DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

PRATICHE CONSERVATIVE IN VIGNETO

Effetti sulla fertilità del suolo

CONSERVATION PRACTICES IN VINEYARDS

Effects on soil fertility

TIPO TESI: compilativa

Studente:
LEONARDO FAZI GIES

Relatore:
PROF. CRISTIANO CASUCCI

Correlatore:
DOTT.SSA ARIANNA DE BERNARDI

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE....4

ELENCO DELLE FIGURE....5

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI....6

PREMESSA E SCOPO DELLA TESI....7

CAPITOLO 1 INTRODUZIONE - FERTILITÀ DEL SUOLO IN VIGNETO....10

1.1 Il suolo vitato e i processi di degradazione....10

1.1.1 Erosione e perdita di suolo....10

1.1.2 Perdita di sostanza organica e impoverimento della fertilità....11

1.2 Fertilità chimica del suolo....12

1.2.1 Sostanza organica e carbonio organico: SOM, SOC e TOC....12

1.2.2 Azoto totale e disponibilità degli elementi nutritivi....13

1.3 Fertilità biologica del suolo....13

1.3.1 Biomassa e componente microbica....13

1.3.2 Attività enzimatiche del suolo....14

1.4 Fertilità fisica e conservazione del suolo....15

1.4.1 Struttura e stabilità degli aggregati....15

1.4.2 Erosione, runoff e conservazione della sostanza organica....15

CAPITOLO 2 PRATICHE CONSERVATIVE NEL VIGNETO....17

2.1 Cover crops e inerbimento....17

2.1.1 Cover crops permanenti e temporanee....17

2.1.2 Inerbimento dell'interfila e gestione della vegetazione sottofila....18

2.2 Pacciamatura organica....19

2.2.1 Materiali organici e protezione della superficie del suolo....19

2.2.2 Effetti sulla sostanza organica e sulla disponibilità degli elementi nutritivi....19

2.3 Compost e ammendanti organici....20

2.3.1 Effetti sul contenuto di sostanza organica e carbonio....20

2.3.2 Effetti su azoto, fosforo e potassio....20

2.4 Biochar..... 21
2.4.1 Caratteristiche e persistenza nel suolo.....21
2.4.2 Effetti sul carbonio organico e sulla componente biologica.....21
CAPITOLO 3 ANALISI BIBLIOGRAFICA E CONFRONTO DEI RISULTATI.....23
3.1 Selezione e organizzazione degli studi analizzati.....23
3.2 Quadro generale degli articoli selezionati.....24
3.3 Effetti sulla sostanza organica e sul carbonio del suolo.....25
3.4 Effetti sull'azoto e sugli elementi nutritivi.....26
3.5 Effetti sulla fertilità biologica.....26
3.5.1 Biomassa e componente microbica.....27
3.5.2 Attività enzimatiche.....27
3.6 Effetti sulla fertilità fisica e sulla conservazione del suolo.....27
3.7 Sintesi quantitativa dei risultati.....28
CAPITOLO 4 DISCUSSIONE.....31
4.1 Efficacia comparativa delle pratiche conservative.....31
4.2 Tempi di risposta delle pratiche conservative.....32
4.3 Applicabilità nel vigneto mediterraneo.....32
4.4 Limiti del confronto e criticità metodologiche.....33
4.5 Implicazioni per una gestione sostenibile del vigneto.....34
CONCLUSIONI.....35
BIBLIOGRAFIA.....37

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 3-1 – Sintesi degli studi sperimentali inclusi nella matrice bibliografica. Fonte: elaborazione dell'autore sulla base della matrice bibliografica.....24

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 3-1 – Delta medio positivo per tecnica nella matrice bibliografica. Fonte: elaborazione dell'autore sulla base della matrice bibliografica.....29

Figura 3-2 – Variazioni percentuali dei parametri per i confronti numericamente utilizzabili della matrice. Fonte: elaborazione dell'autore sulla base della matrice bibliografica.....30

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

SOM	SOIL ORGANIC MATTER (SOSTANZA ORGANICA DEL SUOLO)
SOC	SOIL ORGANIC CARBON (CARBONIO ORGANICO DEL SUOLO)
TOC	TOTAL ORGANIC CARBON (CARBONIO ORGANICO TOTALE)
DOC	DISSOLVED ORGANIC CARBON (CARBONIO ORGANICO DISCIOLTO)
TN	TOTAL NITROGEN (AZOTO TOTALE)
MBC	MICROBIAL BIOMASS CARBON (CARBONIO DELLA BIOMASSA MICROBICA)
BGLU	β-glucosidasi (sigla utilizzata in Gattullo et al., 2020)
APME	FOSFOMONOESTERASI ALCALINA
AP	FOSFATASI ACIDA
BG	β-glucosidasi (sigla utilizzata in Griesser et al., 2022)
LAP	LEUCINA AMINOPEPTIDASI
K	POTASSIO SCAMBIABILE
P	FOSFORO DISPONIBILE
SMC	SPENT MUSHROOM COMPOST (COMPOST ESAUSTO DI FUNGHI)
SA	SOIL AMENDMENT (AMMENDANTE DEL SUOLO)
OM	ORGANIC MULCHING (PACCIAMATURA ORGANICA)
CT	CONVENTIONAL TILLAGE (LAVORAZIONE CONVENZIONALE)
CC	COVER CROP (COLTURA DI COPERTURA)

PREMESSA E SCOPO DELLA TESI

La viticoltura ha un peso rilevante non solo sul piano produttivo, ma anche nella gestione e nella caratterizzazione di molti territori rurali. Nel 2024 la superficie vitata mondiale è stata stimata in circa 7,1 milioni di ettari, comprendendo le superfici destinate a uva da vino, uva da tavola e uva passa (OIV, 2025). Una parte consistente della viticoltura mediterranea si sviluppa inoltre in condizioni nelle quali la tutela del suolo diventa un tema concreto: estati asciutte, piogge concentrate in pochi eventi e, in molti casi, appezzamenti collinari o in pendenza.

In questo quadro, il modo in cui viene gestito il terreno tra e sotto i filari incide direttamente sulla sostenibilità del vigneto. Lavorazioni frequenti e lunghi periodi con suolo scoperto aumentano l'esposizione della superficie all'azione della pioggia e del ruscellamento. Poiché gli strati più superficiali concentrano una parte importante della sostanza organica, la perdita di terreno comporta anche un impoverimento della fertilità. Garcia et al. (2018) richiamano proprio erosione, ridotta dotazione di carbonio organico e perdita di fertilità tra le principali criticità dei suoli vitati. López-Vicente et al. (2020), in un vigneto non irriguo, hanno inoltre collegato una maggiore copertura del terreno a una minore perdita di sostanza organica, evidenziando il rapporto tra protezione fisica del suolo e conservazione della fertilità.

In questa tesi la fertilità viene letta come il risultato di più componenti, evitando di ridurla alla sola disponibilità di nutrienti. La matrice bibliografica comprende indicatori chimici, quali sostanza organica, carbonio organico, azoto totale, fosforo e potassio; indicatori biologici, tra cui biomassa o altri descrittori della componente microbica e attività enzimatiche; infine, parametri legati alla componente fisica e conservativa, come stabilità degli aggregati e perdita di sostanza organica. La stessa distinzione è stata mantenuta nell'organizzazione dei capitoli e nel confronto tra gli studi.

Tra le strategie proposte per limitare la degradazione del suolo vitato, le cover crops sono tra le più studiate. Si tratta di coperture vegetali mantenute in modo temporaneo o permanente, con effetti che possono interessare contemporaneamente protezione della superficie, ingresso di residui organici e attività biologica. La review di Abad et al. (2021) riporta benefici su carbonio organico, infiltrazione, stabilità degli aggregati ed erosione. Anche alcuni degli studi inclusi nel database affrontano questi aspetti da prospettive diverse: Gattullo et al. (2020)

hanno valutato una copertura permanente in un vigneto da tavola, mentre Novara et al. (2020) hanno studiato una cover crop leguminosa in condizioni mediterranee semiaride.

Il quadro, però, non è uniforme. Specie scelta, durata della copertura, tipo di suolo e andamento climatico modificano la risposta del vigneto. Negli ambienti con disponibilità idrica limitata la vegetazione di copertura può entrare in competizione con la vite, soprattutto quando rimane attiva nei periodi più asciutti. Garcia et al. (2018) sottolineano per questo la necessità di bilanciare i servizi forniti dalle cover crops con i possibili effetti sulla coltura principale. È un tema particolarmente importante in ambiente mediterraneo e verrà ripreso nella discussione dei risultati.

Le cover crops non sono l'unica possibilità. La pacciamatura organica protegge la superficie mediante materiali vegetali o organici e non comporta la presenza di una coltura viva. Mairata et al. (2024) hanno confrontato differenti pacciamature con lavorazione ed erbicida, osservando che il compost esausto di funghi poteva aumentare umidità e dotazione nutritiva del suolo, ma anche la conducibilità elettrica. Il risultato è utile perché mostra come una pratica conservativa debba essere valutata anche per gli eventuali effetti collaterali e non soltanto per il beneficio principale atteso.

Compost e biochar agiscono invece soprattutto come ammendanti. Nel vigneto collinare studiato da Lucchetta et al. (2023), fortemente disturbato prima dell'impianto, l'applicazione di compost ha determinato nel periodo 2019–2021, corrispondente a tre annate consecutive di applicazione, un recupero evidente della sostanza organica e della disponibilità di nutrienti. Idbella et al. (2024) hanno seguito il biochar in una prova di dieci anni, rilevando un contenuto di carbonio organico più elevato nei suoli trattati e modificazioni di alcuni parametri chimici e microbiologici. La diversa durata dei due esperimenti anticipa una delle questioni centrali del confronto: non tutte le componenti della fertilità rispondono con gli stessi tempi.

