UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI MILANO

Facoltà di Scienze Agrarie ed Alimentari

Corso di Laurea in Valorizzazione e Tutela dell'Ambiente e del Territorio Montano

RESPIRAZIONE E STABILITA' DEL CARBONIO DI SUOLI FORESTALI DELLA VALLE CAMONICA

Elaborato finale di:

PAOLO BECCARELLI

matr. 949305

Relatrice: Prof.ssa F. Tambone

Correlatrice: Prof.ssa S. Mazzini

Anno accademico 2021/2022

Indice

RIASSUNTO.....3

1. INTRODUZIONE 5

1.1 IL RUOLO DELLE FORESTE 5
1.2 L'ECOSISTEMA FORESTA 6
1.3 LO STATO DELLE FORESTE 8
1.3.1. Situazione a livello mondiale *8*
1.3.2. Situazione a livello nazionale *11*
1.4 IL CICLO DEL CARBONIO 13
1.5 LA RESPIRAZIONE NEI SUOLI 16
1.5.2 La sostanza organica *18*
1.5.3 La respirazione della sostanza organica *23*

2. MATERIALI E METODI 28

2.1 INQUADRAMENTO SULLE SPECIE FORESTALI STUDIATE 28
2.1.1 Il contesto territoriale *28*
2.1.2 Caratterizzazione delle specie studiate *31*
a. Il castagno *31*
b. Il faggio *34*
c. Il pino *37*
2.2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE DELL'AREA DI STUDIO 40
2.2.1 Microarea n°1 ..... *41*
2.2.2 Microarea n°2 ..... *42*
2.2.3 Microarea n°3 ..... *43*
2.3 CARATTERIZZAZIONE DELLE LETTIERE E DEI SUOLI 44
2.3.1 Preparazione dei campioni *44*
2.3.2 Determinazione del pH *45*
2.3.3 Determinazione del carbonio totale (TOC) *45*
2.3.4 Determinazione dell'azoto totale (TKN) *47*
2.3.5 Caratterizzazione del carbonio organico delle biomasse *49*
Estrazione del carbonio solubile *54*
Estrazione del carbonio recalcitrante *49*
2.3.6 Allestimento e monitoraggio della respirazione del suolo *50*

3. RISULTATI E DISCUSSIONI 54

3.1 pH dei suoli e delle lettiere *54*
3.2 Determinazione del carbonio organico totale nei campioni di suoli e lettiere *55*
3.3 Determinazione del contenuto di azoto totale nei campioni di suoli e lettiere *56*
3.4 Determinazione dell'attività respiratoria di lettiere e suoli *58*
3.4 Determinazione del carbonio solubile e recalcitrante di lettiere e suoli *60*
3.5 Correlazioni tra l'attività respiratoria e i risultati delle analisi chimiche dei campioni *62*

4. CONCLUSIONI 65

5. RINGRAZIAMENTI 67

6. BIBLIOGRAFIA.....68

Riassunto

Lo studio delle emissioni di CO_2 dal suolo ha ricevuto negli ultimi anni un'attenzione crescente nell'ambito degli scambi del carbonio tra ecosistemi terrestri ed atmosfera, ma ancora sono molti gli aspetti che richiedono un ulteriore approfondimento. La "respirazione del suolo" infatti, definita come quella serie di processi per cui il carbonio accumulato nel suolo e nelle radici torna nell'atmosfera sotto forma di CO_2, rappresenta dal 60 al 90% della respirazione totale dell'ecosistema forestale, assumendo un ruolo di primo piano nel determinare il bilancio netto di carbonio negli ecosistemi terrestri e quindi nel possibile condizionamento del riscaldamento globale già in atto. È possibile suddividere la respirazione del suolo in due componenti principali: la respirazione autotrofa, associata alla respirazione delle radici, e la respirazione eterotrofa, associata alla decomposizione della lettiera e della sostanza organica del suolo, e alla meno rilevante respirazione della fauna tellurica. Nel presente studio è stata analizzata solo la seconda, senza considerare il contributo dell'apparato radicale all'attività respiratoria dei suoli. Le prove respirometriche hanno avuto una durata di sei mesi, anche se il prelievo dei campioni nelle tre microaree di studio e la successiva essicazione comprende alcuni mesi aggiuntivi. Le tre microaree di studio sono state scelte in modo tale da appartenere a tre distinti popolamenti forestali: un Castagneto, una Faggeta e una Pineta di pino silvestre, tutte appartenenti ai substrati silicatici tipici della zona di Edolo (BS). I campioni sono stati distinti in lettiere e suoli, considerando il differente stadio pedogenetico che ne condiziona le caratteristiche chimiche e quindi anche l'attività respiratoria. Tramite prove di laboratorio sono infatti stati definiti i parametri chimici più rilevanti di tutti i campioni, in grado di condizionare la respirazione degli stessi, in particolare l'acidità e parametri riguardanti il carbonio e l'azoto. Le proprietà chimiche così definite sono state infine correlate ai risultati respirometrici, al fine di riconoscere eventuali influenze legate alla composizione della copertura arborea sulla qualità del materiale organico del suolo, e quindi sull'azione degradativa operata dalla popolazione microbica. In particolare, è stata caratterizzata la frazione solubile del carbonio organico contenuta nei campioni, denominata "DOM", considerata appunto la frazione più prontamente disponibile all'attività ossidativa dei microrganismi e quindi il parametro più condizionante la respirazione nei suoli. A conclusione dello studio condotto, è possibile affermare che, effettivamente, la

differente copertura vegetale di suoli forestali, in virtù delle caratteristiche del materiale di origine, è in grado di determinare specifiche proprietà del suolo sottostante. Inoltre, ciò si ripercuote sulla velocità di turnover della sostanza organica in termini di respirazione. Tutto ciò risulta quindi importante ai fini di poter prevedere il potenziale stoccaggio di carbonio nel suolo in funzione di differenti specie vegetali.

1. Introduzione

1.1 Il ruolo delle foreste

Nel corso della propria storia l'essere umano ha dovuto competere con gli alberi per assicurarsi condizioni ambientali favorevoli, quali possono essere clima e produttività del suolo, le stesse richieste dall'attività agricola, dalla pastorizia e dalla vita urbana. Per fare spazio alle attività umane ha dovuto inevitabilmente deforestare, con conseguenze importanti a carico della biosfera: riscaldamento globale, desertificazione e perdita di biodiversità. Dalle foreste e dalla loro gestione sostenibile derivano infatti servizi fondamentali per la sopravvivenza umana, oltre che negli aspetti della vita quotidiana, anche per ridurre i rischi legati ai disastri naturali e contribuire al benessere delle generazioni attuali e future. "La sopravvivenza di una città non dipende dalla rettitudine degli uomini che vi risiedono, ma dai boschi e dalle paludi che la circondano", così scriveva Henry David Thoreau.

In primo luogo, boschi e risorse forestali hanno plasmato e plasmano il clima della Terra, garantendo le condizioni per la vita così come la si conosce. La diffusione di piante terrestri contribuì ad un generale raffreddamento del clima della Terra, riducendo l'effetto serra tramite la rimozione di anidride carbonica e incrementando la quota di ossigeno attraverso il processo di fotosintesi (Lenton *et al.*,2012). Svolgono un ruolo determinante anche nell' evoluzione del paesaggio e dei suoli, un tempo molto diversi da come si presentano oggi (Gibling *et al.*,2012).

Le foreste sono state un centro fondamentale per lo sviluppo delle civiltà umane, fornendo materiali legnosi e non legnosi necessari al riscaldamento, alla costruzione di utensili, attrezzature e abitazioni, al sostentamento e all'alimentazione. Qui si sono sviluppati miti, leggende e i primi riti religiosi. Ancora oggi circa 1,6 miliardi di persone, tra cui oltre 2000 culture indigene, dipendono dalle foreste per la loro sussistenza, inclusa la protezione e il riparo (FAO,2020).

Ai beni materiali si aggiungono una serie di servizi vitali e imprescindibili, definiti "ecosistemici" perché garantiti dalla biodiversità che l'habitat forestale racchiude in sé (Tab. 1) … La regolazione di parassiti e patogeni, il mantenimento della fertilità del suolo e della sua integrità (erosione e fenomeni di frana), la depurazione e regimazione delle acque, la regolazione del ciclo del carbonio, dell'azoto e del fosforo, il mantenimento di habitat preziosi per le specie di flora e fauna di pregio, e per ultimi, benefici non tangibili come il valore estetico, culturale e ricreativo.

Approvvigionamento	**F1**	Colture
	F2	Foraggio, pascolo
	F3	Specie animali cacciabili e pesci
	F4	Materie prime (legno, fibre...)
	F5	Prodotti non legnosi commestibili (funghi, frutti, erbe...)
	F6	Piante medicinali
	F7	Risorse genetiche
	F8	Acqua potabile
Regolazione	**R1**	Sequestro del Carbonio
	R2	Regolazione del clima locale (piogge/temperatura)/Qualità aria
	R3	Regolazione del ciclo dell'acqua (ricarica falde)
	R4	Purificazione dell'acqua
	R5	Regolazione fenomeni erosivi/protezione da dissesti geologici
	R6	Protezione da dissesti idrologici (alluvioni, piene...)
	R7	Impollinazione
	R8	Controllo biologico (insetti nocivi, patogeni...)
	R9	Habitat per la biodiversità
Culturali	**C1**	Valore estetico
	C2	Valore turistico-ricreativo
	C3	Valore culturale, spirituale, educativo

Tabella 1 _ Servizi ecosistemici forniti dall'ecosistema. Fonte: Millenium Ecosystem Assessment 2005.

1.2 L'ecosistema foresta

Le foreste sono gli ecosistemi biologicamente più diversificati sulla Terra in termini di diversità genetica, di specie e di paesaggio; i biologi ritengono che ospitino oltre l'80% delle specie terrestri di animali e piante (Burley,2002). Un ecosistema è l'insieme degli organismi viventi e delle sostanze non viventi con le quali i primi stabiliscono uno scambio di materia e di energia, in un'area delimitata, come ad esempio un lago, un prato o un bosco (Enciclopedia Treccani); è importante fare un rimando a quella che è la definizione di ecosistema per poter comprendere meglio cos'è una foresta nel suo complesso e perché è così importante. Riducendo un po'

la scala, quindi, è possibile definire anche cos'è una foresta: insieme di piante arboree distribuite su una vasta superficie di terreno, che differisce dal concetto di bosco per estensione, abbondanza e regolarità della vegetazione (Enciclopedia Treccani). Secondo la definizione stabilita dalla FAO con il termine foresta si intende un'area vasta più di 0,5 ettari, caratterizzata da alberi più alti di 5 metri e da una copertura arborea superiore al 10%.

La copertura vegetale prende la forma di "foresta" quando i fattori climatici, il suolo e l'azione dell'uomo creano le condizioni tali per cui gli alberi siano le specie vegetali dominanti. Gli alberi sono il risultato dell'accrescimento, la strategia attuata dalle piante per occupare lo spazio biologico a disposizione, così da preservare il proprio genotipo, ricercare luce, acqua e nutrienti ed esporre gli organi riproduttivi per impollinazione e disseminazione. L'accrescimento è limitato dalla competizione per le risorse che scaturisce inevitabilmente con gli altri individui del popolamento (Fig. 1); in una popolazione sono infatti le dimensioni (diametro e altezza) più che non l'età a controllare i rapporti di competizione, per questo la distribuzione statistica delle dimensioni degli alberi rappresenta una caratteristica interessante per inquadrare un popolamento forestale.

Figura 1 _ Confronto tra diverse modalità di accrescimento di latifoglie in relazione allo spazio disponibile.

La capacità portante di un ecosistema è perciò condizionata dal numero di individui presenti in una certa zona e dalle loro dimensioni, due caratteri inversamente proporzionali se riferiti alla limitatezza delle risorse disponibili in un territorio.

1.3 Lo stato delle foreste

1.3.1. Situazione a livello mondiale

Nell'ultimo report della FAO sullo stato delle foreste "The State of the World's Forest 2020, Forest Biodiversity and People" si riconosce alle foreste una copertura delle terre emerse pari al 31%, corrispondente a un'estensione procapite (per ogni cittadino del pianeta) di 0,52 ha/abitante. La distribuzione non è però omogenea dal momento che più della metà (54%) sono ospitate in soli 5 Paesi, quali la Federazione Russa, il Brasile, il Canada, gli USA e la Cina (Fig. 2).

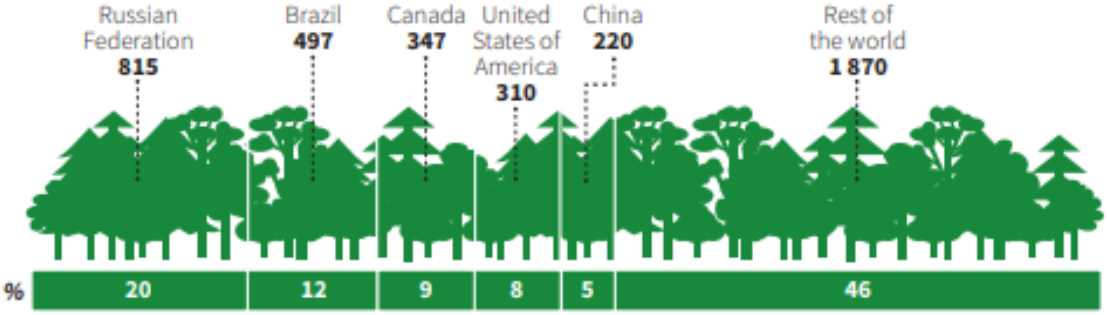

Figura 2 _ Distribuzione delle coperture forestali a livello mondiale (milioni di ha). Fonte: FRA 2020, FAO.

Il 45% di queste si trova nella fascia tropicale, seguite dalla fascia boreale (27%), temperata (16%) e subtropicale (11%). Le foreste vegetano infatti nelle aree in cui il suolo e il clima consentono agli alberi di coprire con continuità il terreno; climi diversi danno origine a diverse foreste. La distribuzione delle foreste sul pianeta è fortemente influenzata dalla temperatura e dalle precipitazioni, il diverso connubio tra questi due fattori ha effetti biogeografici che scaturiscono nella varietà dei Biomi terrestri (Fig. 3).

La foresta tropicale è uno dei più antichi ecosistemi, non ha subito l'effetto delle glaciazioni e s'è sviluppata in un clima favorevole con temperature piuttosto alte, minime escursioni termiche nell'arco dell'anno ed elevate precipitazioni, senza interruzioni di siccità dovute al regime monsonico: questo ecosistema accoglie infatti il più alto tasso di biomassa vegetale tra i Biomi terrestri.

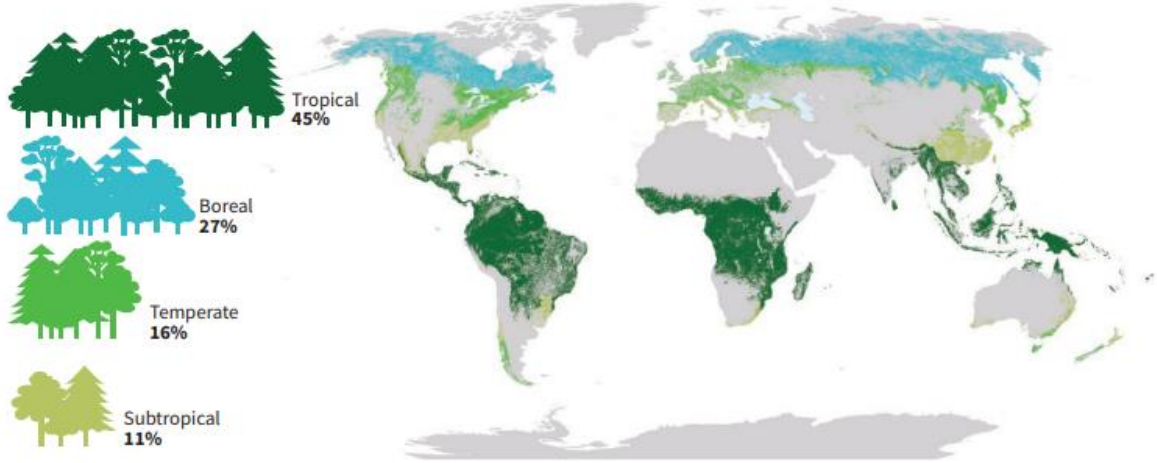

Figura 3 _ Distribuzione dei principali Biomi forestali. Fonte: FRA 2020, FAO.

A incidere in maniera prepotente sulla condizione delle foreste v'è anche e soprattutto la mano umana. Sempre secondo il rapporto della FAO, quasi la metà di tutte le aree forestate è relativamente intatta, mentre il 9% si trova frammentato con una connettività minima o nulla. Le foreste pluviali tropicali e quelle boreali di conifere sono le più integre e gli ultimi Biomi che ospitino ancora "foreste primarie": i popolamenti forestali di specie arboree autoctone rigenerate per via naturale che giocano un ruolo fondamentale nel conservare specie uniche, soprattutto in quelle realtà dove la vegetazione si presenta frammentata (Watson *et al.*, 2018).

È stato calcolato che dal 1990 circa 420 milioni di ettari di foresta siano stati persi per convertire la destinazione d'uso dei suoli; tuttavia, il tasso di deforestazione è diminuito negli ultimi decenni passando dai 16 milioni di ettari per anno nel 1990 ai 10 milioni di ettari per anno tra il 2015 e il 2020 (FAO, 2020 - Fig.4).

Il principale responsabile è l'espansione del settore agricolo, in particolare l'allevamento di bestiame, alla ricerca di nuovi pascoli per alimentare gli animali, e l'espansione delle coltivazioni di soia e olio di palma.

Figura 4 _ Sviluppo dei processi di deforestazione e riforestazione dal 1990 al 2020 (milioni di ettari per anno). Fonte: FRA 2020,FAO.

Un paradosso dato dal fatto che la resilienza del sistema alimentare umano, e la sua capacità di adattarsi ai cambiamenti futuri, risiedano proprio nella biodiversità delle foreste: specie arboree e arbustive resistenti alla siccità per combattere la desertificazione, le specie di insetti, pipistrelli e uccelli (abitanti delle foreste) che impollinano le colture agricole, alberi con sviluppati sistemi radicali che trattengono i versanti e impediscono l'erosione dei suoli, le specie di mangrovie che incrementano la resilienza delle aree costiere contro le alluvioni.

