mi potessero capitare, ad eccezione del fatto che alcuni sono abruzzesi e questo non si può cambiare, per ora. Ho avuto il piacere di condividere con loro spazi personali e le esperienze migliori vissute in un breve periodo ma ricco di qualità.

I miei amici di più vecchia data, Rocco, Pio e Giuseppe, con cui ho condiviso tutto, ognuno ha influito su questo percorso lasciando in me impronte importanti. Non sarei arrivato fin qui se non fosse stato per voi, grazie.

Diego, Nicolò, vi ho conosciuti ad Ancona, al secondo anno di università, ebbene, rappresentate la migliore conoscenza che si possa fare, tra noi si è creato fin da subito un rapporto indissolubile di amicizia, nonostante le nostre opposte idee politiche. Con voi ho condiviso l'adesione a un mondo fantastico, quello di IAAS, creando un comitato e coinvolgendo un sacco di gente, grazie, un ringraziamento speciale a voi che assieme a me avete percorso questo cammino stupendo che spero non finirà.

Ringrazio tutti i miei compagni di università per tutto quello che è stato un percorso stupendo tra esami e risate durante le pause, le uscite e le scampagnate, per non dimenticare pranzi e cene in cui il divertimento non è mai mancato, così come i calcetti.

Un sentito grazie ai professori, specialmente al mio relatore, il prof. Costantino Vischetti, per la disponibilità e per la possibilità datami di svolgere questo lavoro, sempre pronto a risolvere ogni mio dubbio, assieme al dott. Gianluca Brunetti, alle dottoresse Arianna De Bernardi, Enrica Marini e Francesca Tagliabue.

Grazie a tutti, una frase che non riesce a contenere quanto siate stati, ognuno a proprio modo, importanti e fondamentali in questo percorso.

## BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

[<https://agribiositaliana.it/approfondimento/la-vita-sotto-i-nostri-piedi-il-microbioma-del-suolo/#down>], Agribios. Coltivare la vita nel suolo, La vita sotto i nostri piedi: il microbiota del suolo, dicembre 5, 2022.

[<https://www.agripiudabenito.com/cosa-sono-i-concimi-organici/>], Agripiù. Cosa sono i concimi organici, da Benito.

[<https://agronotizie.imaginenetwork.com/agrimeccanica/2023/02/22/vite-da-vino-quali-attrezzature-scegliere-per-la-gestione-ottimale-dell-interfila/78227>], Agronotizie, Serena Giulia Pala. Vite da vino: quali attrezzature scegliere per la gestione ottimale dell'interfila, 23 Febbraio 2023.

[<https://www.padanamenti.com/importanza-dellinerbimento-del-frutteto-e-del-vigneto/>], L'importanza dell'inerbimento del frutteto e del vigneto, padana sementi, 2020.

[<https://www.locciagricoltura.com/SOVESCIO-1.htm>], Locciagricoltura.

Assessorato territorio, ambiente e opere pubbliche, 2024 Regione Autonoma Valle d'Aosta.

Badalucco L., De Nobili M., Grego S.: “La fertilità”, In: Sequi P., “Fondamenti di chimica del suolo”. Bologna: Pàtron Editore, 2005.

Baldini E. “Arboricoltura generale”. Bologna: CLUEB, 1988.

Baldoni R., Kökény B., Lovato A.. “Le piante foraggere”. Roma: Ramo editoriale degli agricoltori, 1974.

Banach-Szott, Magdalena, Andrzej Dziamski (2022). Humic acids in permanent grasslands of the Czerniewice Meadows Complex, north Poland. *Soil Science Annual* 2022.

Bartoli, Marco. “È tempo di sovescio. Ecco quello che c'è da sapere.” 22 Ottobre 2017.

Belsito Alda, et al. *Chimica agraria*. Bologna: Zanichelli, 1988.

Bocchi S., Spigarolo R., Ronzoni S., Caligiore F.. “Produzioni Vegetali – Coltivazioni Arboree”. Torino: Mondadori Education, 2018.

Bruntland, rapporto per la Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo, 1992.

Businelli Mario. *Chimica del suolo*. 2009.

Canuti, Francesco. “Evoluzione della sostanza organica nell'interfilare di due vigneti soggetti a inerbimento permanente e trasemina annuale.” 2023.

Corazzina E., *Coltivare la vite. Tradizione, innovazione, sostenibilità*. L'informatore agrario, 2021.

Croce P., De Luca A., Falcinelli M., Modestini F.S., Veronesi F.. “Tappeti erbosi – cura, gestione e manutenzione delle aree verdi pubbliche e private”. Bologna: Edagricole, 2006.

De Bernardi A., Marini E., Tagliabue F., Brunetti G., Casucci C., Uberson B. R., Silvestroni O., Vischetti C. “Effects of cover crop management on organic matter evolution and on microbial activity in an organic vineyard soil.” *Applied Soil Ecology*.