L'obiettivo del lavoro è confrontare gli effetti delle principali pratiche conservative sulla fertilità del suolo in vigneto. L'analisi riguarda cover crops e inerbimento, pacciamatura organica, compost e biochar, mettendo in relazione i risultati con indicatori chimici, biologici e fisici. Più che costruire una classifica tra tecniche, si è cercato di capire quali risposte ricorrano negli studi e in quali condizioni vengano osservate.

Il database bibliografico è stato costruito utilizzando Google Scholar. La ricerca ha combinato il termine “vineyard” con “soil conservation”, “cover crop”, “mulching”, “compost”, “biochar” e “soil fertility”. Il limite temporale degli ultimi dieci anni è stato applicato agli studi sperimentali destinati alla matrice comparativa; pubblicazioni precedenti sono state utilizzate esclusivamente come supporto teorico. Sono stati privilegiati studi sperimentali in vigneto con una pratica conservativa chiaramente identificabile e almeno un

indicatore di fertilità. Prima dell’inserimento sono stati verificati titolo, rivista, DOI e pertinenza; le review sono state utilizzate soltanto per l’inquadramento teorico.

I dati estratti sono stati organizzati in una matrice comune. Quando unità e disegno sperimentale lo consentivano, i valori sono stati uniformati e la differenza tra trattamento e riferimento è stata espressa anche come variazione percentuale. I parametri non confrontabili sono stati mantenuti nell’unità originale o discussi qualitativamente; la lettura dei risultati tiene conto anche di durata, clima, suolo e gestione del vigneto.

CAPITOLO 1
INTRODUZIONE - FERTILITÀ DEL SUOLO IN VIGNETO

Parlare di fertilità del suolo in vigneto significa considerare contemporaneamente aspetti chimici, biologici e fisici. Nutrienti disponibili, sostanza organica, attività microbica e struttura del terreno non funzionano come compartimenti separati: una modifica della gestione può riflettersi su più componenti nello stesso momento. Nella vite, coltura permanente, gli effetti delle pratiche ripetute negli anni possono diventare particolarmente evidenti. Il capitolo distingue quindi i principali indicatori di fertilità, mantenendo però il collegamento tra le diverse componenti.

1.1 **Il suolo vitato e i processi di degradazione**

Il vigneto è un agroecosistema permanente nel quale il terreno svolge funzioni diverse. Fornisce acqua ed elementi nutritivi, sostiene l'apparato radicale e ospita microrganismi che partecipano alla trasformazione della sostanza organica e al riciclo dei nutrienti. Per questo la gestione dell'interfila e del sottofila assume un peso agronomico rilevante, soprattutto negli areali mediterranei, dove lunghi periodi asciutti possono essere interrotti da piogge brevi e intense.

Quando la gestione prevede lavorazioni ripetute o ampie porzioni di terreno nudo, la superficie diventa più vulnerabile. Le gocce di pioggia favoriscono la disgregazione degli aggregati e il ruscellamento trasporta le particelle distaccate; allo stesso tempo la lavorazione modifica periodicamente la struttura dello strato superficiale. In prove condotte in vigneto, questi processi sono stati messi in relazione con erosione, sostanza organica, attività microbica e stabilità degli aggregati (Novara et al., 2011; Belmonte et al., 2018).

1.1.1 *Erosione e perdita di suolo*

Nei vigneti collinari l'erosione idrica è una delle forme di degradazione più evidenti. Il processo comprende il distacco delle particelle e il loro trasporto con il deflusso superficiale, ma l'intensità cambia molto in funzione di pendenza, caratteristiche del suolo, intensità della

pioggia e grado di copertura. Il confronto tra lavorazione e gestioni alternative in vigneti siciliani ha evidenziato il ruolo della copertura nel contenere le perdite di suolo e acqua (Novara et al., 2011).

La rimozione del topsoil è particolarmente critica perché interessa lo strato in cui si concentra buona parte della sostanza organica e dell'attività biologica. Non si perde soltanto spessore di terreno: insieme ai sedimenti possono essere allontanati carbonio organico e nutrienti. López-Vicente et al. (2020), in un vigneto non irriguo, hanno quantificato la sostanza organica esportata in condizioni diverse di copertura. Il lavoro mostra bene che conservare la fertilità significa anche limitare ciò che viene perso dal sistema, non soltanto aumentare gli apporti.

La pendenza amplifica il problema. Nel confronto di Novara et al. (2019), una parte del maggiore contenuto di carbonio osservato nei vigneti coperti è stata ricondotta proprio alla minore erosione. Nei versanti vitati, quindi, trattenere sedimenti e topsoil ha un significato diretto per il bilancio del carbonio e va considerato quando si valutano gli effetti delle pratiche di gestione.

1.1.2 *Perdita di sostanza organica e impoverimento della fertilità*

La sostanza organica è uno dei principali elementi su cui si costruisce la fertilità del suolo. Nel vigneto il suo bilancio dipende dagli apporti di residui e radici, dalla velocità di mineralizzazione e dalle perdite dovute all'erosione. Ridurre le lavorazioni e mantenere una copertura può aumentare gli ingressi di carbonio e sostenere la componente microbica, anche se la risposta varia con specie utilizzata e condizioni stagionali (Steenwerth & Belina, 2008b).

Una diminuzione della sostanza organica ha conseguenze che vanno oltre la sola riserva di carbonio. Può modificare disponibilità dei nutrienti, attività microbica e stabilità degli aggregati. Prove di lungo periodo hanno mostrato che questi aspetti possono cambiare insieme in funzione della gestione del vigneto (Belmonte et al., 2018). La stessa impostazione emerge dagli studi raccolti nella matrice, nei quali indicatori chimici e biologici risultano spesso strettamente collegati (Gattullo et al., 2020; Novara et al., 2020).

Le variazioni della componente organica, inoltre, non sono sempre rapide. Nella prova decennale di Jiménez-González et al. (2023) quantità e qualità della sostanza organica cambiano in relazione alla gestione e alla profondità di campionamento. Il dato ricorda che il carbonio del terreno deriva da processi di accumulo, trasformazione e perdita che procedono con velocità diverse. Valutazioni condotte su periodi brevi possono quindi fotografare soltanto una fase della risposta.

1.2 **Fertilità chimica del suolo**

La fertilità chimica comprende le proprietà che regolano accumulo, trasformazione e disponibilità degli elementi nutritivi. Nel database gli indicatori ricorrenti sono soprattutto sostanza organica e carbonio organico, azoto totale, fosforo e potassio. Nessuno di questi parametri, preso da solo, descrive però la fertilità complessiva: appartengono a cicli diversi e devono essere letti in relazione alle caratteristiche del suolo e alla gestione adottata.

1.2.1 *Sostanza organica e carbonio organico: SOM, SOC e TOC*

Con SOM (Soil Organic Matter) si indica l'insieme della sostanza organica presente nel terreno: residui vegetali e animali a vari livelli di decomposizione, biomassa microbica e composti organici più trasformati e stabilizzati. Questa componente costituisce una riserva di nutrienti, alimenta l'attività biologica e contribuisce alla formazione degli aggregati. In vigneto, gli apporti derivanti dalle cover crops possono influenzare sia la quantità di carbonio disponibile sia la dinamica microbica (Steenwerth & Belina, 2008b).

Il SOC (Soil Organic Carbon) indica invece la quota carboniosa della sostanza organica e non coincide quindi con la SOM. Negli articoli compaiono anche TOC (Total Organic Carbon), riferito al carbonio organico totale determinato analiticamente, e DOC (Dissolved Organic Carbon), cioè la frazione organica disciolta e più mobile. Distinguere questi indicatori è necessario, perché non rispondono necessariamente nello stesso modo o con la stessa rapidità alla gestione e perché il confronto dipende anche dal metodo analitico e dalla profondità di campionamento (Steenwerth & Belina, 2008b).

Carbonio organico e sostanza organica sono gli indicatori chimici più frequenti nel database. Gattullo et al. (2020) li hanno utilizzati per valutare la gestione dell'interfila; Jiménez-González et al. (2023) hanno analizzato, dopo dieci anni, quantità e qualità della sostanza organica; Novara et al. (2019, 2020) hanno impiegato il SOC per seguire l'evoluzione del suolo in vigneti mediterranei. La frequenza di questi parametri non è casuale: il carbonio organico è collegato alla disponibilità di nutrienti, alla struttura e all'attività microbica.

Nel leggere questi dati è utile separare due meccanismi: accumulare più carbonio e perderne meno. In un vigneto in pendenza, ad esempio, una gestione che limita l'erosione migliora il bilancio del carbonio anche perché trattiene il topsoil ricco di sostanza organica. Per questa ragione i valori di SOC e SOM sono stati messi in relazione, quando possibile, con gli indicatori di erosione e di perdita di materiale organico (López-Vicente et al., 2020; Novara et al., 2019).

1.2.2 *Azoto totale e disponibilità degli elementi nutritivi*

L'azoto è essenziale per la crescita della vite ed è strettamente legato al ciclo della sostanza organica. Una parte consistente dell'azoto del suolo si trova in forme organiche e diventa disponibile attraverso la mineralizzazione microbica. Il TN (Total Nitrogen) descrive la riserva complessiva, ma non coincide con la quota immediatamente assimilabile dalla pianta. Nitrato e ammonio sono forme più direttamente disponibili e, allo stesso tempo, più soggette a trasformazione, assorbimento e perdita.

La gestione della vegetazione modifica la dinamica dell'azoto sia con l'apporto dei residui sia attraverso l'assorbimento temporaneo da parte della cover crop. Cambiano quindi non solo le quantità totali, ma anche l'immobilizzazione nella biomassa e la successiva mineralizzazione. In un vigneto mediterraneo, Steenwerth e Belina (2008a) hanno osservato differenze stagionali nelle forme minerali dell'azoto e nella biomassa microbica azotata tra cover crops e lavorazione. L'aspetto diventa ancora più interessante con le leguminose, come nel lavoro di Novara et al. (2020).