1.3.2. Situazione a livello nazionale

In Italia le foreste sono in espansione: dal secondo dopoguerra la superficie forestale italiana è aumentata costantemente passando da 5,6 a 11,1 milioni di ettari. Ad oggi la percentuale di territorio coperta da foreste ha raggiunto un valore del 38% dell'intera superficie nazionale (Fig. 5), un valore superiore anche a quello di paesi tradizionalmente forestali come Germania e Svizzera.

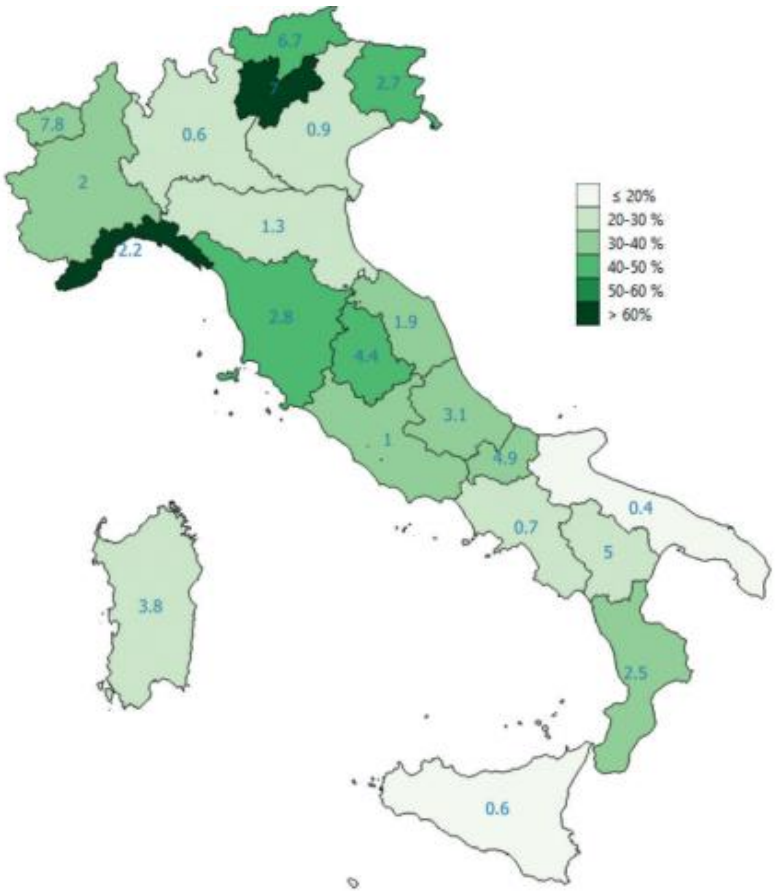

Figura 5 _ Mappa delle regioni italiane per indice di boscosità (%), con indicata la superficie di bosco per abitante (migliaia di m²). Fonte: INFC 2015.

Il patrimonio forestale italiano comprende un'ampia varietà di tipologie forestali: sono state rilevate nell'ultimo inventario nazionale un numero pari a 180 specie forestali, di cui le prime quattro concorrono al 50% del volume complessivo dei boschi.

Si tratta di tre specie di latifoglie e una conifera: faggio (*Fagus sylvatica*), abete rosso (*Picea abies*), castagno (*Castanea sativa*) e cerro (*Quercus cerris*). Con l'aggiunta di altre sette specie si supera la quota del 75%.

I tre quarti della superficie forestale sono composti da soprassuoli di tipo coetaneo, quasi il 60% infatti possiede una struttura monoplana, caratterizzata da un piano dominante di piante coetanee ed eliofile. Il 17 % è a struttura biplana, mentre solo la parte restante è multiplana, quella auspicata dallo storico selvicoltore Lucio Susmel.

Per quanto riguarda invece i tipi di governo, ovvero il metodo attraverso il quale si rinnova il soprassuolo sottoposto a taglio, ceduo e fustaia occupano la stessa superficie, rispettivamente il 42,3 % e il 41,9% del totale. I boschi italiani cubano una provvigione media pari a 165,4 metri cubi a ettaro, valore generalmente superato nelle regioni del Nord. Si stima infine un incremento percentuale annuo pari a 2,5%, che corrisponde a 4,2 tonnellate di anidride carbonica assorbite da un ettaro di bosco in un anno.

1.4 Il Ciclo del carbonio

Il generale aumento della superficie forestale che ha interessato tutto il territorio nazionale ha generato un beneficio in termini di aumento della biomassa forestale e, di conseguenza, un aumento del carbonio stoccato, passando da 140 tonnellate a 157 tonnellate a ettaro (FRA 2020, FAO). Le foreste scambiano infatti grandi masse di questo elemento con l'atmosfera, rivestendo un ruolo importante all'interno del ciclo del carbonio sul nostro pianeta. Attraverso il processo di fotosintesi annualmente trasferiscono 120 Petagrammi di carbonio, presenti in atmosfera come anidride carbonica, alla componente biotica dove sono immagazzinati come carboidrati (GPP-Gross Primary Productivity) (Ruimy *et al.*,1996). La produttività netta del bioma (NBP) è però di molto inferiore, se non quasi nulla: 60 Pg sono rilasciati durante la respirazione delle piante stesse, 55 Pg sono rilasciati dalla respirazione eterotrofa che avviene a carico della sostanza organica da parte degli organismi decompositori e 4 Pg sono persi per disturbi vari che colpiscono la foresta (incendi, morte naturale…). Questi flussi sono mostrati in Figura 6.

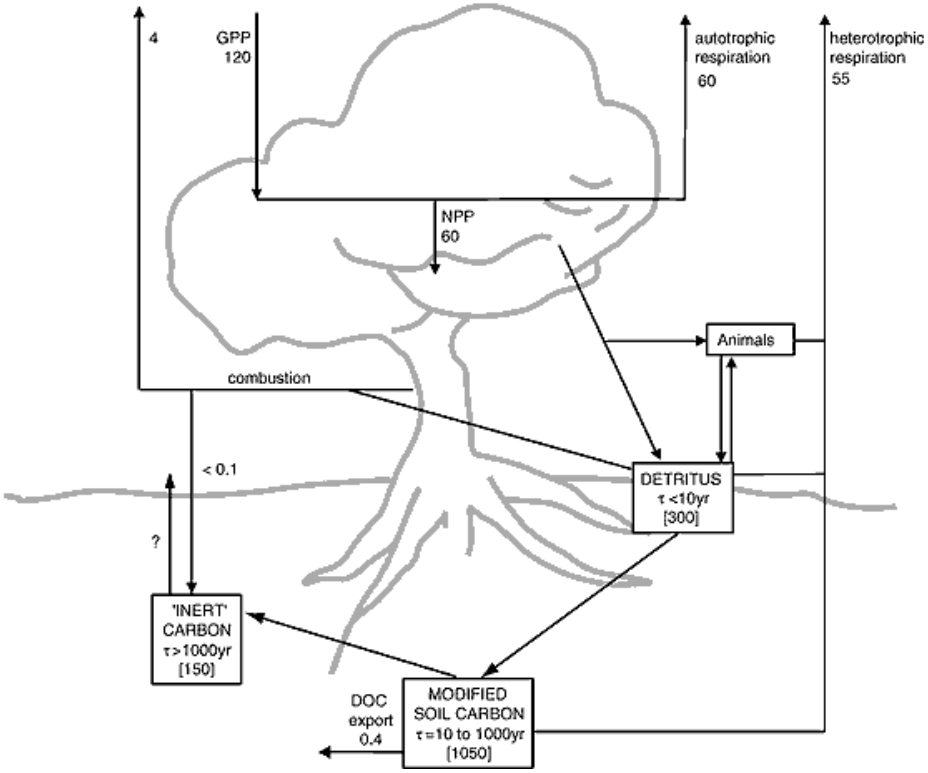

Figura 6 _ Ciclo del C tra foreste e atmosfera (in Pg)

Il bilanciamento tra carbonio sequestrato e carbonio restituito mantiene costante, e pari allo 0,03%, il contenuto di anidride carbonica in atmosfera. Bisogna infatti considerare che oltre alle piante terrestri sul pianeta sono presenti molti altri organismi autotrofi, in particolare il fitoplancton, che assorbe ogni anno una quantità netta di 40 Pg. Nonostante solo una piccola parte del carbonio globale ($40x10^3$ Pg) sia conservato nei comparti attivi (cioè con minore tempo di residenza), quali l'atmosfera e gli organismi viventi, è proprio attraverso questi che si realizzano i flussi di scambio maggiori, a testimonianza della stretta relazione che questo elemento ha con la vita sul nostro pianeta.

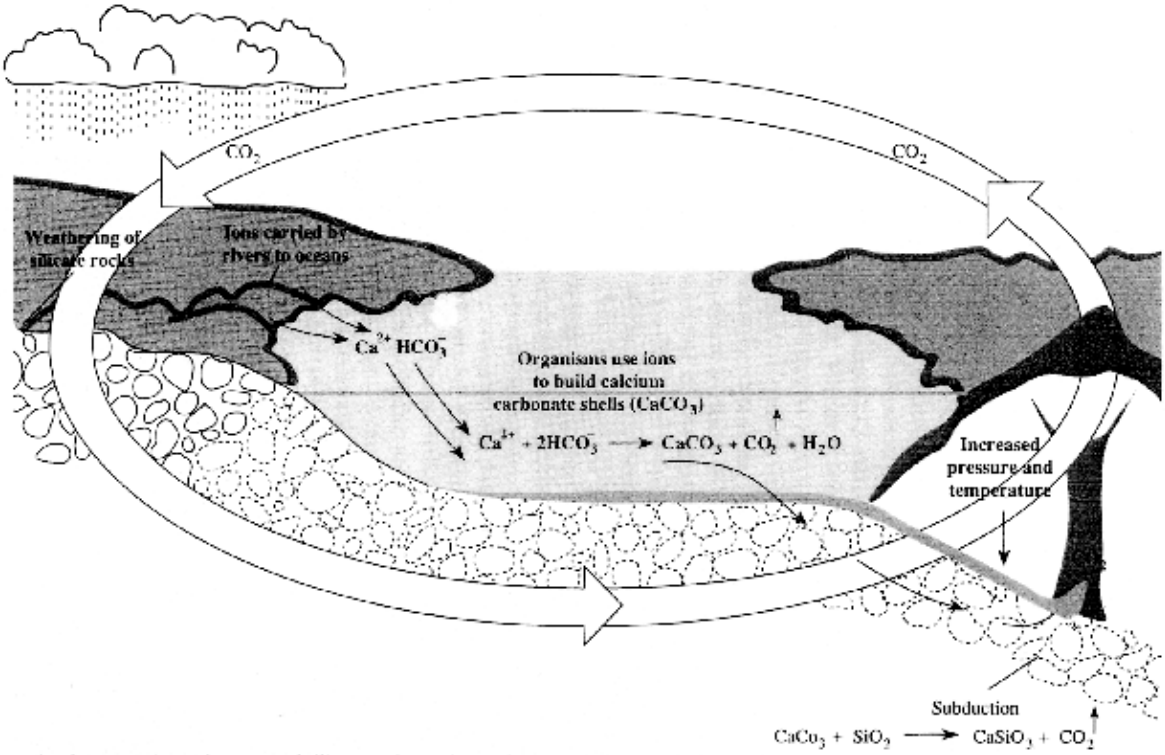

Figura 7 _ Ciclo del C tra oceani e atmosfera

Si stima che sulla Terra siano presenti 10^8 Pg di carbonio, di cui la grande maggioranza è contenuta nelle rocce sedimentarie sotto forma di carbonati ($6,5x10^7$ Pg) e composti organici ($1,56x10^7$ Pg). Senza la vita sulla Terra la concentrazione di anidride carbonica in atmosfera sarebbe essenzialmente determinata dal ciclo che coinvolge oceani e atmosfera (Fig. 7) (Shlesinger,1991).

A livello del sistema aria-superficie delle acque, una quota di CO_2 proporzionale alla pressione parziale del gas si scioglie nelle acque superficiali producendo acido carbonico. Quest'ultimo rende leggermente acide le piogge, capaci così di solubilizzare i minerali delle rocce con cui entrano in contatto durante il loro deflusso. Gli ioni asportati, tra cui il calcio, raggiungono i mari e reagiscono con i carbonati formando carbonato di calcio (calcare). Grazie alla bassa solubilità del carbonato di calcio si realizza una "pompa oceanica" che rimuove anidride carbonica dall'atmosfera per depositarla in forma di carbonati nei sedimenti oceanici (calcite). L'efficacia della pompa è inoltre incrementata dai molti organismi marini che si costruiscono scheletri con il carbonato di calcio. Infine, lentissimi movimenti di subduzione portano i sedimenti nella crosta terrestre dove avvengono i fenomeni di metamorfismo: il carbonato è riconvertito in silicato mentre l'anidride carbonica ritorna in atmosfera attraverso l'attività vulcanica.

Quella parte di carbonio organico che nel corso dei miliardi di anni è scampato all'ossidazione (parti di piante e animali rimasti sepolti in paludi o sedimenti marini in cui erano assenti sia l'ossigeno che i decompositori anaerobi) compone il comparto dei combustibili fossili (carbone, petrolio, gas), serbatoio stimato di 4000 Pg di carbonio. Tuttavia, è nei sedimenti che si trova la quantità maggiore di carbonio non ossidato (mille volte quello contenuto nei combustibili fossili), non adoperabile però per la produzione di energia da parte dell'uomo.

Per quanto riguarda il comparto forestale, lo stock totale di carbonio s'è ridotto nel corso dei decenni, passando da 668 Pg nel 1990 a 662 Pg nel 2020 (FRA 2020, FAO). La quota maggiore è immagazzinata nella biomassa vivente (44%) e nella sostanza organica del suolo (45%), mentre è presente in quota minore nel legno morto (4%) e nella lettiera (6%).

Sebbene i microrganismi presenti nel suolo costituiscano meno di 1 Pg di carbonio a livello di serbatoi, la loro attività biologica, intesa come decomposizione della

materia organica o "respirazione dei suoli", rappresenta fino al 40% delle emissioni biogeniche annue di CO_2 (quella prodotta dall'attività respiratoria della biosfera, costituendo coi suoi 70 Pg a^{-1} il secondo più importante flusso di carbonio esistente tra atmosfera e biosfera dopo la GPP) (Raich et Schlesinger,1992). A confronto, gli esseri umani attraverso lo sfruttamento dei combustibili fossili e la deforestazione generano un flusso pari a 7 Pg a^{-1}. Se a questo si aggiunge che il suolo rappresenta il più importante serbatoio terrestre di carbonio (1500 Pg) dopo i giacimenti fossili e il serbatoio terrestre più influenzabile dall'attività umana, si comprende l'incredibile ruolo che la respirazione dei suoli svolge nel condizionare la concentrazione di CO_2 in atmosfera. In particolare, con il cambiamento climatico in atto ci si aspetta un incremento del tasso di respirazione dei suoli dato dall'incremento delle temperature (Raich and Schlesinger,1992), con risvolti imprevedibili sul ciclo globale del carbonio.

1.5 La respirazione nei suoli

La respirazione del suolo, fatta di processi autotrofi (respirazione radicale) ed eterotrofi (decomposizione della sostanza organica), è la parte più rilevante della respirazione degli ecosistemi forestali, rappresenta dal 60 al 90% della respirazione totale dell'ecosistema (Goulden *et al.*,1996; Longdoz *et al.*,2000). Questo contributo può variare in base alla biomassa presente (Longdoz *et al.*,2000), al tipo di copertura vegetale (Janssens *et al.*,1999), o all'età delle piante (Buchmann,2000).

In generale, la respirazione è il processo metabolico adoperato dagli organismi viventi per produrre l'energia necessaria a compiere le funzioni vitali: sfrutta la differenza di potenziale redox tra composti ridotti, che fungono da donatori di elettroni, e composti ossidati, che fungono da accettori. Il flusso di elettroni serve a concentrare ioni idrogeno in corrispondenza di un lato della membrana cellulare così da generare un potenziale di membrana (gradiente di cariche protoniche), sfruttando il flusso di ritorno degli ioni la proteina di membrana "ATP-sintasi"

sintetizza ATP. Ossidare la sostanza organica a CO_2 rappresenta una delle vie predilette per la produzione di energia dato il basso potenziale redox della coppia "carboidrati-anidride carbonica" (-0,43 V), infatti, tanto più è grande la differenza di potenziale redox tra donatori e accettori della catena di trasporto degli elettroni, tanto più è grande il gradiente elettrochimico di membrana realizzabile, e quindi l'energia che si genera.

La respirazione della materia organica operata dai microrganismi del suolo si inserisce all'interno dei due principali passaggi che caratterizzano il ciclo del carbonio in natura (Fig. 8): l'organicazione del carbonio minerale contenuto nella CO_2 atmosferica, attuata dagli organismi fotosintetici (fase anabolica), e la riconversione del carbonio organico allo stato minerale (fase catabolica), realizzata dai microrganismi che degradando i composti organici pervenuti al suolo. L'attività biochimica di questi ultimi, che traggono energia dall'ossidazione della sostanza organica, consente che gli elementi, necessari alla nutrizione delle piante, assumano uno stato chimico compatibile con l'assorbimento da parte delle radici. Si stabilisce così una fondamentale interdipendenza tra le piante ed i microrganismi del suolo che consente la regolare circolazione dei nutrienti.

