



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE FORESTALI E AMBIENTALI

IL CICLO DEL CARBONIO: LA NECROMASSA FORESTALE
E LA SOSTANZA ORGANICA DEL SUOLO
(The Carbon Cycle: Forest Necromass and Soil Organic Matter)

TIPO TESI: compilativa

Studente:
EMANUELE BERNACCHINI

Bernacchini Emanuele

Relatore:
PROF. CRISTIANO CASUCCI

Cristiano Casucci

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Guardare la bellezza della natura è il primo passo per purificare la mente. (Armit Ray)

SOMMARIO

ELENCO DELLE FIGURE	4
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI.....	5
CAPITOLO 1 IL SUOLO	6
1.1 Definizione di suolo.....	6
1.2 La pedogenesi	7
1.3 Le funzioni del suolo.....	14
1.4 Le proprietà del suolo.....	15
1.5 La Sostanza organica del suolo.....	19
1.6 Il Ciclo del Carbonio.....	21
1.6.1 Il Sequestro del Carbonio in Italia.....	23
CAPITOLO 2 LA NECROMASSA LEGNOSA FORESTALE.....	28
2.1 Definizione	28
2.2 Funzioni e proprietà.....	30
CAPITOLO 3 NECROMASSA FORESTALE E LE INTERAZIONI CON IL SUOLO.....	36
3.1 Necromassa microbica e i processi di decomposizione.....	36
CONCLUSIONI	40
BIBLIOGRAFIA	42

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1: Schematizzazione delle reciproche relazioni tra la pedosfera e gli altri comparti ambientali, (CREST- Centro Ricerche in Ecologia e Scienze del Territorio, “L’impronta Ecologica”)	7
Figura 2: Carta delle Regioni Pedologiche Italiane (Soil Regions) elaborata dal Centro Nazionale di Cartografia Pedologica, dai Servizi Pedologici Regionali e dall’European Soil Bureau.....	10
Figura 3: Strati del suolo.....	14
Figura 4: Tavole di Munsell.....	18
Figura 5: Sostanza organica nel suolo.....	20
Figura 6: Ciclo del Carbonio.....	23
Figura 7: Emissione del Carbonio.....	25
Figura 8: Necromassa legnosa forestale.....	29
Figura 9: Funghi, basidiomiceti.....	32
Figura 10: Muschi e le epatiche.....	33
Figura 11: Necromassa microbica in un suolo forestale.....	35
Figura 12: La necromassa microbica che contribuisce alla degradazione della sostanza organica del suolo.....	36

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Il seguente elaborato ha come scopo quello di investigare le interazioni della necromassa legnosa con la sostanza organica del suolo partendo da una descrizione generale del suolo, quindi della sua struttura e proprietà, della pedogenesi, della sostanza organica e del ruolo fondamentale svolto da essa, con riferimenti al ciclo del Carbonio e alle sue implicazioni a livello globale. L'elaborato si occuperà poi della necromassa legnosa e microbica, del suo ruolo svolto nei suoli forestali con riferimento alle sue proprietà e ai cambiamenti che causa nel suolo. Gli argomenti trattati hanno lo scopo di fissare l'attenzione anche sulle problematiche legate al cambiamento climatico e all'importanza del ruolo svolto dalle foreste a livello globale e di rivolgere l'attenzione a una componente fondamentale per l'ecosistema forestale, la necromassa, che garantisce habitat a molteplici specie, costituisce parte integrante nel ciclo dei nutrienti e del carbonio.

Capitolo 1 IL SUOLO

1.1 Definizione di suolo

Il suolo, per diversi motivi tra i quali quelli religiosi-storici-culturali, soprattutto nella civiltà occidentale, è sempre stato poco studiato, in quanto gli è stata attribuita una connotazione negativa (sporcizia, luogo di sepoltura dei morti, sito delle malattie). Ad oggi, secondo la definizione del Soil Survey Staff, il suolo è considerato un'entità vivente costituita da solidi sotto forma di composti minerali e/o materia organica; da liquidi e gas presenti in varie proporzioni e presenti sulla superficie dei pianeti, che occupano un certo volume. Secondo quanto riportato dall'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici “il suolo, “è un corpo naturale che ricopre, con una continuità interrotta solo da ghiacci, acque e rocce nude, le parti emerse della superficie terrestre e rappresenta il supporto di tutta l'attività biotica all'interno degli ecosistemi terrestri. Esso deriva da complessi e continui fenomeni di interazione tra aria (atmosfera), acqua (idrosfera), substrato geologico (litosfera), organismi viventi (biosfera), attività umane (antroposfera) e rappresenta la “membrana” attraverso la quale avvengono gli scambi di energia e materia con la litosfera e gli altri comparti ambientali, regolati mediante emissione o ritenzione di flussi e sostanze” (APAT, 2008), (Fig. 1).

Si può quindi definire il suolo come un corpo vivente in continua mutazione, composto da particelle inorganiche, sostanze organiche, aria ed acqua, in cui si esplicano i cicli biogeochimici necessari per il mantenimento degli esseri viventi sulla superficie del pianeta. “L'energia e la materia incorporate al suo interno vengono trasformate, tramite un laboratorio biologico straordinariamente differenziato e non ancora totalmente compreso, composto da una grande varietà di organismi, in forme utili a sostenere la vita”. Stimare la durata della formazione del suolo è molto complesso perché la risposta dipende da numerosi fattori, ma la maggior parte dei pedologi concorda sul fatto che per dar vita a un pollice di suolo (2.5 cm circa) sono necessari 100 anni.

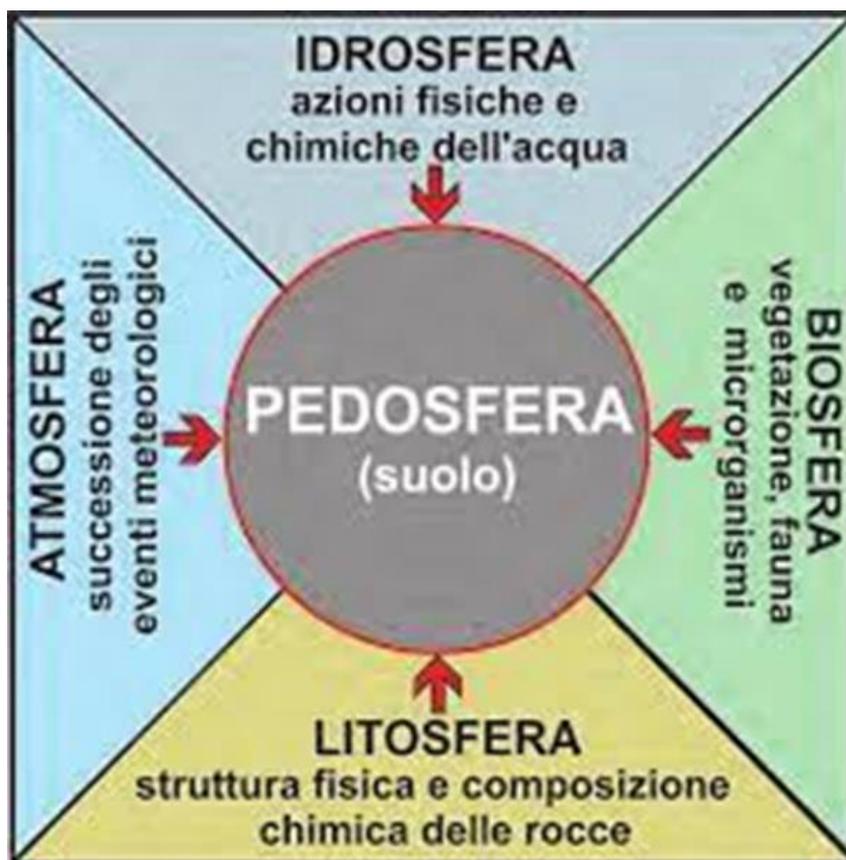


Figura 1 Schematizzazione delle reciproche relazioni tra la pedosfera e gli altri comparti ambientali (CREST- Centro Ricerche in Ecologia e Scienze del Territorio, “L’impronta Ecologica”)

1.2 La pedogenesi

La pedogenesi è il processo di formazione del suolo; si parla di “genesi” in quanto si genera da una roccia dove il suolo è assente. La pedogenesi è influenzata dai fattori pedogenetici, ovvero tutti quegli elementi dell’ecosistema che attraverso i processi pedogenetici vanno a determinare le caratteristiche e le proprietà del suolo che si forma. La persistenza e l’intensità dei fattori nel tempo determinano il grado di sviluppo e la qualità del suolo. Tra gli agenti naturali il principale è, generalmente, il clima che influenza, in vario modo, gli altri.

I fattori pedogenetici si classificano in:

- fattori climatici: come accennato in precedenza sono senza dubbio quelli che intervengono di più nella pedogenesi. Di maggiore rilievo sono la temperatura e le precipitazioni. La prima condiziona la vita degli organismi che vivono nel suolo e lo svolgersi dei processi chimici. Difatti la velocità di reazione dei processi chimici si va a raddoppiare ogni 10 gradi centigradi di aumento della temperatura. La temperatura influenza in maniera indiretta anche il colore del suolo, per esempio le basse temperature bloccano le reazioni che alterano i minerali ferrosi.

- fattori abiotici: sono senza dubbio i fattori che condizionano maggiormente il processo della pedogenesi e consistono nel tipo di roccia e nell'orografia del terreno. Difatti la composizione chimica della roccia madre va a determinare le caratteristiche chimiche del nuovo suolo mentre l'orografia del terreno determina l'intensità dell'azione distruttiva degli agenti atmosferici soprattutto quella derivante dall'erosione esercitata dall'acqua. Ne consegue che in un terreno in pendenza l'aspetto orografico sarà dominante rispetto all'azione chimica.

- fattori biotici: consistono nelle interazioni tra gli animali e vegetali di un determinato ecosistema con i fattori abiotici descritti in precedenza. Gli animali in particolar modo quelli terricoli come roditori e lombrichi rimescolano la frazione minerale a quella organica, rendono soffice il primo strato di suolo e garantiscono inoltre il trasporto di elementi da un punto all'altro del terreno. I vegetali svolgono un ruolo altrettanto importante nei processi biogenesi. L'apparato radicale, grazie alla forza che sviluppa contribuisce alla frantumazione del substrato roccioso; inoltre la presenza dei vegetali nel terreno, favorisce lo sviluppo dei microrganismi che a loro volta contribuiscono alla disgregazione del substrato. Infine la parte morta dei vegetali, conosciuta come necromassa, apporta notevoli quantitativi di sostanza organica necessaria alla sopravvivenza dei microrganismi.

