



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

Corso di Laurea in Valorizzazione e Tutela dell'ambiente e del
territorio montano

Valutazione dell'impatto di progetti di riforestazione in ambito periurbano: effetti sul suolo.

Relatore: Prof. Michele Eugenio D'amico

Correlatore: Prof. Lorenzo Matteo Walter Rossi

Tesi di Laurea di:
Alessandro Bricchetti
Matricola: 00408A

Anno accademico 2023 – 2024

Se l'organizzazione del carbonio non si svolgesse quotidianamente intorno a noi, sulla scala dei miliardi di tonnellate alla settimana, dovunque affiori il verde di una foglia le spetterebbe a pieno diritto il nome di miracolo.

Primo Levi, *Il sistema periodico*.

Einaudi, 1975

Riassunto

Scopo di questo progetto di tesi è la valutazione dell'impatto di progetti di riforestazione in ambito periurbano, in particolare la valutazione di eventuali miglioramenti rispetto ai servizi ecosistemici offerti dai suoli, principalmente riguardanti la regolazione del clima; tale indagine è stata condotta attraverso l'analisi di importanti parametri riguardanti lo stato di salute del suolo quali quantità totale di carbonio stoccato, qualità di tale carbonio e pH del suolo, incrociando i dati quantitativi ottenuti con l'analisi dei profili pedologici. Tale approccio ha consentito di valutare la risposta di questi importanti ecosistemi a dinamiche di pressione antropica come è stata la destinazione di uso precedente del suolo e la successiva rinaturalizzazione.

Attraverso la ricerca bibliografica è stato possibile inquadrare i processi che legano la salute del suolo con i servizi ecosistemici e, soprattutto, è stato possibile fornire una solida base rispetto alle evoluzioni che i suoli a livello globale affronteranno considerando l'attuale crisi climatica, ponendo l'accento sulla necessità di mantenere in salute il suolo che, in ultima analisi, può essere considerata una risorsa non rinnovabile e dalle cui caratteristiche dipendono la vita e il benessere dell'intera popolazione mondiale.

Nella prima parte di questo elaborato l'accento è stato posto sulle cause che promuovono i processi degradativi del suolo, i quali possono essere definiti come un insieme di processi che risultano in una perdita di funzionalità di questo ecosistema, intesa come la perdita dei servizi ecosistemici ad esso associati.

Proprio considerando i servizi ecosistemici è stato importante sottolineare come questi ultimi non si limitino esclusivamente ai servizi di approvvigionamento della risorsa cibo, ma il suolo è implicato in importanti dinamiche di regolazione climatica come la capacità di stoccare a lungo termine il carbonio assorbito dalle piante e traslocato nel suolo stesso; su quest'ultimo aspetto è incentrato l'intero processo di analisi dei dati ed interpretazione di questi ultimi.

Le analisi condotte hanno riguardato in primis l'isolamento delle tre frazioni di carbonio organico contenute nel suolo; la tecnica di isolamento utilizzata prende il nome di frazionamento in liquido. Le tre frazioni citate prendono il nome di: MAOM ossia Mineral Associated Organic Matter, il cui isolamento è avvenuto tramite lavaggio e filtrazione a 200 micrometri; tale frazione è considerata come la più recalcitrante in quanto il carbonio presente è protetto da strutture organo minerali create dall'azione di batteri secernenti esopolisaccaridi (EPS) che consentono l'adesione del carbonio alle frazioni granulometriche più fini del suolo, tali strutture fungono da protezione fisica rispetto al processo di respirazione operato dalla pedofauna conferendo particolare stabilità a questa componente del carbonio organico. La seconda frazione isolata prende il nome di POM ovvero Particulate Organic Matter, composto principalmente da materia organica poco degradata riconoscibile sotto forma di radichette e necromassa, che è stata isolata in liquido per sospensione; tale componente risulta essere più suscettibile alla degradazione in quanto non protetta da strutture minerali che ne impediscono la respirazione. In ultimo è stata isolata, per precipitazione, la componente di carbonio organico adesa alla sabbia denominata SAND, quest'ultima componente risulta essere parzialmente protetta dalla degradazione ma quantitativamente scarsa a causa delle deboli interazioni promosse dalla frazione granulometrica più grande presente nel suolo.

Le percentuali di carbonio contenuto nelle tre diverse frazioni sono state quantificate attraverso l'utilizzo di un analizzatore elementare CHN Analyzer che ha permesso la determinazione ponderale dell'elemento rispetto al peso dei campioni. I risultati ottenuti da questa analisi sono stati importati in un database che ha permesso di ottenere la percentuale di carbonio organico nei diversi orizzonti di suolo attraverso una semplice aggregazione.

I processi sopra descritti hanno permesso di valutare la qualità del carbonio stoccato nel suolo, tale analisi risulta funzionale a stabilire se un particolare suolo è in grado o meno di stoccare carbonio a lungo termine.

Per poter evidenziare l'effetto della forestazione di suoli degradati sullo stock di carbonio è stato necessario considerare una cronosequenza, ossia un gradiente temporale che ha permesso un confronto delle caratteristiche del suolo verificate in corrispondenza di particelle forestali piantate in epoche successive e dotate di un'uniformità delle caratteristiche di partenza, in particolare la tessitura dei suoli in modo tale da rendere tale confronto quanto più statisticamente significativo.

In questo contesto si inserisce perfettamente il Parco Nord Milano, un parco alla periferia nord della città metropolitana di Milano che è stato interessato, dagli anni '70 in poi, da progetti di riforestazione che hanno visto modificare la struttura di ex suoli agricoli ed industriali attraverso la piantumazione di oltre duecentomila tra alberi e arbusti; in virtù di questo progetto e avendo rilevato una discreta uniformità nella tessitura dei suoli sono state considerate sette aree di cui sei boscate e un prato permanente come gruppo di controllo; tali aree sono state piantate rispettivamente nel 1984, nel 1987, nel 1995, nel 2006, nel 2010 e nel 2014.

Considerando il gradiente temporale descritto sopra e avendo rilevato i parametri riguardanti qualità del carbonio, quantità totale dell'elemento e pH del suolo è stato possibile analizzare i dati provando ad individuare ed interpretare gli andamenti di: rapporto percentuale delle tre specie di carbonio rispetto al carbonio totale, stock di carbonio e pH del suolo.

Dalle elaborazioni è emerso che la percentuale della frazione più recalcitrante del carbonio (MAOM) è diminuita all'interno dei suoli sia considerando gli orizzonti più superficiali che gli orizzonti profondi, tale risultato, in controtendenza rispetto alle ipotesi teoriche, può essere spiegato analizzando i dati qualitativi ottenuti attraverso l'apertura dei profili di suolo i quali hanno suggerito, tramite l'abbondante presenza di humus MULL, la fortissima attività biologica e l'assenza di limitazioni per quanto riguarda l'attività della pedofauna la quale si ipotizza, con un buon livello di confidenza, operi un'intensa azione respirativa sul carbonio che perviene al suolo prima che esso possa essere modificato e fissato dai batteri nella frazione più stabile.

Un'ulteriore aspetto che depone a favore dell'ipotesi di intensa attività biologica riguarda le percentuali di POM che sono state rilevate in aumento rispetto al gradiente temporale, ciò sta a significare, probabilmente, che l'attività biologica viene fortemente promossa dalla grande quantità di materia organica immediatamente disponibile per la respirazione, andando ad eliminare il fattore trofico dai fattori limitanti per l'attività della pedofauna, la quale viene promossa anche dai valori di pH rilevati nelle diverse aree i quali si attestano quasi nella loro totalità su valori neutri o, al più, acidi.

L'apporto di nuova sostanza organica al suolo, contrariamente a quello che si può pensare, può condurre al cosiddetto *priming effect*, ampiamente citato in letteratura, tale effetto conduce alla

diminuzione della quantità totale di carbonio stoccato in suolo a causa della promozione dell'attività biologica nel suolo stesso, la quale viene incentivata dalla massiccia presenza di sostanza organica "fresca".

Il dato che rivela maggiormente la limitata capacità della nostra area di studio nell'immagazzinare carbonio a lungo termine riguarda il trend dello stock di carbonio di cui si è constatata la diminuzione nel tempo.

Sempre attraverso l'analisi dei profili pedologici aperti durante la campagna di rilevazioni in campo è stato possibile sottolineare aspetti riguardanti le potenziali limitazioni per la crescita delle piante arboree, infatti la maggior parte dei profili considerati recava evidenti tracce di compattamento visibili in campo come aree di suolo molto dense e prive di struttura, tali segni indicano con elevata probabilità la limitata capacità da parte degli apparati radicali di approfondirsi e, quindi, la limitata capacità degli alberi nell'assicurarsi dal suolo acqua e nutrienti; fenomeno che si traduce potenzialmente in una diminuzione dell'efficienza fotosintetica e, in ultima analisi, in una diminuzione nella capacità di assorbire e consequenzialmente stoccare carbonio negli orizzonti più profondi del suolo ove l'attività di disturbo della pedofauna è meno intensa.

Gli aspetti citati sopra consentono di sottolineare la necessità, per quanto riguarda la valutazione di progetti di riforestazione, di incrociare i dati quantitativi rilevati attraverso le analisi di laboratorio con le osservazioni qualitative svolte in campo in modo tale da evidenziare eventuali aspetti che possano inficiare nella massimizzazione dei servizi ecosistemici verso i quali il progetto punta.

In conclusione è possibile affermare che per svolgere una valutazione quanto più accurata rispetto ai servizi ecosistemici offerti da ecosistemi modificati da dinamiche di pressione antropica è necessario incrociare quanti più dati provenienti da diverse rilevazioni in modo tale da poter effettuare delle ipotesi quanto più robuste possibile; in un'ottica più allargata è possibile stabilire che il successo di un progetto di riforestazione, una volta chiariti gli obiettivi di quest'ultimo e i servizi ecosistemici che si vogliono ricavare dal nascente ecosistema, dipende fortemente dalle caratteristiche dell'area di cui si vuole promuovere la rinaturalizzazione; tramite questo elaborato è stato possibile evidenziare come dinamiche rilevabili in campo quali grado di attività biologica e destinazione d'uso precedente del suolo influiscano in misura importante sui servizi ecosistemici di regolazione del clima andando ad impattare negativamente sul perseguimento di questo obiettivo.

Sommario

| | |
|---|---------------------|
| Riassunto..... | 4 |
| 1. | INTRODUZIONE |
| | 12 |
| 1.1.1 Suolo e servizi ecosistemici..... | 12 |
| 1.2.1 Perdita e degradazione del suolo. | 15 |
| 1.2.2 Processi di degradazione. | 15 |
| 1.3.1 Limitare e mitigare: Nature Based Solutions e riforestazione. | 19 |
| 1.3.2 Il ruolo del suolo: l’iniziativa 4x1000 | 21 |
| 1.3.3 Il progetto SUPERB: Systemic solutions for upscaling of urgent ecosystem restoration for forest-related biodiversity and ecosystem services..... | 25 |
| 1.4.1 Lo studio al Parco Nord Milano..... | 27 |
| 1.4.2 La necessità di una cronosequenza. | 28 |
| 1.4.2 Quantità e qualità del carbonio organico. | 29 |
| 2. MATERIALI E METODI..... | 31 |
| 2.1 Inquadramento territoriale : Parco Nord Milano..... | 31 |
| 2.2 Design di campionamento | 31 |
| 2.3 Analisi di laboratorio..... | 33 |
| 2.3.1 Tessitura. | 35 |
| 2.3.2 Densità apparente | 36 |
| 2.3.3 Frazionamento. | 37 |
| 2.3.4 Misura di Carbonio e Azoto..... | 39 |
| 2.3.5 Determinazione del pH. | 40 |
| 3. RISULTATI | 41 |
| 3.1 Presentazione. | 41 |
| 3.1.1: Tessitura..... | 41 |
| 3.1.2: Densità apparente. | 42 |
| 3.1.3 Frazionamento. | 45 |
| 3.1.4 pH del suolo. | 47 |
| 3.2 Elaborazioni. | 49 |
| 3.2.1 pH del suolo. | 49 |
| 3.2.2 Qualità del carbonio..... | 51 |
| 3.2.3 Stock di carbonio. | 59 |
| 3.2.4 Analisi dei profili pedologici | 63 |
| 4. DISCUSSIONE..... | 70 |
| 5. CONCLUSIONE. | 73 |

| | |
|------------------------------|----|
| 6. BIBLIOGRAFIA | 74 |
| 7. SITOGRAFIA | 78 |
| Ringraziamenti | 79 |

Indice delle figure

Figura 1.1.1: Schema dei processi che interessano il carbonio organico del suolo. (Lal, 2004).