Fosforo e potassio completano il quadro dei principali nutrienti considerati. Il fosforo è coinvolto nei processi energetici e nello sviluppo della pianta; il potassio ha un ruolo importante nella regolazione osmotica e nei rapporti idrici. La loro disponibilità dipende dalla dotazione del suolo e dagli apporti effettuati. Mairata et al. (2024) e Lucchetta et al. (2023) mostrano che materiali organici e compost possono modificare in modo consistente P e K, oltre alla sostanza organica. Un aumento, tuttavia, va sempre rapportato alla dose applicata e alla situazione iniziale: più nutriente non significa automaticamente maggiore fertilità.

1.3 **Fertilità biologica del suolo**

La componente biologica del suolo partecipa alla decomposizione della sostanza organica e al riciclo dei nutrienti. Batteri, funghi e altri microrganismi utilizzano i composti organici come fonte di carbonio ed energia e contribuiscono ai processi di mineralizzazione e immobilizzazione. Alcuni indicatori biologici possono reagire alla gestione in tempi relativamente brevi e fornire quindi informazioni complementari a quelle dei parametri chimici.

1.3.1 *Biomassa e componente microbica*

La biomassa microbica è la frazione vivente della sostanza organica costituita principalmente dai microrganismi del terreno. Il MBC (Microbial Biomass Carbon) quantifica il carbonio contenuto in questa componente ed è sensibile alla disponibilità di substrati e alle

condizioni ambientali. È una quota piccola rispetto al carbonio totale, ma molto dinamica; nei vigneti può rispondere a cover crops e apporti organici prima che cambino in modo altrettanto evidente le frazioni più stabili (Steenwerth & Belina, 2008b).

Nel lavoro di Gattullo et al. (2020) il MBC è stato valutato insieme al carbonio organico, all'azoto totale e alle attività enzimatiche. Altri studi della matrice usano però descrittori differenti. Novara et al. (2020) hanno considerato concentrazione di DNA e diversità microbica, mentre Idbella et al. (2024) hanno analizzato la composizione della comunità dopo dieci anni dall'applicazione di biochar. Si tratta di informazioni utili, ma non equivalenti al MBC; per questo sono state mantenute separate nel confronto.

La comunità microbica risente della disponibilità di carbonio e acqua, della temperatura e delle proprietà chimico-fisiche del terreno. Nei vigneti, quindi, una variazione microbiologica ha senso soprattutto se letta insieme alla sostanza organica e alle condizioni idriche. Gli indicatori biologici aiutano così a capire non solo quanta sostanza organica sia presente, ma anche quanto attivamente venga trasformata.

1.3.2 *Attività enzimatiche del suolo*

Le attività enzimatiche forniscono un'altra chiave di lettura della fertilità biologica. Gli enzimi extracellulari presenti nel suolo derivano dall'attività di microrganismi, radici e residui organici e intervengono in passaggi fondamentali della decomposizione e del riciclo dei nutrienti. Sono quindi indicatori funzionali utili, ma il confronto richiede cautela perché enzimi diversi rispondono a substrati, condizioni e metodi analitici differenti (Nannipieri et al., 2012).

Tra gli enzimi presenti negli studi selezionati, la β-glucosidasi è collegata alla degradazione dei composti glucidici e al ciclo del carbonio. Le fosfatasi liberano fosfato da composti organici e sono quindi legate al ciclo del fosforo, mentre la leucina aminopeptidasi interviene nella degradazione di peptidi e proteine e si collega al ciclo dell'azoto. Valutare più attività nello stesso suolo permette di descriverne meglio il funzionamento biologico, senza attribuire a un singolo enzima il significato di indicatore generale della fertilità (Nannipieri et al., 2012).

Gattullo et al. (2020) hanno misurato β-glucosidasi e fosfomonoesterasi alcalina insieme a carbonio, azoto e biomassa microbica. Griesser et al. (2022), in Austria, hanno considerato fosfatasi acida, β-glucosidasi e leucina aminopeptidasi in relazione alla gestione sottofila; Lucchetta et al. (2023) hanno seguito le attività enzimatiche durante il recupero di un suolo fortemente disturbato. Presi insieme, questi lavori mostrano che gli enzimi completano l'informazione chimica, ma acquistano significato soprattutto quando vengono interpretati nel contesto gestionale del vigneto.

1.4 **Fertilità fisica e conservazione del suolo**

La fertilità fisica riguarda le condizioni che consentono alle radici di svilupparsi e all'acqua e all'aria di muoversi nel profilo. Struttura, porosità, infiltrazione, stabilità degli aggregati e resistenza all'erosione sono aspetti strettamente collegati. Nei vigneti la componente fisica è particolarmente importante per due ragioni: i ripetuti passaggi dei mezzi agricoli e la presenza, in molti areali, di superfici collinari soggette a ruscellamento.

1.4.1 *Struttura e stabilità degli aggregati*

La struttura nasce dall'organizzazione delle particelle minerali e della sostanza organica in aggregati. Quando questi aggregati sono stabili, resistono meglio alla disgregazione causata dalla pioggia e mantengono porosità, aerazione e infiltrazione. Sostanza organica, radici e prodotti microbici contribuiscono alla loro formazione, mettendo in relazione la struttura con la componente organica e biologica del terreno (Belmonte et al., 2018).

Per questo la stabilità degli aggregati è un indicatore particolarmente utile: collega aspetti fisici, chimici e biologici. Una struttura più stabile riduce la formazione di crosta superficiale e la produzione di sedimenti e può anche proteggere parte della sostanza organica dalla rapida mineralizzazione. Nei vigneti della Spagna meridionale studiati da Guzmán et al. (2019), le cover crops temporanee erano associate a una maggiore stabilità rispetto al suolo nudo, pur con differenze evidenti tra siti. La risposta dipendeva quindi anche dallo sviluppo della copertura e dalle condizioni locali.

1.4.2 *Erosione, runoff e conservazione della sostanza organica*

Erosione e ruscellamento rendono evidente il legame tra fertilità fisica e fertilità chimica. Il deflusso superficiale trasporta fuori dall'appezzamento sedimenti e materiale organico; insieme al terreno viene quindi persa una parte della fertilità accumulata nel topsoil. Le prove in vigneto indicano che mantenere una copertura può ridurre questi processi rispetto alla lavorazione convenzionale (Novara et al., 2011).

López-Vicente et al. (2020) hanno quantificato direttamente la sostanza organica persa con i sedimenti, mentre Novara et al. (2019) hanno mostrato come il controllo dell'erosione nei vigneti in pendenza contribuisca al mantenimento del carbonio. I due lavori mettono in evidenza lo stesso punto da prospettive diverse: conservare il suolo significa proteggere insieme struttura e riserva organica.

I diversi indicatori descritti nel capitolo non vanno quindi letti isolatamente. SOM, SOC e TOC aiutano a seguire la componente organica; azoto, fosforo e potassio descrivono parte

della fertilità chimica; biomassa microbica ed enzimi informano sulla funzionalità biologica; stabilità degli aggregati ed erosione riguardano la conservazione fisica. Proprio questa interdipendenza spiega perché una pratica di gestione possa produrre effetti su più aspetti contemporaneamente. Il capitolo seguente prende in esame le tecniche conservative presenti nel database e i principali meccanismi attraverso i quali agiscono sul suolo vitato.

CAPITOLO 2
PRATICHE CONSERVATIVE NEL VIGNETO

2.1 **Cover crops e inerbimento**

Con il termine cover crops si indicano colture erbacee seminate o mantenute nel vigneto per coprire il terreno durante una parte o durante tutto il ciclo annuale. La copertura può essere permanente oppure temporanea, quando viene terminata in un momento prestabilito. La gestione interessa soprattutto l'interfila; nel sottofila, per la vicinanza al ceppo, il rischio di competizione richiede invece maggiore attenzione.

La vegetazione cambia il rapporto tra pioggia e superficie del suolo: intercetta parte dell'energia delle precipitazioni, riduce l'esposizione diretta del terreno e introduce radici e residui organici. Gli effetti non si fermano quindi alla sola protezione dall'erosione. In vigneto sono state osservate variazioni nella dinamica del carbonio, nella componente microbica e nelle forme dell'azoto (Steenwerth & Belina, 2008a, 2008b), oltre a una riduzione di erosione e ruscellamento in condizioni mediterranee (Novara et al., 2011).

Le cover crops sono la pratica più rappresentata nel database: sette articoli su dieci riguardano coperture permanenti o temporanee, leguminose, vegetazione spontanea oppure gestione del sottofila. Questa varietà offre molti elementi di confronto, ma rende improprio parlare di un unico “effetto cover crop”. Per evitare sovrapposizioni, i valori quantitativi dei singoli studi sono concentrati nel Capitolo 3.

2.1.1 *Cover crops permanenti e temporanee*

Una copertura permanente protegge il terreno per periodi prolungati e, proprio per questo, può avere effetti cumulativi sulla componente organica e biologica. Nel vigneto da tavola studiato da Gattullo et al. (2020), *Festuca arundinacea* è stata confrontata con la lavorazione convenzionale. Carbonio organico, azoto totale, biomassa microbica e attività enzimatiche hanno risposto nella stessa direzione. Più del singolo valore, è interessante la risposta contemporanea di indicatori appartenenti a comparti diversi della fertilità.

La permanenza della copertura non basta però a spiegare il risultato. Biomassa prodotta, specie, epoca di sfalcio e modalità di terminazione determinano quanti residui vengono

restituiti al terreno e quanta acqua viene utilizzata. Nelle prove pluriennali le cover crops hanno aumentato gli ingressi di carbonio e sostenuto la componente microbica, ma con differenze legate anche alla produttività della vegetazione (Steenwerth & Belina, 2008b).

Con una cover crop temporanea è possibile concentrare la presenza della vegetazione nei periodi in cui la competizione con la vite è meno problematica. Novara et al. (2020) hanno studiato *Vicia faba* in un vigneto mediterraneo semiarido e hanno seguito carbonio organico, dinamica dell'azoto e componente microbica. Nel caso di una leguminosa, la gestione dei residui assume un interesse ulteriore perché entra direttamente nei processi di trasformazione dell'azoto (Steenwerth & Belina, 2008a).