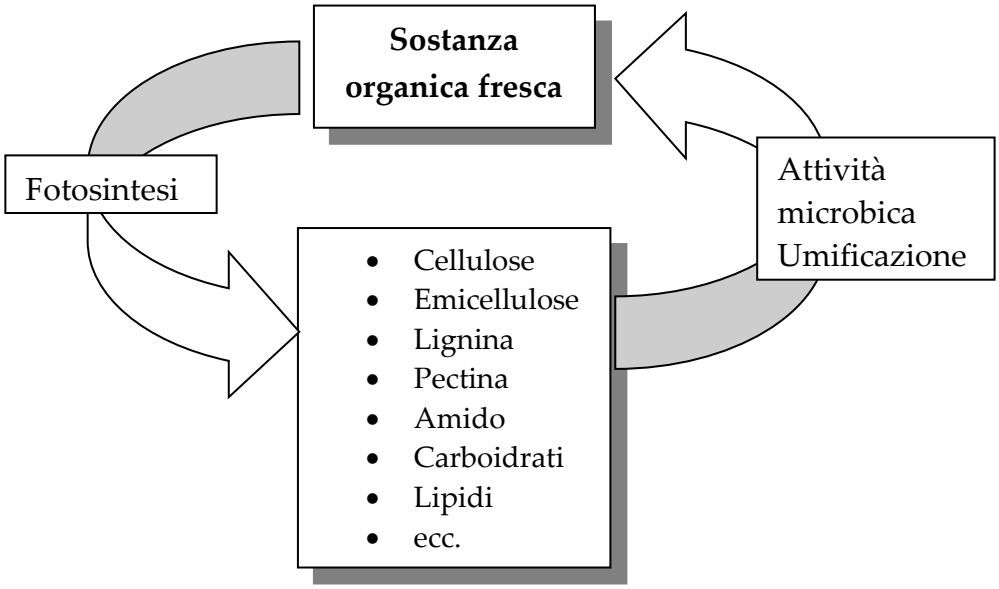

Figura 8 _ Ciclo del C in natura (Florenzano,1983)

1.5.2 La sostanza organica

La sostanza organica è un complesso miscuglio di composti del carbonio, che può essere definita come l'insieme di tutto il materiale organico di origine animale/vegetale, vivente o morto e in qualsiasi stadio di decomposizione, che si trova all'interno del suolo (esclusa la macrofauna), e dei residui animali e vegetali (non viventi) presenti sulla superficie (FAO,2005; Badlock & Broos,2011). Pur rappresentando solo una piccola percentuale del suolo (da 1% nei suoli agricoli fino 8% nei suoli forestali) ne controlla molte delle proprietà chimico, fisiche e biologiche (Tab. 2), risultando il costituente più importante e l'indicatore chiave del suo stato di qualità. Si stima che il contenuto di carbonio della sostanza organica sia pari al 58 % (Van Bemmelen factor), questo è però un valore medio che varia in base al tipo di suolo.

PROPRIETÀ	OSSERVAZIONI	EFFETTO SUI SUOLI
Colore	Impartisce il tipico colore scuro ai suoli	Facilita il riscaldamento e il mantenimento del calore
Biodiversità del suolo	La frazione organica nel suolo rappresenta una sorgente di cibo per un'ampia gamma di organismi	Molte funzioni associate alla sostanza organica sono legate alle attività della flora e della fauna del suolo
Ritenzione idrica	Può trattenere acqua fino a 20 volte il suo volume	Aiuta nel prevenire fenomeni di disidratazione dei suoli. Può aumentare in modo significativo la capacità dei suoli sabbiosi di trattenere l'umidità
Combinazione con i minerali delle argille	Consolida le particelle di suolo in unità strutturali chiamate aggregati	Permette lo scambio gassoso, stabilizza la struttura del suolo e aumenta la sua permeabilità
Riduzione della densità di suoli minerali	La sostanza organica normalmente ha una bassa densità, per ciò l'aggiunta di questi materiali alleggerisce il suolo minerale	Una più bassa densità è normalmente associata ad un aumento nella porosità del suolo grazie alle interazioni tra le frazioni organiche e quelle inorganiche
Solubilità in acqua	È generalmente poco solubile a causa della capacità di legame con le argille	Poca sostanza organica viene persa attraverso il dilavamento
Chelazione	Forma complessi stabili con Cu^{2+}, Mn^{2+} e Zn^{2+} e altri cationi polivalenti. Può formare complessi stabili con molti metalli, influenzandone la mobilità	Può aumentare la disponibilità dei micronutrienti per le piante e diminuire la tossicità degli elementi nocivi
Capacità tampone	La sostanza organica mostra un effetto tampone in *range* leggermente acidi, neutri ed alcalini	Aiuta a mantenere costante il pH rispondendo a variazioni acide e/o alcaline
Scambio cationico	Contribuisce ad aumentare la capacità di scambio cationico del suolo	Dal 20 al 70% della CSC di molti suoli è associata alla sostanza organica
Mineralizzazione	La decomposizione della sostanza organica produce CO_2, NH_4^-, NO_3^-, PO_3^{4-} e SO_4^{2+}	Sorgente di nutrienti per la crescita delle piante
Stabilizzazione dei contaminanti	La stabilizzazione dei materiali organici in sostanze umiche include i composti organici volatili	Può influenzare la bioattività, la persistenza e la biodegradabilità di molti contaminanti organici

Tabella 2 _ Proprietà della sostanza organica
(modificato da Nortcliff e Amlinger, 2001)

È il risultato di due processi opposti attivi nel suolo: la mineralizzazione (processo distruttivo), che comprende i processi di decomposizione dei residui animali e vegetali con trasformazione dei composti organici in sostanze minerali semplici, e quindi rilascio di C, e l'umificazione (processo costruttivo), che prevede la ripolimerizzazione di composti complessi non degradabili e la formazione di sostanze umiche, e quindi l'accumulo e la stabilizzazione di C nel suolo.

Frutto di questi due processi, la sostanza organica inglobata negli orizzonti superficiali risulta, pertanto, costituita da un insieme di prodotti variamente decomposti e resintetizzati (Persicani,1989). Un quadro schematico di queste presenze integrate comprende:

- fibre organiche parzialmente riconoscibili;
- prodotti intermedi in cui prevalgono i materiali meno solubili, come la lignina e le resine, mentre risultano già fortemente decomposti i carboidrati più solubili;
- composti umici (acidi umici, acidi fulvici ed umina in rapporto variabile);
- sostanze in fase di mineralizzazione più o meno spinta (Sequi 1989).

In base al livello di trasformazione biologica della lettiera, gli orizzonti organici sono raggruppati in tre orizzonti diagnostici mostrati in Figura 9: OL, OF e OH (A. Zanella *et al.*,2011). Il primo, il più superficiale, consiste di residui vegetali la cui struttura è ancora riconoscibile ad occhio nudo e di un quantitativo di composti humici inferiori al 10 % del volume. Il secondo è composto da residui vegetali sminuzzati, trasformati ma ancora riconoscibili a occhio nudo, mescolati a una quantità variabile di sostanza organica fine (composti humici) inferiore al 70 % del volume. Il terzo, quello posto alla profondità maggiore, si presenta come un materiale omogeneo di colorazione scura, dove i composti humici superano il 70 % del volume. Il materiale organico può concentrarsi inoltre nel sottostante orizzonte A dove si integra più o meno intimamente, in funzione dell'attività biologica, alla componente minerale.

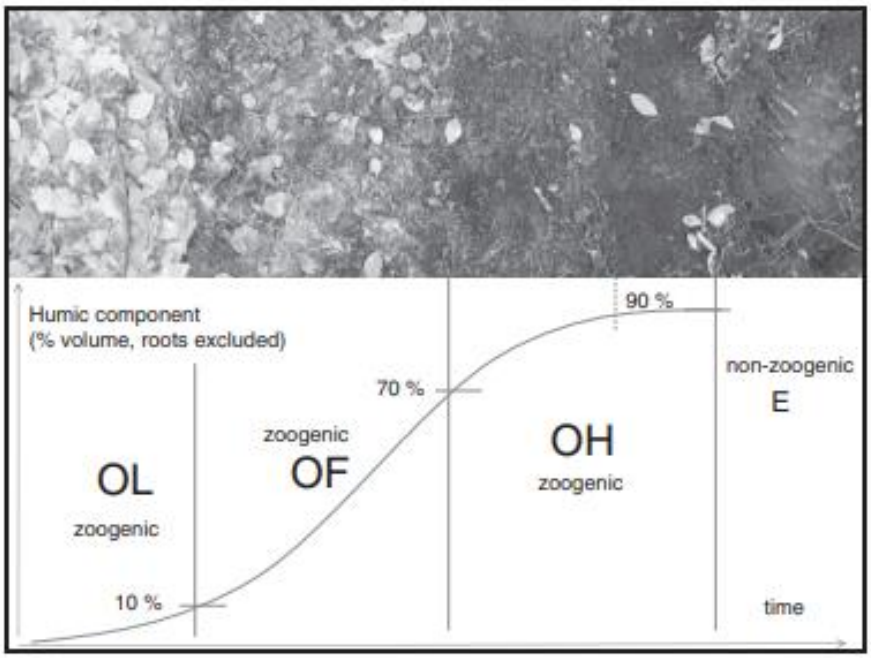

Figura 9 _ Classificazione degli orizzonti organici in base al livello di trasformazione biologica della lettiera

I processi di decomposizione hanno inizio quando i residui vegetali e animali vengono depositati al suolo. Qui compongono la cosiddetta "lettiera", costituita appunto di sostanza organica fresca. I processi seguono dinamiche diverse che dipendono da fattori abiotici, quali clima, altitudine, substrato e tipologia di suolo (Drewnik,2006), così come da quelli biotici, quali il tipo di vegetazione presente e l'attività dei microrganismi del suolo (Blonska *et al.*,2013); è bene sottolineare che nella composizione istologica vegetale le proporzioni reciproche dei costituenti variano in funzione delle specie, ne deriva, quindi, che l'influenza della sostanza organica fresca può cambiare in funzione delle specie vegetali prevalenti in termini sia quantitativi sia qualitativi. L'equilibrio che si genera tra l'apporto di detriti organici morti alla lettiera e la loro mineralizzazione e trasformazione determina le proprietà dei suoli, inclusa l'acidità, la quantità di sostanza organica, il contenuto di azoto e degli altri nutrienti utili alle piante, così come influenza i processi di pedogenesi (Mareschal *et al.*,2010; Ranger and Nys,1994). Un'enfasi particolare è riservata al ruolo svolto dalle lettiere forestali come riserve locali di carbonio

organico, protezione meccanica contro l'erosione e filtro per l'accumulo degli inquinanti atmosferici (Szopka *et al*.,2011,2013).

I componenti della lettiera sono suddividibili in almeno cinque classi principali:

1. carboidrati (amido, cellulosa ed emicellulosa);
2. lignine ed humus;
3. proteine ed aminoacidi;
4. lipidi, cere e resine;
5. acidi nucleici.

Circa il 90% dei tessuti vegetali risulta costituito dai primi due gruppi, rappresentati da sostanze ternarie (carbonio, idrogeno e ossigeno), caratterizzati da una maggiore complessità strutturale per quanto riguarda le lignine rispetto ai carboidrati: polimeri aromatici dall' alto peso molecolare, composti da unità di fenil-propano variamente sostituite. Questa caratteristica è all'origine del loro diverso comportamento nella fase di decomposizione biochimica: i carboidrati conferiscono un contributo maggiore alla mineralizzazione rispetto alle lignine, le quali sono maggiormente coinvolte nel processo di umificazione, andando a formare una fonte rilevante dei composti aromatici costituenti l'humus. Le lignine, come i lipidi, sono refrattarie alla degradazione microbica, insolubili in acqua, in numerosi solventi organici ed acidi forti. Tra i carboidrati la cellulosa è il costituente più abbondante dei tessuti vegetali e la maggiore fonte di carbonio nel terreno. La quantità di carbonio fissato annualmente sulle terre emerse, sotto forma di cellulosa ammonta a circa 0,01 Pg. La struttura chimica è rappresentata da un insieme di poliosidi costituiti da lunghe catene di unità di β-D-glucopiranosio, riunite da legami glucosidici. La struttura fisica variabile ne determina una diversa sensibilità all'attacco biologico.

Gli elementi più solubili sono trasportati nel suolo per dilavamento, mentre i residui sono incorporati nel suolo dai processi di bioturbazione degli animali (lombrichi,

formiche, termiti, roditori, uomo). Un importante apporto arriva dai turnover radicali. Nei suoli forestali l'apporto principale di C è dovuto alla lettiera, mentre negli ecosistemi di prateria i due terzi di C derivano dalla degradazione delle radici. I composti più facilmente degradabili quali zuccheri semplici, amminoacidi, acidi organici, alcune proteine e molti polisaccaridi sono utilizzati in poche ore o pochi giorni. La degradazione della cellulosa può impiegare settimane, mentre lignine e cere possiedono tassi di degradazione che possono richiedere da mesi ad anni. Le sostanze minerali che si generano sono in parte liberate in atmosfera come gas (CO_2, H_2O, NH_3), una parte è assorbita dalle radici oppure incorporata nei tessuti microbici.

La frazione più o meno stabile di sostanza organica che rimane dopo che è stata degradata la maggior parte dei residui animali e vegetali è il cosiddetto "humus". Si presenta generalmente di colore bruno (Brady,1990) ed è composto da una miscela eterogenea di elementi dall'alto peso molecolare per la quale non è possibile individuare una singola struttura chimica, perché risultato di processi di condensazione e ripolimerizzazione. Le tre frazioni che lo compongono vengono distinte in base alla solubilità in acidi ed alcali: acidi fulvici (AF), solubili in alcali e acidi, acidi umici (AU), solubili solamente in alcali, e umina, frazione insolubile. Questi contengono numerosi gruppi carbonilici e carbossilici che gli consentono di formare aggregati con le componenti minerali (chelazione dei metalli): i complessi organo-minerali, interessanti nella dinamica di decomposizione della materia organica, sono in grado di adsorbire gli enzimi microbici, stabilizzando la struttura terziaria della proteina rendendola più resistente alla degradazione termica e microbica, rendendo il suolo un vero e proprio sistema enzimatico extra-cellulare (Burns,1982; Nannipieri *et al.*,1990). Attraverso il processo completo di umificazione (mineralizzazione indiretta) la liberazione degli elementi nutritivi avviene con maggiore gradualità evitando, quindi, la rapida liberazione degli elementi nutritivi e la loro dispersione dal sistema senza poter essere efficacemente immagazzinati.

Per queste motivazioni la frazione umica si può definire come un importante deposito di carbonio organico non rapidamente disponibile per l'atmosfera (sink).

Il terzo gruppo (proteine e amminoacidi) è costituito da macromolecole di amminoacidi, sostanze quaternarie (carbonio, idrogeno, ossigeno ed azoto), la cui presenza nei tessuti vegetali è compresa tra l'1 ed il 15%.

Per quanto concerne il quarto gruppo (lipidi, cere e resine), decisamente idrofobico, esso entra nella composizione istologica vegetale in proporzioni variabili comprese tra l'1 e l'8 %.

Gli acidi nucleici, infine, sono costituiti da acido deossiribonucleico (DNA) ed acido ribonucleico (RNA) di derivazione prevalentemente vegetale: si tratta di lunghe catene di zuccheri e residui fosfato.

1.5.3 La respirazione della sostanza organica

Esistono cinque principali fonti biogeniche di CO_2 nel suolo (Kuzyakov,2006), mostrate in Figura 10:

- la decomposizione microbica della sostanza organica (SOM-Soil Organic Matter) in suolo non rizosferico, detta "respirazione basale";
- decomposizione microbica della sostanza organica indotta dalla presenza di prodotti radicali o residui vegetali ("rhizosphere priming effect");
- decomposizione microbica della necromassa vegetale;
- decomposizione microbica delle rizodeposizioni (rhizomicrobial respiration);
- la respirazione radicale.

La respirazione basale è l'unica fonte di CO_2 presente in tutti i suoli contenenti sostanza organica, tutte le altre quattro fonti (rhizosphere-derived CO_2) infatti sono legate alla presenza di vegetazione, sebbene solo l'ultima sia direttamente dovuta alla respirazione degli autotrofi.

È stato infatti dimostrato come la deposizione da parte delle radici di composti organici facilmente disponibili ("rhizosphere priming effect") o l'apporto di residui vegetali freschi possa incrementare notevolmente l'attività microbica del suolo e dunque la decomposizione della sostanza organica (Kuzyakov *et al.*, 2000, 2002).

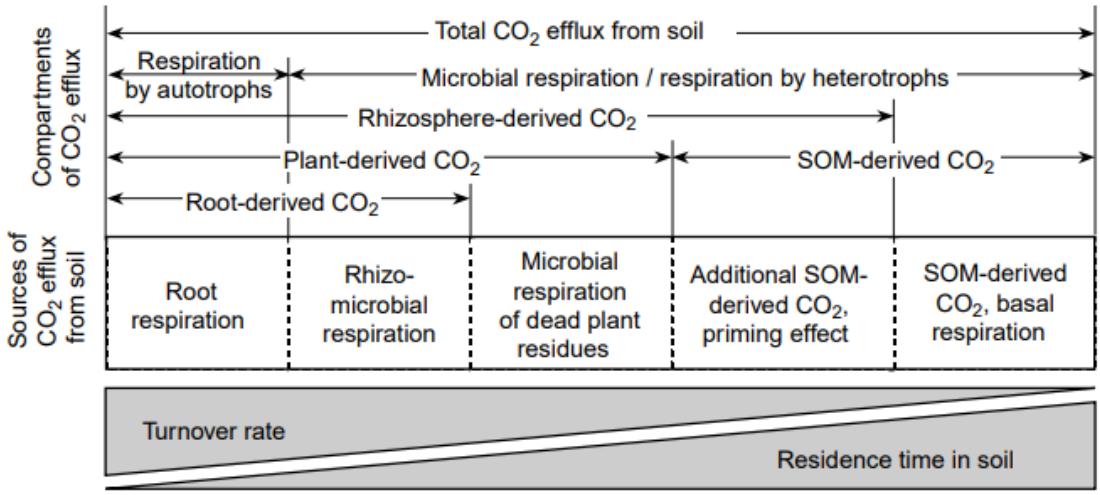

Figura 10 _ Cinque principali fonti biogeniche di CO_2 nel suolo

A distinguere le cinque fonti sono i tassi di ricambio (o turnover) del C nei rispettivi serbatoi ("C pools"). Tra i fattori che più direttamente influenzano il decorso dei processi di degradazione della sostanza organica sono certamente da ricordare quelli che concorrono alla formazione del pedoclima locale (in primo luogo la temperatura e le precipitazioni atmosferiche), oltre alle caratteristiche del suolo quali la struttura, la porosità, la tessitura e la granulometria.

L'attività microbiologica di mineralizzazione viene inoltre influenzata dalle condizioni ecologiche ottimali degli organismi che vivono negli strati superficiali del suolo, che si configurano, essenzialmente, in temperature mediamente elevate ed umidità ottimale (vicino alla capacità di campo) in rapporto al fabbisogno di ossigeno necessario ai processi ossidativi di decomposizione.

