



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI
CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE FORESTALI ED AMBIENTALI

GESTIONE DELLA FERTILIZZAZIONE ORGANICA E MANTENIMENTO
DELLA FERTILITÀ DEL SUOLO:
ANALISI DEI BENEFICI AGRONOMICI ED ECOSISTEMICI NEL
QUADRO DELL'AGRICOLTURA BIOLOGICA E DELLA PIANIFICAZIONE
AGRONOMICA (PUA)

*ORGANIC FERTILIZATION MANAGEMENT AND SOIL FERTILITY
MAINTENANCE: AGRONOMIC AND ECOSYSTEM BENEFITS IN THE CONTEXT
OF ORGANIC FARMING AND AGRONOMIC PLANNING (PUA)*

TIPO TESI: compilativa

Studente:
EDOARDO FANESI

Relatore:
PROF. LUIGI LEDDA

CORRELATRICE
PROF. PAOLA A. DELIGIOS

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

*Dedico questo lavoro alla mia terra e alla mia comunità,
nata dai sacrifici e dalle speranze di chi ci ha preceduto.*

Sommario

ABSTRACT	1
PREMESSA E SCOPO DELLA TESI	2
CAPITOLO 1	4
METODO DI RICERCA BIBLIOGRAFICA E CRITERI DI SELEZIONE DELLE FONTI	4
CAPITOLO 2	6
IL RUOLO DELLA SOSTANZA ORGANICA NEL SISTEMA SUOLO-PIANTA	6
2.1 Definizione e frazionamento della sostanza organica nel terreno	6
2.2 La chimica delle sostanze umiche: acidi umici, acidi fulvici e umina	6
2.3 Influenza delle sostanze umiche sulle proprietà chimiche e nutrizionali del suolo	7
2.4 Influenza della sostanza organica sulle proprietà fisiche del suolo	7
2.5 Il complesso umo-argilloso e i meccanismi di protezione del carbonio	9
2.6 Influenza della sostanza organica sulle proprietà biologiche del suolo	10
2.7 La dinamica del carbonio e i processi di mineralizzazione	10
CAPITOLO 3	13
MATRICI ORGANICHE E PRATICHE GESTIONALI PER LA TUTELA DEL SUOLO	13
3.1 Gli ammendanti organici tradizionali e industriali	13
3.2 Tecniche di gestione biologica: la pratica del sovescio	16
3.3 Sostenibilità ambientale e corrette pratiche di distribuzione	17
3.4 Strumenti gestionali e quadro normativo	20
CAPITOLO 4	23
BENEFICI AGRONOMICI ED ECOSISTEMICI: UN'ANALISI COMPARATIVA	23
4.1 Miglioramento della fertilità fisica e resilienza idrica dei suoli	23
4.2 Dinamiche della biodiversità microbica e salute del suolo	25
4.3 Il contributo delle matrici organiche al sequestro del carbonio	27
DISCUSSIONE E CONCLUSIONI	31
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	35

ABSTRACT

Il mantenimento della fertilità del suolo rappresenta una delle sfide centrali per la sostenibilità dei sistemi agricoli, ponendo la gestione della sostanza organica al centro della transizione agroecologica. Questo elaborato, di natura compilativa, analizza il ruolo della fertilizzazione organica e delle pratiche di concimazione verde nella tutela della fertilità fisica, chimica e biologica del suolo, attraverso una revisione critica della letteratura scientifica, tecnica e normativa.

L'analisi prende avvio dall'esame della sostanza organica del suolo e delle sue principali funzioni gestionali, con particolare attenzione alle sostanze umiche, alla capacità di scambio cationico, alla stabilità degli aggregati, alla ritenzione idrica e ai processi di mineralizzazione e umificazione. Successivamente vengono confrontate diverse matrici e strategie gestionali, tra cui letame, compost, digestato e sovescio, evidenziandone le differenti funzioni agronomiche: apporto di nutrienti, stimolo dell'attività biologica, incremento del carbonio stabile e miglioramento della struttura del terreno.

Un ulteriore approfondimento riguarda la gestione dell'azoto e le possibili criticità ambientali associate agli apporti organici, quali volatilizzazione dell'ammoniaca, lisciviazione dei nitrati, ed emissioni di protossido di azoto. In questo quadro, strumenti come il Piano di Utilizzazione Agronomica (PUA) e il rispetto della Direttiva Nitrati assumono un ruolo essenziale per collegare l'efficacia agronomica delle matrici organiche alla tutela delle acque, del suolo e dell'atmosfera.

L'elaborato evidenzia inoltre come l'apporto regolare e razionale di sostanza organica possa favorire la biodiversità microbica edafica, l'attività enzimatica, la resilienza idrica, e il potenziale di sequestro del carbonio. Tuttavia, tali benefici dipendono dalla qualità delle matrici impiegate, dalle dosi, dalle epoche di distribuzione e dalle tecniche di applicazione. La fertilizzazione organica e il sovescio non rappresentano quindi soluzioni immediate per il ripristino di suoli degradati, ma strategie conservative di medio-lungo periodo.

In conclusione, la tesi propone una visione integrata della gestione della fertilità organica, fondata sulla combinazione tra apporti organici stabilizzati, colture di copertura, riduzione del disturbo meccanico e pianificazione agronomica degli apporti nutritivi. Tale approccio, in una prospettiva conservativa e *progressivamente rigenerativa*, consente di valorizzare le matrici organiche come risorse all'interno di cicli produttivi più circolari, ridurre l'impatto ambientale dell'attività agricola e rafforzare la capacità del suolo di mantenere nel tempo le proprie funzioni ecosistemiche. In questo senso, la tutela della sostanza organica non assume soltanto un valore agronomico, ma diventa un elemento strategico per la salvaguardia del suolo come patrimonio vitale, limitato e non rinnovabile.

PREMESSA E SCOPO DELLA TESI

Il suolo rappresenta una risorsa naturale non rinnovabile, la cui integrità è fondamentale per il sostentamento degli ecosistemi terrestri e della produzione alimentare globale. Tuttavia, l'intensificazione delle pratiche agricole avvenuta negli ultimi decenni, unita a una crescente industrializzazione, ha accelerato i processi di depauperamento delle risorse naturali. In questo scenario, la sostanza organica non deve essere considerata semplicemente come una fonte di nutrienti, ma come il pilastro fondamentale per il mantenimento della fertilità fisica, chimica e biologica del sistema suolo-pianta.

La sfida attuale dell'agricoltura moderna risiede nella necessità di rispondere a problematiche globali quali la degradazione dei suoli e l'urgenza di mitigare i cambiamenti climatici. La progressiva mineralizzazione del carbonio organico porta a una perdita di struttura del terreno, riducendo la biodiversità microbica e la capacità di scambio cationico (CSC). Quest'ultima agisce come un vero e proprio serbatoio di nutrienti, ovvero il complesso di scambio chimico che permette alle piante di assorbire elementi essenziali in modo efficiente e bilanciato. Il recupero di matrici organiche e l'adozione di tecniche biologiche come l'uso di letame, compost, digestato anaerobico e la pratica del sovescio si inseriscono in una visione di economia circolare volta a reintrodurre stabilità nel ciclo produttivo, riducendo la dipendenza dai fertilizzanti sintetici derivanti da combustibili fossili.

In particolare, l'apporto di queste matrici e l'impiego di colture da sovescio agiscono sulla resilienza del suolo attraverso meccanismi biochimici complessi. Le sostanze umiche e la biomassa vegetale interrata giocano un ruolo determinante nel potenziare la capacità di trattenere l'acqua e nel favorire la formazione di aggregati stabili, proteggendo il terreno dall'erosione e dal compattamento. Tuttavia, è necessario analizzare tali pratiche con pragmatismo: l'inserimento di fertilizzanti organici e concimi verdi richiede una pianificazione rigorosa per evitare impatti negativi, come la lisciviazione dei nitrati, rendendo strumenti come i Piani di Utilizzazione Agronomica (PUA) indispensabili per una gestione razionale e normativa del comparto agricolo.

Scopo della Tesi

Il presente elaborato si pone l'obiettivo di analizzare criticamente il ruolo della fertilizzazione organica e delle pratiche di concimazione verde nella gestione moderna dei suoli agrari. Attraverso una revisione sistematica delle principali tecniche e matrici disponibili, la tesi mira a:

- Approfondire la scienza del sistema suolo-pianta: Indagare la natura chimica delle frazioni umiche e il loro impatto sulla stabilità strutturale e sulla capacità nutritiva dei terreni.
- Confrontare le tecniche di fertilizzazione organica e biologica: Esaminare le differenze qualitative e agronomiche tra ammendanti tradizionali (compost, letame), sottoprodotti industriali (digestato) e

pratiche colturali come il sovescio, valutando il loro contributo alla fertilità nel breve e nel lungo periodo.

- Analizzare il quadro tecnico-normativo: Valutare l'importanza della pianificazione agronomica e dei regimi di agricoltura biologica, evidenziando come la normativa guidi l'efficienza d'uso dell'azoto per la protezione delle acque e del suolo.
- Valutare i benefici ecosistemici e climatici: Analizzare il potenziale di sequestro del carbonio (*carbon sequestration*) e il miglioramento della biodiversità microbica come strumenti per potenziare la resilienza idrica e biologica delle colture.
- Definire il valore della gestione conservativa: Evidenziare come fertilizzazione organica e sovescio non rappresentano soluzioni immediate per il ripristino di suoli degradati, ma strategie agronomiche di medio-lungo periodo finalizzate a rallentare i processi di degradazione pedologica e a migliorare la resilienza del sistema suolo-pianta.

In conclusione, lo scopo ultimo del lavoro è evidenziare come una gestione razionale degli apporti organici sia una scelta imprescindibile non tanto per un incremento produttivo incondizionato, quanto per la mitigazione dell'impronta ambientale e la salvaguardia della risorsa suolo come patrimonio per le generazioni future.

CAPITOLO 1

METODO DI RICERCA BIBLIOGRAFICA E CRITERI DI SELEZIONE DELLE FONTI

Il presente elaborato è stato sviluppato attraverso una revisione critica della letteratura scientifica, tecnica e normativa relativa alla fertilizzazione organica, alla conservazione della fertilità del suolo e alla pianificazione agronomica degli apporti nutritivi. La ricerca bibliografica è stata condotta principalmente attraverso le banche dati Scopus e Google Scholar, utilizzando stringhe di ricerca costruite a partire dai principali nuclei tematici della tesi: sostanza organica del suolo, ammendanti organici, digestato, compost, letame, sovescio, dinamica dell'azoto, sequestro del carbonio, biodiversità microbica, Direttiva Nitrati e Piano di Utilizzazione Agronomica.

Le stringhe di ricerca sono state formulate prevalentemente in lingua inglese, al fine di intercettare la letteratura scientifica internazionale, integrandole quando necessario con termini in italiano per gli aspetti tecnico-normativi nazionali. A titolo esemplificativo, sono state utilizzate combinazioni di parole chiave quali: *soil organic matter AND soil fertility, organic fertilization AND soil health, compost AND carbon sequestration, anaerobic digestate AND nitrogen use efficiency, green manure OR cover crops AND soil structure, organic amendments AND greenhouse gas emissions, nitrate leaching AND manure management*, Piano di Utilizzazione Agronomica e Direttiva Nitrati.

La selezione bibliografica ha privilegiato contributi pubblicati negli ultimi quindici anni, così da garantire un inquadramento aggiornato delle conoscenze scientifiche relative alla fertilizzazione organica, alla salute del suolo, alla gestione dell'azoto e ai benefici ecosistemici delle matrici organiche. Tuttavia, sono stati mantenuti anche alcuni riferimenti precedenti a tale intervallo temporale, considerati "milestone" della disciplina, poiché fondamentali per l'inquadramento teorico dei processi di umificazione, aggregazione del suolo, capacità di scambio cationico, dinamica della sostanza organica e attività microbica edafica.

I risultati ottenuti dalla ricerca sono stati poi sottoposti a una selezione qualitativa. Sono stati inclusi articoli peer reviewed, review scientifiche, testi universitari di riferimento e documenti tecnico-normativi coerenti con gli obiettivi dell'elaborato. La scelta delle fonti ha privilegiato i contributi capaci di collegare gli effetti agronomici delle matrici organiche con indicatori di qualità del suolo, quali stabilità strutturale, ritenzione idrica, disponibilità dei nutrienti, attività microbica, emissioni di gas serra e potenziale di sequestro del carbonio. Sono stati invece esclusi contributi non pertinenti, fonti divulgative prive di adeguato supporto scientifico o lavori centrati esclusivamente sull'incremento produttivo senza un chiaro riferimento alla sostenibilità del sistema suolo-pianta.

La revisione non ha avuto finalità meta-analitiche, ma è stata impostata come analisi critica e comparativa delle fonti, con l'obiettivo di collegare i meccanismi chimici, fisici e biologici del suolo alle pratiche agronomiche di gestione delle matrici organiche.