Figura 1.1.2: infografica riguardante i servizi ecosistemici derivanti dal suolo. (Adhikari e Hartemink, 2016)

Figura 1.2.1: mappa di distribuzione del tasso di erosione del suolo, indicatore dei fenomeni degradativi. (Garcia Ruiz et al., 2015)

Figura 1.3.1: infografica riguardante source e sink di carbonio. (The international “4 per 1000” Initiative)

Figura 1.3.2: infografica riassuntiva dell’Iniziativa 4x1000. (The international “4 per 1000” Initiative)

Figura 1.3.3: logo del progetto SUPERB.

Figura 1.3.4: infografica di sintesi delle azioni promosse dal progetto SUPERB.

Figura 1.4.1: mappa delle aree piantumate al Parco Nord Milano.

Figura 1.4.2: immagine al SIM di una particella di POM. (Witzgall et al., 2021)

Figura 2.2.1: immagine dei cilindri di campioni indisturbati.

Figura 2.3.1: Particolare di un campione di suolo in fase preliminare di setacciamento.

Figura 2.3.2: particolare dello scheletro isolato.

Figura 2.3.3: particolare della tramoggia.

Figura 2.3.4: equazioni per il calcolo della densità apparente (Hollis et al., 2012.)

Figura 2.3.5: particolare dei campioni lasciati in frigorifero.

Figura 2.3.6: particolare di POM e sabbia isolati.

Figura 3.2.1: grafico a dispersione del valor medio di pH nei suoli superficiali. (Elaborazione Excel)

Figura 3.2.2: grafico a dispersione del valor medio di pH nei suoli profondi. (Elaborazione Excel)

Figura 3.2.3 trend temporale dei dati medi per i suoli superficiali rispetto all’anno di piantumazione. (Elaborazione Excel)

Figura 3.2.4 trend temporale dei dati medi per i suoli profondi rispetto all’anno di piantumazione. (Elaborazione Excel)

Figura 3.2.5 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto POM/Ctot nei suoli superficiali eliminando i valori anomali. (elaborazione Excel)

Figura 3.2.6 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto POM/Ctot nei suoli profondi eliminando i valori anomali. (elaborazione Excel)

Figura 3.2.7 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto MAOM/Ctot per i suoli superficiali rispetto all'anno di piantumazione. (Elaborazione Excel)

Figura 3.2.8 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto MAOM/Ctot per i suoli profondi rispetto all'anno di piantumazione. (Elaborazione Excel)

Figura 3.2.9 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto MAOM/Ctot nei suoli superficiali escludendo i valori anomali. (Elaborazione Excel)

Figura 3.2.10 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto MAOM/Ctot nei suoli profondi escludendo i valori anomali. (Elaborazione Excel)

Figura 3.2.11 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto SAND/Ctot per i suoli superficiali rispetto all'anno di piantumazione. (Elaborazione Excel).

Figura 3.2.12 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto SAND/Ctot per i suoli profondi rispetto all'anno di piantumazione. (Elaborazione Excel).

Figura 3.2.13 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto SAND/Ctot per i suoli superficiali eliminando i valori anomali. (Elaborazione Excel)

Figura 3.2.14 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto SAND/Ctot per i suoli profondi eliminando i valori anomali. (Elaborazione Excel)

Figura 3.2.15: media dello stock di carbonio rispetto all'età di piantumazione dei boschi. (Elaborazione Excel)

Figura 3.2.16: media dello stock di carbonio rispetto all'età di piantumazione dei boschi non considerando i valori anomali. (Elaborazione Excel)

Figura 3.2.17: profilo pedologico sito S1.

Figura 3.2.18: profilo pedologico sito S2.

Figura 3.2.19: profilo pedologico sito S3.

Figura 3.2.20: profilo pedologico sito S4.

Figura 3.2.21: profilo pedologico sito S5.

Figura 3.2.22: profilo pedologico sito S6.

Figura 3.2.23: profilo pedologico sito S7.

Indice delle tabelle

Tabella 1.4.1: tabella riassuntiva della denominazione utilizzata nello studio

Tabella 3.1.1: tabella riassuntiva degli identificativi utilizzati, dell'anno di cambio d'uso del suolo e delle destinazioni d'uso precedente e attuale. (Elaborazione Excel).

Tabella 3.1.2: Risultato delle analisi di tessitura, la prima colonna a sinistra denota il sistema di nomenclatura da noi utilizzato per i campioni.

Tabella 3.1.3: risultati parziali di densità apparente.

Tabella 3.1.4: risultati finali di densità apparente (Elaborazione Excel)

Tabella 3.1.5: Percentuali di Carbonio organico nelle tre frazioni riferite ai suoli superficiali.

Tabella 3.1.6: Percentuali di Carbonio organico nelle tre frazioni riferite ai suoli profondi.

Tabella 3.1.7: percentuali di azoto riferite ai suoli superficiali.

Tabella 3.1.8: percentuale di azoto riferita ai suoli profondi.

Tabella 3.1.9 risultati delle analisi di pH per i suoli superficiali.

Tabella 3.1.10 risultati di pH per i suoli profondi.

Tabella 3.2.1: Tabella riassuntiva dei valori medi di pH nei suoli superficiali per ogni stand con relative deviazioni standard. (Elaborazione Excel).

Tabella 3.2.3: valori medi del contenuto di carbonio nel POM rispetto al carbonio totale per i suoli superficiali con relativa deviazione standard. (Elaborazione Excel)

Tabella 3.2.4: valori medi del contenuto di carbonio nel POM rispetto al carbonio totale per i suoli profondi con relativa deviazione standard. (Elaborazione Excel)

Tabella 3.2.5: valori medi del contenuto di carbonio nel MAOM rispetto al carbonio totale per i suoli superficiali con relativa deviazione standard. (Elaborazione Excel)

Tabella 3.2.6: valori medi del contenuto di carbonio nel MAOM rispetto al carbonio totale per i suoli profondi con relativa deviazione standard. (Elaborazione Excel)

Tabella 3.2.7: valori medi del contenuto di carbonio nella SAND rispetto al carbonio totale per i suoli superficiali con relativa deviazione standard. (Elaborazione Excel).

Tabella 3.2.8: valori medi del contenuto di carbonio nella SAND rispetto al carbonio totale per i suoli profondi con relativa deviazione standard. (Elaborazione Excel).

Tabella 3.2.9: Calcoli parziali per lo stock di carbonio. (Elaborazione Excel).

Tabella 3.2.10: Calcoli finali per lo stock di carbonio. (Elaborazione Excel).

Tabella 3.2.11: tabella riassuntiva della media dello stock di carbonio per ogni Stand riferito ai singoli stand. (Elaborazione Excel).

Tabella 3.2.12: analisi del profilo pedologico sito S1.

Tabella 3.2.13: analisi del profilo pedologico sito S2.

Tabella 3.2.14: analisi del profilo pedologico sito S3.

Tabella 3.2.15: analisi del profilo pedologico sito S4.

Tabella 3.2.16: analisi del profilo pedologico sito S5.

Tabella 3.2.17: analisi del profilo pedologico sito S6.

Tabella 3.2.18: analisi del profilo pedologico sito S7.

1. INTRODUZIONE

1.1.1 Suolo e servizi ecosistemici.

Le esternalità positive di cui l'uomo beneficia in virtù dell'esistenza degli ecosistemi sono state riassunte sotto il termine di Servizi Ecosistemici, nel 2005, dal Millennium Ecosystem Assessment che li ha raggruppati in quattro categorie: servizi di approvvigionamento diretto o indiretto (quali acqua, prodotti agricoli, legno, fibre o combustibili) servizi di regolazione (dinamiche dell'acqua, del clima o regolazione dei processi biologici), servizi culturali (estetici, spirituali o ricreativi) e servizi di supporto (regolazione del ciclo dei nutrienti, biodiversità e conservazione degli habitat).

Il suolo di ecosistemi naturali o gestiti dall'uomo è considerato un punto critico dei servizi di regolazione in quanto caratterizzato da un'intrinseca multifunzionalità che viene sintetizzata nell'espressione "funzioni del suolo" (*Adhikari e Hartemink, 2016*). In virtù di queste funzioni il suolo promuove diversi Servizi Ecosistemici; esso è considerato come uno dei biomateriali più complessi presenti sulla Terra (*Young e Crawford, 2004*) e una componente di interfaccia fondamentale tra litosfera, biosfera, idrosfera e atmosfera (*Szabolcs, 1994*). *Daily et al. (1997)*, suggeriscono che i suoli sono una determinante fondamentale delle condizioni economiche di una nazione e che l'incorporazione di essi in contesti politici e decisionali sia di fondamentale importanza.

La relazione esistente tra carbonio nel suolo, biota nel suolo, ruolo del suolo nelle dinamiche dei nutrienti e dell'acqua e come queste caratteristiche concorrano all'approvvigionamento di servizi ecosistemici è stata ben documentata in letteratura (e.g., *Barrios, 2007, Ghaley et al., 2014, Khanna et al., 2010, Krishnaswamy et al., 2013, Marks et al., 2009, van Eekeren et al., 2010, Williams and Hedlund, 2013*); queste relazioni sono state studiate spesso attraverso la mappatura e l'analisi di dati proxy; tale approccio, riportano *Adhikari e Hartemink, (2016)*. è dovuto alla discreta disponibilità di dati diretti riferiti alle caratteristiche dei suoli stessi; il dato che è stato più largamente utilizzato è quello di uso e copertura del suolo (LULC: Land Use and Land Cover).

Il suolo è una componente di primaria importanza rispetto a tematiche di sostenibilità ambientale quali cambiamento climatico, riduzione della biodiversità, water security e food security e la sensibilità rispetto a questo tema sta acquistando sempre più attenzione a livello politico (*Bouma e McBratney, 2013*).

Negli ultimi anni una serie di importanti iniziative a livello globale hanno interessato le tematiche riguardanti il contributo del suolo ai servizi ecosistemici, ad esempio la FAO (Food and Agriculture Organization) ha fondato la Global Soil Partnership il cui compito è quello di coordinare iniziative che sottolineino l'importanza del suolo a livello di dibattito politico internazionale.

La valorizzazione dei servizi ecosistemici sopracitati è stata rafforzata negli anni dal concetto della *soil security* che mette in relazione diverse tematiche ambientali nelle quali il suolo gioca un ruolo fondamentale oltre a promuovere la sostenibilità degli ecosistemi basata sulla salute e sulla qualità del suolo stesso.

Uno dei servizi ecosistemici offerti dal suolo e considerato di cruciale importanza è il servizio di regolazione, in particolare la capacità del suolo di assorbire e stoccare carbonio. La quantità totale di carbonio stoccata nel suolo è stimata intorno alle 2500 Gt di cui 1550 Gt di carbonio

organico (SOC: Soil Organic Carbon) e 950 Gt di carbonio inorganico (SIC Soil Inorganic Carbon); il pool di carbonio in esso stoccato è 3.3 volte maggiore della quantità presente in atmosfera e 4.5 volte maggiore della quantità presente a livello biotico (Lal, 2004).

Per valutare i servizi ecosistemici offerti dal suolo bisogna considerare che essi dipendono dalle proprietà del suolo stesso e dalle loro reciproche interazioni, le quali sono regolate principalmente dalle strategie di gestione di tale risorsa. Lal (2004) sottolinea come la conversione da suolo naturale a suolo destinato all'attività agricola conduca ad una diminuzione della frazione organica nel suolo pari al 60% nelle regioni temperate, tale fenomeno conduce alla diminuzione nella qualità del suolo stesso con conseguente diminuzione della produttività e peggioramento nella qualità delle acque. Infatti, la sostanza organica rappresenta il principale indicatore di qualità dei suoli, essendo associata alla capacità di scambio che determina la disponibilità di nutrienti per le piante, all'attività biologica e alla biodiversità, alla struttura e alla porosità, che influenzano permeabilità e ritenzione idrica.