Un elevato grado di umificazione del suolo è generalmente raggiunto in condizioni climatiche di tipo continentale (esempio: paesi del Nord Europa), caratterizzate da un'alternanza stagionale delle condizioni termometriche e pluviometriche.

In condizioni climatiche come quelle tipiche di zone caldo-umide equatoriali, invece, l'attività microbiologica è particolarmente intensa e la mineralizzazione procede molto velocemente. In tali condizioni, se la sostanza organica non viene continuamente reintegrata, il terreno presenta un basso contenuto di humus.

Le esperienze condotte da Duchafour (1970) a questo riguardo indicano che in un suolo agrario la sostanza organica fresca incorporata scompare per il 60-70% nell'arco di due anni (mineralizzazione biologica diretta), mentre il restante 30-40% viene distrutto in tempi variabili da 15 a 20 anni (umificazione e mineralizzazione biochimica indiretta).

I due comparti dove il tempo di permanenza del C (MRT-mean period of residence) è minore sono quelli correlati all'attività radicale (root-derived CO2); in particolare il C adoperato nella respirazione radicale permane per pochi minuti oppure ore, mentre gli essudati radicali, composti da sostanze organiche dal basso peso molecolare (carboidrati, acidi carbossilici e amminoacidi), sono degradati dai microrganismi in poche ore (Verburg *et al.*,1998; Kuzyakov and Demin,1998; Jones and Hodge,1999). Il maggior rilascio di essudati tende a corrispondere ai più alti tassi giornalieri di fotosintesi (Baldocchi *et al.*,1986; Kim and Verma,1992; Oberbauer *et al.*,1992; Kuzyakov and Cheng,2001) e dato che i principali processi di decomposizione nel suolo sono condizionati dalla concentrazione del substrato, il maggior rilascio di substrati facilmente degradabili, quali gli essudati radicali, conduce a un incremento dei flussi di CO_2 emessi dal suolo nelle ore diurne.

La necromassa vegetale impiega da alcune settimane ad alcuni mesi per essere completamente degradata (Cadisch and Giller,1997; Hahn and Buchmann,2004). I più rapidi sono i residui vegetali con alto contenuto di azoto e basso contenuto di

lignina, mentre residui con molta lignina e cellulosa, come per esempio gli aghi delle conifere, possono impiegare anche 2-4 anni (Gaudinski *et al.*, 2000).

Ovviamente condizioni più proibitive per la biomassa microbica, come basse temperature o mancanza d'ossigeno, dovuta a saturazione idrica del suolo, rallentano la decomposizione della materia organica.

I maggiori MRT del C si registrano nelle prime due fonti, quelle definite "SOM-derived CO2", dove può permanere da centinaia a migliaia di anni. Nel 1992 Raich and Schlesinger stimarono in 32 anni il tempo di turnover medio del C organico del suolo. Comunemente la SOM è suddivisa in almeno due ma spesso anche più comparti: inerte o passiva, recalcitrante, resistente, degradabile, disponibile, attiva… ognuno con diversi tempi di ricambio del C organico. A livello scientifico non esistono standard che definiscano questi comparti o "SOM-pools".

È universalmente riconosciuto che il comparto più inerte crei stretti legami con i minerali argillosi originando complessi organo-minerali. Il loro contributo al flusso di CO_2 dal suolo è minimo, si stimano tempi di permanenza del C anche di migliaia di anni (Theng *et al.*,1992; Trumbore,1997, 2000; Telles *et al.*,2003; Rethemeyer *et al.*, 2004). Nei comparti invece con materia organica definita "degradabile, disponibile o attiva" la degradazione viene operata dai microrganismi tramite la "respirazione basale" o il "rhizosphere priming effect", con tempi di ricambio da anni a decenni in base alla relativa disponibilità della SOM (Jenkinson,1971; Neff *et al.*,2002; Kuzyakov and Bol, 2006).

La sostanza organica solubile (DOM)

Indice della presenza di elementi organici altamente disponibili è la cosiddetta "Dissolved Organic Matter" o DOM (McDowell *et al.*,2003), ovvero la frazione della sostanza organica solubile in acqua, che passa per un filtro di 0,45 μm di porosità (Thurman,1985). La fase acquosa del sistema rappresenta il centro dell'attività

batterica ossidativa, in quanto il substrato degradato dai batteri è rappresentato da sostanza organica in soluzione; quindi, una conoscenza della frazione solubile e delle sue trasformazioni durante i processi biologici ha la prerogativa di essere un indicatore del sistema stesso, preferibile ai parametri relativi al comparto solido (Chefetz *et al*.,1998). È coinvolta infatti in importanti processi fisici, chimici e biologici riguardanti il suolo, che sono mostrati in Figura 11. Si tratta di un materiale estremamente eterogeneo, formato da una miscela di molecole semplici e di basso peso molecolare (zuccheri e amminoacidi liberi) con specie chimiche complesse (enzimi, amminozuccheri, polifenoli e sostanze umiche) (Businelli *et al*.,1997).

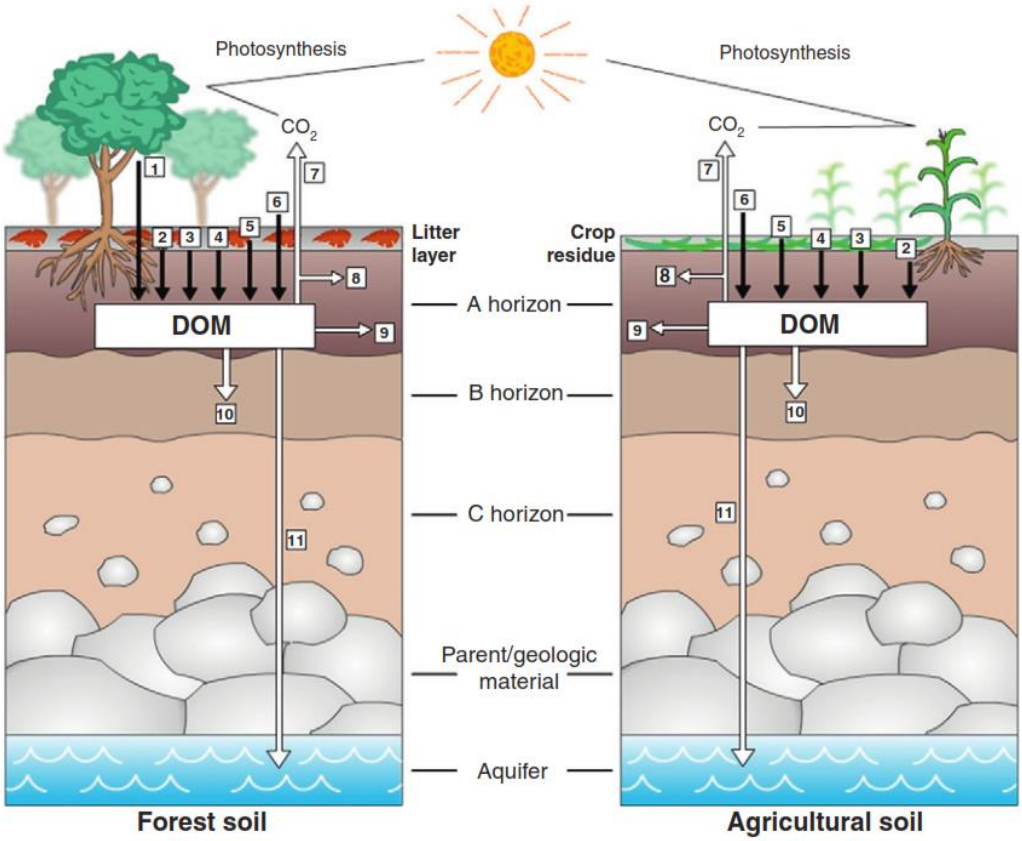

Figura 11 _ Le diverse vie di input e output della DOM:
1.biomassa proveniente da parti vegetali epigee **2**.essudati radicali **3**.lisi cellulare microbica **4**.umificazione **5**.decomposizione di residui e lettiera **6**.ammendanti organici **7**.degradazione microbica **8**.assimilazione microbica **9**.deflusso laterale **10**.adsorbimento **11**.percolazione profonda.

2. Materiali e metodi

2.1 Inquadramento sulle specie forestali studiate

2.1.1 Il contesto territoriale

Le tre essenze forestali su cui s'è focalizzato lo studio, Castagno, Faggio e Pino, sono tutte specie arboree principali, costruttrici di popolamenti anche puri e di distinte fasce vegetazionali. Quest'ultime suddividono l'altitudine di un rilievo in fasce o piani ognuno dei quali esprime una vegetazione di riferimento, detta climax (stadio evolutivo finale della vegetazione di un certo ambiente, in cui raggiunge una definitiva condizione di equilibrio con suolo e clima). I tre campionamenti sono stati fatti salendo di quota e cercando di rispecchiare la progressione in fasce altitudinali, sono state infatti scelte tre specie afferenti a tre fasce distinte del piano montano e submontano, come quelle descritte in Figura 12.

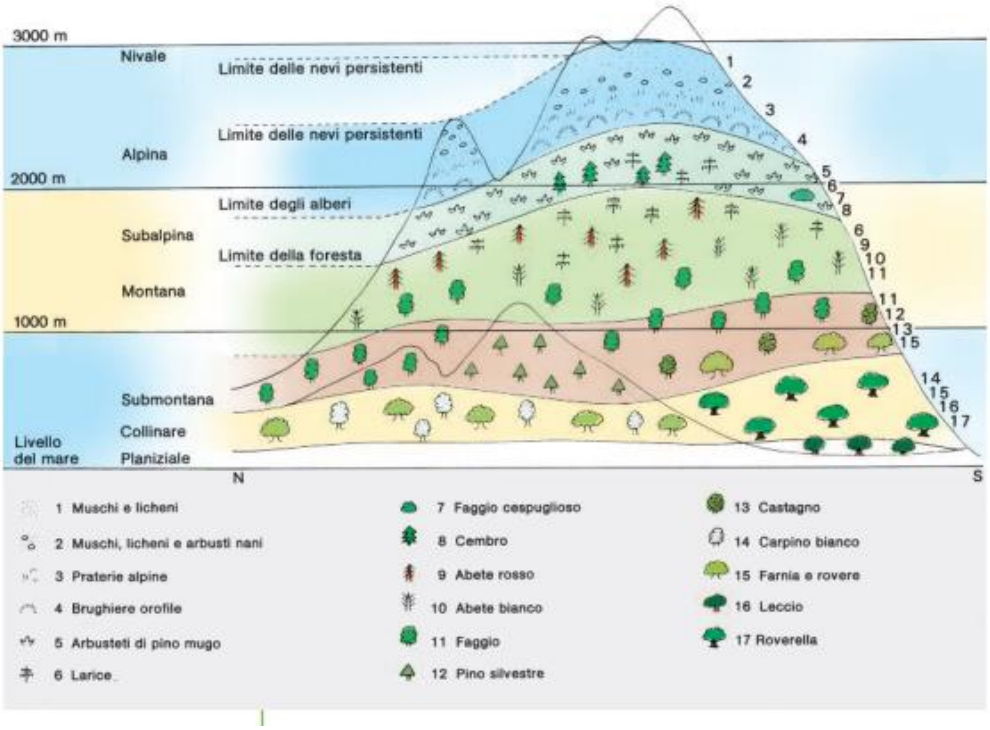

Figura 12 _ Distribuzione altimetrica dei boschi nel contesto alpino

La successione dei piani altitudinali non è però la stessa per tutte le montagne o i rilievi, a influenzare infatti la diffusione delle specie vegetali non è unicamente la quota ma partecipano anche altri fattori fisico-climatici, quali la latitudine, l'esposizione, la distanza dal mare, l'orografia, il substrato geologico. Tra questi riveste particolare rilevanza il cosiddetto "effetto massa", fenomeno legato a una sommatoria di fattori ecologici che agiscono in modo sinergico. Lo si può comprendere attraversando le Alpi perpendicolarmente al loro asse, in direzione Nord-Sud: dalle catene prealpine settentrionali, dove le correnti provenienti dall'Atlantico originano precipitazioni consistenti e distribuite durante tutto l'arco dell'anno con escursioni limitate, si passa attraverso le aride valli trasversali centroalpine, con precipitazioni concentrate in forma nevosa durante l'inverno e con forti escursioni termiche annue, raggiungendo le prealpi meridionali, dove le condizioni di nuovo oceaniche sono determinate dai venti di scirocco provenienti dall'Adriatico (Fig. 13).

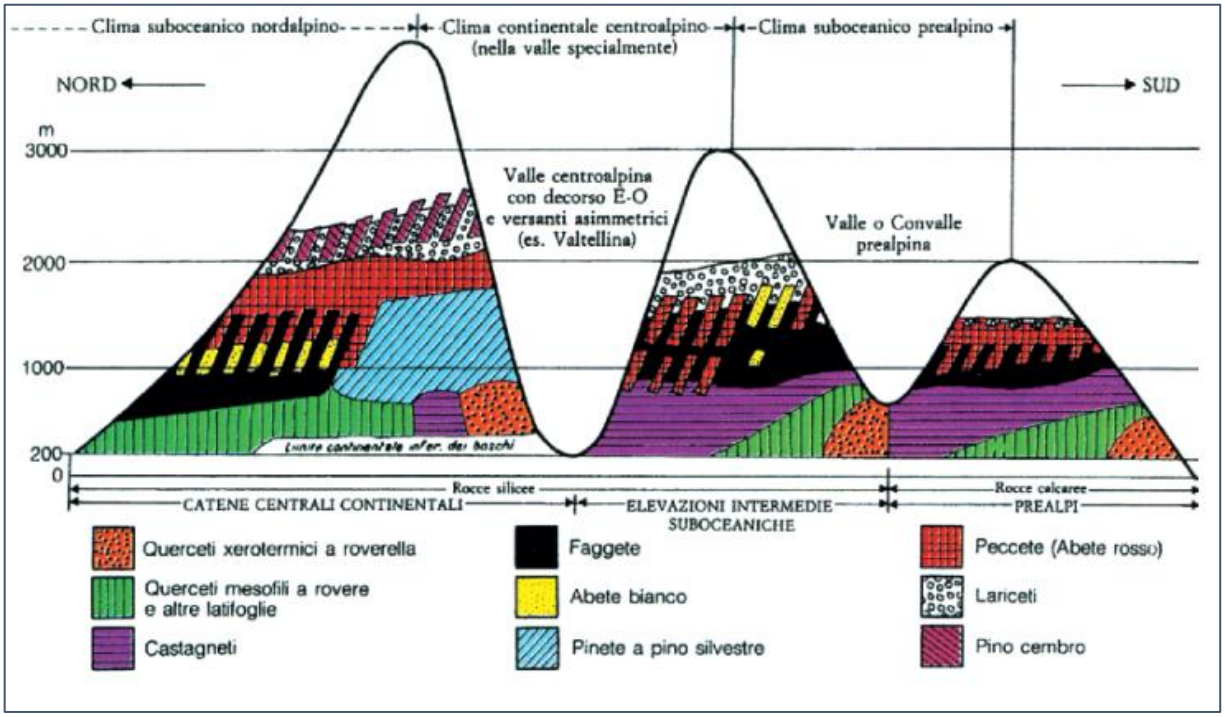

Figura 13 _ Distribuzione altitudinale delle foreste lungo una sezione N-S dell'arco alpino

L'area di studio è situata nella regione forestale esalpica centro-orientale (Fig. 14), nel distretto geobotanico n°4-Alto Camuno, caratterizzata da un clima piuttosto oceanico per le correnti umide provenienti dal Lago d'Iseo che risalgono la valle Camonica. Il substrato appartiene alla categoria dei "silicatici – terrigeno scistosi", più precisamente ai cosiddetti "Scisti di Edolo" dei suoli meso-xerici.

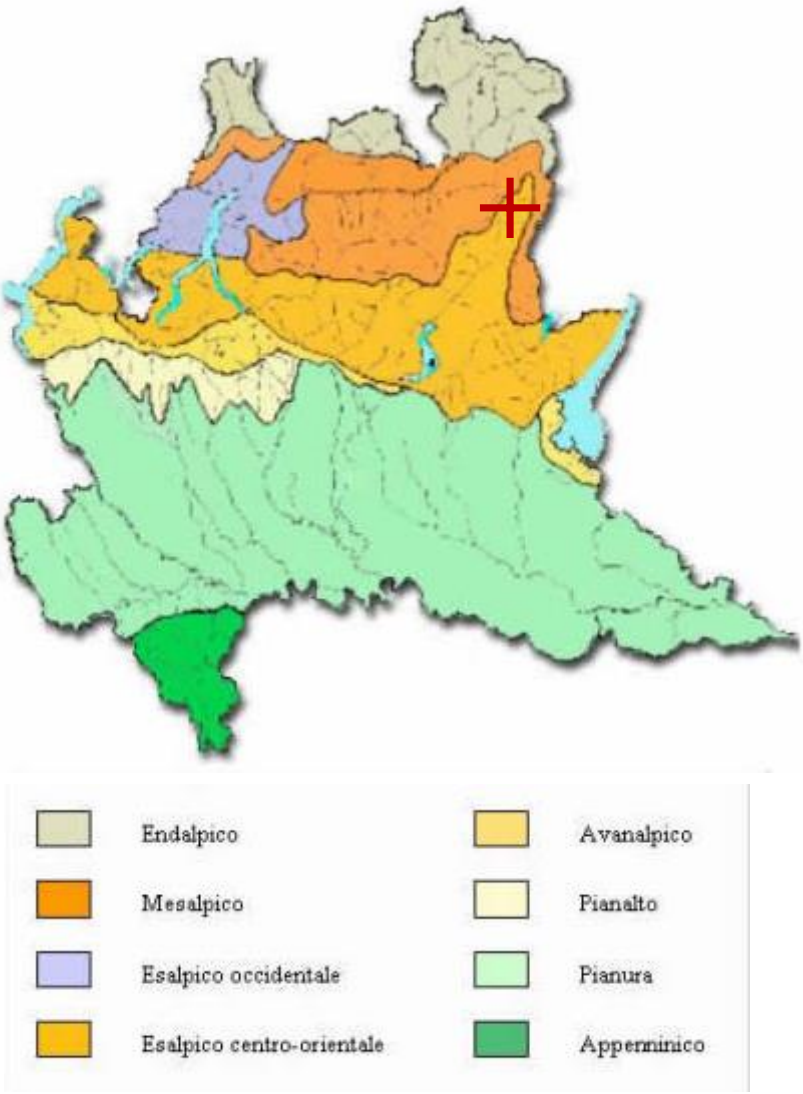

Figura 14 _ Distretti forestali della Lombardia; in evidenza l'area di studio.