L'analisi della letteratura selezionata è stata organizzata secondo una logica tematica e comparativa. In una prima fase sono stati esaminati i contributi relativi al ruolo della sostanza organica e delle sostanze umiche nelle proprietà chimiche, fisiche e biologiche del suolo. In seguito sono state confrontate le principali matrici organiche e pratiche gestionali, quali letame, compost, digestato e sovescio, valutandone composizione, stabilità, tempi di mineralizzazione, benefici agronomici e possibili criticità ambientali. Infine, le evidenze scientifiche sono state integrate con il quadro tecnico-normativo, con particolare riferimento alla Direttiva Nitrati e al Piano di Utilizzazione Agronomica, al fine di collegare la letteratura scientifica alle scelte operative richieste nella gestione aziendale degli apporti organici.

Questo percorso metodologico ha consentito di interpretare la fertilizzazione organica non come una pratica isolata, ma come parte di una strategia complessiva di gestione conservativa del suolo, finalizzata al mantenimento della fertilità, alla riduzione delle perdite di nutrienti, alla tutela delle acque e alla mitigazione dell'impatto ambientale dell'attività agricola.

CAPITOLO 2

IL RUOLO DELLA SOSTANZA ORGANICA NEL SISTEMA SUOLO-PIANTA

2.1 Definizione e frazionamento della sostanza organica nel terreno

La sostanza organica del suolo costituisce una miscela eterogenea e dinamica di materiali di origine biologica in diverse fasi di decomposizione, derivanti da residui vegetali, animali e dalle biomasse microbiche. Dal punto di vista funzionale e chimico, la SOM (*Soil Organic Matter*) può essere suddivisa in due macro-frazioni principali: la frazione non umificata (o labile) e la frazione umificata (o stabile) (Sequi, 2005).

La frazione labile comprende composti organici ben definiti dal punto di vista biochimico, quali carboidrati, proteine, lipidi, amminoacidi e acidi organici a basso peso molecolare. Questi composti, caratterizzati da un rapido turnover (giorni o settimane), rappresentano la fonte primaria di energia prontamente disponibile per la microflora e la microfauna edafica (Violante, 2002). Al contrario, la frazione umificata è costituita dalle sostanze umiche propriamente dette: polimeri complessi, amorfi, di colore scuro e ad alto peso molecolare, che mostrano un'elevata resistenza alla degradazione microbica e la cui persistenza nel terreno può variare da decenni a millenni. Il processo di transizione che trasforma la frazione labile in composti stabili prende il nome di umificazione.

2.2 La chimica delle sostanze umiche: acidi umici, acidi fulvici e umina

Le sostanze umiche non possiedono una formula chimica univoca, ma sono classificate in base alla loro solubilità in soluzioni acquose a differenti valori di pH. Questa separazione analitica permette di identificare tre frazioni fondamentali:

- **Acidi Fulvici (AF):** Rappresentano la frazione solubile sia in ambiente acido ($\text{pH} < 2$) che in ambiente alcalino. Dal punto di vista strutturale, gli acidi fulvici presentano un peso molecolare relativamente basso (compreso generalmente tra 1.000 e 10.000 Da) e un colore giallo-dorato o paglierino. Chimicamente, sono caratterizzati da un'elevata densità di gruppi funzionali ossidrilici e carbossilici, che conferiscono loro una spiccata acidità, un'alta idrosolubilità e una forte capacità di chelazione nei confronti dei cationi metallici liberi nella soluzione circolante (Sequi, 2005).
- **Acidi Umici (AU):** Costituiscono la frazione insolubile in ambiente acido (precipitano a pH inferiore a 2) ma solubile a pH alcalini. Hanno un peso molecolare nettamente superiore rispetto agli acidi fulvici (da 10.000 fino a oltre 100.000 Da) e mostrano una colorazione che varia dal marrone scuro al nero. La loro struttura molecolare è dominata da nuclei aromatici condensati stabili, legati a catene alifatiche. Possiedono una minore quantità di gruppi carbossilici rispetto agli acidi

fulvici, ma presentano una spiccata attitudine a formare complessi stabili con la frazione minerale del suolo (Violante, 2002).

- Umina: Rappresenta la frazione completamente insolubile a qualsiasi valore di pH (Sequi, 2005). L'umina è strettamente legata ai minerali argillosi mediante legami chimici ad alta energia o si trova intrappolata all'interno dei microaggregati strutturali del terreno, risultando la componente più stabile e refrattaria agli attacchi enzimatici.

La reattività chimica delle sostanze umiche è governata dalla presenza di gruppi funzionali ossigenati, principalmente carbossili (-COOH) e fenoli (-OH). Questi gruppi sono debolmente acidi e soggetti a fenomeni di dissociazione in funzione del pH del terreno. A valori di pH neutri o alcalini, tipici dei terreni agricoli ben gestiti, la perdita di protoni (H^+) genera cariche negative nette sulla superficie delle macromolecole umiche. Questa densità di carica negativa è l'elemento biochimico chiave che determina le eccezionali proprietà chimico-fisiche della frazione organica stanziale (Sequi, 2005).

2.3 Influenza delle sostanze umiche sulle proprietà chimiche e nutrizionali del suolo

Il ruolo più rilevante delle sostanze umiche sul piano chimico-agrario si esprime attraverso il drastico incremento della Capacità di Scambio Cationico (CSC) del terreno. La CSC misura la quantità di cationi scambiabili che il suolo è in grado di trattenere per attrazione elettrostatica, impedendone il dilavamento ma mantenendoli biodisponibili per l'assorbimento radicale (Brady & Weil, 2008).

Mentre i minerali argillosi presentano una CSC stabile ma quantitativamente limitata (variabile da 10 a 100 meq/100g a seconda del tipo di argilla), le sostanze umiche esibiscono valori di CSC straordinariamente elevati, compresi tra 150 e 300 meq/100 g (Sequi, 2005; Violante, 2002). Di conseguenza, anche piccoli incrementi percentuali di sostanza organica umificata generano un aumento esponenziale della capacità del suolo di agire come un serbatoio di nutrienti, trattenendo macroelementi e microelementi essenziali quali potassio (K^+), calcio (Ca^{++}), magnesio (Mg^{++}) e ammonio (NH_4^+) (Brady & Weil, 2008).

Oltre alla CSC, le sostanze umiche esercitano un'azione fondamentale sul potere tampone del suolo, ovvero la capacità del sistema pedologico di opporsi a variazioni repentine del pH provocate da fertilizzazioni azotate intensive o piogge acide. I gruppi funzionali carichi, infatti, possono alternativamente legare o rilasciare ioni idrogeno (H^+), stabilizzando la reazione del terreno entro intervalli ottimali per lo sviluppo radicale e la solubilità degli elementi nutritivi (Sequi, 2005). Infine, attraverso i fenomeni di chelazione stabili indotti dagli acidi fulvici e umici, il suolo riesce a mantenere in forma solubile e assimilabile elementi nutritivi altrimenti soggetti a precipitazione o immobilizzazione chimica, come il ferro (Fe) e il fosforo (P), ottimizzando l'efficienza nutrizionale della pianta.

2.4 Influenza della sostanza organica sulle proprietà fisiche del suolo

2.4.1 La struttura del terreno e la formazione degli aggregati

Dal punto di vista fisico, la sostanza organica e in particolare la sua frazione umificata stabile agisce come il principale agente cementante e strutturante della matrice pedologica (Brady & Weil, 2008). In pedologia, la struttura definisce la disposizione spaziale delle particelle minerali primarie (sabbia, limo e argilla) e il modo in cui esse si associano per formare unità strutturali secondarie distinte, denominate aggregati o peds (Violante, 2002).

L'humus, grazie alla sua natura colloidale e alla flessibilità delle sue macromolecole polimeriche, avvolge i costituenti minerali comportandosi come un collante biologico. Questo fenomeno contrasta la naturale tendenza al costipamento dei terreni pesanti e, al contempo, conferisce coesione ai terreni sabbiosi. Il risultato macroscopico di questa interazione è lo sviluppo di una struttura di tipo granulare o glomerulare. Tale configurazione rappresenta lo stato fisico ottimale per il letto di semina e per l'accrescimento dell'apparato radicale, poiché determina un suolo soffice, facilmente lavorabile e dotato di un'elevata stabilità strutturale nei confronti degli agenti degradativi esterni (Brady & Weil, 2008).

2.4.2 La porosità e la ritenzione idrica

La porosità totale di un suolo rappresenta la frazione del volume del terreno non occupata dalle particelle solide, ma riempita alternativamente da aria e acqua (Violante, 2002). Essa non dipende soltanto dal volume totale degli spazi vuoti, ma assume un'importanza cruciale in funzione della geometria e della distribuzione dimensionale dei pori, tradizionalmente suddivisi in macro-pori e micro-pori. I macro-pori (con diametro superiore a 30 μm) sono responsabili della circolazione dell'aria e del drenaggio rapido dell'acqua in eccesso per gravità, prevenendo i fenomeni di asfissia radicale. I micro-pori (con diametro inferiore a 30 μm) costituiscono invece la rete capillare deputata al trattenimento e alla conservazione dell'acqua contro la forza di gravità (Violante, 2002). L'introduzione e il mantenimento della sostanza organica modificano radicalmente questo equilibrio, incrementando sia la porosità totale sia la proporzione di pori di medie dimensioni (meso-pori), che sono i reali responsabili della riserva idrica utile per le piante. La sostanza organica umificata, grazie alla presenza di gruppi funzionali, contribuisce ad aumentare la capacità del suolo di trattenere acqua, soprattutto attraverso il miglioramento della struttura e della distribuzione dei pori. Questo incremento della capacità di ritenzione idrica (water-holding capacity) aumenta la resilienza del sistema agrario durante i periodi di deficit idrico prolungato, ottimizzando l'efficienza d'uso dell'acqua e stabilizzando l'umidità nei pressi della rizosfera (Brady & Weil, 2008).

2.4.3 Resistenza all'erosione idrica e stabilità strutturale

Gli aggregati del terreno che incorporano la frazione organica umificata mostrano un'elevata idrostabilità, definita come la capacità di resistere all'azione di disaggregazione esercitata dall'acqua. Quando le gocce di pioggia colpiscono un suolo privo di sostanza organica, l'impatto cinetico distrugge i deboli legami minerali, provocando il distacco delle particelle fini (limo e argilla) che vanno a ostruire i pori superficiali. Questo fenomeno determina la formazione della cosiddetta "crosta superficiale", uno strato impermeabile che riduce

drasticamente l'infiltrazione dell'acqua, favorisce il ruscellamento superficiale (runoff) ed ostacola meccanicamente l'emergenza delle giovani piantine (Brady & Weil, 2008).

La presenza di complessi umici stabilizza la struttura del suolo contro l'azione battente delle precipitazioni e le forze di taglio indotte dal calpestio e dal passaggio dei mezzi agricoli. La coesione geometrica conferita dall'humus riduce la suscettibilità del terreno all'erosione idrica ed eolica e mitiga i rischi di compattamento profondo, preservando l'architettura fisica del profilo pedologico nel lungo periodo (Violante, 2002).

2.5 Il complesso umo-argilloso e i meccanismi di protezione del carbonio

2.5.1 I ponti cationici e l'interazione elettrostatica

Il meccanismo chimico-fisico fondamentale che governa la stabilità a lungo termine della sostanza organica nel terreno è la costituzione del complesso umo-argilloso, noto anche come legame umo-minerale (Sequi, 2005). Sia i minerali argillosi sia le macromolecole dell'humus presentano, sulle rispettive superfici, una densità di carica elettrica netta di segno negativo. In condizioni normali, l'interazione tra cariche omonime genererebbe una repulsione elettrostatica, impedendo l'unione delle due componenti.

Questo ostacolo chimico viene superato attraverso l'azione dei cationi metallici polivalenti presenti nella soluzione circolante del suolo, tra i quali spiccano per abbondanza e reattività il Calcio (Ca^{++}) e il Magnesio (Mg^{++}). Questi ioni agiscono come veri e propri "ponti cationici": posizionandosi nell'interfaccia tra la frazione minerale e quella organica, saturano simultaneamente le cariche negative dell'argilla e i gruppi funzionali acidi (carbossilici e fenolici) dell'humus. Il legame risultante è estremamente stabile e determina la formazione di aggregati organo-minerali stabili, resistenti al dilavamento e alle variazioni osmotiche del terreno (Sequi, 2005).

2.5.2 La protezione fisica dalla mineralizzazione

La formazione del complesso umo-argilloso riveste un significato di primaria importanza nella dinamica evolutiva del suolo, poiché costituisce il principale fattore di stabilizzazione e preservazione del carbonio organico. Quando le molecole umiche si legano intimamente alle superfici delle argille o vengono racchiuse all'interno dei microaggregati strutturali, subiscono un processo di protezione fisica e sterica. Questa barriera geometrica impedisce agli enzimi extracellulari secreti dalla microflora edafica di raggiungere i siti di legame del carbonio organico. Non potendo entrare in contatto diretto con il substrato, i microrganismi non sono in grado di avviare i processi di degradazione e successiva mineralizzazione. Di conseguenza, il tasso di trasformazione della sostanza organica stanziale in anidride carbonica gassosa viene drasticamente ridotto (Six et al., 2002). Questo meccanismo biologico e strutturale supporta scientificamente l'adozione di strategie agricole conservative, dimostrando come il legame organo-minerale sia la chiave per rallentare il declino della fertilità e favorire lo stoccaggio del carbonio nel terreno (Brady & Weil, 2008).