- fattori tempo: il tempo inteso come il periodo necessario a una roccia per trasformarsi in un suolo maturo, da molti studiosi viene considerato un fattore indiretto della pedogenesi.

- fattore antropico: è determinato dalla presenza dell'uomo e dalla sua capacità di influenzare il corso naturale dei processi pedogenetici. Interventi come elaborazione agrarie, la bonifica dei terreni agrari e tutte le pratiche agronomiche generali favoriscono e accelerano il processo

pedologico, dando vita ad un terreno di buona qualità e permettendo una coltivazione dei vegetali economicamente vantaggiosa. L'intervento dell'uomo però può risultare anche dannoso, ad esempio il forte disboscamento delle aree collinare e montane e le elaborazioni profonde di terreni declivi, favoriscono l'erosione del suolo e di conseguenza di verificarsi di frane e smottamenti. Inoltre l'utilizzo di importanti quantitativi di concimi chimici e coltivazione agrarie ripetute, determinano condizioni ambientali che favoriscono l'involuzione pedologica del terreno. "Negli ultimi decenni le attività umane hanno assunto un ruolo fondamentale nella capacità di modificare le caratteristiche naturali del suolo. L'antroposfera riceve dal suolo gli elementi necessari al proprio sostentamento che di contro viene, troppo spesso, trattato come un elemento di disturbo da rimuovere, un contenitore degli scarti della produzione umana oppure un mezzo da sfruttare con una scarsa consapevolezza degli effetti derivanti dalla perdita delle sue funzioni" (APAT,2008). Durante la formazione di un suolo possono verificarsi mutamenti nelle condizioni climatiche e la sua evoluzione può essere bruscamente interrotta da eventi naturali (apporti eolici, sedimenti alluvionali, accumuli di ceneri vulcaniche, parziale asportazione per movimenti gravitativi ecc.) o antropici che possono modificarne profondamente il profilo, le caratteristiche e condizionarne la futura evoluzione. Il riconoscimento delle fasi che hanno portato alla formazione di un suolo rappresenta pertanto un dato fondamentale nella comprensione della complessa storia evolutiva dell'ambiente naturale ed antropizzato.

Focalizzando il discorso sulla nostra nazione e da quanto riportato dall'articolo, si osserva che "il territorio italiano è caratterizzato da una grande complessità climatica, litologica e morfologica che condiziona lo sviluppo dei diversi processi pedogenetici, tali caratteristiche si traducono in una forte variabilità dei tipi di suolo presenti anche a scala locale. Essi possono essere rappresentati cartograficamente secondo diversi livelli gerarchici. Il primo livello, utile per sintesi nazionali ed europee, è rappresentato dalla carta delle Regioni Pedologiche d'Italia (Soil Regions) come si può vedere nella figura 2. Le regioni pedologiche (34 sul territorio nazionale) sono state definite sulla base delle principali caratteristiche climatiche, litologiche, morfologiche e sulla base dei suoli prevalenti, del loro regime termico ed idrico (pedoclima), della loro capacità d'uso, delle limitazioni permanenti e dei principali processi degradativi. All'interno delle Soil Regions è possibile riconoscere pedoambienti omogenei per caratteristiche climatiche, litologiche e morfologiche (Province Pedologiche o Soil Subregions; (scala 1:1.000.000) ulteriormente suddivisibili in Sistemi Pedologici (scala

1:500.000) e Sottosistemi Pedologici. Questi ultimi costituiscono le unità cartografiche delle carte dei suoli alla (scala 1:250.000), derivanti da rilevamenti di maggior dettaglio”.



Figura 2 Carta delle Regioni Pedologiche Italiane (Soil Regions) elaborata dal Centro Nazionale di Cartografia Pedologica, dai Servizi Pedologici Regionali e dall'European Soil Bureau, (Costantini et al., 2012)

Nell'immagine sopra riportata, è visibile come, appunto, all'interno di ogni Soil Region sono presenti molte tipologie diverse di suoli che vengono rappresentate cartograficamente con diverso dettaglio a seconda della scala utilizzata. Analizzando, invece, gli aspetti tecnici che caratterizzano il suolo e per poterlo riconoscere è necessario indentificare e valutare diversi aspetti tra cui: la composizione chimica, la struttura fisica e l'aspetto biologico, al fine di determinare e quantificare la necessità e la qualità/quantità delle specie vegetali, (erbacee, arbustive e arboree); saper affrontare in un largo spettro temporale i fattori abiotici e abiotici e la loro influenza in riferimento alle condizioni climatiche e atmosferiche; analizzare gli ecosistemi, la biomassa e tanto altro.

Alcuni suoli vengono classificati sulla presenza di orizzonti diagnostici, compresi all'interno dei 30 orizzonti riconosciuti dalla Soil Taxonomy (secondo USDA è un sistema di classificazione dei suoli elaborato dal Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti). La sua prima edizione risale al 1975, sviluppata sulle ceneri di una precedente tassonomia statunitense, risalente al 1938). La presenza degli orizzonti indica una serie di avvenimenti abbastanza precisi che determinano la formazione di un particolare suolo. L'insieme di orizzonti determinano il profilo del suolo. Gli strati superficiali di un suolo, sono più ricchi di sostanza organica, mentre quelli più profondi sono principalmente da roccia inalterata.

Si possono così riassumere gli orizzonti più comuni del suolo:

Orizzonte O (da "organic"): si intendono gli orizzonti organici di superficie, quelli che si trovano al di sopra del suolo minerale (così come inteso in pedologia). Esistono 3 tipi di orizzonte O:

ORIZZONTE Oi (da "indecomposto"), detto anche FIBRIC o ORIZZONTE L (da "litter" = lettiera), comprende materiale riconoscibile, ossia foglie, rami, fiori e altri composti organici che si possono trovare nello strato superficiale, che sono sempre presenti;

ORIZZONTE Oe (da "emic" = a metà), detto anche ORIZZONTE H (da "humic") o H1. Questo strato risulta essere riconoscibile circa la metà mentre l'altra non lo è, cioè in avanzato stato di alterazione la materia organica risulta visivamente essere deformata o di polimero;

ORIZZONTE Oa (da "alterato"), detto anche SAPRIC o ORIZZONTE F/H2. Lo spessore di questo orizzonte risulta essere spesso di 0,5cm e possiamo notare che è costituito da un accumulo di massa particolare nera non riconoscibile formata da materiale vegetale. Tutto questo sotto forma di polvere organica, derivante dalla lettiera ed infine intriso di prodotti di

alterazione della s.o. (acidi umici e fulvici), ovvero polimeri organici che prima non esistevano, prodotti ex novo dalla componente microbica.

Orizzonte A: Questo tipo di orizzonte lo troviamo sottostante all'orizzonte O, dove nel continuo della decomposizione del materiale organico, si va a caratterizzare questo orizzonte per l'inevitabile accumulo della sostanza organica, che ne determina a sua volta un colore scuro. È un orizzonte minerale. Ci si può trovare la presenza di sassi che sono composti da anelli di varie dimensioni con un core centrale di roccia, in riferimento alla roccia madre, che diventa sempre più simile alla terra fine avvicinandosi sempre di più procedendo verso gli strati più esterni. Negli orizzonti A deve esserci organizzazione in aggregati. L'orizzonte A ha una maggior quantità di ossidi e idrossidi di ferro liberi, ma la sostanza organica ha una capacità colorante maggiore ed è per questo che ha una colorazione più scura, ossia nera.

ORIZZONTE B: orizzonte minerale con scarsa incorporazione di sostanza organica, è caratterizzato generalmente tra un colore rosso e giallo, questo è dovuto dal fatto che c'è la presenza del ferro, molto importante questa caratteristica perché indica la presenza di ferro libero, ovvero il ferro liberato dalla struttura dei minerali primari, che sono olivina, biotite, serpentino, saponite, cloriti e montronite. Una delle capacità del ferro è quella colorante in quanto si trova sotto forma di ossidrossido, attraverso un processo denominato estrinsecazione, cioè un processo che andando ad alterare/rompendo i legami dei composti minerali primari, il ferro uscendo, può andare incontro a due percorsi, a seconda delle condizioni in cui si trova, ossidante o anossica del mezzo:

-In condizioni anossigeniche, il ferro rimane Fe^{2+} e reagendo con l'acqua, forma $Fe(OH)_2$, chiamato questo composto chimico come (idrossido di ferro ferroso), tramite un processo autolitico, produce 2 protoni. L'idrossido di ferro ferroso precipita negli strati del suolo e va a far parte del suolo sommerso, ma non ha colorazione.

- In condizioni ossidanti invece il ferro viene immediatamente ossidato a ferro ferrico, Fe^{3+} , per effetto dell' O_2 . Subito dopo forma idrossidi di ferro ferrico, che sono i coloranti che troviamo nella gradazione del rosso: $Fe(OH)_3$. Formandosi più ferro libero in questo caso, tanto maggiore sarà osservabile l'intensità di rosso di questo orizzonte.

Nell'orizzonte B c'è meno sostanza organica che di conseguenza porta una percentuale in meno di ossidi e idrossidi di ferro, il loro colore risulta più evidente. L'orizzonte A e B formano

il SOLUM, cioè il “vero suolo”, perché supportano la vita sulla terra (al 95-98% mantengono la vita dell'intero ecosistema). Generalmente viene anche nominato come orizzonte E; è uno strato di colore chiaro, ricco di sabbia e particolato sciolto. Il suolo in senso generale si estende fino a dove arrivano le radici e/o l'acqua; al di sotto non è più influenzato da quest'ultime, ma viene chiamato substrato pedogenetico, in questo caso dapprima semicoerente (originatosi da sedimentazione, gen. marina) e/o coerente (roccia dura).

Orizzonte C: è un orizzonte minerale, caratterizzato dalla presenza di aggregati o privo di aggregati molto deboli, senza resistenza di cui ha la facilità di essere esplorato facilmente dall'apparato radicale delle piante, viene riconosciuto per i sedimenti di materiali alterati nella sua stratificazione un suolo fino, laddove arrivano le radici e/o l'acqua delle falde superficiali senza alcun tipo di problema. Ogni strato è identificabile come un orizzonte C (C1, C2, C3, ...), si tratta quindi di una roccia sedimentaria semicoerente, cioè dagli strati formati da materiali erosi e da suoli originatesi dalle rocce di montagna, sono stati trasportati dalla rete idrografica fino al fondale marino, quindi diciamo che in sostanza è un materiale che è stato rialterato in quanto la s.o. da esso contenuta è stata in parte mineralizzata e mutata in suoli più o meno asfittici, come ad esempio i fondali marini. Tutto questo è stato il processo di alterazione che ha portato questo materiale. Gli orizzonti C sono generalmente di colore grigio.