Doyeni, MO, Stulpinaite, U., Baksinskaite, A., Suproniene, S., & Tilvikiene, V. “L'efficacia dell'uso del digestato per la fertilizzazione in un sistema di coltivazione agricola.” *Piante*, 10 (8), 1734, 2021.

Giannetta, B., Zaccone, C., Plaza, C., Siebecker, M. G., Rovira, P., Vischetti, C., & Sparks, D. L. (2019). “The role of Fe (III) in soil organic matter stabilization in two size fractions having opposite features.” *Science of The Total Environment*, 653, 667-674.

Giardini L., *Agronomia generale, ambientale e aziendale*. Quinta edizione, Bologna: Pàtron Editore, 2004.

Giardini Luigi, *Agronomia generale*. 32 ed., Bologna, Patron, 1986.

Giordano Andrea, *Pedologia*. Torino: UTET, 1999.

Gisotti G., *Principi di geopedologia*. Bologna: Calderini, 1988.

Haddaway, Neal R., et al. “How Does Tillage Intensity Affect Soil Organic Carbon? A Systematic Review.” *Environmental Evidence*, vol. 6, no. 1, Dec. 2017.

Kononova M. M. *Soil organic matter. Its nature, its role in soil formation and in soil fertility*. Seconda edizione. Oxford: Pergamon Press, 1966.

Lal, R. (2004). “Attività agricole e ciclo globale del carbonio.” *Ciclo dei nutrienti negli agroecosistemi*.

Leone, Diego. “Effetti di inerbimento e sovescio in vigneto sulla sostanza organica e sulla componente microbica del suolo.” 2023.

Magaldi D., Ferrari G. A. *Il suolo - Pedologia nelle scienze della Terra e nella valutazione del territorio*. Roma: La Nuova Italia scientifica, 1991.

Making London Work, Sustainable Wealth London, Forum for the Future, commissione mondiale per l'ambiente e lo sviluppo.

Mez E., “Inerbimento” In: *Enciclopedia agraria italiana – Vol. 5*. Roma: Ramo Editoriale degli Agricoltori, 1965.

- Orlov, D. S. (1998). *Organic substances of Russian soils*.
- Pettit, Robert E. "Materia organica, humus, umato, acido umico, acido fulvico e umino: la loro importanza nella fertilità del suolo e nella salute delle piante." *CTI Ricerca* 10 (2004): 1-7.
- Rivera V. "L'importanza di un trifoglio d'alta montagna per il mantenimento della cotica erbosa, a difesa dalla degradazione del suolo." In: CNR (1952) *Convegno sulla difesa del suolo e le sistemazioni fluviali e montane*. Spoleto: Panetto & Petrelli.
- Sansavini S., Costa G., Gucci R., Inglese P., Ramina A., Xiloyannis C.. *Arboricoltura generale*. Bologna: Pàtron Editore, 2012.
- Santilocchi R.. *Gestione del suolo degli arboreti*. Ancona: Associazione Italiana per la gestione Agronomica e Conservativa del Suolo, 2015.
- Saviozzi, A., Levi-Minzi, R., Cardelli, R., & Riffaldi, R. (2001). "A comparison of soil quality in adjacent cultivated, forest and native grassland soils." *Plant and Soil*, 233, 251-259.
- Schnitzer, M. (1986). "Binding of humic substances by soil mineral colloids." In: *Interactions of soil minerals with natural organics and microbes*, 17, 77-101.
- Senesi, Nicola e Elisabetta Loffredo. "La chimica della materia organica del suolo." *Chimica fisica del suolo*. Stampa CRC, 2018. 239-370.
- Sequi P. "Sostanza organica e ciclo del carbonio", e "Le funzioni agronomiche della sostanza organica." In: Sequi P., *Chimica del suolo*. Bologna: Pàtron Editore, 1989.
- Setia, R., Verma, S. L., & Marschner, P. (2012). "Measuring microbial biomass carbon by direct extraction—comparison with chloroform fumigation-extraction." *European Journal of Soil Biology*, 53, 103-106.
- Silvestroni O., Palliotti A., Santilocchi R. "Gestione del suolo." In: Cozzolino E., *Viticultura ed enologia biologica – Mercato, tecniche di gestione, difesa, vinificazione e costi*. Bologna: Edagricole, 2004.
- Tino, Pietro. "Il rapporto tra agricoltura e allevamento nel Mezzogiorno del Novecento." *Mélanges de l'École française de Rome-Antiquité*, 128-2, 2016.
- Università Reggio Calabria, unirc. *La fertilità biologica*.
- Zdenek Filip, Marta Tesarova. "Microbial degradation and transformation of humic acids from permanent meadow and forest soils." *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2004.