2.1.2 Caratterizzazione delle specie studiate

a. Il castagno

Il castagno (*Castanea sativa Miller*), o castagno europeo, appartiene alla fascia vegetazionale medioeuropea, è un albero di prima grandezza (fino a 30m), deciduo, molto longevo, appartenente alla famiglia delle Fagaceae., con la capacità pollonifera maggiore (100 anni) tra le specie forestali locali. Rappresenta una delle più importanti essenze forestali dell'Europa meridionale in quanto la sua coltivazione ha da sempre interessato l'uomo per la produzione di legname e del frutto. Quest'ultimo ha fornito la sussistenza alimentare necessaria alle popolazioni rurali degli ambienti forestali montani e delle zone prealpine attraverso la produzione di farina di castagne. Attualmente la sua importanza economica s'è ridimensionata: la coltura da frutto si limita alle cultivar di particolare pregio mentre la produzione di legname da opera è ridotta. Oggi gran parte delle superfici forestali a castagno derivano dalla rinaturalizzazione di antiche coltivazioni da frutto abbandonate.

Descrizione botanica

- La chioma di forma globosa-espansa è sorretta da un grosso fusto colonnare con corteccia liscia grigio-brunastra, solcata abbastanza profondamente in senso longitudinale negli individui adulti.
- Le foglie sono alterne, provviste di un breve picciolo con lamina acuminata all'apice seghettata nel margine di forma ovale-lanceolata.
- I fiori sono unisessuali e presenti sulla stessa pianta: i fiori maschili formano amenti eretti all'ascella delle foglie, quelli femminili sono isolati o riuniti in gruppi di 2-3 avvolti da un involucro di brattee detto cupola.
- I frutti noti con il nome di castagne sono acheni con buccia cuoiosa, lucida, bruno scura con parte basale chiara, racchiusi dalla cupola irta di spine (riccio) che si apre a maturità (settembre-ottobre).
- L'apparato radicale è composto da radici robuste, ramificate ma non molto profonde.

- Nel legno si distingue l'alburno bianco-giallastro di ampiezza modesta e durame bruno, semiduro (densità di 580 kg/m^3), durevole per la ricca presenza di tannini e facilmente lavorabile.

In Figura 15 sono mostrati i caratteri distintivi della chioma (foglie, fiori e frutti).

Figura 15 _ Caratteri distintivi della chioma di castagno.

Ecologia

Il castagno è una specie mesofila e moderatamente esigente in umidità. Abbastanza resistente ai freddi invernali, diventa esigente durante la stagione vegetativa dimostrando una ripresa tardiva e richiedendo una buona stagione della durata di 4 mesi per completare il ciclo di fruttificazione. Nei boschi maturi un moderato ombreggiamento favorisce le prime fasi di crescita della rinnovazione, nelle fasi più mature è invece gradita la luce (eliofilia). Dal punto di vista pedologico predilige suoli acidi, tollera quelli neutri ma rifugge dal calcare libero e trova l'optimum nei suoli colluviali profondi ben drenati, sciolti, poveri di limo e argilla. Vegeta tra i 200 e 1300 metri.

Areale di distribuzione

L'areale originario del castagno è di difficile ricostruzione, in quanto è una pianta trasportata dall'uomo e coltivata sin dall'antichità per i suoi frutti. Risulta comunque spontanea, come dimostrano i rilievi di pollini fossili e l'impiego preistorico nelle palafitte. È largamente diffuso sull'Appennino e sulle Alpi nella fascia pedemontana e endovalliva, oltre che sulle colline interne, comprese le Langhe; in Europa lo si trova in Francia e in tutto il sudest europeo, sporadicamente in Spagna, in Inghilterra, Portogallo e Svizzera.

Gestione e usi

Nel corso della storia questa pianta è stata governata sia a fustaia nei castagneti da frutto che a ceduo nella produzione di legname. Oggi però i castagneti da frutto (Fig. 16) sono in gran parte abbandonati a causa dello spopolamento montano e delle avversità fungine (cancro a opera di *Cryphonectria parasitica* e malattia dell'inchiostro causata da *Phytophtora cambivora*), tuttavia meno virulente di un tempo. Fanno eccezione quelli con varietà a frutto grosso adatte per gli usi dolciari. Recintati, irrigati e privati del sottobosco e della lettiera, i castagneti da frutto possono essere interessanti per la produzione di funghi porcini (genere *Boletus*) che entrano in simbiosi micorrizica con la pianta.

Figura 16 _ Immagine di castagneto da frutto.

I cedui, un tempo diffusi per paleria viticola sono spesso invecchiati ma ancora in parte utilizzati. Le ceppaie non perdono la capacità pollonifera con l'avanzare dell'età. A seconda dei prodotti i turni variano, dai 10 fino ai 40 anni per tronchi da opera; questi sono ottenibili a patto che il bosco sia fertile, non soggetto a cipollatura e vengano effettuati diradamenti forti e ripetuti. Il legno è impiegato per la produzione di paleria e travature, tavolame per mobili e pavimenti, ma in certe zone l'uso da lavoro è ostacolato dalla "cipollatura": un grave difetto del legno, le cui cause non sono del tutto note, determinato dallo scollamento tra gli anelli di due anni successivi che ne impedisce la segagione in tavole. Sempre maggiore è l'impiego dei pali nelle opere di ingegneria naturalistica, mentre il legno è poco idoneo alla combustione in stufe tradizionali, se non dopo che il tannino è stato dilavato lasciando i tronchetti spaccati all'aperto. Dal legno sfibrato si estraggono i tannini per la concia di pelli pregiate. Buone sono le potenzialità per la produzione di legname da lavoro gestendo i cedui a turni lunghi (30-50 anni), con diradamenti intercalari. Con la diffusione del sostegno secco per le viti, grande importanza assunsero i cedui da paleria, poi soppiantati in parte dalla più durevole robinia e dai pali in cemento. Per l'abbondante produzione di polline e nettare è una specie particolarmente visitata dalle api, da cui ricavano un miele scuro e aromatico, a modesta cristallizzazione. Un tempo le foglie erano utilizzate come lettiera per gli animali in stalla nelle zone con scarsità di paglia ed erano usate anche per imbottire i materassi. Infine, nei Siti Rete Natura 2000 i Castagneti, cedui e da frutto, sono riconosciuti come ambienti d'interesse comunitario e, come tali, tutelati.

b. Il faggio

La seconda specie, il faggio (*Fagus sylvatica Linneus*) o faggio comune, appartiene anch'esso alla famiglia delle Fagaceae e rientra nella fascia vegetazionale subatlantica, ricerca infatti condizioni climatiche di tipo oceanico, penetrando all'interno delle valli aperte, in direzione delle umide masse d'aria meridionali provenienti dall'Adriatico. È il componente principale dei boschi di latifoglie in

montagna, dove forma boschi puri in unione con altre latifoglie ma anche con pecci e abeti. Anch'esso di prima grandezza (fino a 30 m di altezza) e piuttosto longevo (300 anni e oltre) ma con capacità pollonifera ridotta rispetto al castagno (30-40 anni).

Descrizione botanica

In Figura 17 sono mostrati i caratteri distintivi della chioma (foglie, frutti e fiori).

Figura 17 _ Caratteri distintivi della chioma di faggio.

- La chioma massiccia ha forma arrotondata e larga, con rami della porzione apicale eretti verticali. E' sorretta da un fusto dritto poco rastremato che presenta una corteccia liscia e sottile di colore grigio-cenere, con striature orizzontali e spesso con macchie biancastre per presenza di licheni. Il legno è duro e compatto.
- Il fogliame denso è composto da foglie ovate, lucide su entrambe le facce, più scure su quella superiore; in autunno diventano arancione, poi rosso-bruno. La lamina è coriacea con apice appuntito e margine cigliato, spesso increspato.
- È una pianta monoica con fiori che compaiono a maggio con le foglie; quelli maschili sono portati alla base dei rami giovani in amenti rotondeggianti,

penduli e peduncolati, i fiori femminili sono in coppia, racchiusi in una capsula verdastra terminale.

- I frutti sono piccole cupole legnose, di forma ovale allungata, coperte da brevi appendici squamose non pungenti, che si aprono a maturità liberando 3 o 4 semi bruni, chiamati faggiole.
- Gli apparati fascicolati sono assai estesi, anche in profondità.
- Nel legno non c'è distinzione fra alburno e durame, poco durevole e con densità 750 kg/m^3.

Ecologia

Specie mesofila, ai limiti altitudinali inferiori mesoxerofila; sciafila da giovane, adattabile al pH di suoli a varia granulometria, purché ben drenati. Presente raramente a partire dai 300-400 m di quota, di norma dagli 800 ai 1500 m.

Areale di distribuzione

Per quanto riguarda le Alpi, il faggio trova le condizioni ottimali nella fascia montana del distretto esalpico, dove forma estesi popolamenti puri. A quote superiori o inferiori, i popolamenti subiscono l'entrata di altre specie, rispettivamente più resistenti alle gelate (come l'abete) e più resistenti alla mancanza d'acqua (come il carpino nero).

Gestione e usi

In passato era adoperato per la produzione di carbone e legna da ardere, di ottima qualità e ancora oggi tra le più ricercate a livello commerciale. Il governo consisteva nel ceduo trattato a sterzo secondo turni brevi (Fig. 18), lasciando i polloni più giovani sulle ceppaie per conservare parte della copertura del suolo e la facoltà pollonifera delle ceppaie. Con l'avvento della motosega è stato generalizzato il taglio con rilascio di matricine, a turni sempre più lunghi per ottenere legna in maggiori quantità e dimensioni. Le ceppaie invecchiate però non riescono più a ricacciare causando il degrado della Faggeta. Per ovviare a ciò è necessario trattare come fustaie i popolamenti oltre i 40 anni, la cui rinnovazione sarà almeno in parte

affidata al seme. Al momento dei tagli, anche in casi di ceduazione in popolamenti regolarmente gestiti, è buona pratica conservare le specie diverse dal faggio. Molti boschi di faggio svolgono anche la funzione di protezione diretta di insediamenti e infrastrutture da pericoli naturali, molte Faggete sono inoltre ambienti di interesse comunitario dei Siti Rete Natura 2000 e pertanto tutelate.

Figura 18 _ Immagine di faggeta governata a ceduo

c. Il pino

La terza specie, appartenente alla fascia boreale, più fredda e meno umida, è il pino silvestre (*Pinus sylvestris Linneus*), conosciuto anche come pino di Scozia. È una conifera appartenente alla famiglia delle Pinaceae che può raggiungere un'altezza di 20-40 m e un metro di diametro del tronco.

Descrizione botanica

- La chioma è inizialmente piramidale, quando la pianta cresce diventa ovale o appiattita a seconda dello spazio a disposizione. La ramificazione tende a essere molto regolare, verticellata per quanto riguarda le branche principali. Il tronco è scanalato profondamente e longitudinalmente nella parte bassa mentre in alto è sfaldato a scaglie dal caratteristico colore ocra-aranciato, in ambienti boschivi rimane libero da rami e chioma per tutti e due i terzi inferiori.
- Gli aghi rigidi sono lunghi da 3 a 10 cm raggruppati in mazzetti di due, ad andamento contorto, con bande stomatali sia continue che discontinue, e persistono sulla pianta da 3 a 7 anni.
- È una specie monoica sebbene spesso a prevalere in alcuni esemplari siano sporofilli maschili o femminili. Gli sporofilli maschili formano piccoli coni sessili, penduli, di colore giallo, alla base dei getti dell'anno, quelli femminili formano coni rossastri, globosi e isolati, eretti all'impollinazione, in seguito diventano pendenti e si trasformano in strobili (pigne) ovali con cortissimo picciolo. Le pigne maturano e liberano i semi in 3 anni, si trovano in coppie o in gruppi sugli steli ricurvi.

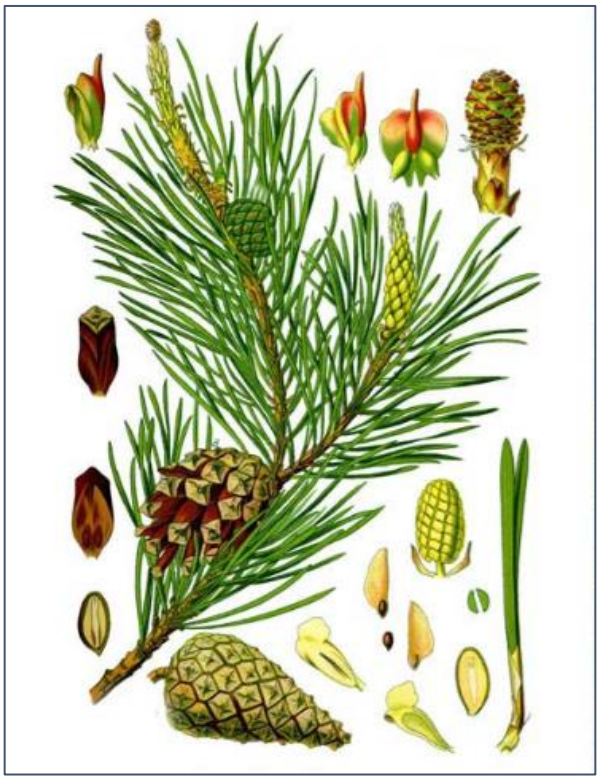

Figura 19 _ Caratteri distintivi della chioma di pino di Scozia

- L'apparato radicale è fittonante con radici laterali capaci di approfondirsi o svilupparsi orizzontalmente con cui può penetrare in strati acquiferi in profondità. Le radici profonde la rendono una specie particoarmente efficiente nell'uso dell'acqua.

In Figura 19 sono mostrati i principali caratteri distintivi della chioma.

Ecologia

Specie eliofila, considerata la pioniera per eccellenza e "l'ossimoro del faggio", resistente alle forti escursioni termiche della fascia e con rinnovazione particolarmente abile su suoli minerali esposti senza sostanza organica. Forma boschi nei terreni poveri e marginali, con suoli aridi e acidi. Subentra ai querceti di rovere o farnia quando il bosco è sottoposto a un disturbo.

Areale di distribuzione

Era la pianta che ricopriva la maggior parte del Nord Italia, dell'Europa continentale e della Russia, sia in boschi puri che in unione con altre essenze, ma adesso il suo areale si è molto ridotto per la sua sostituzione con altre piante. Sulle Alpi è presente nei distretti esalpici e mesalpici, raramente oltre i 1600 metri, tipicamente su di un versante esposto a sud di una valle trasversale alpina. Può presentarsi nelle brughiere di pianura come pineta planiziale di origine antropica.

Gestione e usi

Il legname pregiato è ottenuto da pinete sottoposte a taglio a buche essendo i pini amanti della luce fin dalle prime fasi di sviluppo, la fustaia (Fig. 20) è l'unica forma di governo applicabile data l'incapacità delle Conifere di produrre polloni, la cosiddetta capacità pollonifera. Occorre comunque prestare attenzione ad evitare aperture troppo ampie, ridotte o male orientate rispetto al sole: in esposizioni calde e in vallate poco piovose si può determinare l'inaridimento del suolo, in esposizioni settentrionali l'apertura può essere insufficiente a farvi

giungere luce e calore. Dagli aghi si può ottenere per distillazione un olio essenziale con funzione balsamica, sedativa della tosse e antinfiammatoria.

Figura 20 _ Immagine di fustaia di pino silvestre

2.2 Inquadramento territoriale dell'area di studio

Figura 21 _ Immagine satellitare dell'area di studio con in evidenza in rosso i tre punti di campionamento lungo la strada che sale al monte Faeto (Edolo-BS). Fonte URL https://www.google.it/maps/

L'area di studio è situata nella parte Sud del comune di Edolo (BS) lungo la strada che sale il versante Nord che porta al Monte Faeto, la quale è stata suddivisa in tre microaree che sono state oggetto di campionamento e successiva analisi del materiale prelevato (Fig. 21).

2.2.1 Microarea n°1

Il primo punto di campionamento è localizzato alle coordinate 46,17238 ° N, 10,31864° E ad una quota di 754 m.s.l.m. La prima micro area di studio è caratterizzata dalla presenza prevalente di castagno (*Castanea sativa*) che la porta ad essere classificata come "Castagneto dei substrati silicatici dei suoli mesici", inoltre lo strato arboreo è composto da esemplari giovani di faggio (*Fagus sylvatica*), abeti rossi (*Picea abies*) e alcuni ciliegi (*Prunus avium*); la lettiera risulta principalmente composta da residui fogliari di castagno, infatti, è la specie forestale che genera più biomassa per unità di superficie (Fig. 22).

Figura 22 _ Fotografie della microarea n°1 : a sx il contesto forestale; a dx la lettiera

2.2.2 Microarea n°2

Il secondo punto di campionamento è localizzato alle coordinate 46,16986° N, 10,31755° E ad una quota di 883 m.s.l.m. La seconda microarea di studio (Fig. 23) è caratterizzata dalla presenza dominante del faggio (*Fagus sylvatica*) e una quota minoritaria di larici (*Larix decidua*) che la porta ad essere classificata come "Faggeta montana dei substrati silicatici dei suoli mesici". La lettiera risulta molto ricca di residui fogliari di faggio che sono particolarmente ricchi di lignina e risultano, quindi, più difficili da degradare; per questo tra gli orizzonti organici sarà presente anche quello OH.

Figura 23 _ Fotografie della microarea n°2 : a sx il contesto forestale; a dx lettiera e humus

2.2.3 Microarea n°3

Il terzo punto di campionamento è localizzato alle coordinate 46,15897° N, 10,33336° E ad una quota di 1.200 m.s.l.m. La terza microarea di studio è caratterizzata dalla presenza dominante di pino silvestre (*Pynus silvestris*) con presenza minoritaria di betulle (Betula pendula) ed ericacee, che la porta ad essere classificata come "Pineta di pino silvestre dei substrati silicatici" (Fig. 24). Tra le aree studiate è l'unica con presenza prevalente di conifere, fatto da tenere in considerazione quando si confronteranno le analisi di suoli e lettiere.