Orizzonte R: è lo strato di roccia madre, in termine specifico è il substrato pedogenetico coerente.

È comune che alcuni suoli non possiedano tutti questi strati. Pertanto spesso la classificazione può cambiare in base alla fonte utilizzata: possiamo avere orizzonti in più, orizzonti mancanti, orizzonti divisi in sottocategorie, più o meno spessi e con proprietà diverse a sua volta come riportato nella figura 3.

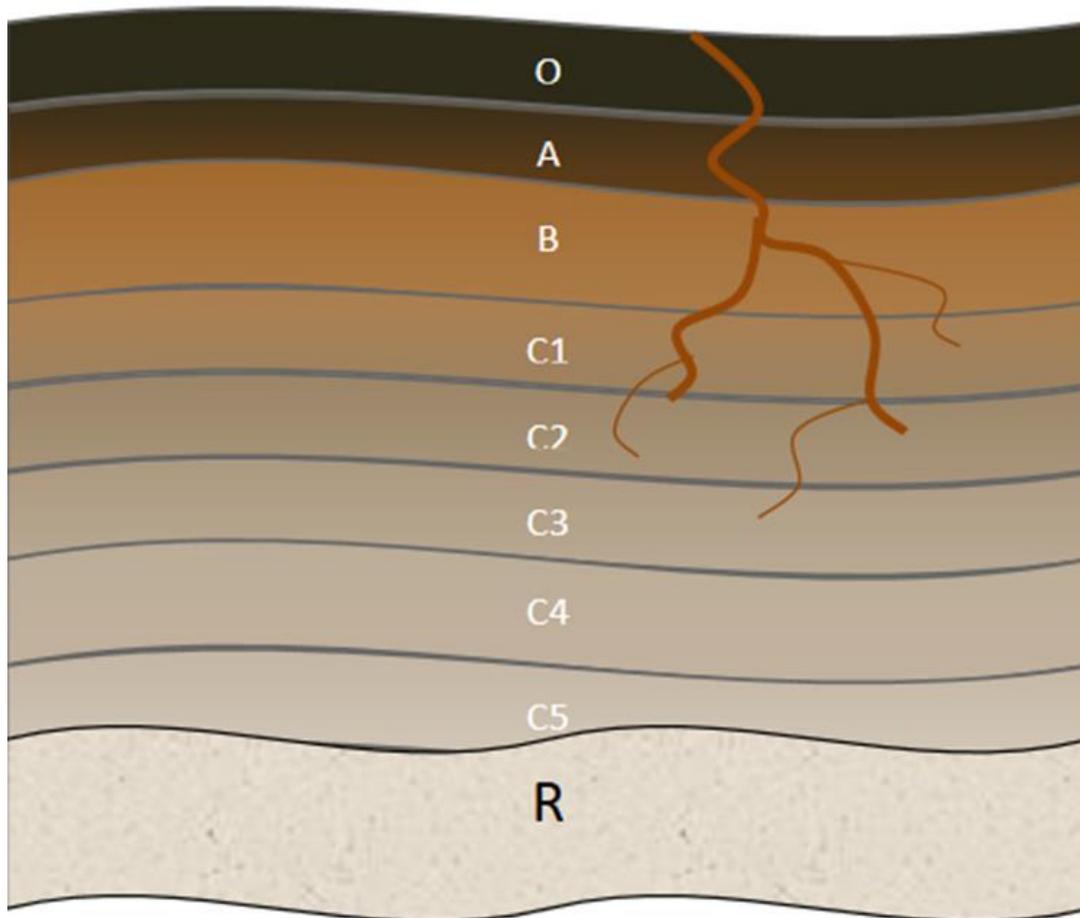


Figura 3: Strati del suolo

1.3 Le funzioni del suolo

Le funzioni del suolo nel sistema terrestre sono moltissime. Il suolo, infatti, è una risorsa complessa, essenziale e limitata: limitata perché, sebbene si generi in continuazione, il suo tasso di formazione è molto lento, mentre invece essenziale per le specie viventi sul pianeta e la loro esistenza. Il suolo come altri ecosistemi, apporta molti vantaggi all'umanità chiamati socio-ecosistemi, tra cui: supporto fisico inteso come base produttiva per alimentazione umana e animale, quindi all'agricoltura e delle sue multi aspetti che ha da offrire; deposito di materie

prime (rocce, sabbie, ghiaia, minerali e acqua), come già visto nel paragrafo precedente; mantenimento dell'assetto territoriale, perché va ad incidere sulla stabilità dei versanti, degli habitat per gli organismi che vivono all'interno del suolo e sulla sua superficie e infine come patrimonio storico e culturale, perché è una prova paleontologica e archeologica vivente che testimonia e fa comprendere l'evoluzione della terra e della storia del genere umano; supporto a abitazioni, infrastrutture, alle attività di svago e al smaltimento dei rifiuti. Richiede molto tempo per la sua formazione e relativamente poco tempo per il suo deterioramento (fondamentalmente di natura antropica), che a tal proposito, questo ha portato nel corso degli anni ad aumentare sempre di più l'inquinamento, subsidenza (abbassamento del suolo), rischio idrogeologico (frane, alluvioni, valanghe), vulcanico e sismico. Ulteriori funzioni offerte dal suolo sono quelle di filtraggio, azione tampone e trasformazione, nonché la capacità di estraniare le sostanze nocive mediante l'azione di filtraggio dei composti organici, inorganici, radioattivi o andando a chiamare i processi chimici- fisici (assorbimento, precipitazione) e quelli biologici (decomposizione e di trasformazione), impedendo che queste sostanze non raggiungano la falda acquifera e in particolare la catena alimentare. Grazie a questa capacità di trattenere acqua, è possibile regolare la stabilità dei paesaggi e dei bacini imbriferi.

1.4 Le proprietà del suolo

Le proprietà che costituiscono e influenzano il suolo si possono classificare in base alle funzioni citate in precedenza e in relazione alle proprietà chimiche, fisiche e biologiche. Focalizzandosi sulle proprietà chimiche, particolare attenzione va sul potere assorbente o assorbimento, ossia la capacità di sottrarre e trattenere, dalle soluzioni o sospensioni circolanti nel terreno, i componenti di natura diversa. Questo fenomeno spicca particolarmente nel terreno agrario, dove viene definito potere di scambio, ed è dato da colloidi elettronegativi del suolo, i quali sono argilla e humus, che fissano gli ioni carichi positivamente (cationi) della soluzione circolante. L'assorbimento del suolo, all'atto pratico è molto importante in ambito agrario, perché permette agli elementi nutritivi, apportati dai concimi artificiali o naturali, di essere assorbiti, e di non disperdersi per dilavamento ovvero il verificarsi dell'azione erosiva da parte del terreno. Gli elementi nutritivi vengono quindi trattenuti nel suolo per essere

disponibili per le piante. Un'altra peculiarità delle proprietà del suolo è l'insieme delle reazioni che avvengono al suo interno. Le reazioni del terreno, sono molto importanti per le piante, tramite effetti sia diretti che indiretti. Tutte queste reazioni sono legate da un fattore a sua volta fondamentale, cioè il pH; difatti un pH molto elevato o basso, va a condizionare la vita delle piante, ma in particolare l'apparato radicale. Altrettanto importanti, sono gli aspetti indiretti che apporta, cioè l'acidità o l'alcalinità di molti fondamentali elementi nutritivi (Fe, Mn, Cu, P, cc.), che andranno a condizionare l'assimilabilità per le piante, col variare del pH e in certi casi diventano totalmente inutilizzabili. Il pH è fortemente influenzato anche dagli organismi che vivono nel terreno; ad esempio nei terreni acidi, troviamo batteri che sopravvivono ed agiscono molto meno rispetto ai funghi. Questo fenomeno si lega anche alle attività biologiche che vanno ad interagire con il terreno e che di conseguenza si risente nelle reazioni in esso. Le attività biologiche, sono molto importanti per il suolo, per molti aspetti già descritti in precedenza, per la somministrazione di concimi nel terreno; per i fattori atmosferici (umidità, pioggia, temperature, cc.); per il metabolismo e per i tanti processi biologici che apportano al terreno benessere e stabilità per le piante.

Le attività biologiche più frequenti che si verificano nel terreno, descritte in un aspetto approssimato, sono:

- umificazione: è un processo che avviene in superficie del terreno, dove si ha il materiale organico (residui vegetali e animali, concimi di varia natura e altro) vanno ad arricchire il terreno. Vengono a loro volta attaccati dai microrganismi terricoli e nel corso di questo processo si ha questa sostanza organica dove andrà a diminuire di peso e trasformata. Alla fine dell'umificazione si ottiene una massa colloidale e nera, che viene chiamata humus.

- mineralizzazione: al seguito del processo dell'umificazione, la sostanza organica andrà incontro ad altri processi, quella della decomposizione, che viene trasformata in composti estremamente semplici; acqua, anidride carbonica, ammoniaca e altri sali minerali. La mineralizzazione può essere suddivisa in due tappe distinte a sua volta:

- ammonizzazione: avviene la formazione di azoto ammoniacale, con l'aiuto dei microrganismi microbici nel processo di mineralizzazione dell'humus

- nitrificazione: in questo processo, l'ammoniaca formata ad opera di particolari batteri, chiamati nitrificanti, viene ossidata in acido nitroso e poi nitrico, questo perché le piante assorbono azoto nitrico invece di quello in forma ammoniacale

- denitrificazione: è un processo biochimico che consiste nel passaggio dall'azoto nitrico ad azoto elementare e/o da ossidi di azoto gassosi che andranno a disperdersi in atmosfera. Questo tipo di processo nei terreni poco arieggiati e asfittici assume una notevole considerazione, soprattutto legandosi al fatto che in questi terreni contiene acqua in eccesso.