2.6 Influenza della sostanza organica sulle proprietà biologiche del suolo

2.6.1 La stimolazione della biomassa microbica edafica

Il suolo non deve essere interpretato come un supporto inerte, bensì come un ecosistema dinamico e biologicamente attivo. All'interno di questa matrice, la frazione organica labile, costituita da residui vegetali freschi, essudati radicali e composti a basso peso molecolare, rappresenta la fonte primaria di carbonio organico e di energia chimica per la comunità degli organismi eterotrofi, che include batteri, funghi, attinomiceti e componenti della microfauna edafica (Nannipieri et al., 2003).

L'apporto regolare di materia organica esogena innesca un incremento immediato della biomassa microbica attiva. I microrganismi utilizzano questi substrati energetici per sostenere i propri processi metabolici e di crescita. Durante le fasi di decomposizione, la microflora edafica secerne attivamente una vasta gamma di sostanze collegate alla propria attività vitale, quali esopolisaccaridi, mucillagini e polimeri transitori (Tisdall & Oades, 1982). Questi composti biologici agiscono sinergicamente con le sostanze umiche descritte in precedenza, stabilizzando ulteriormente i microaggregati del terreno e realizzando una stretta interconnessione funzionale tra lo stato biologico del suolo e la sua architettura fisica (Six et al., 2004).

2.6.2 Il ciclo dei nutrienti e la soppressione biologica dei patogeni

Una comunità microbica numerosa e diversificata, sostenuta da un adeguato livello di sostanza organica, è il motore biologico che alimenta i cicli biogeochimici degli elementi nutritivi (Nannipieri et al., 2003). I microrganismi decompongono le molecole organiche complesse liberando nel terreno azoto, fosforo e zolfo in forme minerali assimilabili dalle radici delle piante superiori (processo di mineralizzazione). Al contempo, la biomassa microbica immobilizza temporaneamente gli eccessi di nutrienti all'interno delle proprie cellule, proteggendoli dalle perdite per lisciviazione e creando una riserva biologica a rilascio graduale.

Oltre alle funzioni nutrizionali, l'incremento della biodiversità microbica indotto dalla sostanza organica esercita un'azione di contenimento fitosanitario nota come soppressione biologica. All'interno di un suolo biologicamente saturo e attivo, i microrganismi benefici instaurano complessi meccanismi di antagonismo nei confronti dei potenziali agenti patogeni radicali (quali funghi dei generi *Fusarium*, *Pythium* o *Rhizoctonia*). Tale azione si esplica attraverso la competizione per lo spazio fisico e per le risorse nutritive disponibili, l'antibiosi e l'iperparassitismo. Di conseguenza, il mantenimento di un elevato livello di attività biologica può contribuire a una maggiore protezione dell'apparato radicale, riducendo la necessità di interventi chimici esogeni e preservando l'equilibrio ecologico del sistema suolo-pianta (Nannipieri et al., 2003).

2.7 La dinamica del carbonio e i processi di mineralizzazione

2.7.1 Il ciclo del carbonio nel sistema suolo e il bilancio tra umificazione e mineralizzazione

Il suolo costituisce il più grande serbatoio di carbonio organico terrestre, contenendo una quantità di carbonio superiore a quella immagazzinata nell'atmosfera e nella biosfera vegetale messe insieme. La dinamica di questo elemento all'interno del sistema suolo-pianta è governata da un delicato equilibrio biologico e biochimico, che si esprime nel bilancio continuo tra due processi microbiologici antagonisti: l'umificazione e la mineralizzazione (Sequi, 2005). L'input primario di carbonio è rappresentato dalla deposizione di biomasse vegetali fresche (residui colturali, lettiera, apparati radicali senescenti) e dagli essudati radicali rilasciati nella rizosfera (Brady & Weil, 2008). Una volta immessi nel sistema pedologico, questi materiali subiscono l'attacco immediato da parte della microflora eterotrofica. Una frazione di questo carbonio viene assimilata dai microrganismi per la sintesi di nuova biomassa cellulare, mentre una parte consistente viene ossidata attraverso i processi di respirazione cellulare e rilasciata nell'atmosfera sotto forma di anidride carbonica gassosa (CO_2). Il carbonio che sfugge a questa immediata ossidazione subisce due destini differenti: la mineralizzazione secondaria (o totale), che trasforma i composti organici intermedi in elementi minerali semplici (quali NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} e SO_4^{2-}), e il processo di umificazione, che ricombina i monomeri resistenti in macromolecole umiche stabili ad alto peso molecolare (Sequi, 2005; Violante, 2002). Il mantenimento dello stock di carbonio nel suolo dipende quindi strettamente dal tasso di umificazione, il quale determina la quantità di elemento che viene sottratta al ciclo di breve periodo per essere stoccata nel comparto a lungo termine.

2.7.2 Il significato biochimico e agronomico del rapporto Carbonio/Azoto (C/N)

Nello studio della dinamica della sostanza organica, il parametro chimico in assoluto più rilevante per prevedere la velocità di decomposizione dei residui e il destino dei nutrienti è il rapporto tra la quantità di carbonio e quella di azoto, indicato come rapporto C/N (Brady & Weil, 2008). I microrganismi del suolo presentano una composizione cellulare interna caratterizzata da un rapporto C/N medio pari a circa 8:1 o 10:1. Per soddisfare le proprie esigenze energetiche e plastiche durante la sintesi di nuovo tessuto, la microflora edafica necessita di un substrato alimentare che presenti idealmente un rapporto C/N vicino a 20:1 o 25:1 (Sequi, 2005). Quando nel terreno vengono incorporati residui organici con un rapporto C/N elevato (superiore a 30:1, come nel caso di paglie di cereali, residui legnosi o biomasse molto mature), si verifica una carenza relativa di azoto rispetto all'abbondanza di carbonio energetico. Per metabolizzare tutto il carbonio disponibile, i batteri e i funghi sono costretti ad assorbire l'azoto minerale disponibile nella soluzione circolante del suolo (NH_4^+ e NO_3^-), sottraendolo temporaneamente alle piante. Questo fenomeno biologico prende il nome di immobilizzazione dell'azoto (o "fame d'azoto"), e può indurre temporanei stati di carenza nutrizionale nelle colture in atto. Al contrario, l'apporto di materiali con un rapporto C/N basso (inferiore a 15:1, come deiezioni fresche, leguminose da sovescio o reflui zootecnici) determina un surplus di azoto rispetto alle capacità di assimilazione della biomassa microbica (Brady & Weil, 2008). In questo secondo scenario, il processo dominante sarà la mineralizzazione netta, con il rapido rilascio di azoto ammoniacale nel

terreno, pronto per l'assorbimento radicale ma anche esposto a rischi di perdite per lisciviazione o volatilizzazione se non opportunamente gestito (Violante, 2002).

2.7.3 Le cause e i meccanismi del declino della fertilità organica

Il progressivo declino della fertilità organica dei suoli agrari è il risultato di un'alterazione antropica del bilancio del carbonio, laddove le uscite (mineralizzazione e asportazioni) superano costantemente gli ingressi (apporti di biomasse). Tra le principali cause agronomiche di questo deterioramento spiccano le lavorazioni meccaniche intensive e ripetute, come l'aratura profonda (Six et al., 2002). Il rivoltamento della fetta di terra provoca la rottura meccanica degli aggregati strutturali e del complesso umo-argilloso, esponendo l'humus precedentemente protetto a una massiccia ossigenazione. L'iper-ossigenazione stimola in modo anomalo l'attività dei microrganismi aerobi, innescando un picco di mineralizzazione accelerata (noto come effetto priming) che consuma rapidamente le riserve di carbonio stabile.

A questo si aggiunge la pratica monocolturale intensiva, associata all'asportazione totale dei residui colturali dal campo per scopi energetici o zootecnici, che azzerà gli input naturali di biomassa fresca necessari a sostenere il tasso di umificazione. L'uso esclusivo e prolungato di fertilizzanti minerali di sintesi, se non accompagnato da adeguati apporti organici o dalla restituzione di residui colturali, può contribuire al declino della sostanza organica, poichè fornisce elementi nutritivi, ma non apporta carbonio strutturale al sistema suolo.

. Le conseguenze di questa degradazione si manifestano con la perdita della struttura glomerulare, il compattamento del profilo pedologico, la drastica riduzione della Capacità di Scambio Cationico e il collasso della biodiversità microbica, trasformando un ecosistema vivo e resiliente in un supporto inerte e vulnerabile ai fenomeni erosivi (Brady & Weil, 2008; Violante, 2002).

CAPITOLO 3

MATRICI ORGANICHE E PRATICHE GESTIONALI PER LA TUTELA DEL SUOLO

3.1 Gli ammendanti organici tradizionali e industriali

3.1.1 Il letame e i reflui zootecnici: stabilizzazione e ruolo storico

L'utilizzazione agronomica dei reflui zootecnici, in particolare del letame (o stallatico), rappresenta la più antica e consolidata pratica di restituzione organica nella storia dell'agricoltura. Dal punto di vista della composizione, il letame è una matrice complessa costituita dalla miscela di deiezioni solide e liquide animali frammiste alla lettiera, generalmente rappresentata da paglia di cereali. Il valore agronomico di questa matrice non è legato unicamente all'apporto immediato di macroelementi nutrizionali, ma risiede nel processo di maturazione o stagionatura a cui viene sottoposto prima della distribuzione in campo (Smith et al., 2018).

Durante la fase di stoccaggio in platea, i residui subiscono una parziale fermentazione aerobica che porta alla degradazione dei composti carboniosi più facilmente solubili e a una parziale umificazione della frazione ligno-cellulosica. Un letame ben maturo presenta un rapporto Carbonio/Azoto (C/N) stabilizzato, generalmente compreso tra 15:1 e 20:1, ottimale per evitare fenomeni di immobilizzazione biologica dell'azoto nel terreno (Jones e Brown, 2021). Gli studi a lungo termine evidenziano come l'applicazione continuativa di dosi razionali di letame provochi un incremento strutturale della stabilità degli aggregati del suolo, aumentando la porosità e potenziando la capacità di ritenzione idrica, soprattutto nei suoli a tessitura grossolana o soggetti a intensi fenomeni di costipamento meccanico (Walker et al., 2020). Tuttavia, il limite gestionale di questa matrice risiede nell'elevata variabilità della sua composizione chimica, fortemente influenzata dalla specie animale allevata, dalla dieta alimentare e dalle modalità di conservazione del refluo stesso.

3.1.2 Il compost: processi di trasformazione e apporto di carbonio stabile

Il compostaggio è un processo biologico controllato di conversione e stabilizzazione bio-ossidativa di substrati organici di scarto, effettuato da comunità microbiche aerobiche (prevalentemente batteri, funghi e attinomiceti) in condizioni di termofilia. Le matrici di partenza per la produzione di ammendanti compostati si dividono principalmente in Ammendante Compostato Verde (derivante da residui di manutenzione del verde pubblico e privato) e Ammendante Compostato Misto (che include la Frazione Organica dei Rifiuti Solidi Urbani, o FORSU).

La dinamica del compostaggio si articola in due macro-fasi distinte: una fase di bio-ossidazione accelerata (fase termofila), durante la quale si assiste all'igienizzazione della massa per distruzione dei patogeni e dei semi delle infestanti, e una successiva fase di maturazione (o cura), caratterizzata dal rallentamento dei

processi metabolici e dalla prevalenza di fenomeni di umificazione (Morales et al., 2019). Dal punto di vista qualitativo, il compost maturo è caratterizzato da un'elevata densità di acidi umici e fulvici altamente polimerizzati e stabili (Figura 4.3).

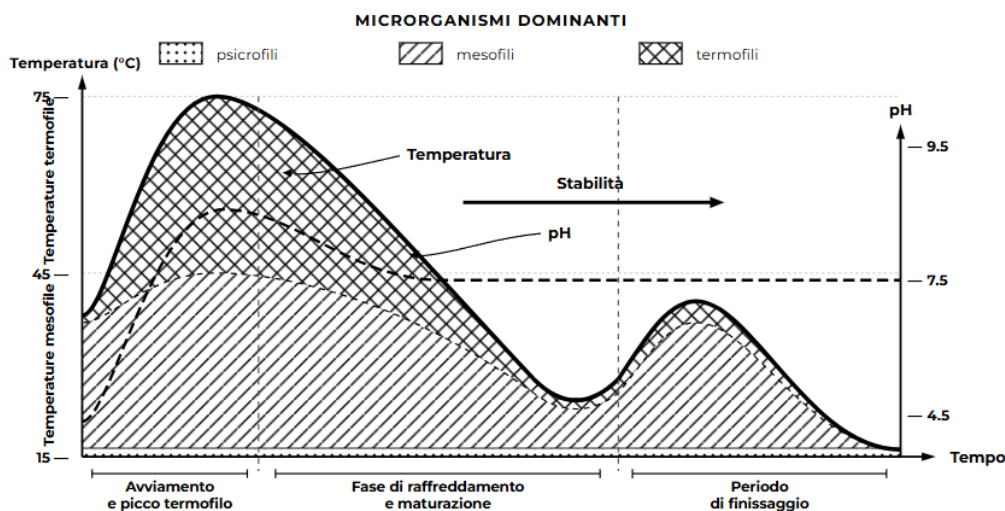


Figura 4.3: Dinamica dell'andamento termico e delle variazioni di pH in funzione delle popolazioni biologiche dominanti durante le macro-fasi del compostaggio. I pattern strutturali differenziano le tre distinte comunità microbiche attive (psicrofili, mesofili e termofili) lungo il gradiente cinetico edafico, evidenziando il picco iniziale di bio-ossidazione, l'igienizzazione biologica e la successiva stabilizzazione chimica. (Adattamento e rielaborazione in bianco e nero da Sequi, 2005; Sieling et al., 2014; Awasthi et al., 2020).