Guzmán et al. (2019), lavorando in vigneti commerciali della Spagna meridionale, hanno valutato coperture temporanee attraverso sostanza organica e stabilità degli aggregati. Le differenze tra aziende sono risultate marcate. Il dato è utile perché ricorda che lo sviluppo della copertura e le condizioni del singolo sito possono pesare quanto il tipo di tecnica adottata.

Nei vigneti in pendenza entra in gioco anche la capacità della copertura di trattenere il suolo. Novara et al. (2019) hanno collegato la presenza della vegetazione a una migliore conservazione del carbonio organico nei contesti più esposti all'erosione. Il beneficio, in questo caso, deriva sia dagli apporti di biomassa sia dalla minore perdita di topsoil e del carbonio associato.

2.1.2 *Inerbimento dell'interfila e gestione della vegetazione sottofila*

L'inerbimento dell'interfila viene spesso adottato per ridurre le lavorazioni e mantenere una protezione continua o stagionale. In ambiente mediterraneo, però, la funzione conservativa va bilanciata con l'acqua disponibile. Specie presenti, durata della crescita e momento dello sfalcio determinano infatti quanto a lungo la vegetazione utilizza risorse nello stesso volume di suolo esplorato dalla vite.

Il compromesso emerge bene nel lavoro di Gattullo et al. (2020): nell'annata più siccitosa la copertura è stata associata a una penalizzazione di alcuni parametri produttivi, mentre negli anni successivi l'effetto è stato meno evidente. La valutazione agronomica dell'inerbimento deve quindi mettere insieme due aspetti: protezione del suolo e risposta della coltura.

Nel sottofila il problema della competizione è ancora più delicato per la vicinanza alla vite. Griesser et al. (2022), in un vigneto austriaco, hanno confrontato una copertura gestita con sfalcio e una gestione con erbicida. Nel terreno coperto l'attività di diversi enzimi idrolitici era maggiore, suggerendo una diversa funzionalità biologica. L'entità delle variazioni è riportata nel Capitolo 3, dove i dati vengono messi a confronto con gli altri studi.

2.2 **Pacciamatura organica**

La pacciamatura organica prevede uno strato di materiale vegetale o organico sulla superficie. Diversamente da una cover crop viva, non introduce una vegetazione in competizione con la vite, ma protegge il terreno e può anche fornire sostanza organica. Nei vigneti mediterranei, ad esempio, la paglia ha mostrato una rapida capacità di ridurre erodibilità e ruscellamento nelle fasi in cui il suolo sarebbe rimasto scoperto (Prosdocimi et al., 2016).

Nel database la pacciamatura è rappresentata da Mairata et al. (2024). Tra i trattamenti confrontati, lo spent mushroom compost (SMC) è particolarmente interessante perché svolge due funzioni nello stesso momento: copre la superficie e apporta sostanza organica e nutrienti. Proprio per questo non può essere valutato soltanto come materiale protettivo.

2.2.1 *Materiali organici e protezione della superficie del suolo*

Il tipo di materiale scelto modifica spessore e durata della copertura, velocità di decomposizione e rilascio dei nutrienti. Paglia e residui ricchi di componente lignocellulosica svolgono soprattutto una funzione fisica nelle prime fasi dopo la distribuzione (Prosdocimi et al., 2016); materiali compostati, invece, possono contribuire in modo più evidente alla dotazione minerale del terreno. La scelta dipende quindi sia dal problema da risolvere sia dalla condizione iniziale del suolo.

Quando la pacciamatura svolge anche una funzione ammendante, la composizione del materiale diventa un parametro da controllare. In Mairata et al. (2024) l'aumento di alcuni nutrienti è accompagnato da una maggiore conducibilità elettrica. Non si tratta di un motivo per escludere la tecnica, ma di un'indicazione pratica: dose e qualità del materiale devono essere conosciute, soprattutto se l'applicazione viene ripetuta nel tempo.

2.2.2 *Effetti sulla sostanza organica e sulla disponibilità degli elementi nutritivi*

L'effetto sulla sostanza organica dipende dalla quantità distribuita, dalla decomposizione e dalla quota che viene incorporata nel terreno. Nello stesso tempo, la mineralizzazione può modificare la disponibilità di azoto, fosforo e potassio. Nel lavoro inserito nella matrice entrambe le componenti cambiano, ma con intensità diverse. I valori vengono quindi discussi nel Capitolo 3, senza trasformarli qui in una graduatoria tra pratiche.

2.3 **Compost e ammendanti organici**

Il compost deriva dalla stabilizzazione biologica di matrici organiche e introduce nel terreno carbonio già parzialmente trasformato insieme a una dotazione di nutrienti che dipende dalle materie prime e dal processo di compostaggio. Prove di lunga durata in vigneto indicano che applicazioni ripetute possono modificare proprietà chimiche, microbiologiche e funzionali del suolo (Calleja-Cervantes et al., 2015).

Nel database il riferimento principale è Lucchetta et al. (2023). Lo studio riguarda un vigneto collinare il cui suolo era stato fortemente disturbato prima dell'impianto e confronta il recupero ottenuto con compost con quello associato alla fertilizzazione minerale. La condizione iniziale è un elemento essenziale per leggere correttamente l'ampiezza delle variazioni osservate.

2.3.1 *Effetti sul contenuto di sostanza organica e carbonio*

Il compost può aumentare sostanza organica e carbonio in modo diretto, attraverso il materiale distribuito, e indiretto, sostenendo attività biologica e formazione di frazioni organiche più stabili. Le prove di lungo periodo confermano che la continuità degli apporti modifica progressivamente la qualità del suolo (Calleja-Cervantes et al., 2015). Nel caso di Lucchetta et al. (2023) la risposta è particolarmente marcata anche perché il terreno partiva da una condizione di forte disturbo.

Il disegno sperimentale va però tenuto presente. I delta riportati per Lucchetta et al. (2023) derivano dal confronto con la condizione pre-trattamento e non da una semplice differenza tra due parcelle stabilizzate nello stesso momento. Descrivono quindi il recupero del suolo nel corso della prova e non una percentuale di incremento automaticamente trasferibile ad altri vigneti.

2.3.2 *Effetti su azoto, fosforo e potassio*

Con il compost possono cambiare rapidamente anche azoto, fosforo e potassio. L'entità della risposta dipende dalla composizione dell'ammendante, dalla dose e dalla dotazione iniziale del suolo. In Lucchetta et al. (2023) le variazioni dei nutrienti sono molto più marcate nel trattamento con compost rispetto alla fertilizzazione minerale. I valori specifici vengono discussi nel capitolo dei risultati.

Un valore elevato di un singolo nutriente non equivale però a un miglioramento proporzionale della fertilità. Conta l'equilibrio con gli altri elementi, il fabbisogno della vite e il

rischio di accumulo. Questa cautela è particolarmente importante per fosforo e potassio e costituisce uno dei punti ripresi nella discussione agronomica.

2.4 **Biochar**

Il biochar è un materiale ricco di carbonio ottenuto dalla trasformazione termochimica di biomasse in condizioni di limitata disponibilità di ossigeno. Rispetto a materiali organici più facilmente degradabili presenta una frazione carboniosa relativamente persistente. Le sue proprietà, tuttavia, cambiano in funzione della biomassa di partenza e del processo produttivo, e questo condiziona gli effetti sul suolo.

Nella matrice il biochar è rappresentato dalla prova decennale di Idbella et al. (2024), che confronta controllo, dose singola e dose doppia. Un precedente studio in vigneto mediterraneo aveva già mostrato la possibilità di migliorare alcuni indicatori di fertilità senza effetti tossici evidenti sulla comunità microbica (Maienza et al., 2017). Il valore aggiunto dell'esperimento di Idbella è soprattutto la durata, che consente di osservare la persistenza della risposta.

2.4.1 *Caratteristiche e persistenza nel suolo*

La relativa persistenza del carbonio apportato spiega gran parte dell'interesse agronomico per il biochar. Una quota può rimanere nel suolo più a lungo rispetto a materiali più facilmente degradabili, ma la risposta non è indipendente dal contesto. Materia prima, dose, tessitura, dotazione organica iniziale e gestione del vigneto influenzano infatti il comportamento dell'ammendante (Maienza et al., 2017).

2.4.2 *Effetti sul carbonio organico e sulla componente biologica*

Nel lavoro di Idbella et al. (2024) il SOC aumenta passando dal controllo alla dose singola e poi alla dose doppia. Il gradiente è coerente con la quantità di carbonio aggiunta, ma da solo non dimostra che la dose maggiore sia anche la più conveniente in termini agronomici. Per scegliere una dose servirebbero anche informazioni su costi, disponibilità del materiale, caratteristiche del terreno e risposta della vite.

Lo stesso esperimento rileva modificazioni nella composizione della comunità microbica. Nella matrice è stato mantenuto l'indicatore relativo ai Basidiomycota senza trasformarlo in una misura generale della biomassa. Abbondanza relativa di un gruppo fungino, DNA microbico e MBC descrivono aspetti differenti; trattarli come equivalenti porterebbe a un confronto scorretto.

Le tecniche descritte agiscono quindi attraverso meccanismi diversi. Le cover crops combinano copertura, attività radicale e restituzione di residui; la pacciamatura protegge la superficie senza una coltura viva; il compost concentra l'apporto di carbonio e nutrienti; il biochar introduce una frazione carboniosa più persistente. Il Capitolo 3 confronta i risultati della matrice mantenendo visibili queste differenze di funzionamento e di contesto.