- fissazione dell'azoto atmosferico: questo processo è fortemente legato ai microbi chiamati azoto-fissatori, sono capaci di assimilare azoto gassoso dell'atmosfera. Ne possiamo trovare di questi azoto-fissatori di due tipi; azotofissatori non simbiotici, li possiamo trovare sulle radici di particolari piante, sia arboree che erbacee; azotofissatori simbiotici, legano l'azoto dell'atmosfera circolante nel terreno con gli idrati di carbonio (zuccheri) elaborati dalla pianta ospite. Ma oltre a questi aspetti, c'è un altro aspetto fondamentale che è il colore del suolo, che è dato dalla presenza all'interno del suolo da ossidi metallici e materia organica. La gamma di colori che troviamo in natura può essere descritta utilizzando delle tavole cromatiche chiamate "Tavole di Munsell", (figura 4).

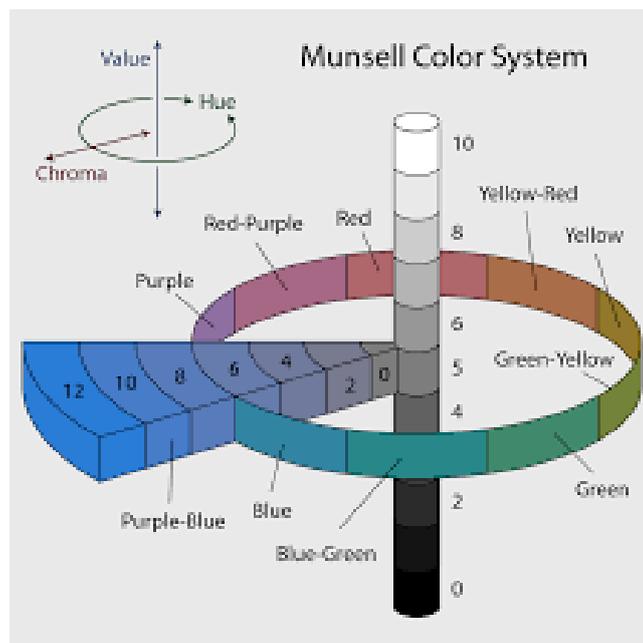


Figura 4 tavole di Munsell, (Munsell-system.svg, Wikipedia, 2007)

Queste tavole permettono di confrontare il colore reale del suolo con quelli della "palette", come si può vedere in figura sopra. Generalmente, si può dire che il colore del suolo riflette ed è condizionata dalla natura della roccia madre e dalla presenza di alcune sostanze che daranno origine a colori diversi a seconda di esse: avendo un giallo-rossastri, indica la presenza

di ossidi di ferro; quelli nero-bruni avremo un elevato contenuto di humus (indice di fertilità, descritto sopra) e infine quelli grigio-blu, dove sta a significare un suolo che ha un drenaggio scarso e con una quantità d'acqua eccessiva. Un altro aspetto che si collega alle proprietà è la tessitura, in particolar modo alla granulometria, che indica la dimensione delle particelle e influenza direttamente la quantità di acqua e aria che un suolo può contenere. Il suolo, che risulta formato da particelle piccole, sarà predisposto a risultare più compatto e privo di spazi vuoti; questo a sua volta porterà ad una maggiore idratazione perché l'acqua resterà "attaccata" alle particelle per il fenomeno della capillarità. Nel caso delle particelle più grandi avremo più spazi vuoti si andranno a formare e più questi saranno ben aerati, perché l'acqua non riesce a rimanere "attaccata" alle rocce e percola in profondità di conseguenza. Un terreno ben bilanciato ha un mix di particelle grandi e piccole che permette un buon grado di idratazione e aerazione del suolo, tale da garantire la sopravvivenza di piante, animali, funghi e batteri che ci vivono, ma anche a favorire alcuni processi come il riciclo della sostanza organica. La struttura è un'altra proprietà che si riferisce alla capacità del suolo di formare aggregati di rocce che hanno forme diverse (come sfere, lamelle, blocchi, colonne o prismi). Ogni suolo e ogni suo orizzonte possiede una particolare disponibilità di sostanze nutritive e una sua acidità (determinata dal pH), come descritto precedentemente, che influiscono direttamente sulla possibilità di ospitare organismi, sulla disponibilità e l'assorbimento di nutrienti da parte di animali e vegetali e sullo sviluppo di alcune reazioni chimiche piuttosto che di altre.

In conclusione si può affermare che il suolo svolge una importante funzione protettiva, tramite un'azione di filtro e barriera, che permette di alleggerire gli effetti delle sostanze inquinanti, ostacolandone il passaggio nelle acque sotterranee o nella catena alimentare. Esso è in grado di controllare il trasporto in profondità dei soluti e lo scorrimento delle acque in superficie, di regolare l'assorbimento da parte della vegetazione e di creare condizioni favorevoli alla degradazione delle sostanze inquinanti. Il valore protettivo dipende così dalle proprietà fisico meccaniche del suolo, dalle loro proprietà chimico, fisiche, biologiche, che ne determinano la sopravvivenza e l'evoluzione del suolo, sia agrario che forestale ed altri tipi di suoli utilizzati nel Terra. La crescita delle attività industriali, l'incremento dei consumi e la diffusione di pratiche agricole intensive hanno contribuito, ad aumentare il numero delle potenziali sorgenti di contaminazione, influenzando così di conseguenza la qualità dei suoli e limitandone molte altre importanti funzioni, inclusa la capacità di rimuovere i contaminanti dall'ambiente attraverso i processi di filtrazione ed assorbimento. Il suolo con la capacità di rimuovere i contaminanti dall'ambiente attraverso i processi, sopra descritti (di filtrazione ed

assorbimento) e alla capacità della resilienza del suolo, cioè alla capacità di reagire agli influssi esterni, fanno sì che spesso i danni al suolo vengano evidenziati solo quando sono in stato molto avanzato, a volte molto vicini alla fase di non reversibilità.

1.5 La Sostanza organica del suolo

La sostanza organica (SO) del suolo, come si può notare nella figura 5, viene definita come una frazione solida costituente del suolo, di natura non minerale, ma che allo stesso tempo deriva da diversi residui di natura vegetale e animale come descritto precedentemente.



Figura 5 La sostanza organica del suolo, (L'importanza della sostanza organica agraria.org, I. L'importanza della sostanza organica, Anno 2017 N. 267)

Una volta che questi residui sopraggiungano nel terreno, si attivano i processi biologic-chimici descritti precedentemente. In un terreno, la quantità di SO varia molto; generalmente è compresa tra il 2% e il 5%, ma più precisamente la possiamo trovare con valori superiori o inferiori. Al di là della percentuale di sostanza organica presente in un suolo, essa risulta

sempre estremamente importante sia per il terreno che per i vegetali che la utilizzano per la propria nutrizione. La SO viene generalmente espressa come contenuto di Carbonio organico ($C_{org} = SO/1,724$), elemento chimico protagonista nei processi della sostanza organica (del suo ciclo tratterà il paragrafo seguente), il cui contenuto nel suolo dipende dal bilancio tra gli apporti di sostanza organica esogena, residui animali e vegetali; perdite dovute alla decomposizione, attraverso la respirazione; l'ossidazione della sostanza organica e a fenomeni di erosione e di lisciviazione. La SO influenza in maniera diretta le proprietà fisiche, chimiche e biologiche del terreno.

Quali sono gli aspetti positivi principali e comuni che la SO, apporta al suolo nell'ambito delle proprietà fisiche, chimiche e biologiche?

- Dal punto di vista fisico: favorisce l'aggregazione e la stabilità delle particelle di terreno; riduce il rischio di erosione del terreno, di ruscellamento superficiale dell'acqua, di compattazione e di formazione di croste superficiali; regola le proprietà termiche del suolo e rende i terreni più facilmente lavorabili.

- Dal punto di vista chimico: aumenta la capacità di scambio cationico del terreno; è in grado di formare complessi stabili con metalli e di legare altri composti presenti in traccia, contribuendo a ridurre le perdite di micronutrienti, la tossicità potenziale dei metalli e prodotti fitosanitari per mantenere in forma assimilabile alcuni ioni che in caso contrario sarebbero fissati al suolo; contribuisce inoltre alla capacità tampone nei confronti di agenti acidificanti favorendo di conseguenza il mantenimento del pH del suolo a valori naturali e infine riduce le emissioni dei gas serra in atmosfera, agevolando l'accumulo di carbonio nel terreno.

- Dal punto di vista biologico: fornisce l'energia metabolica necessaria per i processi biologici; stimola l'attività enzimatica; incrementa il numero delle specie vegetali e l'attività della mesofauna; fornisce elementi nutritivi, come azoto, fosforo e zolfo, al suolo per favorire la sopravvivenza degli organismi del suolo, all'apparato radicale delle piante come fonte di metabolismo per la pianta; aumenta la resilienza del suolo.

Come è già stato evidenziato, la sostanza organica riveste un ruolo molto importante per l'assorbimento del carbonio, infatti ne parla anche un' articolo di "Forigo ® Roteritalia srl; Sostanza organica terreno: ecco perché è importante", questo ruolo è divenuto molto importante, tanto che è arrivato all'attenzione solo recentemente, quando il problema dell'emissione di anidride carbonica nell'atmosfera e il conseguente aumento della temperatura hanno raggiunto dimensioni tali da richiamare l'attenzione pubblica e costringere a utilizzare tutti i mezzi a disposizione per ridurre le emissioni di CO₂. Infatti l'uso sempre più massiccio di combustili e il fenomeno della deforestazione, strettamente collegati alle attività umane, e, in particolare, alle industrie nell'alimentare sempre di più la commercializzazione di legname, hanno determinato di conseguenza un forte continuo diminuire della biomassa vegetale e della sostanza organica del terreno e un aumento dell'anidride carbonica in atmosfera.

1.6 Ciclo del Carbonio

Il carbonio è il quarto elemento chimico più diffuso nell'universo e fa parte della vita di tutti noi. Infatti tutti gli esseri viventi sono fatti di carbonio, mangiano carbonio e gran parte delle nostre economie sono basate sul carbonio. Questo elemento è un pilastro fondamentale del pianeta Terra perché in grado di legarsi molto facilmente con altre molecole creando composti essenziali per la vita. Si stima che nell'intero sistema Terra siano presenti 1,85 miliardi di petagrammi di carbonio (1 petagrammo corrisponde a 1000 miliardi di chilogrammi!). La crosta terrestre è il pool con più carbonio, di cui circa 100 milioni di PgC immagazzinati nelle rocce sedimentarie e carbonatiche. Nei depositi organici sono invece immagazzinati altri 4.000-10.000 PgC, sotto forma di idrocarburi come gas, petrolio e carbone. Gli oceani contengono circa 38.000 PgC, che si trovano perlopiù disciolti in profondità dove vi rimangono per lunghi periodi. In superficie si trovano invece circa 1000 PgC, che vengono scambiati rapidamente con l'atmosfera che è il serbatoio più importante, perché determina l'effetto serra e di conseguenza il clima sul nostro pianeta. Al suo interno sono presenti circa 750 PgC, sotto forma di CO₂ (anidride carbonica) e CH₄ (metano). Le piante contengono circa 560 PgC, immagazzinati nei tronchi e nelle foglie. Altri 1.500 PgC si trovano nel suolo e, in forma organica, nei microrganismi, nei funghi e nelle muffe.