La letteratura scientifica internazionale (Schmidt et al., 2022) concorda sul fatto che il compost rappresenti una matrice particolarmente efficace per contribuire all'incremento lo stock di carbonio stabile nel suolo nel lungo periodo. Poiché la frazione organica contenuta nel compost è già termodinamicamente stabilizzata, essa mostra un tasso di mineralizzazione annuo molto basso rispetto ai residui freschi. L'incorporazione del compost nel profilo pedologico non induce effetti di priming negativi, ma arricchisce direttamente il complesso di scambio umo-argilloso, determinando un incremento della Capacità di Scambio Cationico (CSC) e fornendo una protezione duratura contro il degrado strutturale e l'erosione (Aendekerk, 2020).

3.1.3 Il digestato anaerobico: caratteristiche delle frazioni e valore agronomico

Il digestato anaerobico rappresenta il sottoprodotto effluente dal processo di digestione anaerobica (caratterizzato dall'assenza di ossigeno) a carico di biomasse agro-zootecniche, colture di secondo raccolto o sottoprodotti dell'industria agroalimentare, finalizzato alla produzione di biogas. Sebbene il processo nasca per scopi prettamente energetici, il residuo finale possiede proprietà chimico-nutrizionali di elevato interesse

agronomico. Durante la digestione all'interno dei reattori, la sostanza organica di partenza subisce una profonda trasformazione: la frazione carboniosa più facilmente degradabile viene convertita in metano (CH_4) e anidride carbonica (CO_2), provocando una concentrazione relativa degli elementi nutritivi e della frazione organica più resistente, come la lignina (Awasthi et al., 2020).

Dal punto di vista gestionale, il digestato "tal quale" viene frequentemente sottoposto a un processo di separazione meccanica, tramite centrifuga o pressa a vite, per ottimizzarne lo stoccaggio e la distribuzione. Questo trattamento genera due matrici dalle caratteristiche chimico-fisiche e destinazioni agronomiche completamente differenti (Albuquerque et al., 2012):

- **Frazione liquida:** È caratterizzata da un basso contenuto di sostanza organica secca e da un'elevata concentrazione di azoto prontamente assimilabile, presente principalmente sotto forma di azoto ammoniacale (NH_4^+). Questa frazione presenta un rapporto C/N molto basso ed esercita sul suolo un effetto prevalentemente fertilizzante/nutritivo a breve termine, del tutto analogo a quello dei concimi minerali di sintesi. La sua distribuzione richiede una pianificazione rigorosa per evitare fenomeni di volatilizzazione dell'ammoniaca in atmosfera e lisciviazione dei nitrati nelle falde acquifere.
- **Frazione solida:** Trattiene la maggior parte della sostanza organica insolubile e dei composti carboniosi complessi non degradati dai batteri anaerobi. Presenta un contenuto di sostanza secca nettamente superiore e un rapporto C/N più elevato rispetto alla frazione liquida. Dal punto di vista pedologico, la frazione solida agisce come un vero e proprio ammendante. Una volta incorporata nel terreno, contribuisce attivamente al turnover del carbonio e supporta la stabilità strutturale del suolo, mostrando un tasso di mineralizzazione più lento e regolare (Tambone et al., 2019).

Numerose evidenze sperimentali in ambito internazionale (Möller e Müller, 2015) evidenziano come l'uso strategico del digestato separato consenta di modulare gli apporti in base alle reali necessità del sistema suolo-pianta: la frazione solida può essere impiegata nelle epoche di pre-semina per migliorare la struttura fisica ed incrementare lo stoccaggio di carbonio nel complesso umo-argilloso, mentre la frazione liquida può essere distribuita in copertura per assecondare i picchi di assorbimento dell'azoto da parte delle colture, contribuendo a ridurre la dipendenza dai concimi chimici fossili.

Un aspetto gestionale rilevante del digestato riguarda il suo pH tendenzialmente alcalino e l'elevata quota di azoto ammoniacale, derivante dalla degradazione delle componenti proteiche durante la digestione anaerobica. La rimozione di parte degli acidi organici e la conversione della frazione carboniosa più labile in biogas contribuiscono a modificare le caratteristiche chimiche della matrice rispetto al refluo originario. Questi elementi aumentano il valore fertilizzante a breve termine, ma rendono necessarie tecniche di distribuzione idonee per contenere la volatilizzazione ammoniacale e le perdite azotate.

3.2 Tecniche di gestione biologica: la pratica del sovescio

3.2.1 Principi agronomici del sovescio e criteri di scelta delle famiglie botaniche

La pratica del sovescio, storicamente definita come "concimazione verde", consiste nella coltivazione di specie vegetali pure o in consociazione, non finalizzata alla raccolta del prodotto, bensì al loro successivo abbattimento e interrimento nel suolo allo stato fresco. Questa tecnica rappresenta una delle strategie agronomiche più efficaci per incrementare l'input di sostanza organica labile nel breve periodo e per ottimizzare il riciclo dei nutrienti all'interno degli agroecosistemi (Thorup-Kristensen et al., 2003). L'efficacia del sovescio non è tuttavia univoca, ma dipende strettamente dalla scelta botanica delle essenze utilizzate, le quali vengono selezionate in base alle specifiche carenze del suolo e agli obiettivi culturali prefissati. Le principali famiglie botaniche impiegate si dividono in tre grandi raggruppamenti:

- Le leguminose (*Fabaceae*): Specie come il trifoglio incarnato (*Trifolium incarnatum*), la veccia (*Vicia sativa*) o il favino (*Vicia faba*) rivestono un ruolo insostituibile grazie alla loro capacità di instaurare una simbiosi mutualistica con i batteri del genere *Rhizobium*. Questo meccanismo biologico permette la fissazione dell'azoto atmosferico (N_2) e la sua successiva traslocazione nei tessuti vegetali sotto forma di azoto organico. L'interrimento delle leguminose, caratterizzate da un rapporto C/N molto basso (generalmente inferiore a 15:1), garantisce una rapida mineralizzazione netta dopo l'incorporazione, rilasciando nel terreno azoto prontamente assimilabile per la coltura successiva (Fustec et al., 2010).
- Le Graminacee (*Poaceae*): Specie quali la segale (*Secale cereale*), l'avena (*Avena sativa*) o il loietto (*Lolium multiflorum*) vengono impiegate principalmente per la loro eccezionale attitudine a produrre biomassa epigea ed ipogea e per l'elevata densità del loro apparato radicale fascicolato. A differenza delle leguminose, le graminacee presentano a maturità un rapporto C/N elevato (spesso superiore a 30:1), dovuto alla cospicua presenza di cellulosa e lignina nei fusti. Il loro interrimento apporta una quota di carbonio strutturale che stimola i processi di umificazione a lungo termine, migliorando la stabilità fisica del terreno e agendo al contempo come colture di copertura (*cover crops*) capaci di assorbire i nitrati residui nel profilo, evitandone il dilavamento invernale (Finney et al., 2016).
- Le Brassicacee (*Brassicaceae*): Specie come la senape bianca (*Sinapis alba*) o il rafano (*Raphanus sativus*) si distinguono per la rapidità del loro ciclo biologico e per la spiccata capacità di accumulare fosforo e potassio dagli strati profondi del suolo. Inoltre, l'interrimento delle brassicacee è alla base della pratica della biofumigazione: la degradazione dei loro tessuti libera nel suolo i glucosinolati, composti solforati potenzialmente attivi nei confronti di alcuni organismi tellurici, svolgendo un ruolo cruciale nella protezione fitosanitaria biologica del terreno (Kirkegaard et al., 1998).

3.2.2 Effetti sulla dinamica della rizosfera e sulla rigenerazione della struttura fisica

L'azione del sovescio non si limita all'apporto di biomassa al momento del suo interrimento, ma si esplica in modo continuo durante tutto il ciclo di crescita della coltura attraverso profonde modificazioni biologiche e fisiche concentrate nella rizosfera, ovvero la porzione di suolo immediatamente circostante le radici (Nannipieri et al., 2003). Le radici vive delle essenze da sovescio secernono attivamente nel terreno una vasta gamma di essudati radicali, composti da zuccheri solubili, amminoacidi e acidi organici a basso peso molecolare. Questo flusso costante di carbonio facilmente assimilabile agisce come un potente stimolante per la biomassa microbica edafica, innescando quello che in letteratura viene definito "effetto rizosferico" (Kuzyakov, 2010). I microrganismi, nutriti da questi essudati, incrementano la loro attività metabolica e proliferano nei pressi delle radici, secernendo a loro volta mucillagini e sostanze cementanti transitorie che avviano i primi stadi di aggregazione delle particelle minerali (Tisdall & Oades, 1982).

Sotto il profilo strettamente fisico, l'apparato radicale delle colture da sovescio esercita un'azione meccanica di primaria importanza per il ripristino della porosità. Le specie a radice fittonante profonda, tipiche di alcune leguminose e brassicacee, sono in grado di penetrare gli strati di suolo compattati o le "suole di lavorazione" create dalle ripetute arature. La successiva morte e decomposizione di queste radici lascia nel terreno una fitta rete di biocanalicoli (macro-pori stabili), i quali migliorano drasticamente la conducibilità idraulica, facilitano l'infiltrazione profonda dell'acqua piovana e riducono il fenomeno del ruscellamento superficiale. Al contempo, le radici fascicolate delle graminacee avvolgono meccanicamente le particelle di terra, creando una macrostruttura stabile che intrappola l'aria e l'acqua all'interno dei meso-pori. Al momento dell'interrimento meccanico della biomassa totale, l'improvvisa immissione di materiale vegetale fresco stimola un picco di attività biologica da parte dei funghi saprofiti; le loro ife fungine creano una vera e propria rete tridimensionale che stabilizza temporaneamente i macroaggregati del suolo (Six et al., 2002). Questo sinergismo tra l'azione meccanica delle radici e la successiva stabilizzazione biologica rappresenta lo strumento più efficiente per rigenerare i suoli degradati dall'agricoltura intensiva, restituendo loro sofficità, aerazione e stabilità strutturale nei confronti dell'erosione (Brady & Weil, 2008).

3.3 Sostenibilità ambientale e corrette pratiche di distribuzione

3.3.1 Mitigazione delle perdite gassose, volatilizzazione dell'ammoniaca e lisciviazione dei nitrati

La distribuzione in campo di ammendanti e fertilizzanti organici fluidi o palabili (quali letame fresco, liquami zootecnici e digestato anaerobico) comporta forti criticità ambientali legate alle perdite di azoto per via gassosa e idrica. Se non gestite tramite idonee soluzioni agromeccaniche, tali pratiche inficiano l'efficienza d'uso dell'azoto e innescano severi fenomeni di inquinamento atmosferico e idrico. La principale via di perdita dell'azoto immediatamente successiva allo spandimento superficiale a spaglio (*broadcast spreading*) è rappresentata dalla volatilizzazione dell'ammoniaca (NH_3), un gas che contribuisce all'acidificazione degli ecosistemi e alla formazione di particolato atmosferico secondario.

La dinamica chimica della volatilizzazione è governata dall'equilibrio chimico in soluzione tra lo ione ammonio (NH_4^+) e l'ammoniaca libera (NH_3), un processo fortemente condizionato dal pH della matrice e del suolo, nonché dalle condizioni micrometeorologiche (temperatura e ventilazione). I liquami e la frazione liquida del digestato, caratterizzati da elevati valori di pH originario e da un'alta quota di azoto ammoniacale pronto, subiscono un picco di emissioni di NH_3 già nelle prime poche ore dall'esposizione all'aria. Per mitigare tale impatto, la letteratura internazionale evidenzia la necessità di abbandonare le tecniche tradizionali di spargimento superficiale a favore di tecniche ad alta efficienza. Come dimostrato dagli studi comparativi sui destini dell'azoto legati alle soluzioni di meccanizzazione dello spandimento (Carozzi et al., 2016), l'adozione di sistemi di distribuzione mirata rappresenta una soluzione cardine. Tra le tecniche più performanti spiccano:

- L'iniezione diretta nel suolo (*Slurry Injection*): Consiste nell'introduzione della matrice fluida direttamente sotto la superficie del terreno (a una profondità di 5-15 cm) tramite apposite ancore o dischi assolcatori. Questa tecnica abbatte drasticamente (fino al 60-70%) la volatilizzazione dell'ammoniaca poiché azzerà il contatto diretto tra il refluo e l'atmosfera. Tuttavia, i dati a lungo termine evidenziano che l'iniezione localizzata, concentrando l'azoto e il carbonio labile in bande sotterranee anossiche, può talvolta incrementare le perdite totali per denitrificazione profonda, ma ha il grande vantaggio di promuovere in modo significativo la formazione di azoto organico stabilizzato nel suolo, incrementando lo stock di fertilità stanziale a lungo termine.
- L'acidificazione dei liquami (*Slurry Acidification*): Questa tecnica prevede l'abbassamento controllato del pH della matrice organica fluida (portandolo a valori intorno a 5,5-6,0) mediante l'addizione di acidi, tipicamente acido solforico o, in contesti bio-sostenibili, acidi organici di recupero. Lo spostamento del pH sposta drasticamente l'equilibrio chimico verso la forma ionica e stabile dello ione ammonio (NH_4^+), che non è volatile e rimane trattenuto dai siti di scambio del suolo. La ricerca agronomica di settore conferma che l'acidificazione dei liquami, combinata con lo studio dei diversi destini dell'azoto nel terreno (Fangueiro et al., 2015), garantisce i tassi più bassi in assoluto di perdite totali di azoto, traducendosi in un incremento netto della produttività vegetale e in un'efficienza di recupero dell'azoto nella biomassa epigea.