CAPITOLO 3
ANALISI BIBLIOGRAFICA E CONFRONTO DEI RISULTATI

3.1 **Selezione e organizzazione degli studi analizzati**

La ricerca bibliografica è stata organizzata secondo i criteri riportati nella matrice di lavoro. Google Scholar è stato utilizzato per reperire le pubblicazioni attraverso la stringa “(vineyard) AND (soil conservation OR cover crop OR mulching OR compost OR biochar OR soil fertility)”. Per la selezione degli studi sperimentali destinati alla matrice è stato considerato un arco temporale di dieci anni; lavori precedenti sono stati utilizzati esclusivamente per l’inquadramento teorico e non sono entrati nel confronto quantitativo. La ricerca è stata svolta nel 2026 e nell'agosto dello stesso anno sono stati ricontrollati riferimenti bibliografici e DOI. Per ogni lavoro ritenuto potenzialmente utile sono stati verificati titolo, rivista, DOI, tipologia di articolo e pertinenza con il tema della tesi.

Nel database principale sono entrati soltanto studi sperimentali riferiti al vigneto, con una pratica conservativa chiaramente riconoscibile e almeno un indicatore di fertilità chimica, biologica o fisica. Quando possibile, sono stati privilegiati areali europei o mediterranei e lavori con dati quantitativi utilizzabili. Sono state escluse dal confronto numerico le review, gli studi non condotti in vigneto, quelli privi di indicatori pertinenti e i casi in cui non fosse possibile attribuire con sufficiente chiarezza il risultato al trattamento. Le review sono state utilizzate solo per sostenere l'inquadramento teorico.

La selezione finale comprende dieci articoli sperimentali pubblicati tra il 2019 e il 2024. Per ciascuno sono stati registrati pratica, trattamento, specie o materiale, parametro di fertilità, valore iniziale o di riferimento, valore finale o del trattamento, durata e note metodologiche. Quando era possibile, g kg^{-1}, percentuali e valori per mille sono stati convertiti in ppm; gli indicatori biologici ed enzimatici sono invece rimasti nell'unità originale. Il delta percentuale, calcolato come (valore finale − valore iniziale) / valore iniziale × 100, è stato utilizzato soltanto nei confronti ritenuti numericamente affidabili.

I delta non hanno tutti lo stesso significato. Alcuni derivano da un confronto trattamento-controllo, altri da un confronto pre/post; in pochi casi il controllo è stato posto convenzionalmente pari a 100. Per gli indicatori di perdita, come la sostanza organica esportata

con i sedimenti, una variazione negativa corrisponde invece a un esito favorevole. Queste differenze sono state mantenute esplicite nelle note e nella discussione. Il lavoro è quindi una revisione comparativa e descrittiva, non una metanalisi, perché gli studi differiscono per disegno sperimentale, durata, condizioni pedoclimatiche e metodi di misura.

3.2 **Quadro generale degli articoli selezionati**

La Tabella 3-1 raccoglie in forma sintetica i dieci studi inclusi nel confronto, con pratica, contesto sperimentale, indicatori principali e durata. Le cover crops sono il gruppo più rappresentato e permettono di osservare effetti su sostanza organica, componente biologica e aspetti fisici. Gli studi sugli ammendanti sono meno numerosi, ma forniscono dati particolarmente utili sulla risposta dei parametri chimici.

Tabella 3-1 – Sintesi degli studi sperimentali inclusi nella matrice bibliografica. Fonte: elaborazione dell'autore sulla base della matrice bibliografica.

ID	Studio	Pratica	Contesto	Parametri	Anni
1	Gattullo et al. (2020)	Cover crop permanente	Vigneto da tavola, Sud Italia	SOC, TN, MBC, enzimi	3
2	Novara et al. (2020)	Cover crop leguminosa	Vigneto mediterraneo semiarido	SOC, N, indicatore microbico	8
3	López-Vicente et al. (2020)	Copertura vegetale	Vigneto rainfed	Perdita SOM	2
4	Mairata et al. (2024)	Pacciamatura organica	Vigneto spagnolo	SOM, TN, P, K	3
5	Jiménez-González et al. (2023)	Cover crop lungo periodo	Vigneti semiaridi	SOM, DOC	10
6	Lucchetta et al. (2023)	Compost / minerale	Vigneto collinare disturbato	SOM, TOC, TN, P_2O_5, K_2O	3
7	Idbella et al. (2024)	Biochar	Vigneto, prova decennale	SOC, componente microbica	10
8	Guzmán et al. (2019)	Cover crop temporanea	Vigneti Sud Spagna	SOM, aggregati	2
9	Novara et al. (2019)	Cover crop	Vigneto in pendenza	SOC	5
10	Griesser et al. (2022)	Vegetazione sottofila	Vigneto austriaco	Attività enzimatiche	3

Gli articoli coprono condizioni piuttosto diverse: ambienti mediterranei e semiaridi, appezzamenti in pendenza, vigneti della Spagna meridionale, un caso austriaco e un vigneto caratterizzato da forte disturbo precedente all'impianto. Questa varietà è utile perché amplia il quadro delle risposte osservate, ma rende anche meno corretto un confronto statistico diretto tra tutti i lavori.

3.3 **Effetti sulla sostanza organica e sul carbonio del suolo**

Sostanza organica e carbonio organico sono i parametri che ricorrono più spesso nella matrice. Con la copertura permanente di Festuca arundinacea, Gattullo et al. (2020) riportano un incremento del 136,4% del SOC (carbonio organico del suolo); nel vigneto semiarido con Vicia faba, Novara et al. (2020) riportano invece +9,2%. I due valori non indicano semplicemente che una specie sia più efficace dell'altra: suolo, clima, durata, campionamento e tipo di confronto sono differenti.

Gli altri lavori sulle cover crops confermano una direzione generalmente positiva, ma con ampiezze molto diverse. Guzmán et al. (2019) riportano +73% per la sostanza organica in un confronto indicizzato con il suolo nudo. Novara et al. (2019), dopo cinque anni, osservano +8,9% di SOC in pendenza e +6% in area pianeggiante. Nella prova decennale di Jiménez-González et al. (2023), la SOM aumenta del 44,7% nel topsoil e del 24,4% a 35 cm; il DOC superficiale cresce di circa il 20%.

Questi dati fanno emergere anche il ruolo del tempo. Nel lavoro decennale di Jiménez-González et al. (2023) la risposta è osservabile sia nello strato superficiale sia più in profondità, mentre nelle prove più brevi cambia molto in funzione del parametro considerato. Il carbonio va quindi letto come un bilancio tra apporti, trasformazioni e perdite, non come un valore isolato.

López-Vicente et al. (2020) affrontano il problema da un'altra prospettiva, valutando la sostanza organica persa con i sedimenti. La perdita media annuale risulta pari a 1,29 kg SOM ha^{-1} $anno^{-1}$ nella porzione con minore copertura e a 0,35 kg SOM ha^{-1} $anno^{-1}$ nella porzione con maggiore copertura vegetale, corrispondente a una riduzione descrittiva del 72,9%. Gli autori precisano tuttavia che, nel periodo di prova, la differenza tra le due trappole considerate non risulta statisticamente significativa ($p = 0,149$). Il dato indica quindi una tendenza favorevole della maggiore copertura alla conservazione della sostanza organica, da interpretare tenendo conto di questo limite statistico.

Con i materiali organici le variazioni possono essere molto più ampie. Mairata et al. (2024) riportano +23,1% di SOM con pacciamatura a base di compost esausto di funghi. Nel

trattamento con compost di Lucchetta et al. (2023) la SOM aumenta del 325% e il TOC del 321,4% rispetto alla situazione pre-trattamento. Dopo dieci anni, Idbella et al. (2024) osservano +36,2% di SOC con dose singola di biochar e +81,9% con dose doppia.

L'ampiezza dei valori di Lucchetta et al. (2023) richiede però cautela. Il riferimento è la condizione precedente al trattamento e non una parcella di controllo osservata nello stesso momento. Il delta descrive quindi un percorso di recupero in un terreno fortemente disturbato; non può essere letto come incremento atteso in un vigneto qualsiasi.

3.4 **Effetti sull'azoto e sugli elementi nutritivi**

L'azoto totale risponde in modo evidente soprattutto negli studi con apporti organici. Gattullo et al. (2020) riportano +92,7% di TN con la cover crop permanente; Mairata et al. (2024) +10% con spent mushroom compost. Nel lavoro di Lucchetta et al. (2023), il compost porta il TN da 1,6 a 5,9‰ (+268,8%), mentre la fertilizzazione minerale raggiunge 2,6‰ (+62,5%).

Nel caso di Lucchetta et al. (2023) fosforo e potassio mostrano variazioni ancora più ampie. Il P_2O_5 disponibile passa da 37 a 431 ppm con compost (+1064,9%) e a 127 ppm con fertilizzazione minerale (+243,2%). Il K_2O scambiabile aumenta da 128 a 1111 ppm con compost (+768,0%) e a 303 ppm con fertilizzazione minerale (+136,7%). Mairata et al. (2024) riportano inoltre +47,6% di fosforo disponibile e +282,0% di potassio scambiabile.

Numeri di questa ampiezza mostrano quanto gli ammendanti possano incidere sulla dotazione nutritiva, ma pongono anche un problema interpretativo. Parte della risposta dipende dalla composizione del materiale distribuito e dalla bassa dotazione iniziale del suolo. Il forte incremento del K osservato nei due studi con materiali organici, ad esempio, va quindi letto anche come effetto dell'apporto diretto di nutrienti.

3.5 **Effetti sulla fertilità biologica**

La componente biologica è stata descritta attraverso indicatori diversi: biomassa microbica, DNA o composizione della comunità e attività enzimatiche. Proprio perché non misurano la stessa cosa, questi parametri sono stati mantenuti separati. Insieme aiutano però a capire se la gestione modifica soltanto la dotazione chimica oppure anche la funzionalità biologica del terreno.

3.5.1 *Biomassa e componente microbica*

Gattullo et al. (2020) è il caso in cui la biomassa viene misurata direttamente come MBC. Il valore passa da 114,45 a 242,17 µg g^{-1}, pari a +111,6%. L'aumento procede nella stessa direzione del carbonio organico e del TN e indica che la maggiore dotazione organica si accompagna, in quel caso, a una maggiore biomassa microbica.