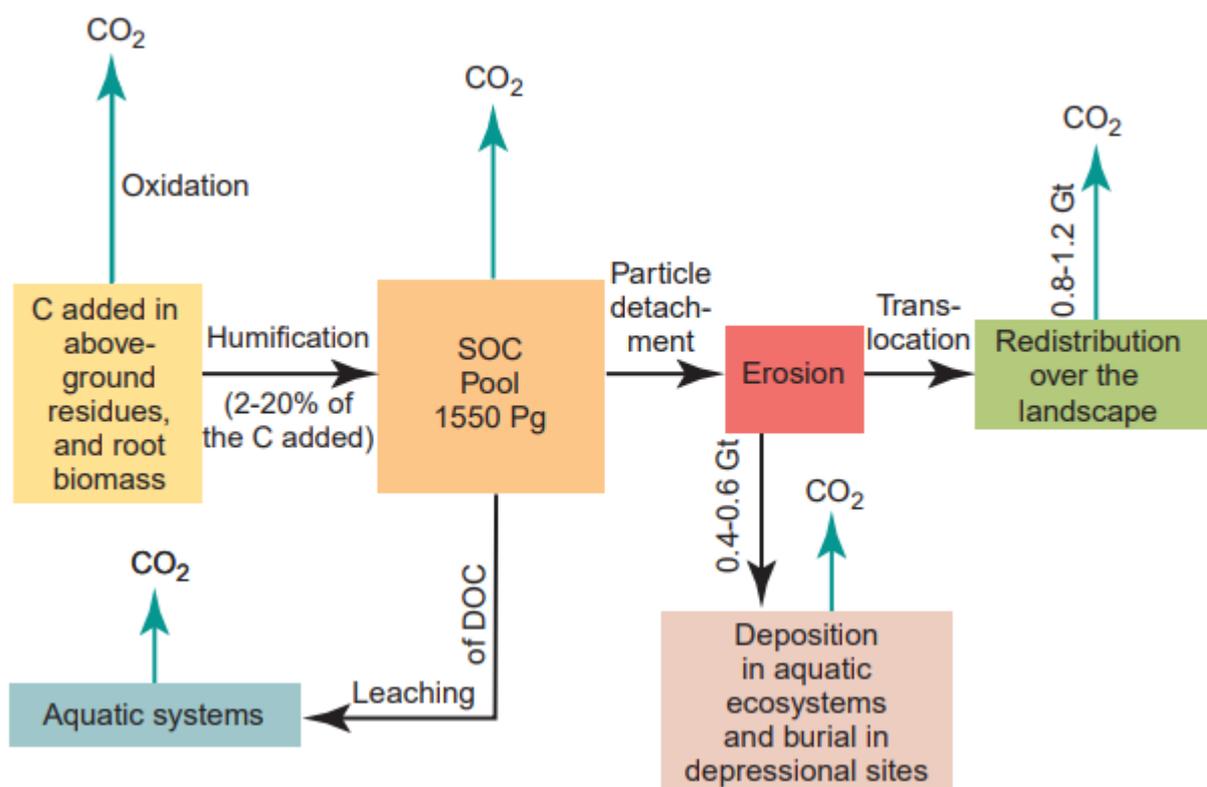


Figura 1.1.1: Schema dei processi che interessano il carbonio organico del suolo (Lal, 2004).

Gli aspetti evidenziati in precedenza si inseriscono nella capacità del suolo di mitigare gli effetti del cambiamento climatico di cui è dimostrato che l'emissione di gas climalteranti, CO₂ in primis, contribuisce in misura sostanziale. I processi degradativi che riguardano il suolo possono, però, concorrere ad esacerbarne gli effetti, si stima che attraverso la perdita di sostanza organica, causata da pratiche agricole non conservative, al suolo possa essere associata l'emissione di 2.5 Gt di carbonio in atmosfera.

La capacità del suolo di sequestrare il carbonio atmosferico implica il trasferimento dell'anidride carbonica, tramite processi fotosintetici che ne fissano la molecola in molecole organiche più complesse, in pool a lunga permanenza che ne impediscono la re immissione in

atmosfera in tempi rapidi; tale capacità, inoltre, è promossa da sistemi di gestione del suolo, quali agricoltura conservativa e agroforestazione che contribuiscono a fornire biomassa aggiuntiva causando il minimo disturbo possibile e promuovendo caratteristiche quali capacità di ritenzione idrica, struttura del suolo e il grado di biodiversità nella pedofauna.

La stima delle potenzialità di sink di un suolo varia in modo continuo da 0.4 Gt C/ anno a 1.2 Gt C/ anno pari al 5% e al 15% delle emissioni globali (Lal, 2004); tale valutazione è ritenuta fondamentale per diversi aspetti, uno dei quali, particolarmente attuale, riguarda lo scambio di crediti di carbonio, ossia strumenti finanziari che certificano l'esistenza di progetti atti al sequestro di anidride carbonica; la promozione di questo tipo di prodotti può essere considerata come uno stimolo al mantenimento della salute dei suoli. (Lal, 2004).

Il carbonio, una volta sequestrato e trasferito nel suolo sotto forma di molecole complesse (humus) permane in questo pool fintanto che erosione o pratiche agricole non conservative (come arature profonde) non ne causano le re-immissione in atmosfera.

Il tempo di permanenza del carbonio nel suolo è un tratto fondamentale per la mitigazione degli effetti del cambiamento climatico. Questo tempo dipende, in prima battuta, dalla tessitura del suolo (suoli argillosi tendenzialmente fissano quantità maggiori di carbonio), dalla stabilità chimica delle strutture organiche formate, dall'esposizione dei siti, dalla temperatura e dal regime delle precipitazioni. (Lal, 2004).

La tessitura è un parametro importante: la frazione più fine, con particelle dotate di elevato rapporto superficie/volume, tendono ad avere una grande affinità per le molecole organiche umificate, che si legano alla superficie delle argille raggiungendo un'elevata stabilità, al contrario le particelle sabbiose, dotate di un rapporto superficie/volume inferiore, tendono a stabilizzare bassi quantitativi di sostanza organica.

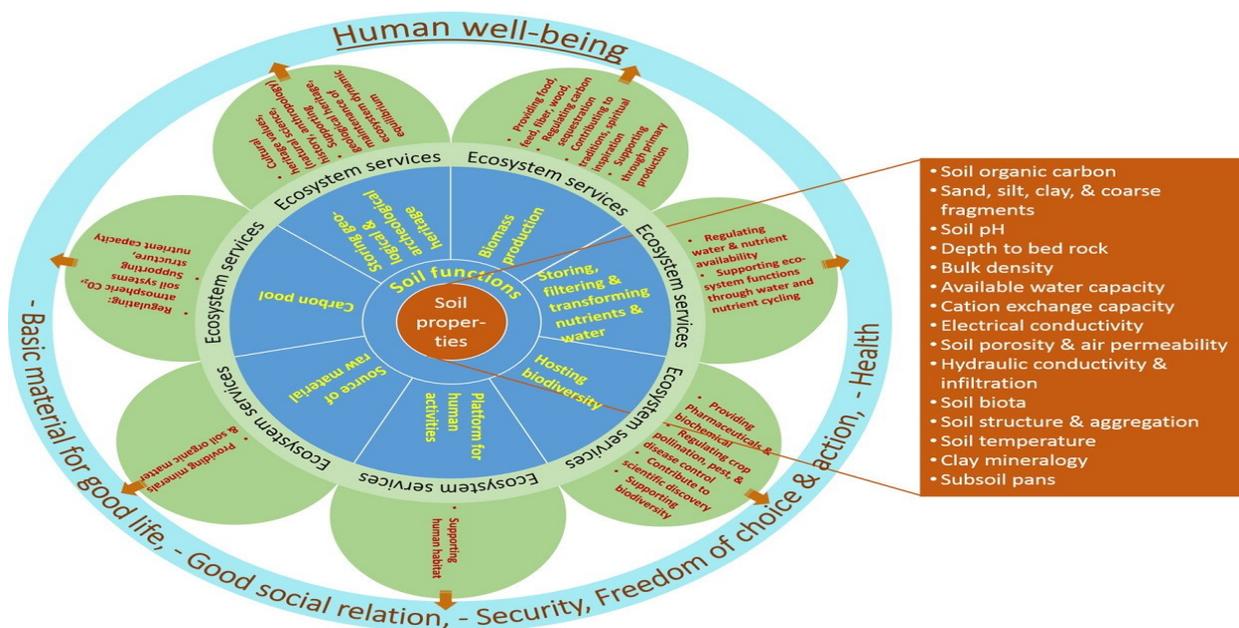


Figura 1.1.2: infografica riguardante i servizi ecosistemici derivanti dal suolo (Adhikari e Hartemink, 2016).

1.2.1 Perdita e degradazione del suolo.

Nel report del 2024, l'IPCC ha dedicato l'intero quarto capitolo alle problematiche legate alla degradazione dei suoli e all'impatto che questo processo può avere sulle attività antropiche e sulla vita nella sua interezza. In tale capitolo come primo punto si stabilisce una definizione univoca di degradazione dei suoli; infatti, in letteratura, si possono trovare molteplici definizioni di tale processo rispetto al quale si possono enfatizzare le correlazioni con biodiversità, funzioni nell'ecosistema e servizi ecosistemici. (*Montanarella et al., 2018*). La degradazione del suolo viene definita come una tendenza negativa nella condizione del suolo, causata da processi di origine, o correlati con l'attività antropica, che si esplica, in un'ottica di lungo periodo, come perdita di produttività biologica, integrità ecologica o valore per gli individui, inteso come perdita dei servizi ecosistemici associati al suolo stesso.

I processi citati si rifanno sia a problematiche riguardanti l'erosione e la perdita di suolo, sia al degrado di quest'ultimo, in particolare delle sue caratteristiche chimiche, fisiche e biologiche e, in ultimo, alla perdita a lungo tempo della vegetazione. Tutti i processi appena citati vengono esacerbati dal contesto di cambiamento climatico che il nostro pianeta sta attraversando sebbene una diretta correlazione, ad esempio tra degrado di suolo e temperatura media o tra degrado e precipitazioni, sia di difficile dimostrabilità (*Giorgi e Lionello, 2008; Pendergrass, 2018*).

Nel Report 2024 l'IPCC ha diviso i meccanismi del processo di degradazione dei suoli in due macro-insiemi:

- Processi di degradazione: ossia i meccanismi diretti attraverso i quali il suolo perde le sue caratteristiche di fertilità.
- Drivers di degradazione: ossia meccanismi non direttamente correlati alla perdita di suolo ma dei quali può essere dimostrato un nesso causale. Esempio di tali processi può essere la fluttuazione del prezzo di una coltura la quale può spingere al cambiamento di uso del suolo o la modificazione nella distribuzione e nell'intensità dei fenomeni climatici estremi.

1.2.2 Processi di degradazione.

Il principale punto che viene sottolineato preliminarmente nel Report IPCC 2024 riguarda la conversione nella destinazione d'uso dei suoli. Infatti, i processi che influiscono sul degrado del suolo, sono in via diretta o indiretta legati alle dinamiche di pressione climatica, o alla conversione nella destinazione d'uso, tra questi possiamo trovare: salinizzazione dei suoli, perdita di sostanza organica e sommersione. La perdita di sostanza organica è una delle principali problematiche legate al degrado del suolo, tale processo è considerato, inoltre, come un processo di primo ordine direttamente correlato con le dinamiche di cambiamento climatico, principalmente con l'aumento della temperatura (*Crowther et al., 2016*).

I processi di degradazione chimica del suolo si rifanno principalmente alla perdita di nutrienti, ai processi di acidificazione e aumento della tossicità da metalli. L'acidificazione dei terreni agricoli è spinta principalmente dalle eccessive fertilizzazioni azotate e dalla diminuzione nella concentrazione di cationi quali il Calcio, Magnesio e Potassio (*Guo et al., 2010*).