Oltre alle perdite gassose di ammoniaca, una non corretta gestione temporale dei reflui distribuiti espone l'agroecosistema al rischio di lisciviazione (o dilavamento) dei nitrati (NO_3^-) verso le falde acquifere profonde. Nel suolo, l'azoto ammoniacale subisce il processo biologico di nitrificazione ad opera dei batteri chemioautotrofici, che lo convertono rapidamente in nitrato. Quest'ultimo, essendo un anione carico negativamente come le argille e l'humus, non viene trattenuto dal complesso di scambio e si muove liberamente con l'acqua di percolazione. La mitigazione di questo fenomeno si attua sincronizzando la distribuzione dei reflui con i reali picchi di assorbimento della coltura ed evitando gli spandimenti

autunno-invernali su suoli nudi o soggetti ad alte precipitazioni, integrando la gestione con colture di copertura (*cover crops*) capaci di immobilizzare biologicamente l'azoto in eccesso.

3.3.2 Dinamiche del protossido di azoto in relazione alla somministrazione di matrici biologiche

Un'ulteriore e cruciale dimensione ambientale della fertilizzazione organica riguarda l'emissione di protossido di azoto (N_2O), un potentissimo gas climalterante con un potenziale di riscaldamento globale circa 300 volte superiore a quello dell'anidride carbonica (CO_2). Le dinamiche di rilascio del N_2O nel suolo sono interamente governate da processi microbiologici e biochimici legati al ciclo dell'azoto, nello specifico la nitrificazione (in condizioni aerobiche) e la denitrificazione (in condizioni anaerobiche o di ipossia).

L'applicazione di matrici biologiche esercita un'influenza profonda e complessa sulle comunità microbiche edafiche responsabili di queste vie metaboliche. Come evidenziato nella revisione scientifica dedicata specificamente all'impatto dei fertilizzanti organici sui consorzi microbici responsabili di tali emissioni (Chen et al., 2021), l'immissione di materia organica fresca agisce come un doppio innesco per la produzione di N_2O :

1. Apporto combinato di substrati: I fertilizzanti organici grezzi forniscono simultaneamente grandi quantità di azoto minerale (sotto forma di NH_4^+ e NO_3^-) e di carbonio organico labile. Il carbonio labile funge da fonte energetica e da donatore di elettroni per i microrganismi eterotrofi denitrificanti, accelerando drasticamente i loro tassi respiratori.
2. Modificazione della microporosità gassosa: Il consumo di ossigeno legato alla rapida respirazione microbica della sostanza organica fresca, unito all'apporto di acqua tipico delle matrici fluide, crea temporaneamente dei micro-siti anossici (privi di ossigeno) all'interno degli aggregati del suolo. Queste condizioni di parziale anaerobiosi sono l'optimum ecologico che stimola gli enzimi della denitrificazione, provocando emissioni spurie di N_2O che risultano spesso superiori e meno prevedibili rispetto a quelle dei concimi minerali puri.

Tuttavia, gli studi di biologia molecolare edafica mettono in luce una differenza sostanziale quando si utilizzano matrici organiche stabilizzate o sottoposte a processi industriali di pretrattamento, come il compost maturo o la frazione solida del digestato. I processi di maturazione bio-ossidativa e di digestione riducono drasticamente la quota di carbonio facilmente degradabile (già termodinamicamente stabilizzato sotto forma di macromolecole umiche o lignina). Di conseguenza, l'applicazione di compost maturo stimola in misura significativamente minore i picchi di respirazione eterotrofica e non genera quelle diffuse microzone anossiche nel suolo. Inoltre, l'apporto continuativo di sostanza organica matura favorisce l'accumulo di uno stock di carbonio stabile che promuove a lungo termine l'abbondanza e la diversità dei microrganismi denitrificanti completi. Questi ultimi possiedono l'enzima protossido di azoto reduttasi (codificato dal gene *nosZ*), capace di convertire il N_2O nel gas inerte dinitrogeno (N_2), completando il ciclo e riducendo l'impatto serra complessivo della pratica agronomica.

3.4 Strumenti gestionali e quadro normativo

3.4.1 La direttiva Nitrati (91/676/CEE) e la designazione delle Zone Vulnerabili da Nitrati (ZVN)

Il quadro normativo che disciplina l'uso agronomico delle matrici organiche a livello europeo trova il suo pilastro fondamentale nella Direttiva Nitrati (Direttiva 91/676/CEE), recepita in Italia attraverso il Decreto Legislativo 152/2006 (Codice dell'Ambiente) e i successivi decreti ministeriali applicativi. Questa norma nasce con il preciso obiettivo di proteggere la qualità delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole, prevenendo i fenomeni di eutrofizzazione delle acque superficiali e la contaminazione dei corpi idrici sotterranei destinati al consumo umano.

Lo strumento cardine previsto dalla Direttiva è la designazione, da parte dei singoli Stati membri, delle Zone Vulnerabili da Nitrati (ZVN): porzioni di territorio in cui il deflusso idrico superficiale o la percolazione profonda convogliano carichi di azoto tali da far superare (o rischiare di far superare) la soglia critica di 50 mg/l di nitrati nelle acque. Nelle aree classificate come ZVN, la normativa impone rigidi vincoli gestionali e temporali riassunti nei Programmi d'Azione Regionali. Il vincolo più celebre e stringente riguarda il limite massimo di azoto zootecnico distribuibile in campo:

- Nelle Zone Non Vulnerabili (ordinarie): il limite è fissato a 340 kg di azoto totale per ettaro all'anno, fatte salve le specifiche disposizioni regionali.
- Nelle Zone Vulnerabili (ZVN): il limite massimo viene dimezzato, imponendo una soglia invalicabile di 170 kg di azoto per ettaro all'anno.

Questo sbarramento quantitativo costringe le aziende agricole e zootecniche a pianificare con estremo rigore gli spandimenti, poiché il superamento dei 170 kg/ha/anno configura un illecito sanzionabile e un rischio di sbilanciamento ambientale. La norma non limita solo i quantitativi, ma impone anche i cosiddetti periodi di divieto (solitamente nei mesi invernali, tra novembre e febbraio), in cui la scarsa attività biologica del suolo e l'elevata piovosità ridurrebbero fortemente l'efficienza di assorbimento delle colture, massimizzando il rischio di lisciviazione profonda dell'anione nitrato (NO_3^-).

3.4.2 Il piano di Utilizzazione Agronomica (PUA)

Per poter applicare concretamente i dettami della Direttiva Nitrati e garantire il rispetto dei limiti legali dei 170 o 340 kg/ha di azoto, l'ordinamento giuridico e agronomico impone alle aziende l'obbligo di redigere il Piano di Utilizzazione Agronomica (PUA). Esso rappresenta uno strumento di ingegneria gestionale e di pianificazione territoriale a scala aziendale di fondamentale importanza, strutturato per ottimizzare i flussi biogeochimici degli elementi nutritivi e guidare l'agricoltore verso scelte agroecologiche sostenibili.

All'interno dell'architettura concettuale del presente lavoro di ricerca, il Piano di Utilizzazione Agronomica (PUA) riveste un ruolo strategico fondamentale, configurandosi come lo strumento analitico di sintesi tra i

processi biogeochimici edafici (trattati nel Capitolo 2) e i protocolli operativi di gestione agronomica biologica (esaminati nel Capitolo 3). Mentre l'analisi dei paragrafi precedenti ha evidenziato gli effetti fisico-biologici indotti dall'apporto di matrici organiche stabilizzate, dall'iniezione sotterranea dei reflui e dalla pratica del sovescio sulla rizosfera e sulla struttura del suolo, la redazione del PUA consente di trasferire tali evidenze teoriche su un piano quantitativo e computazionale. Tale strumento, infatti, definisce la parametrizzazione matematica e la corretta collocazione spazio-temporale delle distribuzioni in campo, traducendo i vettori concettuali di conservazione del carbonio organico e di ripristino della fertilità in un protocollo d'azione aziendale empiricamente misurabile e normativamente conforme.

Dal punto di vista analitico e strutturale, la stesura di un Piano di Utilizzazione Agronomica si basa su un principio matematico rigido di bilancio di massa, che mira a eguagliare l'offerta di nutrienti derivante dalle matrici biologiche aziendali con la reale domanda fisiologica delle colture in atto. Questo approccio metodologico basato sui piani di gestione dei nutrienti e sulla sostenibilità agronomica, ampiamente validato dalla letteratura scientifica di settore ("*Nutrient management plans and agricultural sustainability*"), si articola in una serie di fasi strettamente interconnesse:

1. L'anagrafe delle superfici e la zonizzazione pedoclimatica: Il primo passo consiste nell'identificazione catastale e cartografica di tutti gli appezzamenti che compongono la SAU (Superficie Agricola Utilizzata) aziendale. Questa mappatura consente di verificare l'esatta collocazione geografica dei suoli, determinando se essi ricadano all'interno delle Zone Vulnerabili da Nitrati (ZVN) o in aree ordinarie, e valutando parametri fisici intrinseci quali la pendenza del terreno e la tessitura, essenziali per stimare i rischi di ruscellamento superficiale o percolazione.
2. La quantificazione del carico di azoto originario: Nel caso di un'azienda zootecnica o a indirizzo misto, il piano calcola la quantità di azoto teorico prodotto annualmente dall'allevamento in base alla consistenza della stalla (numero di capi stabulati) e alla categoria animale (es. vacche in lattazione, rimonta, suini, avicoli), applicando coefficienti di escrezione standardizzati per legge. Nel caso di impianti di biogas alimentati con biomasse o pollina, il piano analizza la quantità e la qualità del digestato totale destinato al campo, valutando l'azoto ammoniacale pronto rispetto a quello organico a lento rilascio ("*Anaerobic digestion of poultry manure and livestock waste: evaluation of nutrient balance*").
3. Il piano colturale e il bilancio preventivo dei nutrienti: Per ciascun appezzamento e per l'intera annata agraria, l'agricoltore definisce l'avvicendamento colturale previsto (es. mais in primo raccolto seguito da un loietto invernale, o inserimento di leguminose da sovescio). Conoscendo le rese medie attese per ettaro e i coefficienti di asporto specifici di ogni coltura, il software di calcolo del PUA determina il fabbisogno reale di elementi nutritivi (Azoto, Fosforo e Potassio).

La fase cruciale del PUA consiste nella vera e propria "distribuzione virtuale" delle matrici biologiche disponibili sulle diverse superfici. Il piano deve dimostrare che il quantitativo di refluo o digestato distribuito su ogni singolo ettaro sia sufficiente a coprire i fabbisogni della pianta senza mai oltrepassare i limiti invalicabili dei 170 o 340 kg/ha/anno. Inoltre, il calcolo agronomico introduce i cosiddetti coefficienti di efficienza dell'azoto: a differenza dei concimi chimici minerali, l'azoto contenuto nei reflui biologici non è interamente disponibile nel primo anno, poiché una quota significativa è legata alla frazione organica stabile e necessita dei tempi biologici di mineralizzazione del suolo. Il PUA tiene conto di questa gradualità, pianificando le epoche di somministrazione e i volumi di distribuzione per massimizzare l'efficienza d'uso dell'azoto (*"Slurry management and nitrogen use efficiency in crop rotations"*).

In conclusione, l'adozione del PUA all'interno di un sistema agroecologico moderno trasforma un vincolo normativo potenzialmente penalizzante in uno strumento di efficienza e transizione ecologica. Consentendo una tracciabilità totale e trasparente dei flussi di azoto, il PUA permette alle aziende biologiche e convenzionali di azzerare o ridurre drasticamente l'acquisto di fertilizzanti chimici di sintesi (con un netto risparmio economico), minimizzando al contempo le emissioni di ammoniaca e protossido di azoto nell'atmosfera e preservando l'equilibrio ecosistemico dell'intero sistema suolo-pianta.

CAPITOLO 4

BENEFICI AGRONOMICI ED ECOSISTEMICI: UN'ANALISI COMPARATIVA

4.1 Miglioramento della fertilità fisica e resilienza idrica dei suoli

4.1.1 *Meccanismi di aggregazione edafica e protezione fisica del carbonio organico*

L'indagine sugli effetti derivanti dall'applicazione continuativa di ammendanti organici e matrici biologiche stabilizzate (quali digestato anaerobico, compost e letame) richiede un'analisi dettagliata delle modificazioni indotte sull'architettura fisica del terreno. Il suolo non deve essere inteso come una matrice statica, bensì come un sistema trifasico dinamico, dovuto alla compresenza della fase solida, liquida e gassosa, la cui stabilità strutturale è direttamente governata dalle interazioni tra la frazione minerale e la sostanza organica edafica (Brady & Weil, 2008).