Novara et al. (2020) utilizzano invece un indicatore basato sul DNA microbico, espresso nella matrice come indice, che risulta circa doppio con *Vicia faba*. MBC e DNA microbico non descrivono la stessa proprietà, perciò il dato non è stato trasformato in un valore di biomassa carbonica. Viene utilizzato piuttosto come indicazione della risposta della componente microbica.

Idbella et al. (2024) analizzano un ulteriore indicatore, l'abbondanza relativa dei Basidiomycota nella rizosfera. La matrice riporta +80,9% con la dose singola di biochar e +163,8% con la dose doppia. Anche questo dato riguarda una componente specifica della comunità e non va confuso con la biomassa microbica complessiva.

3.5.2 *Attività enzimatiche*

Le attività enzimatiche danno risultati particolarmente chiari in Gattullo et al. (2020) e Griesser et al. (2022). Nel primo studio la β-glucosidasi aumenta del 95,4% e la fosfomonoesterasi alcalina del 62,4% con la cover crop. Nel secondo, la copertura sottofila gestita con sfalcio porta a +34,6% di fosfatasi acida, +27,6% di β-glucosidasi e +19,5% di leucina aminopeptidasi rispetto alla gestione con erbicida.

La direzione delle variazioni è compatibile con una maggiore disponibilità di residui e con un'attività biologica più intensa. Non è però corretto confrontare direttamente tutti gli enzimi come se fossero la stessa misura: attività analizzate e unità differiscono tra gli studi. Per questo la matrice conserva i valori originali e utilizza i delta soprattutto per descrivere direzione e ordine di grandezza della risposta.

3.6 **Effetti sulla fertilità fisica e sulla conservazione del suolo**

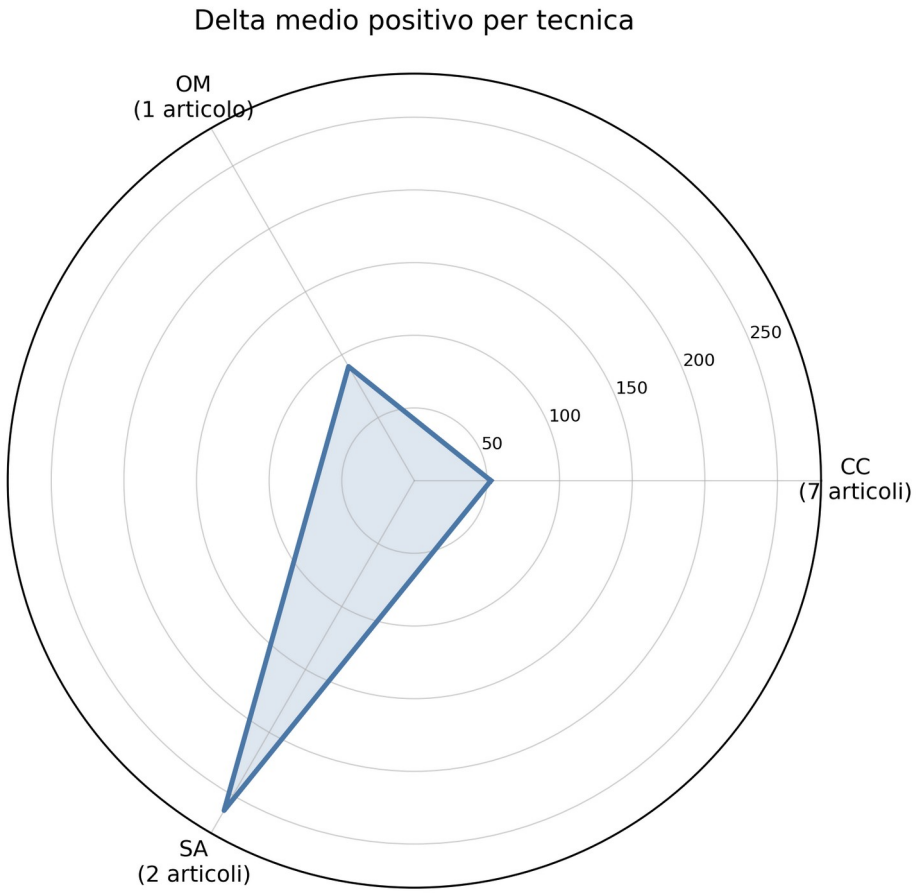
Gli indicatori fisici presenti nel database sono soprattutto stabilità degli aggregati e perdita di sostanza organica con i sedimenti. Guzmán et al. (2019) riportano +29% di stabilità, espresso come valore indicizzato, con cover crop temporanea rispetto al suolo nudo. Il risultato suggerisce una maggiore resistenza alla disgregazione, ma la natura indicizzata del dato impedisce di trattarlo come una concentrazione assoluta.

López-Vicente et al. (2020) riportano una riduzione descrittiva del 72,9% della perdita media annuale di sostanza organica, pur in assenza di una differenza statisticamente significativa tra le due trappole considerate nel periodo di prova ($p = 0,149$). Novara et al. (2019), in un vigneto in pendenza, collegano invece la cover crop al mantenimento del SOC attraverso il controllo dell'erosione. Considerati insieme, i due studi mostrano che una pratica conservativa va valutata sia per ciò che aggiunge o accumula nel terreno sia per ciò che riesce a non perdere.

3.7 **Sintesi quantitativa dei risultati**

Per rendere più leggibile la matrice sono state preparate due rappresentazioni grafiche. Il radar riporta, per ciascuna tecnica, la media aritmetica dei soli delta positivi disponibili; l'istogramma mostra invece le variazioni percentuali delle singole righe per le quali il calcolo era possibile. Si tratta di strumenti descrittivi: la loro lettura richiede sempre il richiamo alle note metodologiche dei singoli articoli.

Il numero di lavori non è distribuito in modo uniforme: sette studi riguardano le cover crops, uno la pacciamatura e due gli ammendanti. Una media elevata nel radar risente quindi sia dell'efficacia osservata sia dei parametri presenti nel database. Anche nell'istogramma i delta più grandi sono legati soprattutto al recupero di un suolo inizialmente molto disturbato. I grafici servono a visualizzare il quadro, non a costruire una classifica.



CC = cover crops; OM = pacciamatura organica; SA = ammendanti del suolo.
Media descrittiva delle righe con Δ positivo: non rappresenta una misura di efficacia agronomica.

Figura 3-1 – Delta medio positivo per tecnica nella matrice bibliografica. Fonte: elaborazione dell'autore sulla base della matrice bibliografica.

Nel radar gli ammendanti presentano la media più alta, soprattutto per effetto dei valori ottenuti con il compost nel vigneto disturbato di Lucchetta et al. (2023). Il risultato va letto per quello che è: una sintesi dei dati disponibili nella matrice. Non dimostra che un ammendante produca effetti superiori alle altre pratiche in qualsiasi condizione.

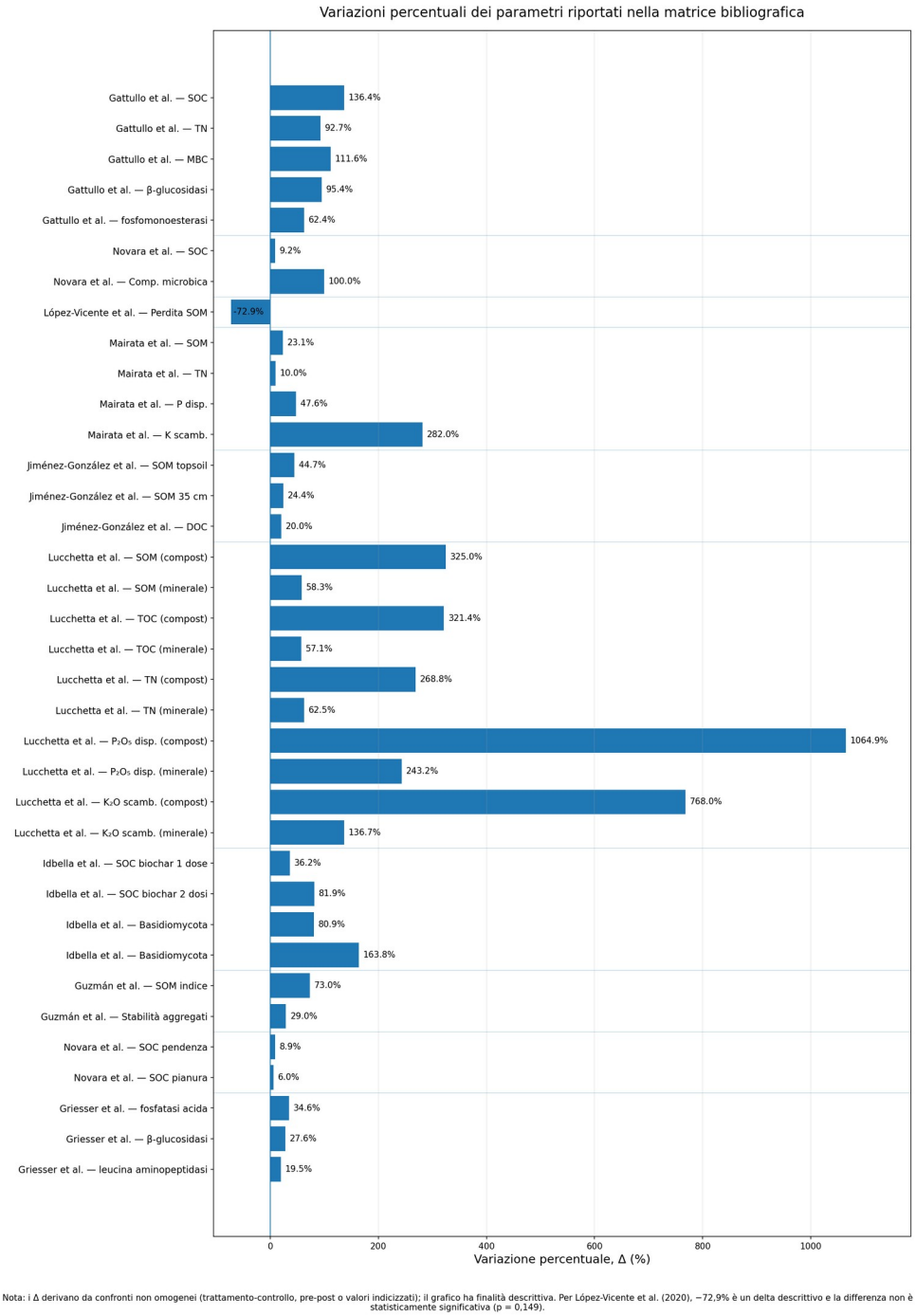


Figura 3-2 – Variazioni percentuali dei parametri per i confronti numericamente utilizzabili della matrice. Fonte: elaborazione dell'autore sulla base della matrice bibliografica.