Il principale processo critico di degradazione chimica del suolo è, come già anticipato in precedenza, legato alla perdita di sostanza organica, infatti il processo di stoccaggio del carbonio organico nel suolo è considerato un fulcro nel ciclo di tale elemento e un collegamento essenziale con il sistema clima (*Minasny et al., 2017*). Tale diminuzione è causata principalmente dall'aumento del tasso di respirazione nei suoli agricoli dovuta alle pratiche di lavorazione profonda del terreno e alla mancanza degli input da parte degli apparati radicali delle piante; la diminuzione di materia organica nel suolo è influenzata, inoltre, anche dagli effetti diretti del cambiamento climatico, non solo nei terreni coltivati ma anche nelle formazioni naturali (*Bond-Lamberty et al., 2018*). L'erosione soprattutto nei sistemi agricoli è un ulteriore fattore di perdita di SOM. Un altro processo fortemente correlato alla perdita di sostanza organica nel suolo riguarda la perdita di terreno forestale, la cui risorsa viene abbattuta per fare spazio alle colture o per portare avanti il processo di urbanizzazione. Questa conversione da suolo forestale a superfici fortemente antropizzate è associata con una perdita netta nello stock di carbonio sia nel pool vegetale che nel suolo.

Tutti i processi citati e legati al clima con un ottimo livello di confidenza possono essere, quindi, considerati secondari rispetto alle attività umane quali sovrappopolazione, eccessiva urbanizzazione e cementificazione che sappiamo essere le principali forze di trazione della perdita di suolo.

Una valutazione riguardo alla magnitudine del fenomeno di degradazione dei suoli in relazione alle attività agricole è stata svolta e riassunta da *Garcia-Ruiz et al. (2015)*. Tale studio si è basato su 1673 misurazioni svolte a livello globale; i risultati indicano che il tasso di perdita di suolo, calcolato rispettivamente su terre arate e non arate, si attesta intorno alle 18 t ha⁻¹ yr⁻¹ e 0.8 t ha⁻¹ yr⁻¹, tale tasso è 380 volte maggiore del naturale livello di neo-formazione del suolo per le terre arate e 16 volte maggiore per le terre non arate; tali tassi dipendono principalmente dal tipo di copertura vegetale e dai metodi di gestione del suolo stesso.

1.2.3 Drivers di degradazione.

La degradazione dei suoli è spinta da un ampio spettro di fattori; da eventi intensi di breve durata quali piogge intense che interessano superfici limitate fino a processi su tempi scala di secoli riguardanti la perdita di nutrienti e l'erosione. I drivers della degradazione dei suoli, ossia l'insieme di processi indirettamente legati alle dinamiche di impoverimento di essi, sono generalmente valutati in base alla possibilità di ripresa dell'ecosistema suolo, sottolineando come tale valutazione sia di difficile applicazione; tale aspetto è dovuto al fatto che il tasso di neo-formazione del suolo è particolarmente lento, attestandosi a meno di 5 mm al secolo (*Delgado e Gomez, 2016*).

Il più importante driver di degradazione risiede nel fenomeno dell'erosione ossia la perdita a lungo tempo del suolo stesso, si sottolinea che il processo è fortemente esacerbato dalle pratiche agricole, infatti è stato dimostrato che il tasso di erosione in terreni lavorati supera di due ordini di grandezza il tasso di rigenerazione del suolo stesso (*Montgomery, 2007*). Gli effetti sul suolo e sul paesaggio dei processi erosivi, anche determinati da fenomeni puntuali ma intensi, possono risultare evidenti per decenni o addirittura per secoli. Alcuni studi hanno dimostrato come l'intensificazione agricola, promotrice di fenomeni erosivi, avvenuta con l'occupazione

romana in territorio francese abbia lasciato dei segni sul paesaggio ancora visibili ai giorni nostri (*Showers, 2005*). Questo permette di comprendere come, a volte, i processi di degradazione possano essere considerati, in ultima analisi, irreversibili (*Dupouey et al., 2002*).

Considerando il fatto che il suolo contiene circa 1500 Gt di carbonio organico (pari a 1.8 volte del carbonio contenuto in atmosfera e 2.5 volte la quantità di carbonio trattenuta nei vegetali) una non decrescita nel trend di perdita di suolo potrebbe potenzialmente impattare in modo sostanziale sulla concentrazione atmosferica di CO₂, innescando, così, potenziali effetti a feedback positivo; in una prospettiva di cambiamento climatico, infatti, il suolo ha un effetto primario anche riguardo alle dinamiche di ossido di azoto (N₂O) e metano (CH₄), due dei principali gas clima-alteranti. L'ossido di azoto è prodotto dall'attività dei microbi e le sue dinamiche sono correlate direttamente sia con le pratiche di gestione che con le condizioni meteo-climatiche, mentre le dinamiche riguardanti il metano considerano principalmente il quantitativo totale di carbonio organico stoccato nel suolo, soprattutto in condizioni anaerobiche.

Oltre all'erosione, i drivers di degradazione dei suoli possono essere legati al cambiamento climatico attraverso diverse modalità e processi sia diretti che indiretti. I processi diretti riguardano le interazioni che si attuano tra clima e suolo nello stesso piano spazio-temporale, ad esempio un'intensificazione nella durata e nell'intensità delle piogge può condurre sia ad una sovraesposizione dei suoli ai fenomeni erosivi sia ad una diminuzione nella quantità di nutrienti presenti nel suolo stesso; allo stesso modo prolungate siccità conducono ad una diminuzione o addirittura ad un azzeramento nella copertura vegetale esacerbando l'azione delle già citate precipitazioni; gli impatti indiretti del cambiamento climatico, invece, implicano una separazione nello spazio e nel tempo tra il fenomeno e l'effetto generato, ad esempio la diminuzione di produttività dei suoli agricoli dovuta alle avverse condizioni climatiche può condurre ad uno spostamento dell'attività agricola con una conseguente intensificazione, la quale, come è già stato sottolineato, rappresenta una delle principali cause di impoverimento dei suoli e desertificazione.

Alcuni studi riassunti nel capitolo 4 del Report 2024 dell'IPCC sottolineano fortemente la correlazione esistente tra la modificazione della copertura vegetale e la degradazione dei suoli; ad esempio, *Settele et al. (2015)* ricordano che il mosaico vegetazionale, ossia l'insieme delle specie vegetali che considera la loro distribuzione su un territorio, dipende intrinsecamente da tre fattori: la capacità di una specie di raggiungere un determinato areale, la modalità con cui la specie tollera le condizioni ambientali e le interazioni che si stabiliscono tra gli individui stessi quali dinamiche di competizione per acqua, luce e nutrienti.

Le dinamiche di cambiamento climatico si ipotizza, con elevato grado di confidenza, possano portare a sostanziali modificazioni nei mosaici vegetazionali; alcuni studi come quelli condotti da *Warren et al. (2018)*, prevedono che la biodiversità rimarrà intatta solamente nel 33% dei casi considerando uno scenario climatico che ipotizzi un riscaldamento di 4.5°C rispetto alla temperatura attuale mentre tale percentuale si vede raddoppiata se l'aumento di temperatura verrà contenuto intorno ai 2°C di riscaldamento.

Citando, questa volta l'AR5, (Report IPCC, 2014) la correlazione tra cambiamento climatico e modificazioni nei biomi è tanto più forte quando si considera la modifica della temperatura come unico driver; infatti considerando fenomeni complessi come il cambiamento climatico dove numerose variabili concorrono alle modifiche del clima l'incertezza dei modelli e delle predizioni aumenta.

Per quanto riguarda, invece, gli effetti indiretti del cambiamento climatico rispetto al degrado del suolo l'IPCC sottolinea come essi siano di difficile predizione in quanto le dinamiche di cambiamento d'uso del suolo sono molteplici e i processi che le governano sono il risultato di interazioni complesse che combinano effetti fisici, biologici ma anche drivers socio-economici (*Lambin et al., 2001*).

Schematicamente i drivers associati al cambiamento climatico possono agire in due direzioni. Una di queste due direzioni può essere potenzialmente migliorativa, anche se consideriamo trend di variazione quali l'aumento della CO₂ atmosferica; alcuni studi suggeriscono infatti che tale aumento possa comportare entro il 2100 un aumento delle terre adatte per l'agricoltura nelle regioni più a nord del mondo fino al 16% (*Ramankutty et al., 2002*), ma in parallelo una diminuzione nelle regioni più meridionali.

La direzione peggiorativa è sintetizzata specificamente nella perdita di suolo, tale aspetto è stato studiato grazie all'analisi di dati indiretti quali la distribuzione di mortalità degli alberi in quanto affetta da dinamiche di intensificazione di eventi quali stress da caldo e siccità i quali possono rappresentare, su ampia scala, un ottimo indicatore dell'azione di impoverimento causato dal cambiamento climatico (*Allen et al., 2010*).

Come ulteriori drivers di modificazione delle caratteristiche dei suoli può essere considerato anche un ampio range di fattori quali l'aumento demografico, il progresso tecnologico, i cambiamenti nello stile di vita dei consumatori, cambiamenti politico-economici e sociali (*Mirzabaev et al., 2016*).

L'impoverimento dei suoli, particolarmente evidente nelle regioni tropicali del mondo, può condurre sia ad una diminuzione nella *food security*, definita dalla FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) come il diritto delle persone di avere accesso a cibo sano e nutriente che incontri le proprie necessità e preferenze; sia a fenomeni quali la perdita di suolo forestale necessaria a creare nuove terre arabili.

Considerando un contesto di cambiamento climatico, si prospetta che esso avrà importanti effetti sulla diminuzione della produttività dei terreni agricoli, con conseguenze su cambiamenti di uso di suolo e perdita di fertilità; *Porter et al. (2014)*, affermano che un aumento di temperatura che si attesti sui +3°C avrà effetti su tutti i tipi di colture, se insieme a questo dato si considerano le proiezioni che riguardano l'aumento della domanda di cibo, che nel 2050 sarà prevista raddoppiare, la sfida che riguarda l'utilizzo efficiente e sostenibile del suolo risulta sempre più impellente.

In conclusione è possibile affermare che essendo la degradazione dei suoli un fenomeno complesso e sottoposto all'azione multipla di diversi fattori sia che essi siano climatici, biotici e di gestione esso deve essere monitorato e studiato sia a scala spaziale che temporale.

Considerando il fatto che, come affermato precedentemente, l'impoverimento dei suoli è strettamente dipendente dalle pratiche di gestione degli stessi è possibile che i contesti di cambiamento su diversi livelli (climatico, socio-economico, politico ecc..) sottolineati in precedenza possano promuovere cambiamenti nella gestione del suolo limitando gli impatti o addirittura riducendoli in un processo che in letteratura è denominato adattamento trasformatore (*Kates et al., 2012*).

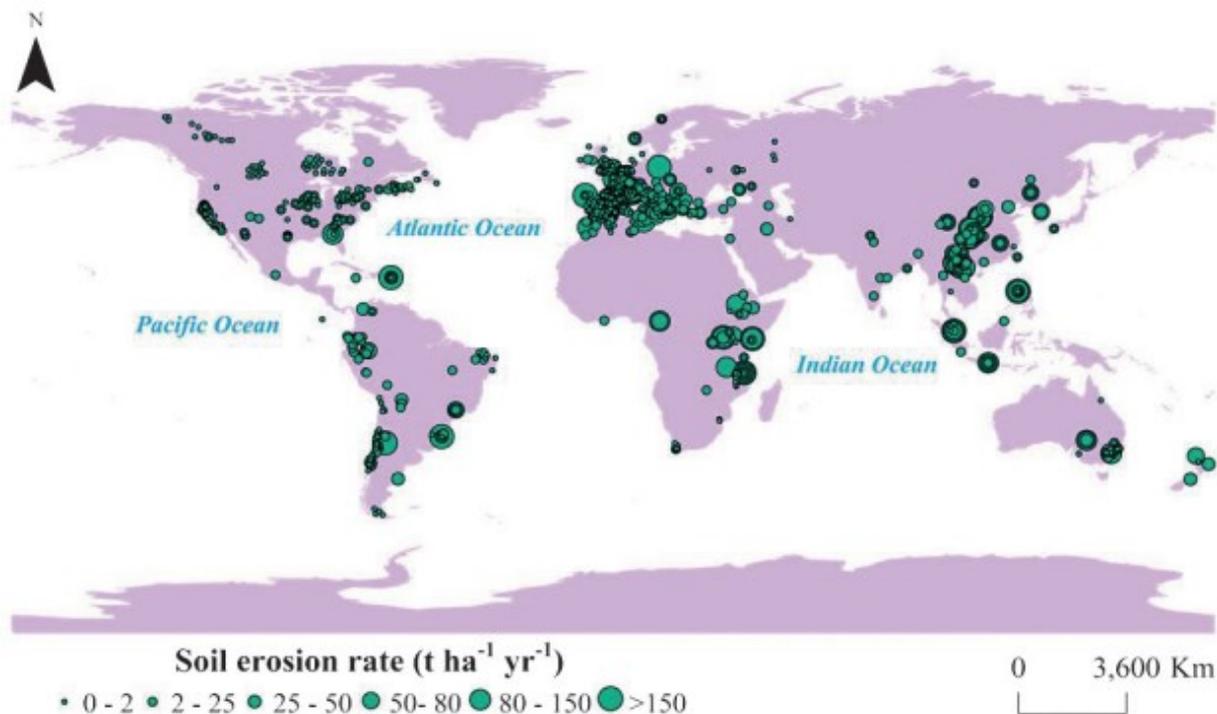


Figura 1.2.1: mappa di distribuzione del tasso di erosione del suolo, indicatore dei fenomeni degradativi (Garcia Ruiz et al., 2015)

1.3.1 Limitare e mitigare: Nature Based Solutions e riforestazione.

Una delle possibili strategie attraverso le quali si può attuare una forma di mitigazione del cambiamento climatico è l'utilizzo di Nature Based Solutions (NBS) ossia l'investimento in progetti naturali con l'obiettivo di proteggere, gestire in modo sostenibile e riportare allo stato semi-naturale alcuni ecosistemi.