Il carbonio scorre liberamente da un pool all'altro, come riportato in Fig. 6, attraverso dei meccanismi naturali chiamati flussi, alcuni più veloci di altri. Nella biosfera, le piante, attraverso la fotosintesi, assorbono CO₂ e restituiscono ossigeno all'atmosfera. In questo processo il carbonio può rimanere nelle piante anche per migliaia di anni, nel caso di alberi molto longevi. Le stime indicano che le piante rimuovono circa 120 PgC all'anno

dall'atmosfera, e ne restituiscono circa 58 PgC dalla respirazione delle stesse piante e 59 PgC dalla decomposizione del suolo. Praticamente è come se la Terra respirasse, dal momento che rilascia nell'atmosfera più o meno la stessa quantità di carbonio che assorbe. Un equilibrio tanto eccezionale quanto sottile.

Quando si parla invece di ciclo veloce del carbonio ad avere un ruolo fondamentale è l'oceano, che di base contiene 50 volte il carbonio contenuto nell'atmosfera. I gas possono essere disciolti e rilasciati nell'acqua, tramite delle reazioni chimiche chiamate carbonatiche infatti l'anidride carbonica, attraverso una serie di reazioni chimiche, può trasformarsi in carbonato, comunemente chiamato calcare. In questa forma il carbonio può essere immagazzinato in grandi quantità. Il carbonio circola nell'oceano anche attraverso dei processi biologici di fotosintesi e tramite la respirazione e la decomposizione dei plankton. Nel ciclo oceano/atmosfera, l'oceano ogni anno assorbe circa 92 PgC dall'atmosfera, mentre ne rilascia 90 PgC. Si stima che con l'aumento della temperatura media globale l'oceano diminuisce la sua capacità di assorbire CO₂, più fa caldo infatti, più ne lascia in atmosfera innescando una sorta di reazione a catena indirizzata verso un continuo innalzamento della temperatura globale. Il ciclo più lento che restituisce carbonio nell'atmosfera è quello della litosfera, cioè quello relativo al carbonio intrappolato nelle rocce. Il carbonio in questo caso viene rilasciato con le eruzioni vulcaniche. Si pensa che i vulcani emettano quantità di CO₂ molto grandi, ma la realtà è ben diversa: in media infatti, i vulcani di tutto il mondo emettono ogni anno circa 0,1 PgC, che è un centesimo dell'anidride carbonica prodotta dalle attività umane, che equivale invece a 8-9 PgC. Una singola eruzione emette tanto, sia chiaro, ma il conto va fatto a livello globale nel corso di un anno, dove la quantità è molto ridotta.

Il ciclo naturale del carbonio è stato in equilibrio per milioni di anni, mantenendo la concentrazione di CO₂ nell'atmosfera più o meno costante nel tempo. L'atmosfera può gestire 750 PgC in maniera naturale, rimanendo in equilibrio.

Dalla rivoluzione industriale in poi l'uomo ha infatti cominciato a estrarre e bruciare enormi quantità di combustibili fossili, immettendo carbonio che a lungo è stato sepolto e stoccato nelle profondità della Terra naturalmente. Questo carbonio, che avrebbe impiegato milioni di anni per entrare nell'atmosfera, attraverso i processi geologici, viene invece rilasciato in un istante geologico, sconvolgendo l'equilibrio naturale del ciclo del carbonio. Ciò che deve essere compreso è che noi siamo parte di questo ciclo e che le nostre azioni mettono in pericolo quel delicato equilibrio che permette all'umanità di vivere su questo pianeta alle condizioni di oggi.

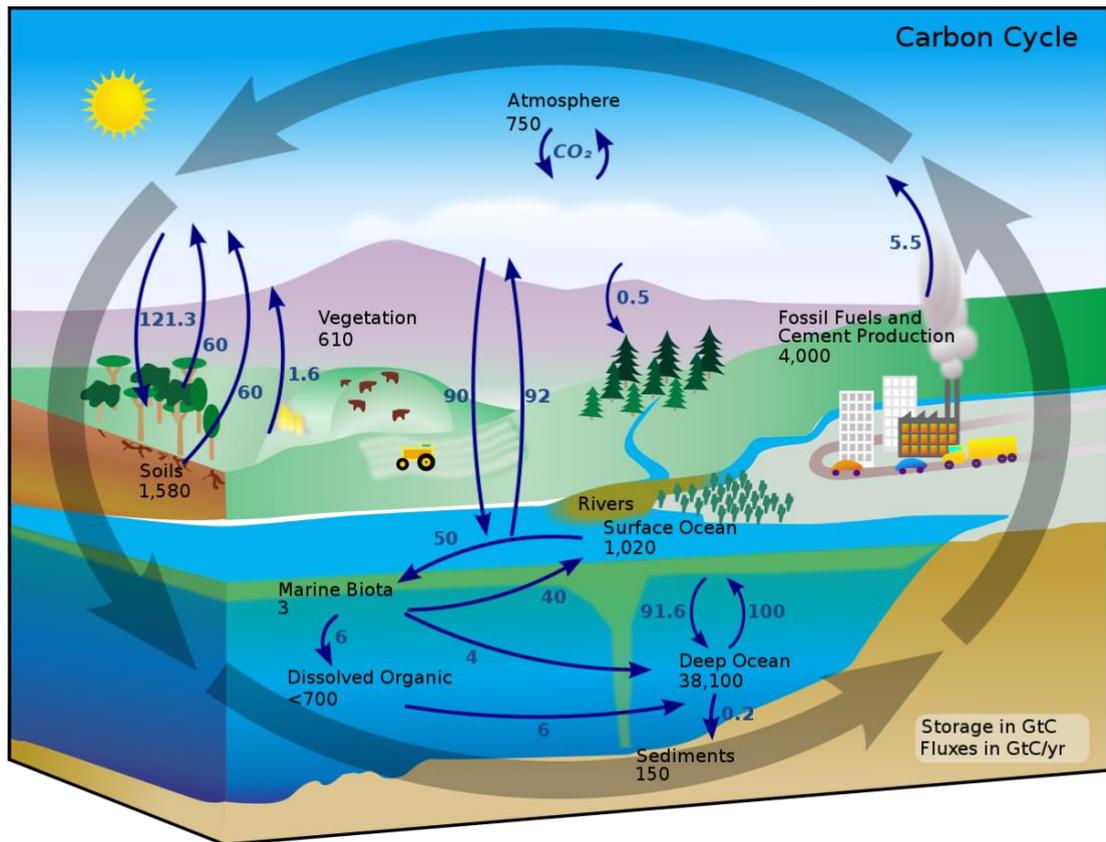


Figura 6 ciclo del carbonio, (Carbon cycle-cute diagram.svg, Wikipedia, 2008)

Il ciclo del carbonio è quindi diviso in due stadi, quello biologico che riguarda il percorso che il carbonio fa dalle piante agli animali per andare all'ambiente circostante, e quello geochimico che riguarda il percorso dalle rocce sedimentarie superficiali all'atmosfera, alla biosfera e all'idrosfera, che produce una parte ossidata, ovvero l'atmosfera e un'altra più ridotta, ovvero gli organismi. L'energia che circola nel ciclo, nel processo di riduzione della CO₂, può essere considerate come fonte di materiale organico. Il ciclo del carbonio è uno dei processi chimici e biologici nel pianeta importante e fondamentale riconoscere le sue caratteristiche e i suoi cambiamenti nel corso degli anni, al fine del benessere del pianeta.

1.6.1 Il Sequestro del carbonio in Italia

Tra le principali azioni previste dagli accordi di Parigi del 2015 per la mitigazione del cambiamento climatico c'è quella di aumentare lo stock di carbonio nella biomassa forestale.

Le foreste, infatti, contribuiscono globalmente a bilanciare una parte significativa delle emissioni antropiche di anidride carbonica (CO₂).

Il contributo degli alberi come assorbitori di CO₂ potrebbe ulteriormente aumentare in futuro, grazie all'effetto fertilizzante legato all'aumento della concentrazione di questo gas serra in atmosfera e quindi le emissioni di anidride carbonica legate all'attività svolta dall'uomo potrebbero quindi essere controbilanciate, almeno parzialmente, da un incremento nella crescita degli alberi.

Molti esperimenti identificati con l'acronimo FACE (Free Air CO₂ Enrichment) hanno effettivamente dimostrato che un aumento della concentrazione di CO₂ (Fig 7) aumenta l'accrescimento e quindi lo stoccaggio netto di carbonio, soprattutto nelle foreste giovani. I dati per foreste mature o vetuste sono tuttavia pochi e molto spesso contrastanti tra loro. Uno studio, condotto in una foresta matura di Eucalipto in Australia, ha dimostrato che l'aumento della CO₂ atmosferica determina un significativo aumento dell'attività fotosintetica fogliare ma non della quantità di carbonio complessivamente assorbita dall'ecosistema della foresta. Gli autori hanno evidenziato come l'aumento della fotosintesi sia infatti bilanciato dall'aumento della respirazione della comunità microbica nel suolo: gli zuccheri prodotti dalla fotosintesi sono rapidamente traslocati verso le radici, dove favoriscono l'emissione di essudati radicali in grado di stimolare l'attività microbica. Tale effetto avrebbe la conseguenza di accelerare la mineralizzazione della sostanza organica velocizzando il rilascio di elementi nutritivi soprattutto di fosforo, generalmente carente negli ecosistemi forestali ma fondamentale per sostenere la crescita degli alberi, ma anche di anidride carbonica. Lo studio suggerisce quindi che il contributo delle foreste mature alla mitigazione della crisi climatica possa essere inferiore a quanto previsto, almeno per quanto riguarda la funzione di assorbimento della CO₂ atmosferica. Risulta quindi necessario che ulteriori studi valutino attentamente le possibili implicazioni legate alla minor capacità di sequestro netto di carbonio delle foreste mature, al fine di elaborare solide strategie forestali di mitigazione del cambiamento climatico per il prossimo futuro.