L'istogramma evidenzia la forte variabilità dei delta. I valori più elevati riguardano soprattutto fosforo e potassio nel trattamento con compost. Per López-Vicente et al. (2020), il −72,9% indica una riduzione della perdita di sostanza organica, ma la differenza non è statisticamente significativa (p = 0,149). Il grafico ha quindi finalità descrittiva e non sostituisce l'interpretazione del disegno sperimentale.

CAPITOLO 4
DISCUSSIONE

4.1 **Efficacia comparativa delle pratiche conservative**

Dai dieci studi non emerge una tecnica migliore in assoluto. È più utile chiedersi quale funzione venga sostenuta da ciascuna gestione. Le cover crops sono il gruppo meglio rappresentato e mostrano effetti favorevoli su carbonio, componente biologica e protezione fisica. Pacciamatura, compost e biochar agiscono con meccanismi diversi, perché aggiungono direttamente materiale organico e, nel caso del compost, anche quantità rilevanti di nutrienti.

Per le cover crops conta soprattutto la convergenza della direzione dei risultati. Gattullo et al. (2020), Novara et al. (2019, 2020), Jiménez-González et al. (2023), Guzmán et al. (2019), López-Vicente et al. (2020) e Griesser et al. (2022) descrivono risposte favorevoli riferite a componenti diverse della fertilità. Le percentuali non sono direttamente confrontabili, ma nel loro insieme indicano che la copertura agisce sia aumentando gli ingressi organici sia riducendo le perdite e sostenendo la funzionalità biologica.

La pacciamatura organica presenta un profilo diverso. In Mairata et al. (2024) la protezione della superficie si somma all'apporto nutritivo del compost esausto di funghi. Può essere un vantaggio in un suolo povero, ma richiede di conoscere composizione del materiale e conducibilità elettrica. Un incremento molto elevato di un elemento, infatti, non produce automaticamente un beneficio della stessa entità: contano l'equilibrio con gli altri nutrienti e la capacità della vite di utilizzarli.

Il biochar va interpretato soprattutto in una prospettiva di lungo periodo. Idbella et al. (2024) osservano un aumento del SOC dalla dose singola alla dose doppia e modificazioni della componente microbica considerata nello studio. Il gradiente segue la quantità di materiale carbonioso apportato, ma non dimostra che raddoppiare la dose sia anche la soluzione più efficiente. Per stabilire una dose agronomicamente conveniente servirebbero informazioni aggiuntive su costi, disponibilità del biochar, risposta della vite e altri effetti sul terreno.

4.2 **Tempi di risposta delle pratiche conservative**

La durata delle prove è una chiave di lettura fondamentale. Alcuni effetti delle cover crops, come la protezione della superficie e la riduzione delle perdite, possono comparire rapidamente; l'accumulo di carbonio e la modifica delle frazioni organiche più stabili richiedono invece tempi maggiori. Le prove decennali di Jiménez-González et al. (2023) e Idbella et al. (2024) permettono di osservare proprio questa componente cumulativa.

Con il compost la dinamica è diversa perché sostanza organica e nutrienti vengono apportati direttamente. Nel lavoro di Lucchetta et al. (2023) i parametri chimici cambiano in modo netto nel periodo osservato, mentre la componente biologica non segue necessariamente lo stesso ritmo. In un terreno molto disturbato è plausibile vedere prima un recupero chimico e, solo successivamente, processi biologici e strutturali più stabili.

Il tempo, quindi, non è un semplice dettaglio del protocollo. Un delta misurato dopo due o tre anni descrive una fase diversa da uno rilevato dopo un decennio. Nel breve periodo possono prevalere l'apporto diretto di materiale e la protezione della superficie; nel lungo entrano maggiormente in gioco accumulo, trasformazione e stabilizzazione della sostanza organica. Per questo la durata è riportata tra le informazioni centrali della tabella riassuntiva.

4.3 **Applicabilità nel vigneto mediterraneo**

Il riferimento al contesto mediterraneo è centrale perché molti degli studi selezionati riguardano vigneti con disponibilità idrica stagionalmente limitata. La stessa copertura che riduce erosione e perdita di sostanza organica può utilizzare acqua in fasi sensibili per la vite. Specie, durata della copertura, sfalcio e terminazione devono quindi essere adattati all'annata e alla capacità del terreno di immagazzinare acqua.

Il lavoro di Gattullo et al. (2020) rende concreto questo compromesso. Nell'annata più siccitosa la Festuca è stata associata a una penalizzazione di alcuni parametri produttivi, mentre negli anni successivi l'effetto è stato meno evidente. L'inerbimento non è quindi una scelta rigida tra terreno nudo e terreno coperto: è una tecnica la cui intensità va gestita in relazione alla disponibilità delle risorse.

In un vigneto in pendenza il peso delle priorità cambia. Novara et al. (2019) e López-Vicente et al. (2020) mostrano che la copertura aiuta a conservare carbonio e sostanza organica anche limitando l'erosione. La perdita di topsoil è difficilmente reversibile nel breve periodo e, in questi siti, la funzione protettiva del suolo può avere un valore agronomico maggiore di quanto emerga osservando soltanto resa o nutrienti disponibili.

Per pacciamatura, compost e biochar l'applicabilità dipende invece soprattutto da qualità e disponibilità del materiale, dose, costi di distribuzione e caratteristiche del terreno. La pacciamatura è utile quando serve coprire la superficie senza una coltura viva; il compost può sostenere suoli poveri o disturbati, ma richiede attenzione a P, K e sali; il biochar è più persistente, ma ha senso soprattutto quando l'incremento del carbonio risponde a una necessità reale del suolo.

4.4 **Limiti del confronto e criticità metodologiche**

Il limite principale del confronto è l'eterogeneità degli studi. Cambiano clima, suolo, pendenza, età del vigneto, gestione dell'interfila e del sottofila, specie o materiale, durata e profondità di campionamento. Anche gli indicatori hanno significati diversi: SOC, SOM e TOC sono collegati ma non identici; MBC, DNA microbico e abbondanza relativa di un gruppo fungino descrivono aspetti distinti; le attività enzimatiche sono misurate con metodi e unità differenti. Per questo il confronto resta necessariamente interpretativo.

Un'altra criticità riguarda i delta. Nel confronto trattamento-controllo la percentuale descrive due gestioni osservate nello stesso momento; nel pre/post include anche la situazione iniziale e il tempo trascorso; nei valori indicizzati il controllo è fissato convenzionalmente a 100. Per gli indicatori di perdita il segno negativo può addirittura indicare un miglioramento. Le note della matrice mantengono esplicite queste differenze per evitare confronti impropri tra percentuali che, solo formalmente, sembrano equivalenti.

Anche la composizione del campione bibliografico pone un limite. Dieci articoli sono sufficienti per costruire un confronto ragionato, ma non rappresentano tutta la letteratura disponibile. La distribuzione, inoltre, è sbilanciata: sette studi riguardano le cover crops, uno la pacciamatura e due gli ammendanti. Il radar riflette inevitabilmente questa struttura e va usato come sintesi, non come classifica delle tecniche.

Il database, infine, è stato costruito intorno alla fertilità del suolo. Resa e qualità dell'uva compaiono solo quando servono a interpretare un compromesso agronomico, come nel caso della competizione idrica. Questa scelta mantiene il lavoro coerente con l'obiettivo fissato, ma non permette di valutare in modo completo convenienza produttiva ed economica. Un approfondimento successivo potrebbe integrare fertilità, uso dell'acqua, produzione e costi.

4.5 **Implicazioni per una gestione sostenibile del vigneto**

Il confronto suggerisce che una gestione conservativa efficace non può essere ridotta a una tecnica applicata allo stesso modo in ogni vigneto. Le cover crops risultano particolarmente interessanti quando la priorità è proteggere la superficie e sostenere nel tempo la componente organica e biologica. Pacciamatura e ammendanti diventano invece più utili quando occorre aumentare gli apporti organici o intervenire su una specifica carenza, purché composizione e dose siano conosciute.

La scelta dovrebbe partire dalla condizione reale dell'appezzamento. Se il problema principale è l'erosione, la copertura del terreno può avere priorità rispetto all'incremento dei nutrienti; in un suolo molto povero di sostanza organica può essere più utile un ammendante; in condizioni siccitose, invece, l'inerbimento va modulato per contenere la competizione. Le pratiche non sono necessariamente alternative: possono essere combinate o alternate in funzione dell'obiettivo e dell'annata.

La sostenibilità dipende dalla capacità di tenere insieme protezione del suolo, dotazione organica, equilibrio dei nutrienti, attività biologica e fabbisogni della vite. I risultati della matrice sono complessivamente favorevoli alle pratiche conservative, ma mostrano anche quanto sia importante adattarle al contesto. La scelta più sensata non coincide con il delta percentuale più alto: coincide con la pratica che affronta il limite principale del vigneto senza crearne un altro.

CONCLUSIONI

Il lavoro ha confrontato dieci studi sperimentali dedicati agli effetti delle pratiche conservative sulla fertilità del suolo in vigneto. L'uso di una matrice comune ha consentito di affiancare indicatori chimici, biologici e fisici senza perdere di vista le differenze di metodo, durata e contesto. Questo è stato essenziale per individuare tendenze ricorrenti senza attribuire ai dati un'omogeneità che in realtà non possiedono.