Figura 24 _ Contesto forestale microarea n°3

2.3 Caratterizzazione delle lettiere e dei suoli

Nel presente studio sono stati raccolti un campione di lettiera (residui organici localizzati in superficie) e un campione di suolo (primi 5 cm a contatto con la lettiera) per ognuna delle tre specie forestali analizzate: castagno (*Castanea sativa*), faggio (*Fagus sylvatica*) e pino silvestre (*Pinus sylvestris*). I campioni sono stati così di seguito denominati (Tab. 3).

• Lettiera di castagno	***CL***
• Suolo di castagno	***CS***
• Lettiera di faggio	***FL***
• Suolo di faggio	***FS***
• Lettiera di pino	***PL***
• Suolo di pino	***PS***

Tabella 3 _ Codici identificativi dei campioni

2.3.1 Preparazione dei campioni

Successivamente al prelievo i campioni sono stati posti ad essiccare all'aria per più di una settimana in contenitori aperti. Una volta essiccati, è stato necessario prima frantumarli in maniera grossolana con un mulino a lame e in seguito, per ottenere una tessitura più fine, macinarli (Fig. 25). I campioni erano posti all'interno di un cilindretto di acciaio assieme ad una sferetta capace di macinare il materiale quando lo strumento raggiungeva una frequenza di 25 oscillazioni al secondo. La possibilità di rimescolare in maniera omogenea i campioni era un requisito necessario perché la parte di campione effettivamente analizzata in laboratorio fosse sufficientemente rappresentativa.

Figura 25 _ a sx Immagine di campione macinato; a dx contenitore in acciaio usato nella macinazione dei campioni

2.3.2 Determinazione del pH

Come prima analisi è stata misurata l'acidità dei campioni. Per determinare il pH sono stati posti 0.5 grammi di campione in 5 ml di acqua deionizzata (H_2O), con rapporto di estrazione pari a 1:10. La prova è stata svolta in doppio: per ogni campione sono stati preparati due falcon, messi in agitazione per 30 minuti in un agitatore rotativo. In seguito, ne è stato misurato il pH tramite il pHmetro.

2.3.3 Determinazione del carbonio totale (TOC)

Per la determinazione del carbonio totale presente nel suolo, ad eccezione dei carbonati facilmente lisciviabili, è stato utilizzato il metodo di Walkley e Black. Questo metodo prevede l'ossidazione del carbonio presente nel suolo con bicromato di potassio ($K_2Cr_2O_7$). Successivamente si dosa il bicromato di potassio ($K_2Cr_2O_7$) in eccesso mediante titolazione ossido-riduttiva con il ferro (Fe^{2+}), la soluzione vira dal verde smeraldo al rosso mattone quando il ferro si ossida. La reazione avviene in ambiente acido attraverso l'aggiunta di acido solforico (H_2SO_4) concentrato. Il risultato si confronta con il bianco.

Le reazioni coinvolte sono due:

1. $2Cr_2O_7^{2-} + 6C + 16H^+ \rightarrow 4Cr^{3+} + 3CO_2 + 8H_2O$;
2. $Cr_2O_7^{--} + 6Fe^{2+} + 14H^+ \rightarrow 2Cr^{3+} + 6Fe^{3+} + 7H_2O$

Si procede aggiungendo a 0.03 g di suolo 10 ml di soluzione bicromato di potassio ($K_2Cr_2O_7$) 1N ed in seguito 20 ml di H_2SO_4 concentrato. Dopo aver agitato la provetta, è stata lasciata riposare per 30 minuti. Successivamente la reazione è stata interrotta con 200 ml circa di acqua deionizzata, sono stati aggiunti 10 ml di acido fosforico (H_3PO_4) e poche gocce di indicatore (ferroina). Questa prova è stata svolta in doppio. Infine, sono state titolate con soluzione di ferro solfato 0,5 N le due prove e una prova in bianco; in quest'ultima occorreranno il doppio degli ml di bicromato di potassio iniziali per arrivare al punto di viraggio dato che il ferro solfato possiede una normalità che è la metà di quella del bicromato.

Per arrivare al valore del carbonio totale espresso in grammi su chilogrammi è stata applicata la formula sotto riportata:

$$C(g/kg) = \frac{(B - A) \cdot N \cdot 3{,}89}{P}$$

- A = ml di ferrosolfato ($FeSO_4$) usati per titolare la prova in bianco;
- B = ml di ferrosolfato ($FeSO_4$) usati per titolare il campione;
- N = normalità del ferro solfato = 10/A;
- 3,89 = fattore di conversione;
- P = peso del campione.

2.3.4 Determinazione dell'azoto totale (TKN)

Il principio per la determinazione dell'azoto totale di un suolo si basa sulla mineralizzazione e dosaggio. In un primo momento si mineralizza la sostanza organica con acido solforico (H_2SO_4) a caldo, l'azoto organico presente passa ad azoto ammoniacale (NH_4), simulando i processi di proteolisi e ammonificazione. Successivamente l'ammoniaca viene raccolta su una soluzione di acido borico. Infine, la soluzione di acido borico, ammoniaca e un indicatore viene titolata con H_2SO_4 (titolazione acido-base). Ma dal dosaggio sono esclusi NO_2^- e NO_3^-, in quanto facilmente lisciviati nel terreno o prontamente assimilabili dalle piante; tuttavia, nelle sostanze organiche costituiscono solo il 3,5%.

Le reazioni coinvolte sono quattro:

1. Norg + $H_2SO_4 \rightarrow (NH_4)_2SO_4$ digestione;
2. $(NH_4)_2SO_4 + 2NaOH \rightarrow NaSO_4 + NH_3 + H_2O$ distillazione;
3. $NH_3 + H_3BO_3 \rightarrow NH_4H_2BO_3$ raccolta su acido borico;
4. $NH_4H_2BO_3 + H_2SO_4 \rightarrow (NH_4)_2SO_4 + H_3BO_3$ titolazione.

Quindi in un tubo per la mineralizzazione sono stati aggiunti ad 0.4 g di suolo setacciato due catalizzatori (ossido di Cu e di Se). La soluzione è stata posta in un mineralizzatore a caldo finché la soluzione assume un colore verde acqua, dopo che è stato volatilizzato tutto il carbonio contenuto nei suoli sotto forma di anidride carbonica (Fig. 26). Nel mentre è stata preparata una beuta con 10 ml di acido borico (soluzione satura) e un indicatore acido-base (rossometile e verde bromocresolo). In seguito, sono stati inseriti, nel distillatore, nella parte sinistra il tubo per la mineralizzazione e nella parte destra la beuta. Alla soluzione mineralizzata è stata aggiunta la soda per alcalinizzare l'ammonio così da ottenere l'ammoniaca, composto volatile e perciò distillabile. Poi, la soluzione mineralizzata è stata distillata fino a quando il liquido condensato nella beuta ha smesso di essere basico.

Infine, la soluzione distillata nella beuta è stata titolata con acido solforico (H_2SO_4) 0,1 N.

Per arrivare al valore dell'azoto totale espresso in grammi su chilogrammi è stata applicata la formula sotto riportata:

$$N(g/kg) = \frac{A \cdot N \cdot 14 \cdot D}{P}$$

- A = ml H_2SO_4 di usati per la titolazione;
- N = normalità dell'H_2SO_4 (in questo caso 0,1 N);
- D = diluizione (in questo caso 1);
- 14 = massa equivalente dell'azoto (14 g/mol : 1 eq/mol);
- P = peso del campione.

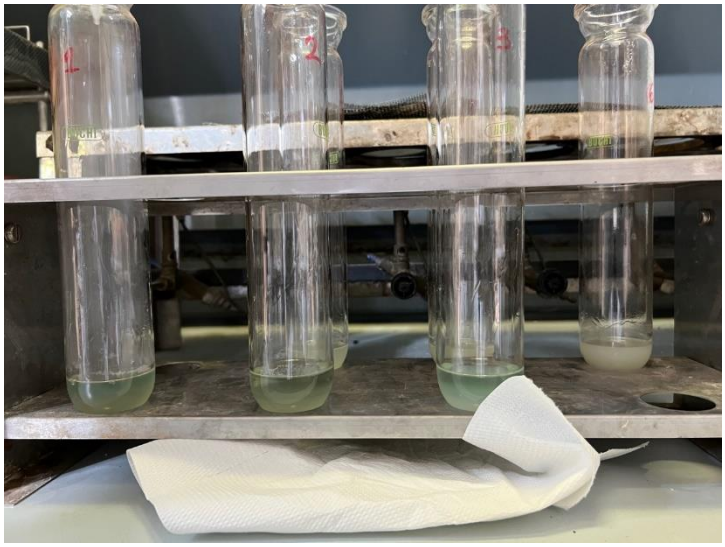

Figura 26 _ Immagine delle soluzioni in fase di mineralizzazione

2.3.5 Caratterizzazione del carbonio organico delle biomasse

Per caratterizzare il carbonio organico presente nei campioni è stato necessario estrarre la frazione organica solubile o DOM (Dissolved Organic Matter) e la frazione più recalcitrante o ROM (Refractory Organic Matter), mentre la frazione conosciuta come "umina", che assieme alle due precedenti costituisce la totalità del carbonio organico, non è estraibile. La prima mobile e facilmente degradabile dai microrganismi è costituita da una miscela di molecole semplici e a basso peso molecolare (zuccheri e amminoacidi liberi) con specie chimiche complesse (enzimi, amminoacidi e polifenoli, acidi fulvici e parte degli acidi umici). La seconda costituisce la porzione quantitativamente maggiore, è costituita principalmente da molecole fortemente idrofobiche e ad alto peso molecolare (es. lignina), per questo è poco mobile e difficilmente degradabile.

Estrazione del carbonio labile

Per estrarre la frazione solubile, sono stati messi in agitazione per 2 ore a temperatura ambiente i campioni in acqua deionizzata in rapporto di 1:10. In seguito, le soluzioni sono state centrifugate per 15 minuti a 6000 rpm per facilitarne la successiva filtrazione. Una volta centrifugate la fase liquida è stata filtrata sottovuoto con un filtro Büchner con pori di 45µm. Per non far degradare la sostanza organica presente in questi, la soluzione filtrata è stata congelata prima a meno 20°C e poi a meno 80°C per 24 ore. Infine, le soluzioni congelate sono state liofilizzate. Un'aliquota dell'estratto è stata conservata per determinare il contenuto di carbonio.

Estrazione del carbonio recalcitrante

Per estrarre la frazione recalcitrante sono stati messi in agitazione, per 24 ore a 80 scosse al minuto a 65°C, 2 g di sostanza secca di ogni campione di biomassa in una soluzione estraente in rapporto 100:2.

La soluzione estraente è stata preparata miscelando in un matraccio 44,6 g di sodio pirofosfato decaidrato ($Na_4P_2O_7 \cdot 10\ H_2O$) e 4 g di idrossido di sodio in un litro di acqua deionizzata. In seguito, le soluzioni sono state centrifugate 15 minuti a 6000 rpm. Per non far degradare la sostanza organica presente in questi, la soluzione filtrata è stata congelata prima a meno 20°C e poi a meno 80°C per 24 ore. Infine, le soluzioni congelate sono state liofilizzate. Un'aliquota dell'estratto è stata conservata per determinare il contenuto di carbonio.

Quantificazione del carbonio labile e recalcitrante

Il contenuto di carbonio nelle frazioni di DOM e ROM è stato determinato con il metodo al dicromato tramite titolazione ossido-riduttiva come riportato nel paragrafo 2.3.3 ("Determinazione del carbonio totale") adattando i volumi al minor contenuto di carbonio.

2.3.6 Allestimento e monitoraggio della respirazione del suolo

Per valutare l'attività biologica e, di conseguenza, i differenti tassi di mineralizzazione dei diversi campioni, è stato applicato il metodo titrimetrico (ISO 16072:2002). Questo metodo si basa sulla misura dell'anidride carbonica (CO_2) rilasciata da un terreno incubato in recipiente chiuso ermeticamente al cui interno è presente un becher contenente idrossido di sodio (NaOH).

Una parte dell'idrossido di sodio reagisce con l'anidride carbonica prodotta dalla respirazione del suolo a dare carbonato di sodio e volatilizza, per questo, il suo rilascio da parte del suolo, viene calcolato tramite la titolazione con l'acido cloridrico (HCl) dell'idrossido di sodio rimanente. L'analisi è stata condotta in doppio e monitorata settimanalmente dal 25 febbraio al 11 aprile e in seguito mensilmente fino al 5 agosto, in condizioni di temperatura ambiente e al buio (per evitare la formazione di alghe).

Allestimento delle prove

Per l'esperimento sono stati predisposti 14 contenitori (Fig. 27), due per ogni campione di lettiera e suolo, più due privi di suolo come prova. Questi contenitori sono stati disposti in modo completamente randomizzato in quanto l'esperimento è stato condotto in condizioni ambientali standard, cioè in una situazione dove i fattori non sperimentali erano quelli ambientali (temperatura, umidità).

Figura 27 _ Immagine dei contenitori

Preparazione dell'unità sperimentale

Ogni unità sperimentale è costituita da un contenitore di vetro chiuso ermeticamente in cui sono contenuti 3 g di campione, suolo o lettiera, e un becher contenente 20 ml idrossido di sodio 1 N (Fig. 28). Fanno eccezione le prove di controllo contenenti solo l'idrossido di sodio. Durante le analisi i campioni sono stati mantenuti mescolati e sufficientemente umidi

Figura 28 _ immagine unità sperimentale

Titolazione dell'idrossido di sodio

Una volta rimosso il becher contenente idrossido di sodio, sono stati aggiunti 2 ml di soluzione di cloruro di bario ($BaCl_2$) al fine di far precipitare l'anidride carbonica intrappolata nella soda come carbonato di bario ($BaCO_3$) e interrompere la reazione. In seguito, la soluzione è stata titolata con acido cloridrico 1 N dopo aver aggiunto 3 gocce di fenolftaleina come indicatore.

Le reazioni coinvolte sono:

- $2\ NaOH + CO_2 \rightarrow NaCO_3 \uparrow + H_2O$ (soda volatilizzata)

1. $CO_2 + NaOH \rightarrow NaO_2CO_3 + H_2O$ incolore;
2. $NaO_2CO_3 + BaCl_2 \rightarrow BaCO_3 + 2NaCl$ colore bianco torbido;
3. $BaCO_3 + C_{20}H_{14}O_4 \rightarrow$ colore viola;
4. $BaCO_3 + C_{20}H_{14}O_4 + HCl \rightarrow BaCl_2 + CO_2 + H_2O$ colore bianco.

Il viraggio di colore che si realizza durante la titolazione della soda rimanente è mostrato in Figura 29.

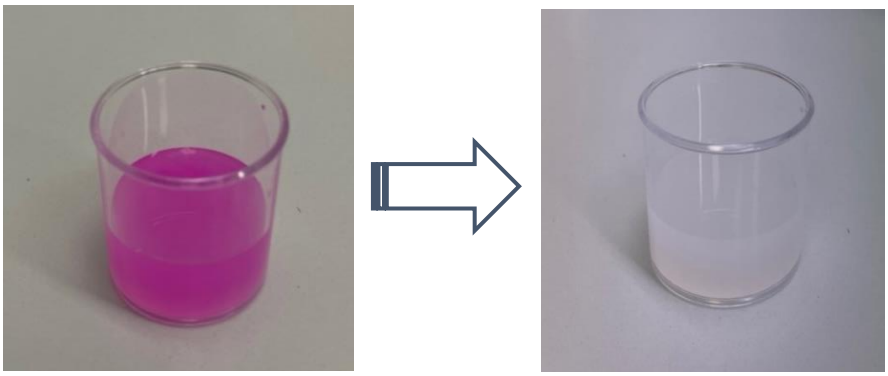

Figura 29 _ Viraggio di colore ottenuto durante la titolazione della soda rimanente con acido cloridrico

Calcolo del tasso di respirazione

Per il calcolo del tasso di respirazione è stata utilizzata la formula (ISO 16072:2002) sotto riportata:

$$R_{CO_2} = \frac{2{,}2\left(\overline{V}_b - \overline{V}_p\right)}{24 \cdot m_{sm} \cdot w_{sd}}$$

Dove:

- R_{CO_2} = tasso di evoluzione della anidride carbonica sulla base della massa di suolo secco (mg $CO_2 \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$);
- $\overline{V}_b$ = volume medio di acido cloridrico consumato nel controllo, in millilitri;
- $\overline{V}_p$= volume medio di acido cloridrico consumato nel campione di studio, in millilitri;
- m_{sm} = massa del campione di terreno umido, in grammi;
- 2,2 = coefficiente ($mg \cdot ml^{-1} \cdot day^{-1}$);
- 24 = fattore per convertire l'evoluzione quotidiana in evoluzione oraria ($h^{-1} \cdot day^{-1}$);
- w_{sd} = frazione di massa secca del terreno umido.

3. Risultati e discussione

3.1 pH dei suoli e delle lettiere

In Tabella 4 vengono riportati i valori di pH dei suoli e delle lettiere misurati tramite pHmetro come riportato nel capitolo "Materiali e metodi".

Tabella 4 _ pH dei suoli e delle lettiere

Campione	pH
FS	4.58 ±0.12
CS	4.41 ±0.03
PS	5.47 ±0.02
FL	5.50 ±0.04
CL	4.72 ±0.03
PL	4.83 ±0.14

Tutti valori di pH rilevati mostrano un valore acido, questo a conferma del fatto che l'analisi è stata effettuata su materiali vegetali freschi, facilmente fermentescibili, che portano alla frequente formazione di acidi organici a corta catena come intermedi della mineralizzazione operata dai microrganismi. I valori medi di pH dei suoli e delle lettiere non mostrano significative differenze, questo perché nei suoli, costituiti dai primi 5 cm circa di orizzonte, i processi degradativi sono ancora in atto.

Dalle analisi effettuate in laboratorio, sia tra i campioni di lettiera che tra quelli di suolo, il castagno possiede l'acidità maggiore; questo potrebbe indicare una più rapida attività degradativa in atto, che potrà essere confermata con i dati ottenuti dalla prova respirometrica descritta successivamente.