Per quanto riguarda il sequestro del carbonio nelle foreste in Italia Barbati *et al.* (2014) riportano che le foreste devono essere considerate come sistemi complessi con capacità adattative in continuo cambiamento, rinnovamento e auto-organizzazione; sono inoltre in costante relazione con i sistemi socio-economici, a loro volta caratterizzati da elevata complessità. Una fondamentale capacità delle foreste, si può anche dire una delle peculiarità delle foreste è quella di contrastare i processi di cambiamento globale, attraverso la riduzione delle emissioni nette di gas serra, riveste un ruolo centrale nei negoziati internazionali sul

clima: gli ecosistemi forestali sono infatti in grado di assorbire il carbonio atmosferico e accumularlo, anche per periodi di tempo relativamente lunghi, nella biomassa, nella necromassa e nel suolo; allo stesso momento, i prodotti legnosi ritraibili con le utilizzazioni forestali possono conservare considerevoli quantità di carbonio per la durata del loro ciclo di vita. La capacità di assorbimento e stoccaggio del carbonio da parte delle cenosi boschive è largamente influenzata dalle pratiche di gestione forestale. Le strategie e gli interventi in grado di favorire dinamiche di accumulazione di carbonio nei sistemi forestali coinvolgono molteplici aspetti: preservazione della quantità di carbonio stoccata (stock), riducendo le perdite dovute a disturbi naturali o antropogenici (ad esempio, incendi); aumento dello stock di carbonio, attraverso l'implementazione di interventi gestionali o la realizzazione di piantagioni forestali, che favoriscano la permanenza e l'accumulo del carbonio nelle piante e nel suolo; utilizzo sostenibile della biomassa legnosa come fonte energetica al fine di ridurre le emissioni di anidride carbonica (CO₂) da combustibili fossili. Ai fini della contabilizzazione del bilancio tra carbonio immesso nell'atmosfera e carbonio assorbito, le Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry, identificano, nell'ambito degli ecosistemi forestali, cinque comparti (carbon pools): biomassa aerea (o epigea), biomassa ipogea, necromassa legnosa, lettiera, suolo.



Figura 7 emissione di Carbonio (G.Alberti, Sisef.org, L'assorbimento di carbonio delle foreste mature in un'atmosfera più ricca di CO₂, 2020)

Nel suolo sono stoccate le maggiori riserve di carbonio: circa due terzi del carbonio organico degli ecosistemi terrestri, ovvero il doppio di quello contenuto in atmosfera e il triplo di quello presente complessivamente nella biosfera epigea. La maggiore quantità di carbonio nel suolo è contenuta nelle sostanze colloidali dell'humus, cioè la decomposizione degli organismi vegetali, animali e altro nella lettiera, ossia nella superficie del suolo, in questo caso nel suolo forestale; che permangono nel suolo per migliaia di anni. Anche la necromassa può essere considerata un comparto a lento turnover in relazione al tempo di residenza, cioè il tempo che il carbonio assorbito tramite processi fotosintetici impiega per essere rimeso mediante processi respirativi; questa dinamica è influenzata da vari fattori quali la comunità di decompositori, le condizioni stazionali, le dimensioni del legno morto e, soprattutto, le modalità di gestione forestale. Il bilancio del carbonio nei sistemi forestali è ottenuto dalla differenza tra la produttività primaria lorda, che rappresenta la quantità di carbonio assimilata attraverso i processi fotosintetici, e la quantità di carbonio rilasciato in atmosfera attraverso i processi di respirazione a livello ecosistemico in un dato intervallo di tempo: questa differenza è detta produttività primaria netta dell'ecosistema (NEP - net ecosystem productivity) e, se positiva, corrisponde all'incremento di biomassa nei vari pools. In generale, ecosistemi forestali non eccessivamente disturbati hanno $NEP > 0$ e mostrano quindi un incremento di biomassa, e dunque possono essere considerati serbatoi (sinks) di carbonio: in Europa, nel periodo 2005-2010 l'incremento annuo dello stock di carbonio nella biomassa legnosa è stimato pari a 0,53%, e sale al 1,42% se si esclude la Federazione Russa ove sono più ingenti i prelievi legnosi. Tutto questo faceva in riferimento in un aspetto generale delle foreste, della gestione delle foreste in tutto il mondo, o in verso simile in un aspetto generale delle foreste sia in Europa che in altre zone. Parlando invece in Italia, sempre in questo articolo dice che il Registro nazionale dei serbatoi di carbonio agro-forestali è lo strumento deputato alla contabilità dell'assorbimento del carbonio generato dalle attività definite nel Protocollo di Kyoto. Nello specifico, il Registro ha il compito di: (i) quantificare, in conformità con le decisioni adottate nell'ambito della convenzione delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC) e in accordo con le linee guida e buone pratiche fornite dal panel intergovernativo sui cambiamenti climatici, l'assorbimento di carbonio a livello nazionale, in conseguenza dell'uso del suolo, cambiamenti di uso del suolo e attività forestali; (ii) certificare l'assorbimento di carbonio ai fini della riduzione del bilancio netto nazionale delle emissioni di gas a effetto serra. Il sistema di contabilità del Registro si fonda su quattro strumenti tecnici predisposti a scala nazionale e tra loro coordinati: (i) inventario dell'uso delle terre d'Italia

(IUTI), quadro conoscitivo dettagliato e diacronico delle categorie di uso del suolo (Foresta, Agricolo, Prati e Pascoli, Terre umide e corpi idrici, Urbano e altre terre) previste da UNFCCC nell'ambito di sequenze temporali prestabilite; (ii) inventario degli stock di carbonio (ISCI), ai fini della quantificazione degli stock di carbonio e della loro dinamica nelle aree identificate da IUTI; ISCI è aggiornato mediante i dati forniti dall'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi di Carbonio (INFC), realizzato dal Corpo Forestale dello Stato, dove ora si chiamano Carabinieri Forestali dello Stato, quale strumento permanente di monitoraggio dei boschi italiani; (iii) censimento degli incendi forestali d'Italia (CIFI), per l'identificazione e la quantificazione delle superfici forestali percorse da incendio dal 2008 al 2012; (iv) inventario delle emissioni da incendi forestali, ai fini della valutazione delle emissioni degli altri gas ad effetto serra (CH₄ e N₂O) delle superfici forestali bruciate riportate da CIFI. Viene riportato un esempio tramite i dati INFC che il carbonio stoccato nella parte arborea epigea delle aree boscate era pari, nel 2005, a circa 437 milioni di tonnellate, con un'incertezza campionaria di $\pm 1\%$. La contabilizzazione degli assorbimenti di CO₂ con metodi inventariali si basa principalmente sulla stima delle variazioni degli stocks di carbonio nei cinque comparti definiti per gli ecosistemi forestali, nel nostro paese la stima delle variazioni di stock di carbonio sarà basata su due inventari successivi: in particolare, quello già realizzato (INFC 2005) e quello attualmente in corso di realizzazione consentiranno di quantificare le variazioni annuali tra il 2008 e il 2012, interpolando i dati acquisiti dalle due rilevazioni inventariali.

Capitolo 2 LA NECROMASSA LEGNOSA FORESTALE

2.1 Definizione

Nel presente capitolo si sofferma l'attenzione sulla necromassa legnosa analizzandone le caratteristiche, le proprietà e la sua interazione col suolo, in modo particolare col suolo forestale.

La necromassa (Motta, 2020) può essere classificata sulla base di specie legnosa, tipo di necromassa (*snag*, *log* o *stump*), dimensioni e grado di decomposizione. Alcune specie, animali e vegetali, nei confronti della necromassa sono generaliste, mentre altre ne richiedono un tipo particolare (ad esempio, specie, tipo, grado di decomposizione). Anche le parti di legno morto o in decomposizione che si trovano all'interno di alberi viventi possono essere importanti per la biodiversità ad esempio gli alberi con cavità, tasche di corteccia, grossi rami secchi o parti morte del fusto o della chioma e permettono di identificare gli "alberi habitat". Il legno morto svolge in foresta un ruolo di fondamentale importanza nei confronti della biodiversità. Una prima constatazione è legata al fatto che in un albero con la chioma verde la percentuale di cellule vive e fisiologicamente attive è circa del 10% (foglie 3%, floema e cambio e raggi midollari 7%); al contrario un fusto o un tronco a terra in avanzato stato di decomposizione la percentuale di cellule viventi (prevalentemente funghi ed altri organismi legati al processo di decomposizione) può essere superiore al 30-40%

Come viene riportato nell'articolo "Significato della necromassa legnosa in bosco in un'ottica di gestione forestale sostenibile" (Wolynski, 2001) in un suolo forestale abbiamo una maggior percentuale di necromassa legnosa, cioè biomassa morta (figura 8). Secondo i principali criteri della selvicoltura infatti, cioè dello studio forestale finalizzato alla conservazione e al mantenimento in vita delle piante forestali nel tempo, occorre rispettare anzitutto il criterio fitosanitario, che prevede l'asportazione di alberi in cattivo stato sanitario, per mantenere una condizione generale di buona salute del popolamento; quindi il criterio economico di prelievo di alberi destinati naturalmente a morire per selezione naturale, prima che inizi il processo di degradazione del legno ed infine il criterio, rapportabile soprattutto ad una gestione disetanea, del mantenimento dell'accrescimento del bosco su livelli elevati, allontanando gli alberi a scarsa efficienza fotosintetica. Questi tre criteri mantengono tuttora

la loro validità in foreste destinate a fornire anche un reddito al proprietario. Ci sono anche altri aspetti quando si deve affrontare il discorso della presenza di necromassa legnosa. Ad esempio, nelle zone dove sono frequenti gli incendi, come nell'area mediterranea, viene spesso posta come necessità prioritaria l'asportazione dal suolo di materiale potenzialmente combustibile; anche in luoghi dove l'impronta turistica è maggiore si pone il problema del mantenimento della sicurezza del transito sui percorsi più frequentati, eliminando le piante in piedi che possono costituire pericolo, in primis proprio le piante secche o deperienti. In questo periodo si assiste in molte aree dell'arco alpino e della montagna appenninica, ad esempio, al fenomeno dell'abbandono del bosco a seguito di mutamenti sociali ed economici che rendono la sua coltivazione meno redditizia rispetto ad un tempo. La conseguenza è che in altre aree si assiste invece ad un accumulo, talvolta anche elevato, di biomassa morta destinata a rimanere in bosco. Se in linea generale tale fatto non comporta conseguenze negative per la salute degli ecosistemi forestali, possono tuttavia nascere problemi di natura sanitaria, come pullulazioni di insetti, particolarmente nel caso di formazioni semplificate di resinose di origine artificiale oppure al pericolo di incendi dato dall'accumulo di combustibile al suolo. Appare quindi sempre più necessaria un'attenta valutazione del significato della necromassa legnosa, sia nell'ambito della pianificazione che delle pratiche gestionali. Come sostiene A. Wolynski nell'articolo analizzato, nell'ottica di una gestione forestale non è sufficiente fare scelte finalizzate alla prevenzione dei problemi, ma occorre anche ragionare sulla quantità e la qualità del materiale legnoso che è opportuno o possibile lasciare in bosco per favorire la conservazione e l'incremento della biodiversità e della naturalità delle nostre foreste. È cioè necessario un approccio ecologico alla questione e non soltanto settoriale.