I principali obiettivi alla base di questa strategia riguardano l'adattamento al cambiamento climatico, la riduzione del rischio associato agli eventi estremi, la perdita di biodiversità, la salute umana, oltre che a water e food security con il fine ultimo di massimizzare i benefici apportati sia alla natura stessa che alla vita; infatti viene stimato che, ad esempio, attraverso l'implementazione di NBS quali la piantumazione di foreste di mangrovie si possano risparmiare fino a 57 miliardi di dollari in tutti i paesi del sud-est Asiatico colpiti da alluvioni grazie alla capacità di queste piante di gestire le alluvioni stesse. (IUCN, International Union for Conservation of Nature).

Oltre a ciò quasi un terzo delle azioni necessarie per rientrare negli accordi per il clima di Parigi (2015) possono essere supportate da NBS, si stima come ultimo dato che i benefici derivanti dalla massimizzazione dei servizi ecosistemici attraverso NBS focalizzate sul tema clima, possano raggiungere i 170 miliardi di dollari. (IUCN, International Union for Conservation of Nature).

L'utilizzo di NBS può condurre, oltre alle conseguenze dirette di mitigazione legate al cambiamento climatico anche a conseguenze indirette quali il miglioramento della qualità del suolo a cui sono associati, a cascata, tutti i benefici citati nei paragrafi precedenti.

Due delle principali forme di NBS sono rappresentate da forestazione e riforestazione di aree con diversa destinazione di uso del suolo originaria; tali pratiche possono contribuire alla mitigazione del cambiamento climatico aumentando le superfici forestate le quali contribuiscono attivamente al sequestro, tramite fotosintesi, di CO₂ dall'atmosfera (*Menard et al., 2022*). Con il termine forestazione si intende il processo antropico attraverso il quale avviene una conversione in suolo forestale di una superficie originariamente sfruttata per altri scopi e che non ha avuto copertura forestale per almeno 50 anni (*IPCC, 2003*). Con il termine riforestazione, si intende sempre un processo antropico che riguarda, però, una superficie forestata in origine che viene riportata al suo stato semi-naturale dopo un periodo di conversione ad altra destinazione (*IPCC, 2003*). Le due diverse strategie sono riconosciute entrambe come promotrici del sequestro di CO₂ dall'atmosfera attraverso l'implementazione o il miglioramento della capacità di sink dell'ecosistema.

In uno studio, condotto nella regione del Quebec in Canada da *Menard et al. (2022)*, sono state considerate diverse superfici con destinazione d'uso del suolo differente quali la foresta boreale di conifere e terreni ex agricoli delle zone più temperate, che sono state interessate da progetti rispettivamente di riforestazione post disturbo da fuoco e forestazione per quanto riguarda i territori agricoli. I progetti sopracitati hanno portato all'individuazione di aree per la piantumazione di 2 miliardi di alberi, strategia che il Canada ha adottato per contribuire all'obiettivo di emissioni nette pari a zero entro il 2050 (*Government of Canada, 2021*).

Considerando i tempi scala in cui si rendono manifesti gli effetti di tali progetti lo studio canadese si è basato sull'utilizzo del software di simulazione CBM (*Carbon Budget Model*) del *Canadian Forest Sector 3*, un programma che, attraverso input riguardanti la crescita media degli alberi in particolari condizioni climatico-pedologiche, permette di stimare la quantità di carbonio che viene stoccata nella biomassa in un tempo di simulazione definito a piacere. L'utilizzo delle simulazioni è stato fondamentale per calcolare il flusso netto di carbonio ossia la differenza tra gli input (fissazione della CO₂ nei tessuti vegetali) e gli output (prelievo di biomassa legnosa, eventuali disturbi o trattamenti selvicolturali). I risultati dello studio hanno dimostrato come per ogni plot considerato il sistema è diventato un sink di carbonio (condizione per cui il flusso netto tra input e output è positivo) dopo 15 anni in media dall'intervento e, per quanto riguarda la riforestazione post disturbo il risultato migliore è stato un aumento della capacità di sink pari a 369 ± 72.3 t CO₂/ha mentre per la forestazione degli ex terreni agricoli, piantati con specie a rapido accrescimento, i dati suggeriscono un aumento che va dalle 357 tCO₂/ha alle 887 tCO₂/ha (*Menard et al., 2022*).

Progetti come quello citato dimostrano come l'implementazione di soluzioni basate sulla natura possano effettivamente contribuire a modificare le dinamiche del ciclo del carbonio e, quindi, supportare strategie di mitigazione rispetto al cambiamento climatico; un altro aspetto da sottolineare in riferimento al caso studio canadese riguarda la necessità di monitorare gli ecosistemi negli anni e decenni successivi al progetto in modo tale da quantificare le eventuali addizionalità, fornire delle linee guida per la valutazione dei progetti NBS e avere dei dati quantitativi che permettano di validare le eventuali simulazioni teoriche.

Il C organico stoccato nel suolo forestale rappresenta il 71% del C organico totale stoccato negli ecosistemi forestali (*IPCC, 2007*), in questo contesto la forestazione di aree abbandonate può avere un effetto significativo nell'aumentare sia la capacità di sink del suolo che lo stock stesso (*Laganière et al., 2010; Wang et al., 2011; Wei et al., 2012*)

Una meta-analisi condotta in fasce climatiche tropicali da *Don et al. (2011)* ha dimostrato un aumento del 29% nello stock di carbonio organico mentre *Wei et al. (2012)* hanno osservato nella Cina nord-occidentale che il carbonio organico si accumula molto più rapidamente in stand forestali giovani con un'età compresa tra i 18 e i 48 anni rispetto a stand a fine ciclo dell'età di 100/200 anni; ciò sottolinea la necessità di una chiara definizione dell'orizzonte temporale del fenomeno che si intende indagare, questo aspetto verrà approfondito maggiormente nel proseguo dell'elaborato. Nello studio citato si afferma che per comprendere le dinamiche di accumulo di C organico nel suolo è fondamentale indagare gli effetti che le pratiche di forestazione hanno sulla struttura del suolo stesso; infatti, è possibile correlare l'aumento di carbonio organico nel suolo con l'aumento della stabilità degli aggregati ai quali il carbonio si associa. In particolare dopo 50 anni dall'inizio dei progetti si è notato un netto miglioramento nella struttura del suolo con un aumento dei macroaggregati e, consequenzialmente, un miglioramento nella capacità di stock. Tale effetto è maggiore nel suolo superficiale (0-10 cm) rispetto al suolo profondo (>20 cm), dove la stabilità degli aggregati risulta essere minore; i ricercatori sottolineano che una spiegazione precisa di questo fenomeno non è ancora stata approfondita ma che può essere correlata con le dinamiche di rimescolamento operate dalla pedofauna e allo sminuzzamento degli aggregati di dimensioni maggiori (*Wei et al., 2012*). Attraverso questi aspetti viene sottolineato come il solo dato sulla quantità totale di C organico stoccata nel suolo non possa essere l'unico parametro di valutazione di un progetto di forestazione ma deve essere associato a valutazioni riguardanti la qualità del carbonio e della forma in cui esso viene stoccato. In particolare, nei suoli forestali la maggior parte del carbonio presente è occlusa in macroaggregati (*Caravaca et al., 2004; Bronick and Lal, 2005*) i quali conferiscono una protezione fisica rispetto all'azione di respirazione operata dalla pedofauna; legando così la struttura del suolo con la capacità di quest'ultimo di stoccare carbonio a lungo tempo.

In virtù di ciò viene messo in evidenza come processi quali la deforestazione di superfici che verranno destinate a pratiche di agricoltura convenzionale conducano alla disintegrazione degli aggregati e, quindi, alla maggior suscettibilità della materia organica alla degradazione biologica, risultando in una perdita netta nello stock.

I casi studio presentati ci permettono, unitamente, di sottolineare come l'orizzonte temporale entro il quale confrontare i vari risultati ottenuti è una potenziale limitazione a questo tipo di studi; l'ultimo studio, poi, evidenzia come per descrivere in modo puntuale il processo dello stoccaggio di carbonio nel suolo debbano essere considerati congiuntamente diversi parametri come la precedente destinazione d'uso del suolo, quantità di carbonio stoccata dopo il progetto e qualità di tale carbonio.

1.3.2 Il ruolo del suolo: l'iniziativa 4x1000

[Discover - 4 per 1000 \(4p1000.org\)](http://4p1000.org)

L'iniziativa internazionale "4 per 1000", lanciata in Francia nel dicembre del 2015 nel contesto della COP21 mira a dimostrare il ruolo cruciale che i suoli, in particolare i suoli agricoli e forestali, hanno rispetto a tematiche quali food security e mitigazione del cambiamento climatico.

Tale iniziativa consiste principalmente nella sensibilizzazione rispetto al ruolo dei suoli e alla gestione corretta e sostenibile di questa risorsa. Come già sottolineato in precedenza le piante, attraverso i processi fotosintetici, contribuiscono ad assorbire fino al 30% delle emissioni antropiche di gas serra e attraverso gli input di sostanza organica morta nel suolo contribuiscono a conferire al suolo le condizioni di fertilità essenziali per l'approvvigionamento di cibo per gli esseri umani.

Il processo che coinvolge l'input di sostanza organica nel suolo e la successiva alterazione ad opera di funghi, batteri e mesofauna oltre a contribuire alle condizioni di fertilità nel suolo è essenziale per la capacità di C stock come ricordato nei paragrafi precedenti.

Il nome dell'iniziativa deriva proprio dalla capacità di stock di carbonio del suolo, infatti, nella presentazione del progetto viene sottolineato come un aumento dello 0.4% nella quantità di carbonio stoccata entro i primi 40 cm di suolo possa ridurre in maniera significativa la concentrazione atmosferica di gas climalteranti.



4 PER 1000

WHERE DOES IT COME FROM ?