I campioni di pino, l'unica gimnosperma analizzata, sono gli unici in cui la lettiera presenta un'acidità superiore al rispettivo suolo, fatto probabilmente dovuto all'elevata presenza di aghi nella stessa, il cui alto contenuto di fenoli inibisce

l'attività degradativa negli orizzonti sottostanti quando le sostanze più fermentiscibili sono ormai state consumate. Questo a conferma dell'effetto che i diversi tipi di sostanza organica possono avere sull'attività enzimatica dei suoli, come analizzato da Januszek (1999) e Bloñska and Januszek (2010) che dimostrarono come una marcata presenza del pino di Scozia nella composizione della copertura arborea potesse inibire l'attività biologica della microfauna del suolo rispetto ad una maggiore presenza di piante di faggio.

3.2 Determinazione del carbonio organico totale nei campioni di suoli e lettiere

In Tabella 5 vengono riportati i valori di carbonio organico totale dei suoli e delle lettiere, determinati tramite titolazione ossido-riduttiva come riportato al capitolo "Materiali e metodi".

Tabella 5 _Carbonio organico totale dei suoli e delle lettiere

Campione	**TOC (%)**
FS	43.53 ±0.54
CS	25.96 ±0.17
PS	19.27 ±1.14
FL	50.74 ±1.95
CL	51.02 ±1.52
PL	37.05 ±0.18

Dai dati si evince come le lettiere di faggio e castagno siano quelle con il contenuto di carbonio organico più elevato, e molto simile, discorso diverso è fatto per il pino che mostra un valore sensibilmente più basso. Nei suoli invece il valore relativo al faggio è circa doppio rispetto agli altri due. Analizzando infatti il delta di degradazione del contenuto di carbonio tra lettiere e suoli (in riferimento al carbonio contenuto nelle lettiere) (Tab. 6) si evidenzia come i processi degradativi

siano fortemente limitati nell'area caratterizzata dalla presenza del faggio (Δ= 14%), mentre sono molto più rilevanti nelle aree con pino e castagno dove si raggiunge quasi il 50% di delta di degradazione, confutando così le precedenti ipotesi legate unicamente al valore di pH.

Tabella 6 _ Δ di degradazione tra il carbonio delle lettiere e dei suoli

Campione	Δ di degradazione (%)
F	14.21
C	49.11
P	48.00

3.3 Determinazione del contenuto di azoto totale nei campioni di suoli e lettiere

In tabella 7 vengono riportati i valori del contenuto di azoto totale di suoli e lettiere, determinati come riportato nel precedente capitolo "Materiali e metodi".

Tabella 7 _ Contenuto di azoto totale nei campioni dei suoli e delle lettiere

Campione	TKN (g/kg)
FS	15.45 ±1.00
CS	11.56 ±0.30
PS	11.08 ±0.59
FL	10.26 ±1.19
CL	9.53 ±0.28
PL	5.70 ±0.19

Confrontando i dati medi relativi a lettiere e suoli risulta evidente una maggiore presenza di azoto nei suoli, questo è dovuto al cosiddetto "effetto concentrazione", che è causato da ritmi inferiori di degradazione rispetto a quelli del carbonio.

Risulta ancora più interessante calcolare il rapporto C/N (ovvero il rapporto carbonio/azoto) utile a indicare la potenziale degradabilità dei suoli e delle lettiere, i valori emersi sono riportati in Tabella 8.

Tabella 8 _ Rapporto C/N dei suoli e delle lettiere

Campione	**C/N**
FS	28.17
CS	22.47
PS	17.38
FL	49.47
CL	53.52
PL	65.05

Indipendentemente dai valori assoluti di carbonio e azoto, si fissa pari a 20 il valore di rapporto ideale che indica un'attività equilibrata di degradazione. Questo valore viene rilevato nei suoli, mentre nelle lettiere vengono messi in risalto dei valori tendenzialmente più elevati; questo è un aspetto normale e deriva dal fatto che il contenuto di carbonio nelle lettiere è maggiore rispetto a quello dei suoli, dove si riduce a seguito di processi di mineralizzazione e dove l'azoto, più lento nel processo di degradazione, si concentra.

Faggio e castagno presentano un rapporto C/N simile per quanto attiene le lettiere, il pino si discosta con un valore sensibilmente più elevato che è dovuto al fatto che contiene circa la metà di azoto. Questo ne denota una minore tendenza alla degradazione che può essere verificata nelle successive prove respirometriche.

3.4 Determinazione dell'attività respiratoria di lettiere e suoli

Il test di misurazione dell'attività respiratoria di lettiere e suoli ha avuto durata di circa 6 mesi, durante i quali nella prima metà le misurazioni sono state fatte settimanalmente, mentre hanno rispettato intervalli di circa un mese nella seconda metà. In Tabella 9 vengono riportati i dati cumulati di CO_2 emessa per grammi di campione in relazione ai giorni trascorsi dall'inizio delle misurazioni, ottenuti come riportato al capitolo "Materiali e metodi".

Tabella 9 _ mg cumulati CO_2 g sost.secca^{-1} (valori medi)

CAMPIONE	0	5	13	20	32	45	68	96	161
CL	0.0	5.9	9.9	14.0	20.5	28.2	38.9	50.5	66.9
CS	0.0	1.8	2.8	3.2	4.5	5.7	7.5	9.9	14.4
FL	0.0	5.1	9.5	12.2	17.2	21.9	28.6	37.3	53.8
FS	0.0	2.4	4.0	4.8	6.6	8.3	10.8	14.7	19.9
PL	0.0	3.9	8.1	11.0	14.6	18.5	23.7	30.0	41.3
PS	0.0	1.8	2.9	3.6	4.8	5.6	6.5	8.1	10.1

In Figura 30 vengono mostrate le dinamiche di respirazione dei campioni in relazione ai giorni trascorsi.

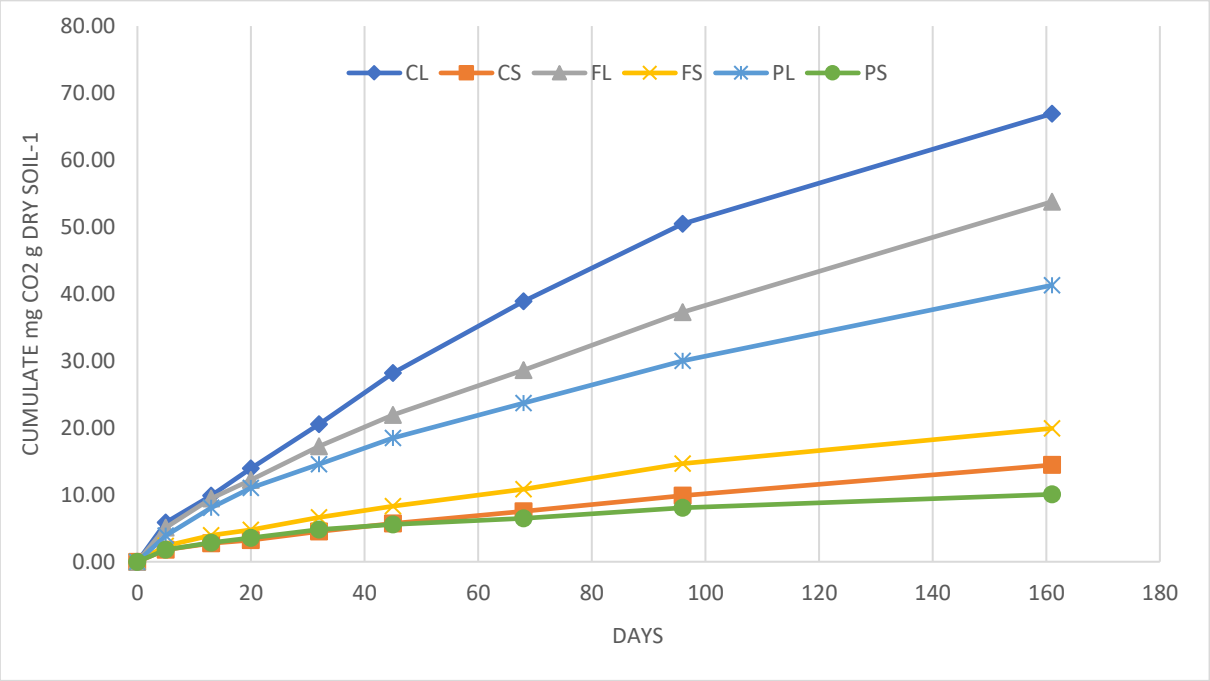

Figura 30 _ mg cumulati CO_2 g sostanza secca^{-1} (valori medi)

Dal grafico in Figura 30 risulta evidente la maggiore attività respiratoria delle lettiere rispetto ai suoli, di fatti composte da materiale più facilmente degradabile. In particolare, la lettiera di castagno soddisfa le ipotesi fatte al Paragrafo 3.1 (quello inerente al pH) e si dimostra la più attiva a livello respiratorio. Anche il pino rispetta le attese registrando i dati più bassi in entrambi i campioni di lettiera e di suolo. Il faggio, nonostante il basso delta di degradazione descritto al Paragrafo 3.2 (Tab. 6), presenta valori della lettiera intermedi a quelli di castagno e pino mentre tra i suoli è quello più attivo; nel suolo di faggio, infatti, è presente ancora molto carbono organico detenendo un basso delta di degradazione tra lettiera e suolo.

Ad ulteriore approfondimento i valori di respirazione vengono espressi in Tabella 10 sulla base del contenuto in termini assoluti di carbonio, si riesce così a comprendere la quantità di carbonio organico che viene effettivamente ossidata ad anidride carbonica dai microrganismi.

Tabella 10 _ mg cumulati CO_2 g C organico^{-1} (valori medi)

CAMPIONE	**0**	**5**	**13**	**20**	**32**	**45**	**68**	**96**	**161**
CL	0.0	11.0	18.4	26.0	38.3	52.6	72.5	94.2	124.8
CS	0.0	7.6	11.9	14.0	19.5	24.8	32.4	42.7	62.4
FL	0.0	9.7	18.0	23.3	32.8	41.7	54.4	70.9	102.3
FS	0.0	5.4	9.0	10.8	15.0	18.8	24.5	33.2	45.1
PL	0.0	11.4	23.8	32.5	43.1	54.8	70.7	89.8	123.4
PS	0.0	10.7	17.3	21.4	29.1	34.1	39.6	49.8	62.2

Rielaborando i dati dell'anidride carbonica emessa sulla base del contenuto effettivo di carbonio dei campioni, e non più sul peso della sostanza secca, i risultati delle prove respirometriche cambiano. In Figura 31 sono mostrate le dinamiche di respirazione dei campioni in relazione ai giorni trascorsi. La lettiera di castagno rimane il campione dove viene respirato il maggiore tasso di carbonio, anche se nei primi mesi viene sorpassato dalla lettiera di pino, che anche nel periodo successivo s'attesta su valori simili a quelli del castagno. In particolare, il suolo di pino registra

i più alti valori di respirazione tra i suoli. Il vero "sconfitto" è il faggio, coi più bassi tassi di C respirato sia tra le lettiere che tra i suoli.

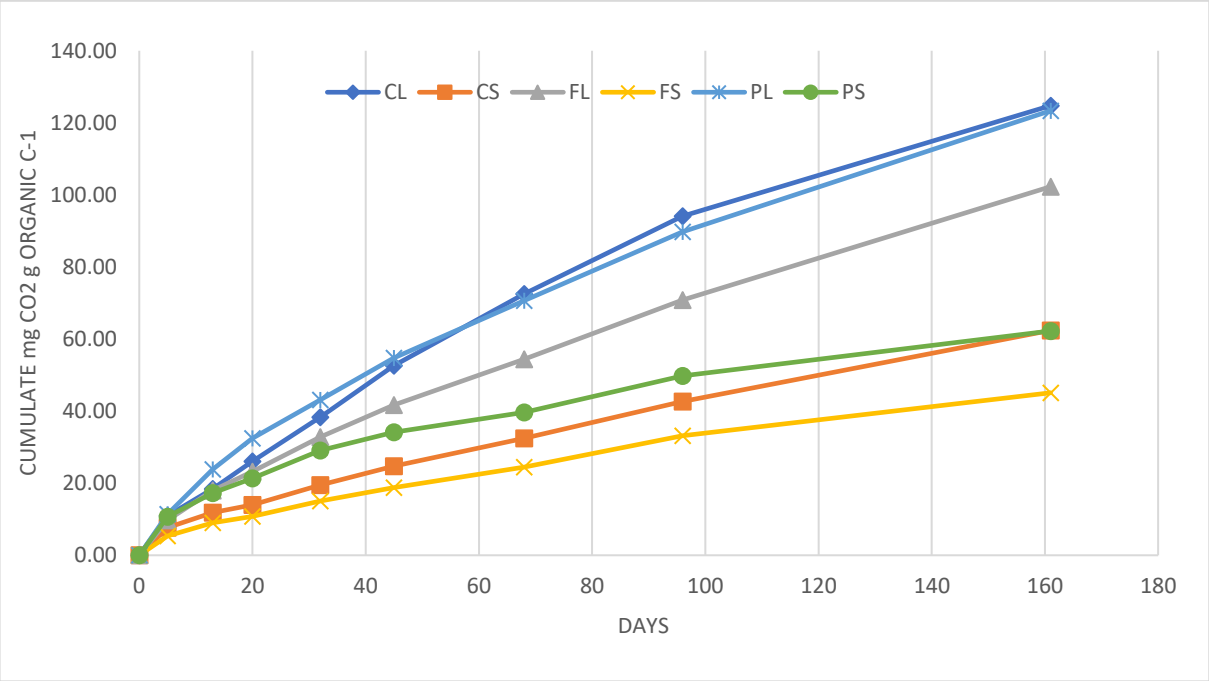

Figura 31 _ mg cumulati CO_2 g Corganico^{-1} (valori medi)

3.4 Determinazione del carbonio solubile e recalcitrante di lettiere e suoli

Al fine di meglio comprendere i risultati delle prove respirometriche i campioni sono stati analizzati per le due componenti principali di carbonio, come riportato al capitolo "Materiali e metodi": la componente solubile, o DOM, e quella più recalcitrante e humo-simile, la ROM. Questi risultati sono riportati in Tabella 11.

Tabella 11 _ Contenuto C solubile (DOM) e C recalcitrante (ROM) di suoli e lettiere

Campione	**ROM**(g/kg)	**DOM**(g/kg)
FS	147.13	9.89
CS	118.66	7.78
PS	94.97	6.10
FL	175.56	14.46
CL	196.61	22.90
PL	141.09	13.77

Analizzando i valori di carbonio solubile, quello più facilmente estraibile e infatti anche degradabile, si possono confermare gli alti tassi di respirazione registrati dalla lettiera di castagno, che possiede la quantità più rilevante di "DOM". Malgrado, infatti, i rapporti C/N facessero presagire la lettiera del faggio come la più potenzialmente attiva, le prove di laboratorio hanno confutato questa ipotesi. Il rapporto è un parametro puramente quantitativo, che dà una stima della potenziale mineralizzazione della sostanza, ma non considera quali composti effettivamente la compongono. Una quantità elevata di carbonio organico non presuppone l'elevata degradabilità della sostanza organica, ma è necessario caratterizzare qualitativamente tale quantità per poterlo stabilire.

In Tabella 12 si analizza la variazione percentuale delle due componenti di carbonio (solubile e recalcitrante) passando dall'ambiente lettiera a quello suolo. Si riesce così a riscontrare il più alto potenziale degradativo del carbonio solubile (DOM) in opposizione alla maggiore resistenza dei composti ligno-humici (ROM), costituiti appunto da carbonio recalcitrante.

Tabella 12 _ Δ *di degradazione* (%) di DOM e ROM

GRUPPO	**DOM** (G/KG)	**ROM (**G/KG**)**
LETTIERE	17.04	171.09
SUOLI	7.92	120.25
$\boldsymbol{\Delta}$ ***di degradazione***	*53.52 %*	*29.71 %*

3.5 Correlazioni tra l'attività respiratoria e i risultati delle analisi chimiche dei campioni

Al fine di stabilire eventuali relazioni tra i risultati delle attività respirometriche e i parametri chimici ottenuti dalle analisi di laboratorio sono state analizzate diverse correlazioni; nello studio vengono descritte quelle più significative.

La prima correlazione significativa, con un R^2 (coefficiente di correlazione lineare) pari a 0.7, è quella tra il contenuto totale di carbonio dei campioni (TOC) e la rispettiva attività respiratoria, mostrata in Figura 32.

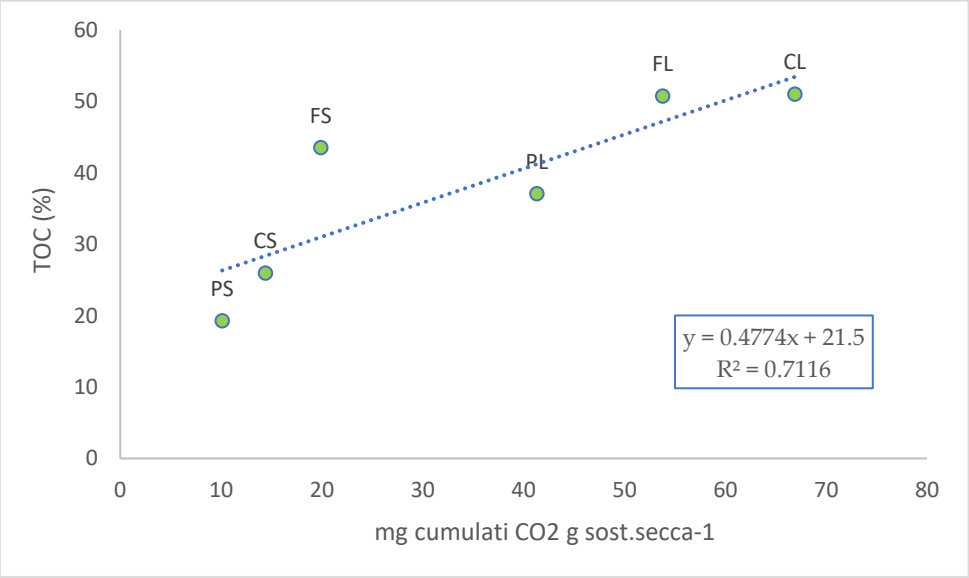

Figura 32 _ Grafico a dispersione: correlazione tra "contenuto di C organico totale (TOC)" e "mg cumulati CO_2 emessa per g sostanza secca" dei campioni.