Figura 8 necromassa legnosa forestale (Molise Alberi, Il legno morto o necromassa legnosa, 2021)

2.2 Funzioni e proprietà

La necromassa legnosa, infatti, svolge molteplici funzioni positive per il suolo e per la biodiversità nei diversi ecosistemi circostanti: offre habitat a numerosi organismi viventi, contribuendo così alla conservazione della biodiversità, rappresenta una riserva di carbonio a lungo termine, mantiene ed incrementa la produttività complessiva della foresta, contribuisce allo sviluppo del suolo e dei cicli dei nutrienti, favorisce la connessione tra la catena di pascolo e quella di detrito nella decomposizione della materia organica ed influenza, in particolar modo, il microclima della foresta rappresentando anche una riserva d'acqua durante i periodi secchi. Anzitutto incrementa la fertilità del suolo, grazie all'apporto di elementi nutritivi, CO₂, O₂ e di elementi minerali nutritivi come ad esempio K, Ca, N, P, S, nonché di microelementi. Gli elementi nutritivi CO₂ e O₂ sono condizionati da fenomeni atmosferici esterni e interni come la radiazione solare, dall'acqua e dai materiali organici e inorganici; gli elementi nutritivi minerali, invece, sono condizionati da fattori interni e esterni abiotici ed abiotici, cioè precipitazioni e all'assorbimento dal substrato minerale, piuttosto che la componente animale. Al contrario, le uscite sono dovute alle acque di scorrimento (soprattutto su terreni con elevate pendenze e con scarsa copertura) e al prelievo di materiale vegetale da parte delle componenti

animale (pascolo) e umana (principalmente prelievi legnosi). Si riesce ad intuire che a differenza dei suoli agrari, i suoli forestali non godono dell'apporto esterno di concimazioni, ma dipendono essenzialmente dall'equilibrio dei cicli biogeochimici interni, cioè dalla restituzione al suolo attraverso la lettiera delle macro e dei micro elementi nutritivi assorbiti con lo sviluppo vegetativo, necessari per lo sviluppo delle nuove generazioni di piante. La distribuzione e la concentrazione di tali elementi all'interno dei vari organi vede peraltro una concentrazione molto elevata nelle parti fini (foglie, frutti, fiori, corteccia, gemme) e molto inferiore nelle parti legnose.

Un altro approccio possibile allo studio della necromassa legnosa è procedere per confronto con lo stesso concetto della biodiversità; ci rendiamo conto di questa potrà assumere significati molto diversi in relazione alla scala con la quale la si valuta. Si distingue una diversità a livello di habitat, una diversità tra habitat lungo un gradiente spaziale, nonché una diversità a livello geografico evidenziando come la distinzione tra un livello e l'altro non è sempre agevole, mentre è più facile attribuirle alle variazioni ambientali. Peraltro la diversità non dipende solamente dal numero di esseri viventi di specie diverse (vegetali ed animali), ma è anche una diversità genetica, una diversità di strutture ed una diversità di funzioni. Tuttavia, se il livello delle utilizzazioni si accresce ulteriormente, gli stadi maturi tendono a sparire e con essi le specie collegate, incluse quelle che dipendono dalla presenza di necromassa legnosa di grosse dimensioni quindi di conseguenza la biodiversità del sistema tende perciò a diminuire. Per quanto riguarda la presenza di microrganismi derivanti in maniera diretta o indiretta dalla presenza di legno morto, in piedi o a terra, nel bosco sono numerosi. Essi trovano nella biomassa morta un substrato per la germinazione e lo sviluppo, la usano per l'alimentazione, per la nidificazione o come riparo. Le funzioni svolte e gli organismi ospitati possono dipendere sia dallo stadio raggiunto nel processo di degradazione del legno, sia dalla struttura del popolamento circostante. Le piante morte in piedi vengono generalmente utilizzate dai pipistrelli e dall'avifauna, che vi possono trovare cavità adatte alla nidificazione e possono talvolta scavarle loro stessi. Ciò risulta tanto più agevole quanto più il processo di degradazione del legno è andato avanti. La durata di tale processo, e quindi del tempo di permanenza dei tronchi in piedi, è spesso direttamente correlata al loro diametro. Dalle dimensioni degli alberi secchi in piedi inoltre dipendono evidentemente anche le dimensioni degli organismi che in essi possono trovare rifugio. Mentre in riferimento ad altri animali, cioè roditori, anfibi, rettili trovano spesso riparo sotto tronchi a terra in avanzato stato di decomposizione. La categoria animale più dipendente dalla presenza di necromassa di grosse dimensioni è quella degli invertebrati terrestri, molti dei quali usano il legno come alimentarsi,

per ibernare, come riparo dalle temperature termiche estreme e come per la riproduzione. I gruppi più legati al legno morto sono gli scolitidi, i bupestridi, i cerambicidi, gli isopodi, gli imenotteri e i ditteri, meno i lepidotteri. I primi stadi sono caratterizzati dalla colonizzazione di organismi abbastanza specializzati sulla pianta ospite, come scolitidi o cerambicidi. Negli stadi successivi invece la specializzazione è di meno in riferimento alla specie ospite, ma questo dipende soprattutto dal grado di decomposizione raggiunto dal substrato legnoso. All'inizio, cioè nei primi processi, troviamo coleotteri che scavano sotto corteccia e sulla superficie del legno, spesso associati con funghi; seguono coleotteri e larve diversi a seconda dello stadio di degradazione del legno e, per finire, specie che vivono al riparo di tronchi in decomposizione, tra cui oltre agli insetti, anche molluschi e chilopodi. Il primo stadio ha una durata di due-tre anni, il secondo stadio di otto-dieci anni e nei penultimi due stadi di alcune decadi. Da ultimo, è importante ricordare che solamente i primi due anni dopo la morte dell'albero sono utili per la colonizzazione di insetti potenzialmente dannosi per la loro capacità di pullulare su piante vive in quanto ciò può avere delle evidenti ripercussioni pratiche per l'adozione di eventuali misure di carattere fitosanitari. Pur essendo così poco visti nell'ecosistema del bosco, gli invertebrati ne costituiscono una componente essenziale sotto l'aspetto funzionale è da loro infatti che dipende, assieme ai funghi, la decomposizione e la rimessa in circolo degli elementi nutritivi immobilizzati nei fusti legnosi. I funghi, in particolare i basidiomiceti, riportato in figura 9, divengono particolarmente importanti in tale processo alle quote più elevate o alle alte latitudini, dove gli estremi climatici riducono la presenza degli invertebrati. Ed infine, sempre quanto dice l'articolo, parla in riferimento al regno vegetale i gruppi più legati alla presenza di necromassa sono senz'altro i licheni, i muschi e le epatiche, figura 10. Per tali organismi le dimensioni dei tronchi possono risultare essenziali al fine di garantire la dispersione e quindi la permanenza negli ecosistemi forestali. Ciò in quanto i tempi impiegati dai detriti legnosi di piccolo diametro per decomporsi risultano troppo brevi per consentire loro la colonizzazione di un nuovo substrato, che avviene molto lentamente.



Figura 9 funghi, basidiomiceti (Motta R., Forest@ - Rivista di Selvicoltura ed Ecologia Forestal, Volume 17, Pagine 92-100, 2020)



Figura 10 muschi e le epatiche (Muschi e Epatiche/Terraria-Piante per il Terrario/Paludario Tropicale,2015)

Infine come riporta l'articolo sui fattori delle diverse proprietà della necromassa, un altro fattore importante è di avere il substrato di germinazione, cioè in alcuni ecosistemi forestali i tronchi a terra sono particolarmente importanti come substrato per la rinnovazione del soprassuolo principale come è noto in Europa il caso delle peccete subalpine, ma anche in altre regioni si riscontrano processi analoghi come nei popolamenti di *Picea sitkensis* - *Tsuga heterophylla* del Pacific Northwest. Nel caso specifico delle peccete europee, in stazioni subalpine o anche montane, il legno morto in decomposizione, purché di dimensioni sufficienti, può costituire spesso un substrato di germinazione indispensabile per le plantule delle nuove generazioni, che attorno trovano condizioni inadeguate per la presenza di tappeti di felci ad esempio, avendo di conseguenza ombreggiamento e di eccesso di umidità e con una notevole concorrenza di acqua da parte del tappeto stolonifero di tali specie. Tutto questo risulta che in esposizioni particolarmente aride e assolate, laddove il legno morto è in

decomposizione, per la sua caratteristica di assorbire e trattenere l'umidità necessaria alla germinazione del seme, può costituire il substrato più adatto alla rinnovazione.

La necromassa rappresenta anche un importante *sink* di carbonio. Il carbonio presente negli alberi morti, in seguito al processo di decomposizione, viene restituito al suolo ed all'atmosfera gradualmente nel corso di decenni. Mentre nel passato questo ruolo della necromassa era trascurato attualmente è considerato di prioritaria importanza per il ruolo di mitigazione che i popolamenti forestali possono svolgere nei confronti delle emissioni di carbonio. Sotto questo punto di vista è stato evidenziato che la conservazione di foreste vetuste o anche di componenti strutturali vetusti all'interno delle foreste coltivate può svolgere un ruolo più efficace, nei confronti dei flussi di carbonio, anche rispetto a nuovi impianti. Questo ruolo si riflette anche sulle politiche nazionali: a partire dal 2005 il protocollo di rilievo dell'inventario forestale nazionale prevede anche il rilievo della necromassa, lo stesso Inventario forestale nazionale ha preso il nome di "Inventario nazionale delle foreste e dei serbatoi di carbonio", così come avviene in molti paesi europei (<https://www.sian.it/inventarioforestale/>).