Il meccanismo primario attraverso cui le matrici organiche migliorano la fertilità fisica si sviluppa mediante il processo di aggregazione. Seguendo il modello gerarchico classico della strutturazione del suolo, le particelle primarie minerali (sabbia, limo e argilla) vengono cementate in microaggregati (diametro < 250 µm) grazie all'azione di agenti leganti persistenti, quali gli acidi umici e fulvici e i complessi organo-minerali stabili. Successivamente, i microaggregati vengono uniti in macroaggregati (diametro > 250 µm) attraverso l'azione di leganti temporanei o transitori, rappresentati principalmente dalle reti di ife fungine, dalle mucillagini prodotte dalla microflora e dagli essudati radicali ricchi di polisaccaridi (Tisdall & Oades, 1982).

L'apporto di frazioni organiche stabilizzate, come la frazione solida del digestato derivante dal trattamento anaerobico di reflui zootecnici e biomasse (Benato & Macor, 2019; Bhatnagar et al., 2022), può favorire la formazione e stabilizzazione di macroaggregati idro-resistenti, in funzione della qualità della matrice, della dose applicata e delle condizioni pedologiche. Questo fenomeno introduce il concetto fondamentale di "protezione fisica" della sostanza organica. Quando le molecole di carbonio organico vengono inglobate e intrappolate all'interno della fitta rete dei micro e macroaggregati, esse risultano meno accessibili agli enzimi idrolitici secreti dai microrganismi eterotrofi (Six et al., 2002). Di conseguenza, la cinetica di mineralizzazione del carbonio subisce un forte rallentamento: il carbonio viene preservato dal decadimento microbico e stabilizzato nel suolo nel lungo periodo, contrastando la degradazione strutturale tipica dei regimi di agricoltura intensiva convenzionale (Six et al., 2002). Al contrario, la rottura meccanica di tali aggregati, causata da lavorazioni profonde o da una gestione agronomica priva di apporti umici, espone nuovamente il carbonio intrappolato all'attacco microbico, provocando una rapida perdita di struttura edafica e un incremento delle emissioni di CO₂ verso l'atmosfera (Six et al., 2002).

È tuttavia necessario evidenziare come la protezione fisica e il conseguente rallentamento dell'attività microbica non debbano essere interpretati come una condizione di totale e benefica inerzia biologica. Si

delinea qui un cruciale paradosso biochimico: l'eterotrofia microbica e la parziale mineralizzazione della sostanza organica non costituiscono un processo degradativo penalizzante, bensì il motore stesso della fertilità biologica e della nutrizione vegetale (Kuzyakov, 2010; Nannipieri, 2003). Se l'intera quota di carbonio immessa rimanesse indefinitamente protetta e inaccessibile, verrebbe meno il riciclo dei nutrienti, precludendo la liberazione di macroelementi essenziali per le colture, quali azoto e fosforo, originariamente legati alle matrici organiche (Nannipieri, 2003).

La chiave della sostenibilità agronomica risiede pertanto nel mantenimento di un equilibrio dinamico tra due pool di carbonio coesistenti: una frazione "labile", prontamente accessibile alla microflora edafica per sostenerne il metabolismo e garantire il rilascio di nutrienti nella soluzione circolante, e una frazione "stabile" o protetta all'interno della microarchitettura del suolo (Six et al., 2002). L'accezione negativa legata alla mineralizzazione subentra unicamente laddove interventi meccanici invasivi quali le arature profonde provochino la rottura sistematica dei macroaggregati. Un simile disturbo fisico espone repentinamente le frazioni precedentemente protette a un'ossigenazione massiccia e a un attacco microbico incontrollato, traducendosi in un "priming effect" esasperato (Kuzyakov, 2010). Il risultato finale è un rapido collasso della struttura fisica del terreno, la perdita del suo potere cementante e l'aumento delle emissioni di CO₂ in atmosfera, declassando il suolo da serbatoio (*carbon sink*) a sorgente di gas serra.

4.1.2 Dinamica idrogeologica e incremento della Water Holding Capacity

Parallelamente alla ristrutturazione meccanica, l'incremento di sostanza organica indotto dalle matrici biologiche esercita un impatto diretto e quantificabile sulle proprietà idrauliche del profilo colturale. In un contesto globale caratterizzato da mutamenti climatici rapidi, associati a prolungati periodi di deficit idrico alternati a eventi meteorologici di eccezionale intensità, la capacità di un suolo di immagazzinare e trattenere l'acqua piovana rappresenta un fattore critico per la resilienza dell'agroecosistema (Bhatnagar et al., 2022).

L'incorporazione di ammendanti biologici modifica la curva di ritenzione idrica del suolo agendo su due livelli macroscopici (Brady & Weil, 2008):

1. Modificazione della porosità totale e della distribuzione dei pori: L'aumento dell'aggregazione strutturale sposta il rapporto tra macro, meso e micropori. Mentre i macropori (diametro > 50 µm) sono fondamentali per garantire il drenaggio dell'acqua in eccesso e l'aerazione dell'apparato radicale, i mesopori (compresi tra 0,2 e 50 µm) costituiscono la classe dimensionale strategica in cui l'acqua viene trattenuta per capillarità, rimanendo però a una tensione tale da poter essere attinta dalle radici (Brady & Weil, 2008).
2. Effetto "Spugna Biologica" delle macromolecole umiche: Dal punto di vista chimico-fisico, la sostanza organica umificata possiede una struttura altamente idrofila, caratterizzata da un'elevata densità di gruppi funzionali polari (carbossilici, ossidrilici e fenolici) capaci di stabilire legami a idrogeno con le

molecole d'acqua. Le sostanze umiche mostrano la capacità di adsorbire acqua in quantità pari a diverse volte il proprio peso secco (Brady & Weil, 2008).

Questo duplice meccanismo determina un incremento netto della *Water Holding Capacity* del terreno. I suoli ricchi di sostanza organica o regolarmente ammendati con digestato stabilizzato manifestano una conducibilità idraulica ottimale: aumentano la velocità di infiltrazione dell'acqua durante le precipitazioni intense, riducendo drasticamente i fenomeni di ruscellamento superficiale e la conseguente erosione del suolo fertile, e contemporaneamente trattengono l'umidità negli strati esplorati dalle radici (Benato & Macor, 2019; Brady & Weil, 2008). Per le colture agricole (sia in regime biologico che convenzionale), ciò si traduce in una maggiore tolleranza allo stress idrico, in una riduzione dei volumi irrigui di soccorso e in una nutrizione minerale più costante, poiché gli elementi nutritivi rimangono disciolti nella soluzione circolante del suolo riducendo il rischio di perdite per lisciviazione e favorendo una disponibilità più graduale degli elementi nutritivi.

4.2 Dinamiche della biodiversità microbica e salute del suolo

4.2.1 Impatto delle matrici biologiche sulla rete trofica edafica

La transizione da sistemi di fertilizzazione chimica minerale a regimi di gestione agronomica basati sull'apporto di matrici organiche (quali sovescio, compost o digestato anaerobico) determina una profonda ristrutturazione della componente biologica del suolo. Mentre i concimi di sintesi apportano elementi nutritivi in forme ioniche prontamente assimilabili dalle radici, bypassando e talvolta deprimendo la biologia edafica, le matrici organiche forniscono anche substrati carboniosi in grado di sostenere la rete trofica del suolo (Nannipieri, 2003).

La somministrazione di matrici biologiche esogene al comparto edafico innesca una complessa successione ecologica guidata dalle comunità microbiche residenti, la cui dinamica temporale è strettamente regolata dalla natura chimica dei substrati carboniosi immessi. Questo processo non si sviluppa in modo uniforme, ma si configura come una vera e propria successione biochimica sequenziale in cui diverse classi filogenetiche di batteri e funghi si avvicendano man mano che i composti organici subiscono alterazioni e scomposizioni biochimiche (Kuzyakov, 2010).

In base alla teoria delle strategie ecologiche applicata alla microbiologia del suolo, le comunità microbiche si dividono in due grandi raggruppamenti funzionali che governano il turnover del carbonio (Fierer et al., 2007):

Fase I: Dominanza dei microrganismi Copiotrofi (strategia R)

Immediatamente dopo l'applicazione di matrici ricche di frazioni solubili e carbonio labile, come i residui freschi di un sovescio di leguminose o la frazione liquida del digestato, si può osservare un rapido incremento dell'attività e dell'abbondanza relativa di microrganismi a strategia R, definiti copiotrofi (Chen et al., 2021).

Questi organismi possiedono tassi di crescita specifici estremamente elevati e un genoma altamente plastico, specializzato nella rapida assimilazione di molecole semplici e a basso peso molecolare, quali monosaccaridi (glucosio, fruttosio), amminoacidi e acidi organici a catena corta.

Dal punto di vista tassonomico, questa prima fase è dominata dai *phyla* batterici *Gammaproteobacteria* e *Betaproteobacteria*, con una prevalenza dei generi *Pseudomonas*, *Bacillus* ed *Enterobacter*. Questi batteri possiedono sistemi di trasporto transmembrana altamente efficienti, che permettono l'importazione istantanea dei nutrienti solubili all'interno del citoplasma per sostenere una respirazione eterotrofica accelerata e una rapida divisione cellulare (Chen et al., 2021). L'ossidazione di questi substrati energetici di facile consumo è la principale responsabile dei picchi di emissione di CO₂ che si osservano nei primi giorni successivi all'applicazione delle matrici.

Fase II: Transizione verso i microrganismi Oligotrofi (strategia K)

Nel giro di poche settimane, l'esaurimento biologico dei composti solubili provoca il collasso delle popolazioni copiotrofe. Sul terreno residuano unicamente le macromolecole strutturali idrofobe e recalcitranti della matrice organica originaria (lignina, cellulosa strutturale, emicellulosa, cere e cutine), particolarmente concentrate quando si utilizzano ammendanti già stabilizzati o la frazione solida del digestato (Bhatnagar et al., 2022). La nicchia ecologica viene quindi occupata dai microrganismi a strategia K, definiti oligotrofi (Fierer et al., 2007).

Questi organismi sono caratterizzati da tassi di crescita più lenti, ma sono biologicamente attrezzati per colonizzare e degradare i complessi polimerici del suolo. Questa fase vede la dominanza strutturale del *phylum Actinomycetota* (Attinomiceti), in particolare i generi *Streptomyces* e *Nocardia*, la cui crescita filamentosa simil-fungina permette di penetrare fisicamente nei residui vegetali lignificati. Accanto ad essi, i *phyla Acidobacteriota* e *Verrucomicrobiota* mantengono il controllo dei microambienti edafici più stabili, operando in sinergia con la componente dei funghi saprofiti e dei funghi micorrizici arbuscolari (Nannipieri, 2003). I monomeri derivanti da questa lenta demolizione vengono assimilati in modo estremamente efficiente all'interno della biomassa cellulare microbica, determinando una stabilizzazione biologica complessiva dei costituenti edafici.

4.2.2 Indicatori enzimatici di funzionalità e concetto di Soil Health

Mentre l'analisi della successione filogenetica descritta nel paragrafo precedente delinea la composizione strutturale e l'evoluzione delle comunità microbiche edafiche, lo studio delle attività enzimatiche consente di mappare il profilo funzionale e l'espressione concreta dei loro processi metabolici. Gli enzimi del suolo, secreti extracellularmente dalle comunità copiotrofe e oligotrofiche o rilasciati in seguito alla lisi cellulare, rappresentano infatti i catalizzatori biologici responsabili della scomposizione delle macromolecole e della conseguente liberazione dei nutrienti nella soluzione circolante (Nannipieri, 2003).

L'applicazione regolare di ammendanti organici e la conseguente stimolazione dei *phyla* batterici e fungini sopra citati incrementano in modo sensibile l'attività di specifici sistemi enzimatici, eletti dalla letteratura scientifica come indicatori sensibili della funzionalità edafica nei cicli dei macroelementi (Nannipieri, 2003):

1. Ciclo del Carbonio (Beta-glucosidasi): Questo enzima è responsabile del passaggio finale della degradazione della cellulosa (idrolisi del cellobiosio in glucosio). La sua sintesi aumenta drasticamente nella transizione tra la fase copiotrofa e quella oligotrofica, riflettendo fedelmente il tasso di turnover energetico della biomassa microbica.
2. Ciclo dell'Azoto (Ureasi e Proteasi): Enzimi deputati alla scomposizione dei composti azotati organici (come le proteine dei residui vegetali o l'urea della pollina zootecnica) in forme minerali di ammonio (NH_4^+) (Bhatnagar et al., 2022). La loro attività assicura una costante disponibilità di azoto per le radici, regolata sull'effettiva richiesta del sistema edafico e riducendo i rischi di lisciviazione profonda.
3. Ciclo del Fosforo (Fosfatasi acide e alcaline): Catalizzano l'idrolisi degli esteri fosforici organici, convertendo il fosforo organico indisponibile in ortofosfato minerale (H_2PO_4^- e HPO_4^{2-}). Questo processo è fortemente potenziato dall'attività delle ife dei funghi micorrizici stimulate dai regimi di gestione biologica.