Le cover crops sono la pratica meglio documentata nel campione bibliografico e offrono anche il quadro più articolato. Nei diversi lavori si associano a una migliore conservazione della sostanza organica, a variazioni favorevoli del carbonio e della componente biologica e, quando vengono analizzati gli aspetti fisici, a una maggiore protezione del terreno. Nei vigneti in pendenza questo ruolo conservativo appare particolarmente importante; negli ambienti mediterranei, invece, la disponibilità idrica rimane il principale elemento da gestire con attenzione.

Pacciamatura organica, compost e biochar svolgono funzioni diverse ma complementari. La pacciamatura protegge la superficie e, in funzione del materiale, apporta anche sostanza organica e nutrienti; il compost può accelerare il recupero della fertilità chimica nei suoli impoveriti; il biochar introduce una quota di carbonio più persistente. Per tutte e tre le pratiche, però, dose e composizione sono decisive: un forte aumento di un nutriente non corrisponde necessariamente a un miglioramento equilibrato del suolo.

La durata delle prove modifica il significato dei risultati. Gli effetti fisici e alcune risposte biologiche possono comparire in tempi relativamente brevi, mentre accumulo e stabilizzazione del carbonio richiedono spesso periodi più lunghi. Le prove decennali incluse nella matrice mostrano quindi l'importanza di un monitoraggio prolungato, soprattutto per cover crops e biochar, i cui effetti possono sommarsi nel tempo.

I delta percentuali non permettono di costruire una graduatoria assoluta tra tecniche. Trattamento-controllo, pre/post e valori indicizzati descrivono confronti diversi; allo stesso modo SOM, SOC, enzimi, nutrienti e indicatori microbici non hanno lo stesso significato agronomico. Radar e istogramma sono utili per orientarsi nella matrice, ma non hanno il significato di una metanalisi né di una classifica di efficacia.

Dal punto di vista gestionale, la scelta della pratica dovrebbe partire dal principale limite dell'appezzamento: rischio erosivo, scarsa dotazione organica, squilibri nutrizionali, ridotta attività biologica o disponibilità idrica. Un approccio adattativo, nel quale coperture e apporti organici vengono modulati in base al sito e all'andamento stagionale, appare più coerente rispetto a protocolli applicati in modo uniforme.

Nel loro insieme, gli studi esaminati sostengono una gestione del vigneto orientata alla conservazione del suolo e al mantenimento della sua funzionalità nel tempo. Rimane però la necessità di prove di lunga durata, soprattutto in ambiente mediterraneo, con indicatori più omogenei e una valutazione integrata di fertilità, disponibilità idrica, risposta produttiva e costi di gestione. Una base sperimentale più comparabile aiuterebbe a definire meglio dosi, tempi e condizioni di applicazione delle diverse pratiche conservative.

BIBLIOGRAFIA

Abad, J., Hermoso de Mendoza, I., Marín, D., Orcaray, L. & Santesteban, L.G., 2021. Cover crops in viticulture. A systematic review (1): Implications on soil characteristics and biodiversity in vineyard. OENO One, 55(1), pp. 295–312. doi: 10.20870/oeno-one.2021.55.1.3599.

Belmonte, S.A., Celi, L., Stahel, R.J., Bonifacio, E., Novello, V., Zanini, E. & Steenwerth, K.L., 2018. Effect of Long-Term Soil Management on the Mutual Interaction Among Soil Organic Matter, Microbial Activity and Aggregate Stability in a Vineyard. Pedosphere, 28(2), pp. 288–298. doi: 10.1016/S1002-0160(18)60015-3.

Calleja-Cervantes, M.E., Fernández-González, A.J., Irigoyen, I., Fernández-López, M., Aparicio-Tejo, P.M. & Menéndez, S., 2015. Thirteen years of continued application of composted organic wastes in a vineyard modify soil quality characteristics. Soil Biology and Biochemistry, 90, pp. 241–254. doi: 10.1016/j.soilbio.2015.07.002.

Garcia, L., Celette, F., Gary, C., Ripoche, A., Valdés-Gómez, H. & Metay, A., 2018. Management of service crops for the provision of ecosystem services in vineyards: A review. Agriculture, Ecosystems & Environment, 251, pp. 158–170. doi: 10.1016/j.agee.2017.09.030.

Gattullo, C.E., Mezzapesa, G.N., Stellacci, A.M., Ferrara, G., Occhiogrosso, G., Petrelli, G., Castellini, M. & Spagnuolo, M., 2020. Cover Crop for a Sustainable Viticulture: Effects on Soil Properties and Table Grape Production. Agronomy, 10(9), 1334. doi: 10.3390/agronomy10091334.

Griesser, M., Khalil, S., De Berardinis, F., Flix Porret, O., Hörmayer, R., Mayer, N., Kührer, E. & Forneck, A., 2022. Under-vine vegetation in vineyards: a case study considering soil hydrolytic enzyme activity, yield and grape quality in Austria. OENO One, 56(4), pp. 81–93. doi: 10.20870/oeno-one.2022.56.4.5518.

Guzmán, G., Cabezas, J.M., Sánchez-Cuesta, R., Lora, Á., Bauer, T., Strauss, P., Winter, S., Zaller, J.G. & Gómez, J.A., 2019. A field evaluation of the impact of temporary cover crops on soil properties and vegetation communities in southern Spain vineyards. Agriculture, Ecosystems & Environment, 272, pp. 135–145. doi: 10.1016/j.agee.2018.11.010.

Idbella, M., Baronti, S., Giagnoni, L., Renella, G., Becagli, M., Cardelli, R., Maienza, A., Vaccari, F.P. & Bonanomi, G., 2024. Long-term effects of biochar on soil chemistry, biochemistry, and microbiota: Results from a 10-year field vineyard experiment. Applied Soil Ecology, 195, 105217. doi: 10.1016/j.apsoil.2023.105217.

Jiménez-González, M.A., López-Romano, H., Carral, P., Álvarez-González, A.M., Herranz-Luque, J.-E., Sastre-Rodríguez, B.E., García-Díaz, A., Muñoz-Organero, G. & Marques, M.J., 2023. Ten-Year Impact of Cover Crops on Soil Organic Matter Quantity and Quality in Semi-Arid Vineyards. Land, 12(12), 2143. doi: 10.3390/land12122143.

López-Vicente, M., Calvo-Seas, E., Álvarez, S. & Cerdà, A., 2020. Effectiveness of Cover Crops to Reduce Loss of Soil Organic Matter in a Rainfed Vineyard. Land, 9(7), 230. doi: 10.3390/land9070230.

Lucchetta, M., Romano, A., Alzate Zuluaga, M.Y., Fornasier, F., Monterisi, S., Pii, Y., Marcuzzo, P., Lovat, L. & Gaiotti, F., 2023. Compost application boosts soil restoration in highly disturbed hillslope vineyard. Frontiers in Plant Science, 14, 1289288. doi: 10.3389/fpls.2023.1289288.

Maienza, A., Baronti, S., Cincinelli, A., Martellini, T., Grisolia, A., Miglietta, F., Renella, G., Stazi, S.R., Vaccari, F.P. & Genesio, L., 2017. Biochar improves the fertility of a Mediterranean vineyard without toxic impact on the microbial community. Agronomy for Sustainable Development, 37, 47. doi: 10.1007/s13593-017-0458-2.

Mairata, A., Labarga, D., Puelles, M., Rivacoba, L., Portu, J. & Pou, A., 2024. Organic Mulching Versus Soil Conventional Practices in Vineyards: A Comprehensive Study on Plant Physiology, Agronomic, and Grape Quality Effects. Agronomy, 14(10), 2404. doi: 10.3390/agronomy14102404.

Nannipieri, P., Giagnoni, L., Renella, G., Puglisi, E., Ceccanti, B., Masciandaro, G., Fornasier, F., Moscatelli, M.C. & Marinari, S., 2012. Soil enzymology: classical and molecular approaches. Biology and Fertility of Soils, 48, pp. 743–762. doi: 10.1007/s00374-012-0723-0.

Novara, A., Gristina, L., Saladino, S.S., Santoro, A. & Cerdà, A., 2011. Soil erosion assessment on tillage and alternative soil managements in a Sicilian vineyard. Soil and Tillage Research, 117, pp. 140–147. doi: 10.1016/j.still.2011.09.007.

Novara, A., Minacapilli, M., Santoro, A., Rodrigo-Comino, J., Carrubba, A., Sarno, M., Venezia, G. & Gristina, L., 2019. Real Cover Crops Contribution to Soil Organic Carbon Sequestration in Sloping Vineyard. Science of The Total Environment, 652, pp. 300–306. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.247.

Novara, A., Catania, V., Tolone, M., Gristina, L., Laudicina, V.A. & Quatrini, P., 2020. Cover Crop Impact on Soil Organic Carbon, Nitrogen Dynamics and Microbial Diversity in a Mediterranean Semiarid Vineyard. Sustainability, 12(8), 3256. doi: 10.3390/su12083256.

OIV, 2025. State of the World Vine and Wine Sector in 2024. International Organisation of Vine and Wine.

Prosdocimi, M., Jordán, A., Tarolli, P., Keesstra, S., Novara, A. & Cerdà, A., 2016. The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards. Science of The Total Environment, 547, pp. 323–330. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.076.

Steenwerth, K.L. & Belina, K.M., 2008a. Cover crops and cultivation: Impacts on soil N dynamics and microbiological function in a Mediterranean vineyard agroecosystem. Applied Soil Ecology, 40(2), pp. 370–380. doi: 10.1016/j.apsoil.2008.06.004.

Steenwerth, K.L. & Belina, K.M., 2008b. Cover crops enhance soil organic matter, carbon dynamics and microbiological function in a vineyard agroecosystem. Applied Soil Ecology, 40(2), pp. 359–369. doi: 10.1016/j.apsoil.2008.06.006.