Capitolo 3 LA NECROMASSA FORESTALE E LE INTERAZIONI CON IL SUOLO

3.1 Necromassa microbica e i processi di decomposizione

Si viene a parlare in questo capitolo del contributo che dà la necromassa microbica al suolo, sia dal punto di vista come elemento nutritivo per il suolo; come apporta sostanza organica al suolo e sia come può contribuire al sequestro del carbonio nel suolo. In riguardo alla necromassa microbica, come in figura 11, dove ne parla l'articolo "L'accumulo di carbonio della necromassa microbica dalla lettiera al suolo minerale e il suo contributo al sequestro di carbonio organico nel suolo" (Baorong Wang et al., 2021); dove riportano uno studio fatto in riferimento alla necromassa microbica nelle foreste e le interazioni con il suolo. Spiega che la necromassa microbica e il suo contributo al sequestro del carbonio, cambiano dalla lettiera al suolo minerale e che di conseguenza a questo fattore comporta un mutamento a questi fattori nel suo accumulo. In primis dice che la materia organica del suolo (SOM) contiene più carbonio (C) della vegetazione e dell'atmosfera messe insieme e pertanto i suoli svolgono un ruolo fondamentale nel mediare il feedback del ciclo clima-C. A causa delle grandi dimensioni del pool di C organico del suolo (SOC), piccole variazioni nelle scorte di SOC hanno un impatto significativo sui livelli atmosferici di CO₂ e vanno ad essere ulteriormente gravi di conseguenza per il clima globale. Il carbonio organico del suolo si forma attraverso la parziale decomposizione e trasformazione degli apporti vegetali (ad esempio, essudati radicali e apporti di lettiera sopra e sotto terra) da parte dei microrganismi del suolo. I componenti vegetali che sono prontamente disponibili per l'uso diretto da parte dei microrganismi entrano nel loro organismo nel percorso di turnover in vivo (cioè attraverso l'assorbimento cellulare, la biosintesi e la crescita, che sono dei processi biologici, chimici e fisici per decomporre le sostanze presenti nel suolo) e formano il C di derivazione microbica (extracellulare) e poi nei microrganismi.



Figura 11 necromassa microbica in un suolo forestale, (Le faggete vetuste, patrimonio UNESCO di Maurizio Bongioanni, Credit foto ©danciaba)

Dopo la morte delle cellule microbiche e la successiva lisi e frammentazione, i composti delle cellule microbiche contribuiscono al pool della necromassa microbica. La necromassa microbica si lega alle particelle minerali di argilla o si stabilizza in micro-aggregati (effetto entomba) per entrare nel pool di C organico non vivente del suolo e contribuisce al SOC, come si può notare nella figura 12. Un numero crescente di studi ha fornito una forte evidenza del fatto che la necromassa microbica è una componente importante del SOC e che contribuisce a > 50% del sequestro di SOC in molti casi.



Figura 12 la necromassa microbica che contribuisce alla degradazione come sostanza organica del suolo (La cooperativa Agricola Nuovo Cilento, Rigenerare la terra per nutrire le piante, 2016)

Tuttavia, il contributo della necromassa microbica all'accumulo di SOC varia a seconda del tipo di ecosistema, a causa delle differenze nelle fonti di SOC, nel tempo di turnover e nel meccanismo di stabilizzazione. Ad esempio, hanno riscontrato che l'apporto di C della necromassa microbica rappresenta il 55,6%, il 61,8% e il 32,6% del carbonio organico del suolo in suoli agricoli, prativi e forestali temperati, rispettivamente. L'apporto di C organico negli ecosistemi di prateria deriva principalmente dalle radici vive delle piante sotto forma di essudati, che vengono facilmente degradati e utilizzati dai microrganismi e poi adsorbiti dalle particelle minerali argillose del suolo sotto forma di residui microbici. I residui vegetali non facilmente decomponibili sono protetti dalla loro recalcitranza chimica intrinseca o dall'inaccessibilità spaziale dovuta all'aggregazione, hanno un tempo di ricambio lento e quindi contribuiscono maggiormente all'aumento del SOC rispetto ai residui microbici della necromassa nei suoli forestali. Un altro aspetto fondamentale di questo articolo è che si concentra l'equilibrio tra gli effetti di rimineralizzazione e di intrappolamento, influenza notevolmente la formazione e la decomposizione della necromassa microbica e influisce ulteriormente sul suo contributo all'accumulo di SOC. Questo equilibrio è controllato principalmente da uno squilibrio stechiometrico tra le comunità microbiche e le loro risorse. I microrganismi si adattano allo squilibrio tra il substrato e le esigenze microbiche nell'ambito

della regolazione dell'omeostasi principalmente (i) regolando l'efficienza di utilizzo degli elementi, (ii) alterando la composizione delle specie microbiche e (iii) mobilitando le risorse attraverso la produzione di specifici enzimi extracellulari. Il riciclo dei nutrienti derivati dalla biomassa microbica morente o dai suoi residui è un altro importante meccanismo con cui i microrganismi soddisfano il loro fabbisogno di nutrienti. Pertanto, i rapporti C/N dei decompositori sono relativamente costante tra gli ecosistemi e i tipi di lettiera, soprattutto perché i microrganismi possono sfruttare la materia organica del suolo e la necromassa microbica per soddisfare le loro richieste di C (energia) e nutrienti. Gli enzimi extracellulari, come le chitinasi, decompongono i polimeri di amminozuccheri per utilizzarli come fonte alternativa di N per i microrganismi quando l'apporto di N prontamente disponibile è limitato. Le condizioni ambientali e le richieste microbiche di nutrienti hanno una forte influenza sul riciclo della necromassa. L'elevata disponibilità di C e N nell'ambiente stimola l'accumulo di residui microbici. Ad esempio, un ambiente ricco di nutrienti favorisce la crescita delle comunità microbiche con strategie di alta resa e accelera l'accumulo di residui. Al contrario, le condizioni di limitazione dei nutrienti, dominate da comunità microbiche con strategie di acquisizione dei nutrienti, limitano la produzione e l'accumulo di residui. Pertanto, la domanda microbica di C e N e la disponibilità ambientale di C e N possono influenzare l'accumulo e la decomposizione dei residui microbici, perché la stechiometria microbica C/N/P dipende dalla disponibilità di nutrienti nel suolo o nella lettiera. I nutrienti labili nel suolo o nella lettiera (ad esempio, C, N e P labili) e il loro rapporto C/N/P sono più variabili, ma più vicini alla stechiometria dei microrganismi del suolo rispetto alle risorse del suolo sfuso o della lettiera.

CONCLUSIONI

Il presente elaborato si è posto l'obiettivo di analizzare l'importanza della corretta gestione delle foreste per contrastare in modo adeguato l'aumento di carbonio in atmosfera e il conseguente "effetto serra" prendendo in considerazione anche il ruolo svolto dalla necromassa forestale.

Infatti, la quantità di necromassa nelle foreste italiane ed europee è in continuo aumento, così come la consapevolezza dei gestori dell'importanza di questo componente. L'aumento di necromassa è un fattore legato alla minore pressione antropica nelle foreste coltivate, alla quota di boschi che sono abbandonati e costituiscono delle Riserve di fatto ed all'aumento della frequenza e dell'intensità dei disturbi naturali che non sono oggetto di *salvage logging* o che comunque rilasciano una quota importante di residui legnosi. Accanto a queste situazioni, in cui l'aumento della necromassa avviene potremmo dire "per inerzia", è di fondamentale importanza una "gestione attiva" di conservazione del legno morto da attuarsi nelle foreste coltivate che richiede il supporto della ricerca per la definizione di quantità e qualità dei rilasci. Di questa pratica si gioverà non solo la biodiversità ed il funzionamento di tutto l'ecosistema, ma anche la sostenibilità e l'accettazione sociale della gestione forestale. L'aumento della necromassa nelle foreste coltivate è però anche legata anche all'aumento delle superfici forestali dotate di Piani di Assestamento forestale o Piani Aziendali, in assenza dei quali non è possibile programmare la conservazione della necromassa sul lungo periodo e prevedere un'adeguata distribuzione della quantità e della qualità di questo elemento all'interno dei comprensori forestali. Una politica attiva di conservazione e valorizzazione della biomassa richiede un consapevole approccio culturale da parte dei tecnici forestali e di tutti i portatori di interesse. Infine, l'aumento di necromassa, di alberi habitat e di altri elementi legati all'erogazione di biodiversità e di servizi ecosistemici di cui beneficia tutta la comunità, non può essere a carico, in termini di aumento di spese di gestione e di mancato reddito, dei soli proprietari forestali. È quindi auspicabile che le leggi nazionali e regionali che, anche nell'ambito di accordi internazionali, sono finalizzate ad aumentare la sostenibilità della gestione forestale e la valorizzazione dell'erogazione di servizi ecosistemici prevedano delle adeguate forme di indennizzo abbinato ad incentivi mirati a premiare le modalità di gestione

“virtuosa” e le “buone pratiche” finalizzate ad aumentare la presenza di alberi habitat, di isole di invecchiamento e di necromassa rilasciata in foresta.

Vorrei ringraziare il Professore Cristiano Casucci, mio relatore, per avermi dato l’opportunità di trattare questo argomento particolare e odierno. Vorrei inoltre, ringraziare tutte le persone che mi hanno aiutato, supportato in questo percorso universitario.

BIBLIOGRAFIA

- Forigo ® Roteritalia srl; “Sostanza organica terreno: ecco perché è importante”.
- Wolynski, A. (2001). Significato della necromassa legnosa in bosco in un'ottica di gestione forestale sostenibile. *Sherwood*, 67, pp. 5-12.
- Barbati A., Ferrari B. , Alivernini A., Quatrini A., Merlini P., Puletti N., Corona P., 2014 – Sistemi forestali e sequestro del carbonio in Italia. *L'Italia Forestale e Montana*, 69 (4): 205-212.
- APAT- Agenzia per le Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici (2008). *Il suolo, la radice della vita*. APAT, Roma ISBN 978-88-448-0331-5.
- Baorong Wang, Chao Liang, Hongjia Yao, Env Yang, Shaoshan An, The accumulation of microbial necromass carbon from litter to mineral soil and its contribution to soil organic carbon sequestration, *CATENA*, Volume 207, (2021).
- Motta R (2020) " Why do we have to increase deadwood in our forests? How much deadwood does the forest need?" *Forest@* - Journal of Silviculture and Forest Ecology, 17, pp 92-100