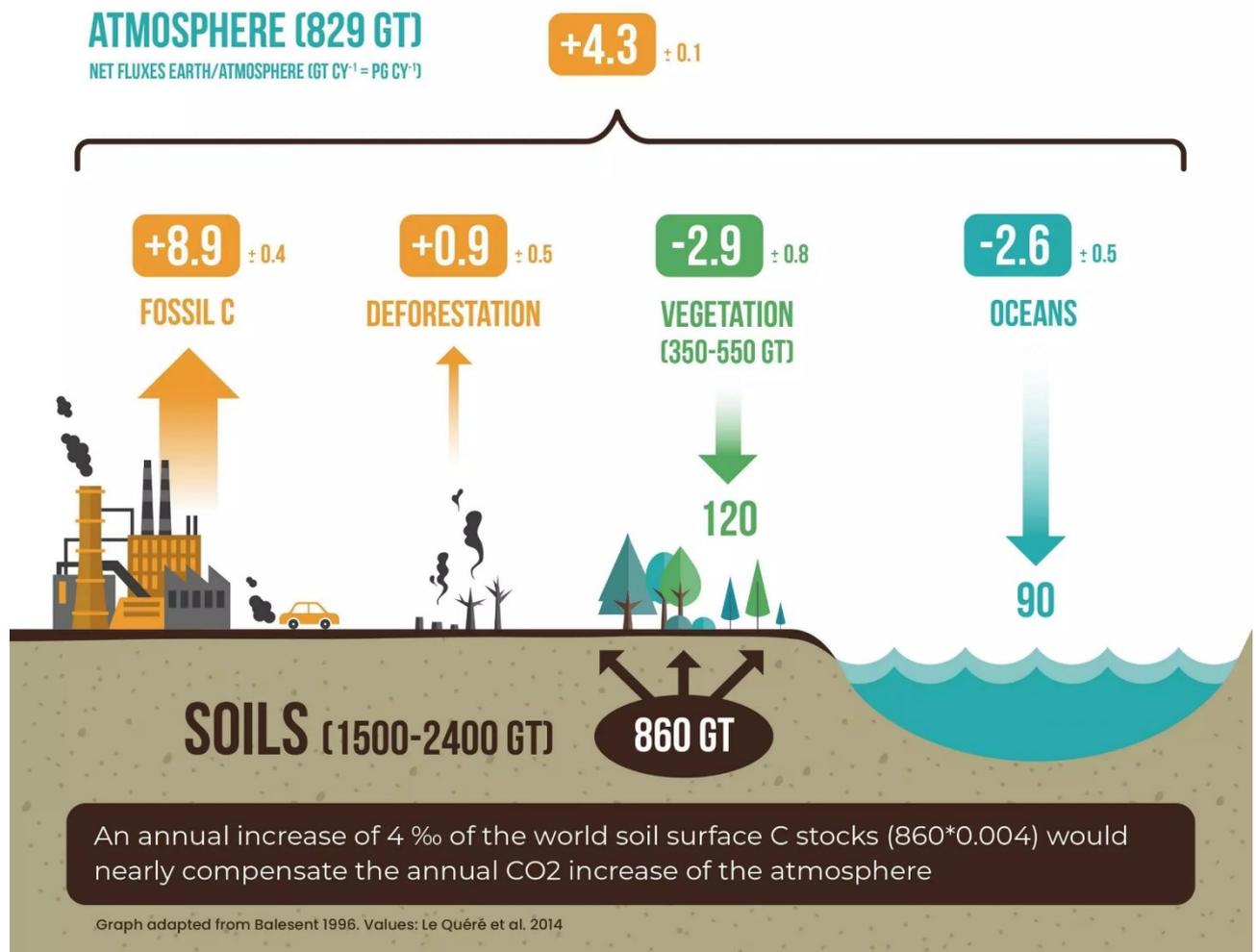


Figura 1.3.1: infografica riguardante source e sink di carbonio. (The international “4 per 1000” Initiative)

Il principale settore verso il quale è diretta l’Iniziativa 4 per 1000 è quello dell’agricoltura e della gestione forestale al quale vengono associati tre macro-obiettivi:

- Stabilizzazione del clima attraverso sequestro dell’anidride carbonica atmosferica.
- Adattamento alle condizioni di cambiamento climatico.
- Assicurare a livello globale la food security provvedendo alla produzione di sufficiente cibo.

Gli obiettivi presentati si declinano attraverso la promozione di differenti misure da adottare a livello politico e decisionale, tali misure si riconducono alla limitazione della deforestazione, alla promozione di progetti di rigenerazione degli ecosistemi naturali e all’incoraggiamento

nell'adozione di pratiche agroecologiche che permettano di migliorare la salute dei suoli attraverso l'aumento di sostanza organica in essi.

Alcune delle pratiche sopracitate possono essere, per esempio, le pacciamature che espongono in misura minore il suolo a processi erosivi e contribuiscono all'aumento della quantità di sostanza organica facilmente degradabile; la fertilizzazione organica attraverso l'utilizzo corretto dei reflui di allevamento; la promozione delle rotazioni colturali in modo da aumentare la resistenza degli agro-ecosistemi rispetto ai disturbi biotici ed abiotici e, in ultimo, i progetti di forestazione e riforestazione.

A sostegno delle linee guida proposte l'Iniziativa afferma che nel mondo ci sono oltre 570 milioni di aziende che possono aderirvi con costi variabili che possono essere compensati dal fatto che il carbonio stoccato nel suolo applicando e portando avanti tali pratiche nel tempo potrà avere tempi di ritenzione molto importanti.

Ponendo l'accento direttamente sui suoli, i partner dell'iniziativa informano che il 75% dei suoli nel mondo sia in via di degradazione per i già citati fattori di pressione antropica (principale) e climatica e si ricorda, poi, che nel contesto dell'aumento della domanda di cibo conseguente all'aumento della popolazione che nel 2050 arriverà a sfiorare i 10 miliardi di individui la sfida nel mantenimento delle caratteristiche dei suoli è sempre più importante, in quanto l'agricoltura e la produttività dei suoli agricoli sono estremamente correlate con la sanità dei suoli e con la nostra capacità di mantenerli attivi limitando processi quali erosione e impoverimento; in riferimento a ciò l'Iniziativa fornisce tre step di azione:

- Aumentare la quantità di carbonio organico nel suolo.
- Stabilizzare i suoli sviluppando o promuovendo tecniche che preservino il contenuto di carbonio organico.
- Ristabilire e migliorare suoli agricoli degradati attraverso pratiche appropriate e sostenibili.



* This international initiative can reconcile the aims of food security and the combat against climate change, and therefore engage every concerned country in COP21. *

Stéphane Le Foll, Vice Chair of the "4 per 1000" Initiative Consortium and former French Minister of Agriculture, Agrifood and Forestry

Figura 1.3.2: infografica riassuntiva dell'Iniziativa 4x1000. (The international "4 per 1000" Initiative)

1.3.3 Il progetto SUPERB: Systemic solutions for upscaling of urgent ecosystem restoration for forest-related biodiversity and ecosystem services.

[SUPERB: Upscaling Forest Restoration - SUPERB \(forest-restoration.eu\)](https://forest-restoration.eu)

Nel contesto di implementazione e monitoraggio di progetti NBS si inserisce il progetto SUPERB (Systemic solutions for upscaling of urgent ecosystem restoration for forest related biodiversity and ecosystem services), un Progetto finanziato per 20 milioni di euro dall'Unione Europea con riferimento al Green Deal, una strategia con l'obiettivo di trasformare l'Unione Europea in un'economia moderna, efficiente e sostenibile, con zero emissioni nette di gas serra entro il 2050 (*Commissione Europea*).

Il progetto consiste nella riqualificazione di migliaia di ettari di terreno forestale sul territorio europeo attraverso la piantumazione di migliaia di alberi e, soprattutto, il monitoraggio degli effetti di tali pratiche sugli ecosistemi a livelli diversi quali servizi di approvvigionamento, servizi di regolazione, servizi culturali e sociali e servizi riguardanti la biodiversità.

L'ultimo aspetto sottolineato sopra implica la formazione di un forte legame tra la messa in pratica di progetti NBS con le conoscenze scientifiche in modo da ottenere una sinergia tra portatori di interesse, società e comunità scientifica.



Figura 1.3.3: logo del progetto SUPERB. ([Resources - SUPERB \(forest-restoration.eu\)](https://forest-restoration.eu))

Il progetto si compone di 36 partners tra cui Università, aziende private e centri di ricerca divisi in 16 paesi guidati dall'European Forest Institute e coordinati dal Wageningen Environmental Research; le attività di questi enti sono focalizzate nella costituzione di un vasto network che possa conciliare conoscenza pratica e ricerca in modo tale da ottenere dati e migliorare il *know-how* rispetto agli effetti dei progetti di riforestazione.

La superficie interessata da SUPERB comprende 12 macro aree europee in 12 paesi diversi in modo tale da avere una solida base riguardante i principali fattori di stress per la riqualificazione degli ecosistemi e in modo da avere un ampio range di azioni da mettere in atto.

Schematicamente gli obiettivi di tale progetto posso essere riassunti in:

- Dimostrare e testare insieme ai portatori di interesse un approccio vincente per la riqualificazione delle diverse aree: come espresso in precedenza, SUPERB ha considerato

diverse macro aree considerando le diverse peculiarità di ognuna tendendo a restaurare la struttura, la composizione e la funzionalità delle foreste e degli habitat forestali suolo incluso; considerando, congiuntamente a questo obiettivo, il ruolo dei portatori di interesse che abitano tali aree che comprendono comunità locali, privati, comuni, foreste di proprietà degli stati e aree con destinazione di uso del suolo differente.

- Fornire evidenze riguardo la sostenibilità e la gestione vincente degli ecosistemi forestali basato sull'analisi delle pregresse esperienze di forestazione e riforestazione in Europa.
- Implementare maggiormente il supporto della società rispetto ai progetti di riqualificazione e rendere consapevoli dei benefici da essi derivanti tenendo in considerazione le richieste che la società avanza in tale contesto.
- Lanciare un mercato online interattivo dove gli agenti del mercato stesso possano supportare dal punto di vista economico i progetti futuri.
- Fornire linee guida comuni riguardo alla riqualificazione degli ecosistemi forestali creando una base scientifica di conoscenze teoriche e pratiche che possano essere funzionali al successo dei progetti futuri.
- Creare un vasto potente network che consideri tutti i portatori di interesse anche ai più alti livelli politico-decisionali.



Figura 1.3.4: infografica di sintesi delle azioni promosse dal progetto SUPERB. ([Resources - SUPERB \(forest-restoration.eu\)](https://resources-superb.forest-restoration.eu))

1.4.1 Lo studio al Parco Nord Milano

Uno dei principali obiettivi di SUPERB riguarda il monitoraggio di vecchi e nuovi progetti di forestazione/riforestazione in modo tale da poter fornire delle linee guida sovranazionali che possano rendere progetti simili, che verranno promossi in futuro, quanto più di successo e in grado di massimizzare i benefici per gli ecosistemi, e, quindi, per tutti i portatori di interesse.

In riferimento a tale obiettivo si inserisce il progetto riguardante il Parco Nord Milano che è stato scelto da SUPERB e dall'Università degli Studi di Milano come area di studio per la valutazione dell'impatto su suolo, dinamiche idrologiche e biodiversità di una campagna di forestazione che ha interessato l'area sin dalla metà degli anni '80.



Figura 1.4.1: mappa delle aree piantumate al Parco Nord Milano, in arancione sono evidenziate i diversi plot con l'anno di piantumazione. (Workplan SUPERB)

| ID | Anno piantumazione | Land Use |
|----|--------------------|----------|
|----|--------------------|----------|

| | | |
|----|------|-------|
| S1 | | Prato |
| S2 | 2014 | Bosco |
| S3 | 2010 | Bosco |
| S4 | 2006 | Bosco |
| S5 | 1995 | Bosco |
| S6 | 1987 | Bosco |
| S7 | 1984 | Bosco |

Tabella 1.4.1: tabella riassuntiva della denominazione utilizzata nello studio, si noti la destinazione d'uso del suolo.

1.4.2 La necessità di una cronosequenza.

Come è stato sottolineato nel paragrafo 1.3.1 una delle principali limitazioni rispetto agli studi che riguardano la valutazione degli effetti di progetti NBS riguarda l'orizzonte temporale entro il quale tale valutazione deve essere effettuata. Infatti, le dinamiche riguardanti il suolo e le sue caratteristiche hanno tempi scala molto lunghi; basti pensare al tasso di neo-formazione del suolo che si attesta intorno ai 5 mm secolo⁻¹ in media. Per poter, quindi, raccogliere dati rispetto a variabili quali contenuto di carbonio organico, pH del suolo, livelli di biodiversità e infiltrazione è necessario considerare particelle forestate impiantate in tempi successivi su un orizzonte temporale di almeno trent'anni.