L'integrazione di un'elevata biodiversità microbica con un'intensa attività enzimatica introduce ed esplicita il concetto accademico moderno di "Salute del Suolo". Un suolo sano è un ecosistema vivente e dinamico che manifesta un'elevata resilienza biologica. Questa stabilità ecologica si traduce in due fondamentali benefici agronomici: la capacità del suolo di mantenere le proprie funzioni biochimiche anche a seguito di stress ambientali (es. siccità o sbalzi termici) e lo sviluppo di una marcata soppressività naturale contro i patogeni radicali (Chen et al., 2021; Nannipieri, 2003). Le comunità microbiche utili (come i generi *Pseudomonas* e *Bacillus*), stabilizzate grazie all'apporto costante di materia organica, occupano permanentemente le nicchie ecologiche della rizosfera ed esercitano un controllo biologico continuo, che riduce l'incidenza delle malattie fungine, fungendo da pilastro protettivo indispensabile per le colture condotte sotto i protocolli dell'agricoltura biologica.

4.3 Il contributo delle matrici organiche al sequestro del carbonio

4.3.1 Dinamiche di umificazione e partizione del carbonio edafico in pool funzionali

Il ruolo della gestione agronomica moderna si estende oltre i confini della mera produttività colturale, posizionandosi come una delle strategie più concrete per la mitigazione del cambiamento climatico globale. Il suolo agrario rappresenta il secondo serbatoio di carbonio più grande del pianeta dopo gli oceani, contenendo più carbonio di quanto non ne coesista simultaneamente nell'atmosfera e nella vegetazione mondiale. Il potenziale di un terreno di agire come un pozzo di assorbimento (*carbon sink*) anziché come una

sorgente di gas climalteranti è governato dal bilancio dinamico tra gli input di materia organica esogena e gli output dovuti alla respirazione microbica ed eterotrofica (Lal, 2004).

Quando una matrice organica viene incorporata nel profilo edafico, il flusso di carbonio immesso va a ridistribuirsi all'interno di compartimenti funzionali dotati di tempi di semivita (turnover) radicalmente differenti. La letteratura scientifica internazionale adotta una ripartizione basata su tre pool principali (Six et al., 2002):

1. Pool labile o attivo: Costituito da composti organici transitori a basso peso molecolare (zuccheri, amminoacidi, acidi organici liberi). Ha un tempo di permanenza nel suolo che varia da pochi giorni a pochi mesi. È il pool prediletto dalle comunità batteriche copiotrofe e, pur essendo fondamentale per sostenere il metabolismo microbico e il rilascio di nutrienti, non contribuisce in modo significativo al sequestro di carbonio a lungo termine.
2. Pool intermedio o intermedio-stabile: Composto da materiale vegetale parzialmente decomposto ma protetto fisicamente all'interno dei macroaggregati edafici. Mostra tempi di turnover quantificabili in decenni.
3. Pool stabile, recalcitrante o passivo: Rappresentato dal carbonio chimicamente stabilizzato attraverso i processi di umificazione (acidi umici e fulvici ad alto peso molecolare) o chimico-fisicamente associato alle superfici attive delle argille e degli ossidi di ferro e alluminio (frazione organo-minerale). Questo pool presenta una resistenza intrinseca alla degradazione enzimatica, con tempi di permanenza nel profilo che possono superare i secoli o i millenni.

L'efficienza con cui il carbonio immesso si trasferisce dal pool labile a quello passivo, definita con il nome di tasso di umificazione, dipende strettamente dallo stato termodinamico della matrice applicata. Matrici altamente stabilizzate, quali la frazione solida del digestato derivante dalla digestione anaerobica di reflui zootecnici (come la pollina o i liquami bovini e suini) o il compost maturo, presentano un vantaggio strategico intrinseco (Benato & Macor, 2019; Bhatnagar et al., 2022). Il processo di digestione anaerobica industriale o di compostaggio agisce infatti come una forma di "pre-degradazione" controllata, durante la quale la frazione di carbonio più labile viene convertita in biogas (metano e anidride carbonica) o degradata termicamente, lasciando nel residuo solido finale una percentuale più elevata di composti aromatici complessi, strutture ligno-cellulosiche condensate e molecole recalcitranti. Di conseguenza, l'applicazione al suolo di queste matrici pretrattate può favorire una maggiore quota di carbonio stabilizzato o stabilizzabile rispetto all'interramento di biomasse fresche non trattate, incrementando la probabilità di trasferimento verso pool organici a più lenta degradazione.

4.3.2 Dinamiche dei gas climalteranti (GHG) in atmosfera e analisi comparativa dei sistemi di apporto

I gas serra edafici e le problematiche di impatto radiativo globale

La valutazione della sostenibilità ambientale di una qualsiasi pratica agronomica non può prescindere da un'analisi quantitativa dei flussi gassosi scambiati tra il sistema suolo-pianta e l'atmosfera. I gas serra legati alle dinamiche agricole, principalmente il biossido di carbonio (CO_2), il metano (CH_4) e il protossido di azoto (N_2O), esercitano una forzante radiativa che altera il bilancio energetico planetario, intrappolando la radiazione infrarossa termica uscente e provocando il riscaldamento globale (IPCC, 2023).

La pericolosità e l'impatto di questi gas vengono quantificati accademicamente attraverso il potenziale di riscaldamento globale (*Global Warming Potential* - GWP), un parametro che misura l'effetto climalterante di una tonnellata di un determinato gas rispetto a una tonnellata di CO_2 su un orizzonte temporale stabilito (solitamente 100 anni, GWP_{100}) (IPCC, 2023):

1. Biossido di Carbonio (CO_2): Assunto come unità di misura di riferimento ($\text{GWP} = 1$). Sebbene sia il gas meno potente dal punto di vista dell'efficienza radiativa molecolare, i volumi emessi attraverso la respirazione eterotrofica del suolo e l'ossidazione accelerata della sostanza organica ne fanno il principale bersaglio delle strategie di sequestro stanziale.
2. Metano (CH_4): Caratterizzato da un GWP_{100} pari a circa 28-30. In ambito agricolo, si origina principalmente in condizioni di rigorosa anossia (potenziale redox estremamente basso), come nei processi di stoccaggio dei reflui zootecnici grezzi o nei suoli permanentemente sommersi.
3. Protossido di Azoto (N_2O): Rappresenta la problematica climatica più critica e complessa per la gestione agronomica, manifestando un GWP_{100} pari a 273 (IPCC, 2023). Il protossido di azoto è un sottoprodotto gassoso dei processi microbici edafici di nitrificazione (ossidazione dell'ammonio a nitrato) e, soprattutto, di denitrificazione (riduzione del nitrato a azoto gassoso in condizioni di parziale asfissia e disponibilità di carbonio labile) (Butterbach-Bahl et al., 2013).

Di conseguenza, un agroecosistema può essere scientificamente definito un vero pozzo di assorbimento (*carbon sink*) solo se il tasso di stoccaggio del carbonio umico nel suolo supera l'equivalente in CO_2 delle emissioni congiunte di tutti e tre i gas serra menzionati nel corso del ciclo colturale e di gestione delle matrici organiche (Janzen, 2004).

Il Sovescio e le Colture di copertura (*Cover Crops*)

L'interramento della biomassa fresca derivante da colture da sovescio (in particolare leguminose o crucifere) immette nel sistema enormi quantitativi di biomassa vegetale. Tuttavia, a causa del basso rapporto carbonio/azoto (C/N) e dell'elevata presenza di composti solubili facilmente assimilabili, questa pratica scatena un repentino innalzamento dell'attività dei batteri copiotrofi, provocando un marcato priming effect o effetto di avviamento (Kuzakov, 2010). Una quota rilevante del carbonio introdotto viene dissipata in atmosfera sotto forma di CO_2 respiratoria nel giro di poche settimane. Inoltre, la contemporanea immissione di azoto labile e tessuti freschi in decomposizione può creare microsit di intensa attività respiratoria che

consumano l'ossigeno locale; queste micro-nicchie anossiche stimolano i processi di denitrificazione, provocando picchi temporanei ma significativi di emissione di N_2O (Butterbach-Bahl et al., 2013). Il beneficio agronomico del sovescio si concentra pertanto sul pool labile e intermedio (fertilità biologica e nutrizione immediata), mentre il contributo al sequestro stanziale a lungo termine risulta inferiore rispetto alle matrici umificate. Sebbene il contributo del sovescio al sequestro stabile di carbonio possa risultare inferiore rispetto a matrici già stabilizzate, la sua funzione agronomica rimane centrale per la protezione del suolo, il riciclo dei nutrienti, l'attivazione biologica della rizosfera e la riduzione delle perdite di nitrati nei periodi interculturali.

Il Digestato Anaerobico e gli Ammendanti Compostati

Al polo opposto della cinetica di degradazione si collocano il digestato stabilizzato e il compost. L'applicazione della frazione solida del digestato o di compost maturi introduce nel suolo macromolecole strutturali che non necessitano di ulteriori complessi passaggi di stabilizzazione biochimica. Il priming effect indotto è minimo, poiché la microflora eterotrofica non trova fonti energetiche di facile consumo immediato, riducendo le perdite per respirazione basale edafica (Bhatnagar et al., 2022).

La valutazione biogeochimica globale richiede però cautela nella gestione dell'azoto associato a queste matrici. Se l'applicazione superficiale di effluenti zootecnici grezzi o di digestato non interrato tempestivamente favorisce la volatilizzazione dell'ammoniaca (NH_3) e l'innescò di dinamiche di denitrificazione parziale, con conseguente rilascio di protossido di azoto (N_2O), una corretta pianificazione agronomica annulla tali esternalità negative. L'adozione di tecniche di iniezione diretta nel suolo o l'interramento immediato della frazione solida entro poche ore dallo spargimento, in conformità con i Piani di Utilizzazione Agronomica (PUA) e la Direttiva Nitrati, minimizza l'esposizione all'aria e previene la formazione di micro-siti asfittici (Chen et al., 2021).

In conclusione, la sinergia tra la stabilizzazione anaerobica industriale delle biomasse zootecniche (che intercetta e abbatte le emissioni fuggitive di metano in atmosfera durante lo stoccaggio nei vasconi) e la successiva corretta distribuzione agronomica nei suoli agrari permette di massimizzare lo stoccaggio permanente del carbonio organico nei complessi organo-minerali delle argille (Benato & Macor, 2019; Bhatnagar et al., 2022). Questo approccio integrato trasforma la concimazione organica da una mera pratica agronomica di ripristino nutrizionale a uno strumento scientifico d'avanguardia per la decarbonizzazione dei sistemi antropici e la salvaguardia della fertilità globale della biosfera.

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

L'obiettivo della presente trattazione consisteva nell'analizzare criticamente il ruolo della fertilizzazione organica e delle pratiche di fertilizzazione verde nella gestione della fertilità dei suoli agrari, con particolare attenzione al contributo delle matrici biologiche (con particolare riferimento alla frazione solida del digestato anaerobico, agli ammendanti compostati e alla pratica del sovescio) alla stabilità strutturale, alla funzionalità biologica, all'efficienza dell'uso dei nutrienti e alla mitigazione dell'impatto ambientale nei sistemi agricoli, inclusi quelli condotti secondo i principi dell'agricoltura biologica.

Alla luce della letteratura scientifica analizzata, l'elaborato consente di evidenziare come la fertilizzazione organica non debba essere interpretata esclusivamente come una fonte alternativa di elementi nutritivi rispetto ai fertilizzanti minerali di sintesi. Il lavoro svolto ha dimostrato che il suo valore agronomico risiede soprattutto nella sua capacità di interagire con la microarchitettura e la biologia del terreno nel medio e lungo periodo.

L'analisi delle diverse matrici considerate ha evidenziato una differenziazione funzionale tra letame, compost, digestato e sovescio. Mentre il sovescio di colture di copertura si è rivelato insostituibile per l'attivazione della fertilità biologica a breve termine e per il rapido rilascio di nutrienti solubili, la frazione solida del digestato anaerobico e il compost maturo hanno dimostrato una netta superiorità strutturale nell'allocazione del carbonio nel *pool* passivo e nella cementazione dei macroaggregati idro-resistenti. L'ipotesi di partenza secondo cui è possibile guidare la transizione ecologica agraria attraverso una gestione integrata della bioeconomia circolare trova quindi un solido riscontro scientifico.

La discussione dei risultati impone il superamento di una visione semplicistica dello stoccaggio del carbonio, risolvendo organicamente quel "paradosso biochimico" emerso nel corso del terzo capitolo. La tutela del suolo non può coincidere con la ricerca di una totale inerzia biologica; un suolo in cui tutto il carbonio fosse permanentemente protetto e inaccessibile sarebbe un suolo strutturalmente stabile ma biologicamente morto, incapace di nutrire la coltura. Il vero fulcro della discussione risiede nella comprensione dell'equilibrio dinamico. Come evidenziato nel diagramma sottostante (Figura 4.1; rielaborato da Six et al., 2002 e Kuzyakov, 2010), il successo agronomico e ambientale si gioca sulla calibrazione di due flussi opposti che devono coesistere all'interno dello stesso appezzamento:



Figura 4.1: Schema concettuale del bilancio dinamico del carbonio edafico (Rielaborazione personale da Six et al., 2002; Kuzyakov, 2010).