Si evince come un maggiore contenuto di carbonio organico nei campioni rifletta anche una maggiore attitudine respiratoria; quanto più carbonio è presente in suoli e lettiere tanta più sarà la CO_2 emessa dagli stessi.

Ancor più interessante è la correlazione mostrata in Figura 33, dove l'attitudine respiratoria è messa in relazione con il contenuto di C solubile dei campioni. L'elevato coefficiente di correlazione (R^2 = 0.9) che ne deriva evidenzia come l'attività di degradazione dei microrganismi sia fortemente influenzata dalla

presenza di C facilmente disponibile, espresso appunto dal parametro percentuale di C solubile "DOM", a conferma di quello detto nell'Introduzione (Paragrafo 1.3.5).

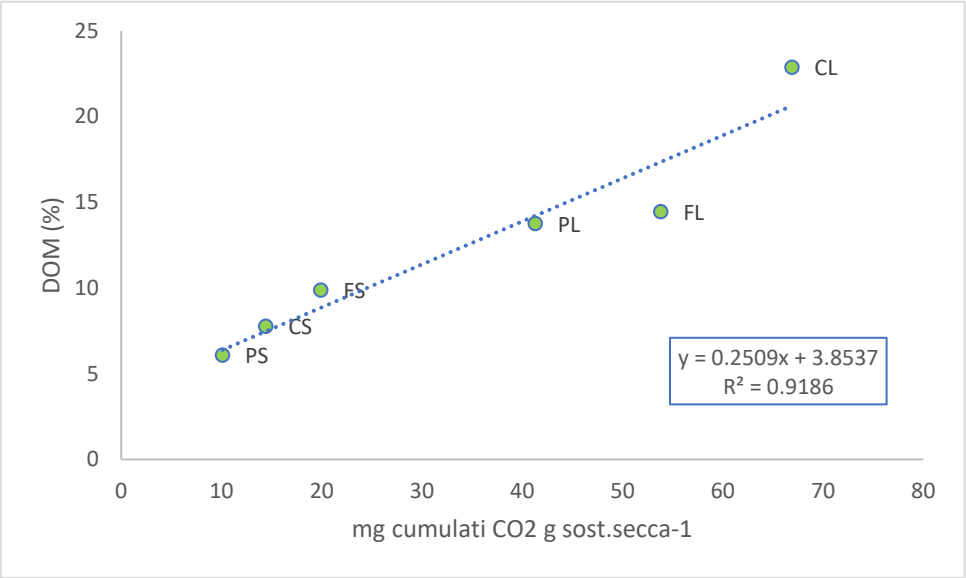

Figura 33 _ Grafico a dispersione: correlazione tra "contenuto di C solubile (DOM)" e "mg cumulati CO_2 emessa per g sostanza secca" dei campioni.

Un ultimo carattere interessante da valutare è la possibile correlazione tra il valore C/N rispetto l'attività respiratoria dei campioni, anche se come detto al Paragrafo 3.4 è un indicatore puramente quantitativo a cui è necessario accostare una valutazione qualitativa dei composti presenti. Un riscontro in linea con le attese si ha correlando i mg di CO_2 emessa per g di sostanza secca e il rapporto C/N delle lettiere (Fig. 34); maggiore è infatti il rapporto, minore è il potenziale di mineralizzazione e dunque l'attività respiratoria dei campioni. Questa considerazione è confermata in modo ancor più marcato mettendo in correlazione i rapporti C/N dei suoli con i mg di CO_2 emessa per g di carbonio del campione, mostrata in Figura 35.

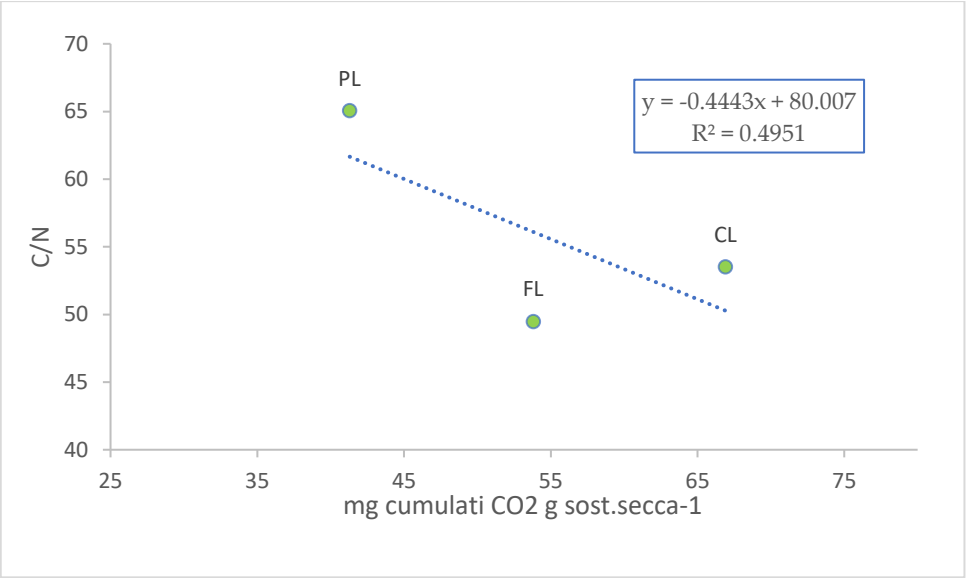

Figura 34 _ Grafico a dispersione: correlazione tra "valore C/N" e "mg cumulati CO_2 emessa per g sostanza secca" delle lettiere.

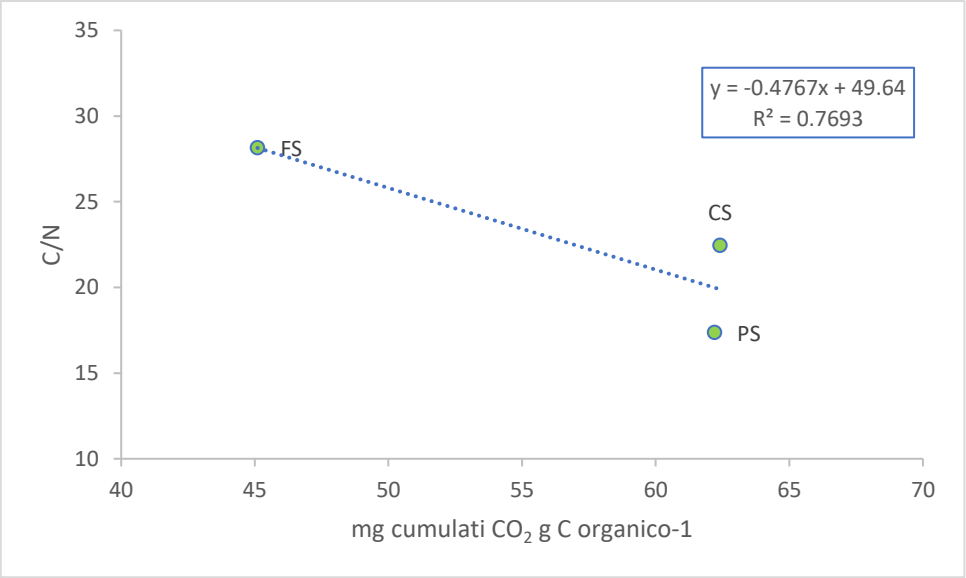

Figura 35 _ Grafico a dispersione: correlazione tra "valore C/N" e "mg cumulati CO_2 emessa per g C organico" dei suoli.

4. Conclusioni

Combinando i risultati delle prove respirometriche con i parametri chimici ottenuti dalle prove di laboratorio è stato possibile stabilire i caratteri chimici che effettivamente influenzano l'attività respiratoria dei suoli forestali operata dai microrganismi, caratterizzando i campioni in base allo stadio evolutivo di pedogenesi (lettiere e suoli) e in base alla provenienza del materiale organico (composizione della copertura arborea); non sono stati presi in considerazione fattori ambientali quali microclima, temperatura o umidità, né il contributo dato all'attività respiratoria dall'apparato ipogeo delle piante, ma considerando unicamente la cosiddetta "respirazione basale", descritta nell'Introduzione (Paragrafo 1.3.5).

Le lettiere sono i campioni che hanno mostrato la maggiore attività respiratoria, nonostante presentino valori C/N più elevati; a valori elevati del rapporto C/N (superiori di molto al valore ottimale, pari a 20, quello del letame maturo) dovrebbero corrispondere materiali organici con uno scarso potenziale di mineralizzazione. Il rapporto è però, come già sottolineato nei Paragrafi 3.4 e 3.5, un parametro puramente quantitativo: nei suoli il carbonio prontamente disponibile delle lettiere è già stato consumato, mentre l'azoto, più lento nella degradazione, si è concentrato, cosicché il rapporto tende a ridursi. La quantità di carbonio organico delle lettiere è infatti superiore, ma ad essere presente in maggiori quantità è soprattutto il carbonio solubile. Laddove, infatti, la percentuale di DOM è superiore, i campioni mostrano una maggiore attitudine respiratoria; la lettiera di castagno (*Castanea sativa*) ne è l'esempio: con il più elevato contenuto di carbonio solubile (22.9 g kg^{-1}) è il campione che respira di più. A condizionare l'attività dei microrganismi è appunto la qualità della sostanza organica, i cui componenti dipendono dai residui organici che raggiungono il suolo tramite la lettiera; determinante diventa quindi la composizione specifica della copertura arborea, in

questo caso forestale. Nei campioni di pino (*Pinus sylvestris*), l'unica conifera studiata, la quantità di carbonio organico è molto inferiore rispetto i campioni delle altre due latifoglie. Il valore C/N della lettiera è comunque il più elevato, in quanto il contenuto in azoto è dimezzato rispetto le quantità delle altre due specie forestali; infatti, nelle prove respirometriche i campioni di pino sono quelli che emettono meno CO_2. Questa peculiarità potrebbe essere legata alla presenza di aghi nella composizione della lettiera, particolarmente ricchi in lignina e altre molecole resinose piuttosto recalcitranti. La dinamica di respirazione cambia però se si considera la quantità di CO_2 emessa rispetto il contenuto effettivo di carbonio dei campioni, e non rispetto il peso della sostanza secca; le lettiere in cui si consuma la minore quantità di carbonio sono infatti quelle relative al faggio (*Fagus sylvatica*), dove si registra il minore "delta di degradazione" tra il carbonio di lettiera e suolo (Paragrafo 3.2). Nelle sue foglie coriacee è riconosciuta la presenza marcata di lignina; infatti, nonostante l'attività degradativa garantita dalla presenza dei lombrichi, nei suoli di faggete è spesso presente un orizzonte organico OH che denota una mineralizzazione rallentata. La lettiera di pino invece, nonostante contenga meno carbonio, è quella dove si ossida la quota maggiore di carbonio almeno nei primi 50 giorni di misurazioni (poi s'attesta su valori similari a quella di castagno) (Fig. 31). Nella lettiera di pino la quota di carbonio solubile è probabilmente più disponibile all'azione ossidativa dei microrganismi, dato che la quantità di DOM è circa la stessa nelle lettiere di pino e faggio (14 g kg^{-1}).

La tipologia di copertura arborea presente condiziona dunque le proprietà del suolo sottostante, con effetti sulla velocità di turnover della sostanza organica in termini di respirazione. Si può così attribuire alle specie vegetali un ruolo di primo piano nel condizionare la capacità di stoccare carbonio dei suoli.

5. Ringraziamenti

Lo studio fatto si pone a conclusione di un percorso lungo tre anni in cui ho potuto crescere come persona, attraversando momenti di ripensamento, di debolezza e alcune difficoltà. Per questo motivo in queste poche righe voglio ringraziare coloro che mi sono stati vicino e m'hanno sostenuto; in primis la mia famiglia! Ringrazio la professoressa Fulvia Tambone per avermi permesso di compiere questa esperienza di tirocinio che s'è rivelata davvero appagante, ricordandone la pazienza (molta) e la disponibilità. Ringrazio Lorenzo Salvi per avermi sopportato ma, soprattutto, supportato moralmente in questo periodo di convivenza, così come Martina Mauri, Mattia Marzorati e gli altri compagni con cui ho condiviso questo periodo della mia vita.

6. Bibliografia

B³oñska E., Januszek K., 2010. The influence of tree species on the enzyme activity and physical-chemical properties of forest soils. Roczn. Glebozn. – Soil Science Annual 61: 5–14.

Badlock J.A., Broos K., 2011. Soil organic matter. In: Huang P. M., Li Y., Sumner M.E. (eds), 2011. Handbook of Soil Sciences: Properties and Processes, Second Edition. CRC press

Baldocchi, D.D., Verma, S.B., Matt, D.R., Anderson, D.E., 1986. Eddycorrelation measurements of carbon dioxide efflux from the floor of a deciduous forest. Journal of Applied Ecology 23, 967–975

Brady, N. C. (1990), The Nature and Properties of Soils (10th edition). New York: Macmillan Publishing Co.

Burns R.G. (1986). "Interactions of enzymes with soil mineral and organic colloids". In Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes (P.M. Huang e M. Schntzer, Ed.), Soil Sci. Soc. Am., pp: 429-451.

C. Ciavatta, L. Vittori Antisari & P. Sequi (1989) Determination of organic carbon in soils and fertilizers, Communications in Soil Science and Plant Analysis, 20:7-8, 759-773

Cadisch, G., Giller, K.E., 1997. Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition. CAB International, Wallingford, p. 409.

Chefetz, B., Y. Hader, and Yona Chen. "Dissolved organic carbon fractions formed during composting of municipal solid waste: properties and significance." Acta hydrochimica et hydrobiologica 26.3 (1998): 172-179.

FAO and UNEP. 2020. The State of the World's Forests 2020. Forests, biodiversity and people. Rome.

Florenzano, G. (1983). Fondamenti di microbiologia del terreno. Reda.

Gaudinski, J.B., Trumbore, S.E., Davidson, E.A., Zheng, S.H., 2000. Soil carbon cycling in a temperate forest: radiocarbon-based estimates of residence times, sequestration rates and partitioning of fluxes. Biogeochemistry 51, 33–69.

Gibling, M., Davies, N. Palaeozoic landscapes shaped by plant evolution. Nature Geosci 5, 99–105 (2012).

Gigliotti, G., et al. "Composition changes of dissolved organic matter in a soil amended with municipal waste compost." Soil Science 162.12 (1997): 919-926.

Hahn, V., & Buchmann, N. (2004). A new model for soil organic carbon turnover using bomb carbon. Global Biogeochemical Cycles, 18(1).

Januszek K., 1999. The enzymatic activity of selected forest soils of southern Polish in the light of field studies and laboratory (in Polish with English summary). Scientific books, AR Krakow, Books 250.

Jenkinson, D.S., 1971. Studies on the decomposition of C14 labelled organic matter in soil. Soil Science 111, 64–70

Jones, D.L., Hodge, A., 1999. Biodegradation kinetics and sorption reactions of three differently charged amino acids in soil and their effects on plant organic nitrogen availability. Soil Biology & Biochemistry 31, 1331–1342.

Kuzyakov, Y., Bol, R., in press. Sources and mechanisms of priming effect induced in two grassland soils amended with slurry and sugar. Soil Biology & Biochemistry (available online, doi: 10.1016/j.soilbio.2005. 06.025).

Kuzyakov, Y., Cheng, W., 2001. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition. Soil Biology & Biochemistry 33, 1915–1925.

Law, B.E., M.G. Ryan and P.M. Anthoni. 1999. Seasonal and annual respiration of a Ponderosa pine ecosystem. Global Change Biol. 5: 169–182.

Lenton, T., Crouch, M., Johnson, M. et al. First plants cooled the Ordovician. Nature Geosci 5, 86–89 (2012).

Longdoz B., Yernaux M. and Aubinet M. 2000. Soil CO2 efflux measurements in a mixed forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution, Glob. Change Biol. 6 , pp. 907–917.

McDowell, William H. "Dissolved organic matter in soils—future directions and unanswered questions." Geoderma 113.3-4 (2003): 179-186.

Nannipieri P., Ceccanti B. and Grego S. (1990). “Ecological significance of the biological activity in soil” In Soil Biochemistry vol. VI (J.M. Bollag e G. Stotzky, Ed), pp. 293-356.

Neff, J.C., Townsend, A.R., Gleixner, G., Lehman, S.J., Turnbull, J., Bowman, W.D., 2002. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. Nature 6910, 915–917

Persicani, D. (1989). Elementi di scienza del suolo. Casa Editrice Ambrosiana. Milano.

Raich, J.W., Schlesinger, W.H., 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. Tellus B 44, 81–99.

Rethemeyer, J., Grootes, P.M., Bruhn, F., Andersen, N., Nadeau, M.J., Kramer, C., Gleixner, G., 2004. Age heterogeneity of soil organic matter. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 223-224, 521–527.

Ruimy, A., Dedieu, G., & Saugier, B. (1996). TURC: A diagnostic model of continental gross primary productivity and net primary productivity. Global Biogeochemical Cycles, 10(2), 269-285.

Schlesinger, W. H. (1991). The global carbon cycle. Biogeochemistry, an analysis of global change.

Schlesinger, W.H., Andrews, J.A. Soil respiration and the global carbon cycle. Biogeochemistry 48, 7–20 (2000).

Szopka, K., Karczewska, A., Jezierski, P., Kabala, C., 2013. Spatial distribution of lead in the surface layers of mountain forest soils, an example from the Karkonosze National Park, Poland. Geoderma 192, 259–268.

Szopka, K., Karczewska, A., Kabala, C., 2011. Mercury accumulation in the surface layers of mountain soils: a case study from the Karkonosze Mountains, Poland. Chemosphere 83, 1507–1512.

Theng, B.K.G., Tate, K.R., Becker-Heidmann, P., 1992. Towards establishing the age, location, and identity of the inert soil organic matter of a Spodosol. Zeitschrift fu¨r Pflanzenerna¨hrung und Bodenkunde 155, 181–184.

Thurman, E. M. "Amount of organic carbon in natural waters." Organic geochemistry of natural waters (1985): 7-65.

Trumbore, S.E., 1997. Potential responses of soil organic carbon to global environmental change. Proceedings of the National Academy of Science of USA 94, 8284–8291.

Watson, J.E.M., Evans, T., Venter, O., Williams, B., Tulloch, A., Stewart, C., Thompson, I. et al. 2018. The exceptional value of intact forest ecosystems. Nature Ecology & Evolution 2: 599–610.