I progetti che hanno riguardato il Parco Nord Milano forniscono, quindi, un'eccellente opportunità per determinare eventuali variazioni rispetto alle variabili suddette, ottenendo un buon esempio di cronosequenza. Il Parco, infatti, come anticipato in precedenza, è stato interessato dalla metà degli anni '80 fino ai giorni nostri da progetti di forestazione durante i quali sono stati piantati più di 200000 tra alberi e arbusti. (Marziliano *et al.*, 2009 e Sanesi, 2007).

Nel Workplan del progetto SUPERB viene riportato che la composizione specifica delle particelle forestate è abbastanza omogenea, le principali specie usate sono: *Pinus sylvestris*, *Quercus petraea*, *Quercus robur*, *Fraxinus angustifolia*, *Fraxinus excelsior*, *Populus alba*, *Populus nigra*, *Acer platanoides*, *Sorbus domestica*, *Prunus avium*, *Acer campestre*, *Quercus cerris*, *Tilia cordata*; *Tilia platyphyllos*, *Carpinus betulus*, *Junglas regia* e *Ulmus laevis*.

Perché i dati possano essere confrontati statisticamente in una cronosequenza, risulta fondamentale che le rilevazioni siano svolte in condizioni quanto più omogenee, in modo tale da poter valutare se il progetto sia effettivamente andato a migliorare le caratteristiche del suolo confrontate con una base di riferimento che, nel nostro caso, è stata un prato permanente rimasto tale dal 1984.

Come sarà possibile osservare in *Risultati 4.1* la tessitura, una delle principali variabili da cui dipende il contenuto di carbonio organico nel suolo risulta essere, in prima analisi, omogenea nei diversi stand; un gradiente ambientale più robusto riguarda, però, la destinazione d'uso del suolo prima che il Parco Nord Milano fosse istituito.

Infatti sono state considerate tre differenti origini del suolo ognuna di esse proveniente da destinazione diversa e, quindi, con classi di fertilità diverse, i suoli originariamente avevano

destinazione agricola o industriale o urbana; ovviamente alle ultime due destinazioni d'uso sono associati, generalmente, suoli più poveri. (*Workplan SUPERB*).

1.4.2 Quantità e qualità del carbonio organico.

Lo studio condotto in Cina da *Wei et al.*, (2012) citato nel paragrafo 1.3.1, ha permesso di sottolineare come lo stock di carbonio organico e, soprattutto, la permanenza del carbonio in questo pool dipenda dalle strutture che esso forma una volta alterato dalla pedofauna e dal microbiota del suolo, e in particolare dal grado di stabilità degli aggregati formati.

In questo paragrafo si vuole porre l'accento, infatti, sul fatto che il servizio ecosistemico di regolazione legato al sequestro atmosferico dell'anidride carbonica è strettamente legato alla permanenza del carbonio nel suolo stesso; infatti tanto maggiore è la permanenza del carbonio tanto più lungo sarà il tempo necessario perché il carbonio sequestrato venga reimpresso in atmosfera dai processi respirativi. Tale aspetto è correlato direttamente alla valutazione del successo di un progetto di forestazione che abbia lo scopo di mitigare gli effetti del cambiamento climatico, oltre, ovviamente, alla quantità totale di carbonio che viene stoccata nel suolo.

Il carbonio nel suolo può essere diviso in tre differenti frazioni, una di queste si considera non protetta e, quindi, immediatamente alterabile dall'azione di batteri, funghi e pedofauna, questa frazione viene generalmente indicata con la sigla POM (*Particulate Organic Matter*), un'altra frazione si considera protetta da meccanismi biochimici in quanto il carbonio che la costituisce viene trasferito nel suolo sotto forma di specie recalcitranti e, in ultimo, una specie di carbonio protetta fisicamente in quanto adsorbita alle particelle di argilla e limo che viene difficilmente respirata, tale specie prende il nome di MAOM (*Mineral Associated Organic Matter*) ed è considerata la frazione più stabile e quindi di capitale importanza per promuovere lo stock di carbonio (*Rossi, 2019*). La formazione di MAOM, inoltre, è strettamente associata all'attività microbiologica in quanto gli essudati batterici, principalmente di esopolisaccaridi sono i principali precursori del carbonio protetto da strutture organominerali (*Cotrufo, 2019*).

La protezione sopracitata del carbonio nel suolo è dovuta principalmente all'inclusione di quest'ultimo nei pori più piccoli in grado di limitare l'attività dei microrganismi (*Rossi, 2019*). Gli aggregati vengono generalmente formati attraverso la formazione di un legame tra le particelle del suolo con le radici più piccole e le ife fungine, attraverso la cementazione da parte di microbi.

Sempre in *Rossi, (2019)* si sottolinea come limo e argilla e, quindi, le classi granulometriche più piccole della frazione minerale del suolo sono direttamente connesse con la formazione di microaggregati mentre particelle più grosse quali la sabbia tende a non formare aggregati o a formare aggregati deboli e grossolani.

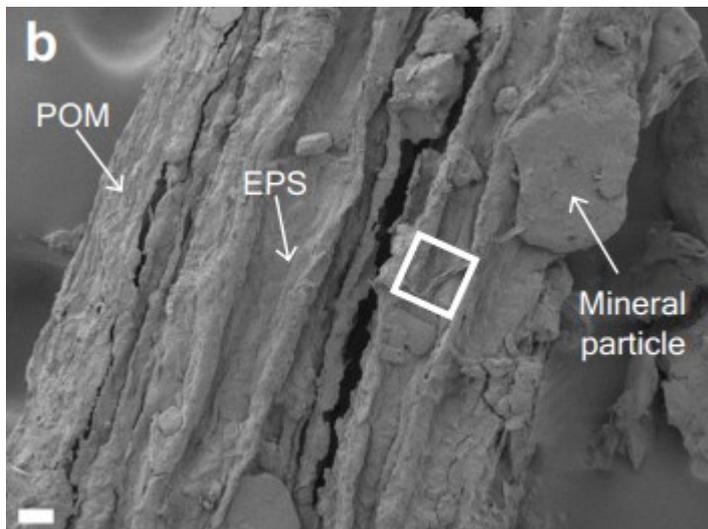


Figura 1.4.2: immagine al SEM di una particella di POM, si notino le ife fungine cementate agli aggregati minerali attraverso esopolisaccaridi. (Witzgall et al., 2021)

La riforestazione di suoli primariamente nudi può avere sia effetti positivi che effetti negativi rispetto all'accumulo di carbonio organico nel suolo. Il principale effetto positivo riguarda l'aumento di input di carbonio con il conseguente accumulo. Infatti, le potenzialità di sequestro da parte del suolo sono determinate dall'equilibrio tra gli input derivanti dalla via fotosintetica e gli output sotto forma di CO_2 dovuto alla mineralizzazione della sostanza organica da parte della pedofauna. Le piante, però, possono avere anche un effetto negativo sul sequestro di carbonio. In particolare è stato ampiamente dimostrato (Broadbent and Nakashima, 1974; Sørensen, 1974; Wu et al., 1993; Kuzyakov et al., 2000) che gli input di materiale organico da parte delle piante possono condurre ad una promozione dell'attività microbica con un risultato netto di mineralizzazione della sostanza organica preesistente nel suolo, tale effetto prende il nome di *priming effect*. Si parla di *priming effect* positivo quando gli input di carbonio labile conducono ad un aumento dell'attività microbica con un effetto negativo sullo stock di carbonio; in caso contrario se l'attività microbica viene promossa nella direzione della mineralizzazione della sostanza organica di nuovo apporto si parla di *priming effect* negativo con aumento della capacità di stock del suolo.

L'impatto e la direzione del *priming effect* sono regolati da un complesso equilibrio tra suolo, piante e comunità microbiche (Cheng e Kuzyakov, 2005), una delle discriminanti di questo effetto riguarda, ad esempio la concentrazione di azoto minerale, principale fattore limitante nella crescita dei microrganismi.

2. MATERIALI E METODI

2.1 Inquadramento territoriale : Parco Nord Milano

L'area interessata dal nostro studio comprende il Parco Nord Milano, un parco situato nella periferia nord della città metropolitana di Milano; sorto nel 1975 su ex terreni industriali ed agricoli ormai abbandonati a causa del processo di deindustrializzazione e di delocalizzazione delle imprese iniziato negli anni '70, Tale parco interessa i comuni di Milano, Cinisello Balsamo, Cusano Milanino, Bresso, Cormano e Sesto San Giovanni.

Dal 1983 in poi il parco, che ricopre una superficie di 790 ettari, è interessato da progetti di riforestazione nei quali sono stati piantati più di 200000 tra alberi e arbusti appartenenti a più di 100 specie differenti come riportato da *Marziliano et al. (2009)* e *Sanesi (2007)*; l'esistenza del Parco è mutuata dall'esigenza delle amministrazioni comunali di mantenere una minima superficie verde fruibile dalle comunità appartenenti ai comuni sopracitati oltre che a fornire una zona tampone per le specie animali, soprattutto volatili, che utilizzano il parco come zona di riposo.

Per fornire un inquadramento climatico ci rifacciamo a *Marziliano et al., (2009)* i quali riportano un'indagine basata sulla raccolta di dati meteo tra il 1971 e il 2000 riferiti alla stazione di Linate; la sintesi permette di concludere che la temperatura media dell'area risulta essere 12,7°C, il mese più caldo è Luglio con temperature che si attestano tra i 17,6°C e i 29,6°C mentre il mese più freddo, Gennaio, è caratterizzato da temperature tra i -2°C e i 4,2°C; le precipitazioni annuali si attestano intorno ai 906 mm di pioggia.

Dal punto di vista geologico la superficie è classificata come pianura deposizionale fluvio-glaciale, stabilizzata a partire dalla fine dell'ultimo massimo glaciale, come riportato da *Sanesi (2007)*.

2.2 Design di campionamento

La raccolta dei campioni è iniziata nel mese di ottobre del 2023, essa è avvenuta in 3 aree del parco denominate "Sites" delimitate in precedenza e riferite a 3 diversi usi del suolo originari, sono state infatti considerate zone precedentemente destinate a: attività agricola (ex marcite), attività industriali e un'ultima area già rurale in precedenza.

Sono state considerate, poi, sei aree omogenee dal punto di vista dell'età di piantumazione del bosco denominate "Stand"; le particelle citate sono state piantumate in periodi successivi: 1984, 1987, 1995, 2006, 2010 e 2014, e un'area a prato permanente come controllo. Ciò ha consentito di considerare una cronosequenza che ha permesso di valutare l'impatto di una riforestazione sui servizi ecosistemici offerti dai boschi e dai loro suoli.

I servizi ecosistemici indagati per lo studio riguardano lo stock di carbonio che verrà principalmente approfondito in questo elaborato, la regolazione dell'idrologia del suolo e la variazione dei livelli di biodiversità, in modo tale da fornire delle linee guida per un'efficace attuazione e monitoraggio del ripristino delle foreste e, in un'ottica di più ampio respiro,

determinare un indicatore in grado di valutare l'impatto degli interventi di riforestazione periurbana sui servizi ecosistemici.

Per ogni stand (georeferenziato in precedenza) sono stati scelti 3 plot attraverso la seguente metodologia: un plot centrale come riferimento al quale sono stati associati due plot a distanza di 25 metri dal primo in modo tale da creare un transetto secondo le linee guida di campionamento riferite al progetto SUPERB; tutti i campioni sono stati raccolti ad una distanza minima di 1 metro dagli alberi.

La metodologia di campionamento su ogni plot si articola attraverso tre fasi successive:

- Durante la prima fase sono state delimitate tre aree di 40x40 cm all'interno delle quali è stata raccolta inizialmente la biomassa di specie erbacee vive e la necromassa sulla superficie del suolo. È stato raccolto un composite sample con tutte le componenti verdi per ogni area, successivamente è stata raccolta la necromassa curandosi di raccogliere rami e foglie secche.
- La seconda fase ha riguardato lo studio dell'idrologia: seguendo le aree precedentemente delimitate è stata misurata innanzitutto l'umidità percentuale del suolo attraverso un sondino a forchetta, (5 misure per ogni area di campionamento); una volta fatto ciò è stata misurata l'infiltrazione dell'acqua servendosi di un infiltrometro minidisk.