La problematica più complessa emersa dalla discussione riguarda il bilancio radiativo globale dei gas climalteranti (GHG). Se da un lato l'interramento di biomasse fresche aumenta temporaneamente il carbonio del suolo, l'effetto innesco (*priming effect*) indotto dall'iperattività delle comunità batteriche copiotrofe (r-selettive) ne accelera la dissipazione sotto forma di CO₂. Al contrario, il digestato solido bypassa questa fase dissipativa, garantendo un'elevata *Carbon Use Efficiency* (CUE) da parte dei microrganismi oligotrofi (K-selettive).

Tuttavia, la discussione evidenzia che il digestato può trasformarsi da alleato climatico a minaccia se gestito in modo errato. L'elevato contenuto di azoto ammoniacale espone il sistema a rischi di volatilizzazione di NH₃ e, in condizioni di anossia locale, a picchi di emissione di protossido di azoto (N₂O). Il giudizio finale sul piano climatico è quindi strettamente vincolato alla tecnica di applicazione: il bilancio carbonioso netto rimane positivo (*carbon sink*) solo se lo spargimento della frazione solida è seguito dall'interramento immediato nel profilo edafico o dall'iniezione diretta, azzerando le perdite gassose secondarie e rispettando i vincoli normativi della Direttiva Nitrati.

Proposta di gestione integrata della fertilità organica

Sulla base del quadro biogeochimico discusso nei capitoli precedenti, la tutela della fertilità del suolo può essere interpretata come il risultato di un insieme coordinato di pratiche agronomiche, piuttosto che come l'effetto di una singola matrice organica. In questa prospettiva, la fertilizzazione organica, il sovescio, la riduzione del disturbo meccanico, e la pianificazione degli apporti nutritivi possono essere integrati in un modello di gestione conservativa e, nel medio-lungo termine potenzialmente *rigenerativa*.

Il sistema generale di tutela qui teorizzato si articola su tre direttrici strategiche e complementari, destinate a operare in sinergia sia a livello di singola azienda agraria sia su scala comprensoriale.

Nella prima direttrice, la gestione della sostanza organica non deve basarsi sull'applicazione univoca o ripetitiva di una singola matrice, bensì su una pianificazione strategica che alterni le fonti di carbonio in base alle loro proprietà termodinamiche e ai tempi di *turnover*:

- Fase di attivazione biologica (Input Labili): L'inserimento sistematico di colture di copertura (*cover crops*) e la pratica del sovescio devono essere programmati in coincidenza con i periodi di massima richiesta nutritiva delle colture principali in rotazione. Questa somministrazione di biomassa fresca stimola la successione dei microrganismi copiotrofi, massimizzando la mineralizzazione a breve termine e la pronta liberazione di elementi biodisponibili come l'azoto (N) e il fosforo (P).
- Fase di stabilizzazione strutturale (Input Recalcitranti): A questa fase di attivazione deve succedere, con cadenza poliennale, l'apporto mirato di frazioni organiche altamente stabilizzate, quali la frazione solida del digestato anaerobico o ammendanti compostati di alta qualità. Queste matrici, ricche di composti aromatici e resistenti alla degradazione enzimatica immediata, agiscono direttamente sul pool passivo del carbonio, garantendo il sequestro stanziale a lungo termine e promuovendo la formazione dei complessi organo-minerali.

La seconda direttrice riguarda la riduzione del disturbo meccanico. L'efficacia della sincronizzazione degli apporti organici rischia di essere annullata se associata a lavorazioni meccaniche invasive del terreno. Le arature profonde e ripetute provocano la rottura sistematica dei macroaggregati edafici, esponendo le frazioni di carbonio precedentemente protette all'azione ossidativa dell'ossigeno atmosferico e accelerando la respirazione eterotrofica. Il sistema di tutela prevede pertanto l'adozione sistematica di tecniche di agricoltura conservativa, quali la lavorazione minima superficiale (*minimum tillage*) o la semina su sodo (*no-till*). Limitando il disturbo meccanico, si preserva l'integrità strutturale del suolo e si permette lo sviluppo della rete di ife dei funghi micorrizici arbuscolari (AMF), i quali agiscono come veri e propri leganti biologici stabili, riducendo i fenomeni di erosione e migliorando la porosità e la capacità di ritenzione idrica del profilo.

La terza direttrice riguarda la chiusura dei cicli biogeochimici a scala aziendale e territoriale. L'ultimo pilastro del modello sposta l'orizzonte dalla singola parcella al territorio, proponendo una sinergia tra il comparto zootecnico, i sistemi bioenergetici e le aziende agricole biologiche. I reflui zootecnici grezzi rappresentano spesso un elemento di criticità ambientale a causa dell'instabilità biologica e del rischio di emissioni climalteranti durante lo stoccaggio. Attraverso la costituzione di bio-distretti territoriali, tali reflui vengono convogliati verso impianti di digestione anaerobica per la produzione di biometano. Il residuo di questo processo vale a dire il digestato, ritorna infine ai suoli agrari sotto forma di ammendante igienizzato, stabilizzato e ad alto valore unico. Questo circuito non solo abbatte le emissioni di metano (CH₄) in atmosfera, ma valorizza un sottoprodotto industriale convertendolo in una risorsa fondamentale per la

nutrizione e la decarbonizzazione dei suoli, in perfetta conformità con le linee guida della Direttiva Nitrati e dei Piani di Utilizzazione Agronomica (PUA).

In conclusione, il suolo non può più essere considerato un semplice fattore di produzione, ma deve essere tutelato come una risorsa comune, limitata e insostituibile, fondamentale per la sicurezza alimentare, la stabilità degli ecosistemi e la mitigazione dei cambiamenti climatici. La presente tesi evidenzia come l'integrazione tra stabilità della microstruttura fisica, conservazione della sostanza organica e dinamicità della biodiversità microbica rappresenti una condizione essenziale per garantire la sostenibilità a lungo termine degli agroecosistemi. In questa prospettiva, l'adozione di un sistema integrato di gestione organica e rigenerativa della fertilità, fondato sull'impiego razionale delle matrici organiche, sulla riduzione del disturbo meccanico e sulla pianificazione agronomica degli apporti, può consentire al comparto agricolo biologico di assumere un ruolo attivo nei processi di transizione ecologica, contribuendo alla tutela della fertilità del suolo e alla riduzione dell'impatto ambientale dell'attività agricola.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Aendekerk, R. (2020). *Efficacy of organic amendments and cover crops on soil organic carbon stocks: A regional analysis*. *Soil Use and Management*, 211-224.
- Al Seadi, T., Drosch, B., Fuchs, W., Rutz, D., & Janssen, R. (2013). Biogas digestate quality and utilization. In A. Wellinger, J. Murphy, & D. Baxter (Eds.), *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications* (pp. 267-301).
- Alburquerque, J. A., de la Fuente, C., & Bernal, M. P. (2012). Chemical properties and phytotoxicity of co-digested biogas residues. *Waste Management*, 2154-2160.
- Awasthi, S. K., Sarsaiya, S., Wainaina, S., Rajasekhar, K., Liu, T., Awasthi, M. K., & Zhang, Z. (2020). Technological development in the composting of organic fraction of municipal solid waste: A review. *Bioresource Technology*.
- Benato, A., & Macor, A. (2019). Italian Biogas Plants: Trend, Subsidies, Cost, Biogas Composition and Engine Emissions. *Energies*.
- Bhatnagar, A., Singh, R., & Kumar, M. (2022). A comprehensive review of green policy, anaerobic digestion of animal manure and chicken litter feedstock potential – Global and Irish perspective. *Waste Management*, 144, 286-296.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The Nature and Properties of Soils* (14th ed.).
- Butterbach-Bahl, K., Baggs, E. M., Dannenmann, M., Kiese, R., & Zechmeister-Boltenstern, S. (2013). Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*.
- Chen, R., Wang, Y., & Zhang, L. (2021). Ammonia volatilization and greenhouse gas emissions from soil amended with anaerobic digestates: A review of mitigation strategies. *Science of the Total Environment*.
- Consiglio delle Comunità Europee. (1991). Direttiva del Consiglio del 12 dicembre 1991 relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole (91/676/CEE). *Gazzetta Ufficiale delle Comunità Europee*.
- Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 3-11.
- Fangueiro, D., Surgu, S., Fraga, I., Cabral, F., & Vasconcelos, E. (2015). Band application of acidification additives to slurry to mitigate ammonia and greenhouse gas emissions. *Journal of Environmental Management*, 149, 74-81.
- Fierer, N., Bradford, M. A., & Jackson, R. B. (2007). Toward an ecological classification of soil bacteria. *Ecology*.
- Finney, D. M., White, C. M., & Kaye, J. P. (2016). Biomass production and carbon-to-nitrogen ratio influence greenhouse gas emissions from cover crop mixtures. *Agronomy Journal*.
- Fustec, J., Lesuffleur, F., Billou, D., & Cliquet, J. B. (2010). Nitrogen rhizodeposition of legumes. A review. *Agronomy for Sustainable Development*.
- Goulding, K., Jarvis, S., & Whitmore, A. (2008). Optimizing nutrient management for farm systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*.

- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, H. Lee and J. Romero, eds.). IPCC, Geneva, Switzerland.
- Janzen, H. H. (2004). Carbon sequestration in agricultural soils: Is it a legitimate mitigation strategy? *Agriculture, Ecosystems & Environment*.
- Jones, D. L., & Brown, S. (2021). The role of grass cover crops in soil organic matter dynamics and structural stability. *Soil Use and Management*.
- Kelleher, B. P., Leahy, J. J., Henihan, A. M., Dwyer, T. F., Ward, A. J., & Al-Duri, B. (2002). Advances in anaerobic digestion of poultry manure. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Kirkegaard, J. A., Sarwar, M., Wong, P. T. W., & Mead, A. (1998). Biofumigation potential of brassicas. II. Effect of select isolates on soil-borne fungal pathogens. *Plant and Soil*, 201(1), 81-89.
- Kuzyakov, Y. (2010). Priming effects: Interactions between living plants and soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*.
- Masciandaro, G., Ceccanti, B., Ronchi, V., & Lando, S. (1997). Soil enzymological and chemical monitoring as indicators of sustainability in land agricultural management. *Soil Biology and Biochemistry*.
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Caruso, C., Sambo, P., & Borin, M. (2017). Effects of digestate solid fraction fertilisation on yield and soil carbon dioxide emission in a horticulture succession. *Italian Journal of Agronomy*.
- MiPAF - Ministero delle Politiche Agricole e Forestali. (2004). *Metodi di Analisi Biochimica del Suolo*. Collana di metodi analitici per l'agricoltura, diretta da P. Sequi. FrancoAngeli, Milano.
- Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences*.
- Morales-Corts, M. R., Pérez-Sánchez, R., & Gómez-Sánchez, M. A. (2019). Efficiency of garden waste compost tea on tomato growth, yield, and chemical composition. *Scientia Horticulturae*.
- Nannipieri, P., Ascher, J., Ceccherini, M. T., Landi, L., Pietramellara, G., & Renella, G. (2003). Microbial diversity and soil functioning. *European Journal of Soil Science*.
- Nannipieri, P., Trasar-Cepeda, C., & Dick, R. P. (2018). Soil enzyme activity: a brief history and biochemistry as a basis for appropriate interpretations and meta-analysis. *Biology and Fertility of Soils*.
- Provenzano, M. R., Malerba, A. D., Pezzolla, D., & Gigliotti, G. (2014). Chemical and spectroscopic characterization of organic matter during the anaerobic digestion and successive composting of pig slurry. *Waste Management*.
- Schmidt, R., Gravuer, K., Bossange, A. V., Mitchell, J., & Scow, K. M. (2022). Long-term use of cover crops and no-till shifts soil microbial community life-history strategies. *Soil Biology and Biochemistry*.
- Sequi, P. (Ed.). (2005). *Fondamenti di Chimica del Suolo*. Pàtron Editore, Bologna.
- Sieling, K., Ni, K., & Kage, H. (2014). Application of pig slurry—First year and residual effects on yield and N balance. *European Journal of Agronomy*.
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*.

- Smith, R., Johnson, K., & Brown, T. (2018). Dynamics of organic matter and nutrient cycles in agricultural soils: A 20-year retrospective. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*.
- Stevenson, F. J. (1994). *Humus chemistry: Genesis, composition, reactions*. John Wiley & Sons.
- Tambone, F., Adani, F., Gigliotti, G., Volpe, D., Fabbri, C., & Provenzano, M. R. (2013). Organic matter characterization during the anaerobic digestion of different biomasses spectroscopy. *Biomass and Bioenergy*.
- Tambone, F., & Adani, F. (2019). Nitrogen mineralization dynamics of anaerobic digestate and its fractions in agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*.
- Thorup-Kristensen, K., Magid, J., & Jensen, L. S. (2003). Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Advances in Agronomy*.
- Tisdall, J. M., & Oades, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*.
- Violante, P. (2002). *Chimica del suolo e nutrizione delle piante*. Edagricole-New Business Media, Bologna.
- Walker, Y., Martin, L., & Evans, G. (2020). Plant diversity promotes soil carbon storage through microbial biomass accumulation. *Nature Ecology & Evolution*