Lo strumento, partendo da un volume di acqua noto e misurato in precedenza ha consentito di calcolare il volume di acqua infiltrato nel suolo osservando la variazione del volume stesso nel tempo, per fare ciò è stato utilizzato un cronometro.

- La terza fase ha riguardato la raccolta dei campioni di suolo: come prima operazione sono state svolte delle trivellate con prelievo del campione in corrispondenza di due classi di profondità diverse : 0-18 cm e 40-60 cm.

Per ogni punto è stato raccolto un determinato volume di suolo attraverso la trivella, i tre campioni sono stati uniti e miscelati così da creare un composite sample per ogni classe di profondità.

Ogni campione raccolto è stato classificato ed etichettato avendo cura di trascrivere il numero di stand e di plot corrispondente.

A conclusione dell'ultima fase è stato scavato un profilo di profondità 50 cm in modo da caratterizzare la morfologia del suolo (struttura, colore, radici, consistenza, scheletro) e prelevare due campioni indisturbati per il calcolo della densità apparente la quale sarà funzionale al calcolo dello stock di carbonio; ogni profilo è stato fotografato avendo cura di utilizzare un metro come riferimento per la descrizione; i campioni sono stati prelevati utilizzando dei ring di metallo di volume noto a due profondità diverse di 9 cm e in fondo al profilo a 50 cm.

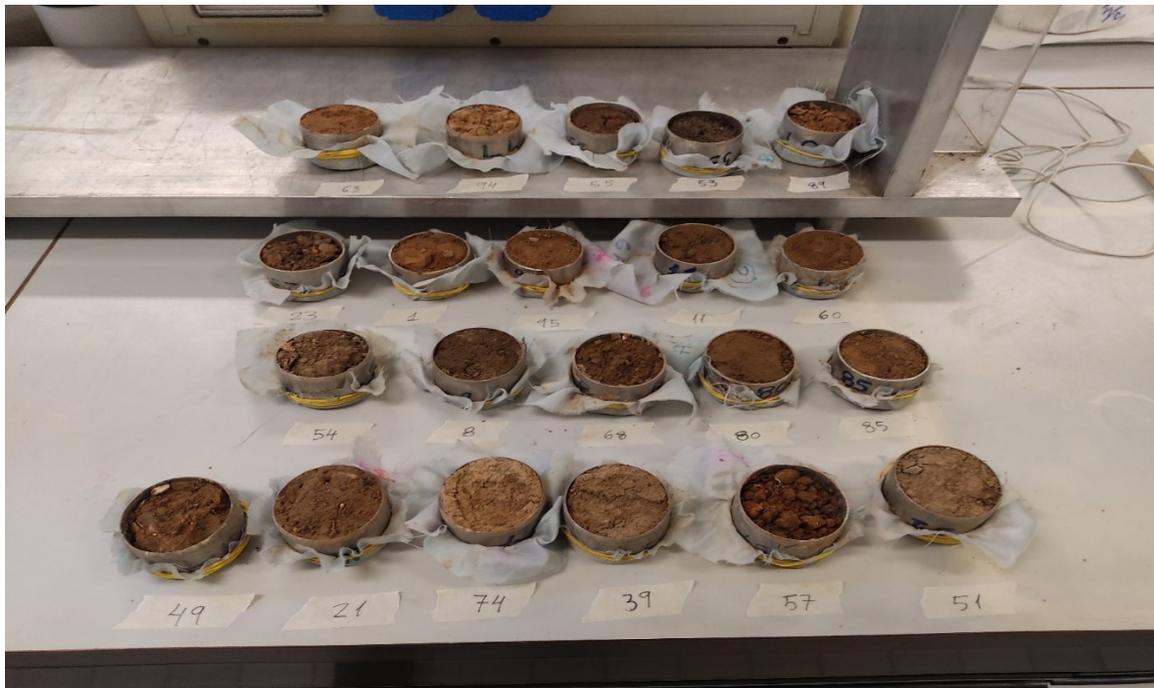


Figura 2.2.1: immagine dei cilindri di campioni indisturbati.

2.3 Analisi di laboratorio

Una volta raccolti i campioni essi sono stati trasportati presso l'Università degli Studi di Milano per le analisi di laboratorio le quali si sono svolte in periodi di tempo successivi tra Novembre 2023 e Aprile 2024.

Come prima operazione funzionale alle analisi sono stati considerati i diversi composite sample citati in precedenza, i quali sono stati dapprima setacciati: tale operazione è stata svolta attraverso dei setacci con maglie di larghezza pari a 2 mm in modo tale da isolare lo scheletro rispetto alle componenti di terra fine; l'isolamento dello scheletro seguito da pesatura ha permesso di determinar la percentuale della componente inerte sul peso del suolo.



Figura 2.3.1: Particolare di un campione di suolo in fase preliminare di setacciamento.

Com'è possibile osservare dalla *Figura 2.1* il campione di suolo prelevato attraverso il composite sample è stato dapprima omogeneizzato con l'ausilio di un mattarello in modo tale da rompere eventuali aggregati per facilitare le operazioni di setacciamento ed evitare un'eventuale sovrastima dello scheletro presente.



Figura 2.3.2: particolare dello scheletro dal setaccio a maglia 2 mm.

La *Figura 2.3.2* consente di osservare il risultato finale del processo di setacciamento, tutte le particelle con diametro superiore ai 2mm sono rimaste isolate rispetto alla terra fine che è stata traslocata nella porzione sottostante; lo scheletro così raccolto è stato catalogato per stand e plot.

Successivamente il residuo è stato lavato, in modo tale da eliminare le ultime particelle di terra fine ad esso adese e, in ultimo, è stato pesato per determinarne la presenza in percentuale sul peso totale del suolo, anch'esso pesato in precedenza.



Figura 2.3.3: particolare della tramoggia.

La Figura 2.3.3 ci consente di sottolineare un altro aspetto metodologico.

Per alcuni campioni la quantità di suolo eccedeva la quantità massima utilizzabile per le analisi. Per evitare eventuali bias di selezione e, quindi, una distorsione nei risultati, la quantità totale di terra fine è stata separata casualmente attraverso la tramoggia in figura; tale strumento consente di dividere il campione in due quantità omogenee ed eliminare il suolo in eccesso.

La terra fine da noi raccolta è stata classificata nuovamente per stand e plot, a questo punto si è proceduto con il frazionamento della sostanza organica, la determinazione del pH, il calcolo della densità apparente e la stima della tessitura.

2.3.1 Tessitura.

La stima della tessitura è stata svolta attraverso il metodo della sedimentazione secondo il quale (Taubner *et al.*, 2009) la velocità di sedimentazione delle particelle sospese in un fluido è funzione del raggio delle particelle (Legge di Stokes), della loro densità, e della viscosità dinamica del fluido stesso; conoscendo suddetti parametri è possibile separare rispetto al tempo

di sedimentazione le differenti frazioni granulometriche del suolo in modo da stimare, basandosi sulla massa preliminare del campione, la ripartizione percentuale di esse.

2.3.2 Densità apparente

Il calcolo della densità apparente ha necessitato dei campioni indisturbati di suolo prelevati, durante la raccolta campioni, alle due classi di profondità 0-18 cm e 40-60 cm.

Il prelievo dei campioni sopraccitati è stato realizzato attraverso dei ring di metallo di volume noto pari a 100 cm³ che sono stati inseriti alla profondità desiderata, estratti e catalogati.

Una volta noto il volume di suolo prelevato il calcolo della densità ha previsto la pesatura del suolo asciutto e il suo rapporto rispetto al volume.

Per alcuni campioni lo scheletro prelevato insieme al suolo andava ad occupare un volume troppo significativo e, quindi, il volume degli spazi vuoti creati era tale da non poter essere trascurato; per suddetti campioni si è proceduto al calcolo della densità apparente attraverso il metodo della paraffina come riportato da *Grossman e Reinsch, (2002)*. Tale metodo si basa sull'applicazione del Principio di Archimede, infatti esso prevede innanzitutto la pesatura del suolo tal quale, successivamente i vuoti creati dall'eccessivo scheletro vengono saturati con una sostanza idrorepellente, generalmente paraffina, e, successivamente, il campione viene pesato nuovamente sia libero che immerso in un fluido di densità e temperatura note. La pesatura in liquido e un'ulteriore pesatura del suolo post asciugatura in stufa a 105° consente di determinare il volume del solo terreno che può infine essere rapportato al volume noto del ring.

Grossman e Reinsch (2002) suggeriscono di utilizzare tale metodo solamente su suoli sufficientemente stabili e coesi; considerando la tessitura dei suoli da noi ritrovati, possiamo considerare validi i risultati da esso ottenuti.

Alcuni valori di bulk density calcolati attraverso il metodo della paraffina sono risultati anomali in quanto i sopraccitati problemi riguardo la quantità di scheletro si sono tradotti in valori troppo bassi di densità apparente, soprattutto per i suoli profondi. Per ovviare a questo problema si è ricorsi ad un calcolo indiretto di densità apparente utilizzando la funzione di pedotrasferimento sviluppata da *Hollis et al. (2012)*. Tale formula è basata sulla raccolta di dati riguardante le principali caratteristiche fisiche del suolo quali struttura, tessitura e contenuto di carbonio organico, tali dati sono stati messi in relazione con i valori di densità apparente per ogni orizzonte. È stata creata dagli autori basandosi su un dataset di 1545 suoli stilato dalla *Cranfield University's National Soil Resources Institute*; vari dati (tessitura, sostanza organica etc) sono stati messi in relazione con la densità apparente ed è stato utilizzato un metodo statistico che ha consentito di trovare la funzione matematica che meglio descrivesse la relazione tra i diversi valori. I dati di bulk density calcolati attraverso questo metodo sono stati validati incrociando i risultati ottenuti con quelli presenti in un dataset di 818 suoli provenienti da 15 paesi europei, tale processo ha consentito di verificare la bontà dell'accordo tra i dati e le curve calcolate.

| Name | <i>n</i> | Multiple regression equation | Model efficiency | RMSE / g cm ⁻³ |
|----------------------------|----------|---|------------------|---------------------------|
| Volcanic materials | 34 | $Db (g\ cm^{-3}) = 1.5868 - (0.4682 \times EXP(0.0578 \times OC\%)) - (0.07778 \times Ln(Horizon\ mid-point,\ cm))$ | 0.44 | 0.17 |
| Cultivated topsoils | 333 | $Db (g\ cm^{-3}) = 0.80806 + (0.823844 \times EXP(-0.27993 \times OC\%)) + (0.0014065 \times Total\ sand\%) - (0.0010299 \times Clay\%)$ | 0.62 | 0.13 |
| Compact subsoils | 64 | $Db (g\ cm^{-3}) = 1.1257 - (0.1140245 \times Ln(OC\%)) + (0.0555 \times Ln(Horizon\ mid-point,\ cm)) + (0.002248 \times Total\ sand\%)$ | 0.40 | 0.14 |
| All other mineral horizons | 925 | $Db (g\ cm^{-3}) = 0.69794 + (0.750636 \times Exp(-0.230355 \times OC\%)) + (0.0008687 \times Total\ sand\%) - (0.0005164 \times Clay\%)$ | 0.63 | 0.15 |
| All organic horizons | 67 | $Db (g\ cm^{-3}) = 1.4903 - 0.33293 \times Ln(OC\%)$ | 0.68 | 0.10 |

Figura 2.3.4: equazioni per il calcolo della densità apparente (Hollis et al., 2012.)

Si sottolinea che per il nostro studio è stata utilizzata la quarta equazione presentata in figura, si noti come la funzione mette in relazione la bulk density con le classi granulometriche che compongono il suolo e la quantità di carbonio organico.

2.3.3 Frazionamento della sostanza organica.

Il frazionamento è un'operazione che ha consentito di separare le 3 componenti del carbonio organico presenti nel suolo. La metodologia di frazionamento da noi seguita si rifà *Gavinelli et al. (2008)* e consiste nella separazione in liquido di POM (Particulate organic matter), MAOM (Mineral Associated Organic Matter) e SAND.

La prima fase del frazionamento è consistita nella preparazione del campione. Dalla terra fine precedentemente setacciata sono stati prelevati, per ogni stand e plot, 20 g di suolo ai quali sono stati aggiunti 6 g di esametafosfato di sodio, un agente deflocculante oltre a 200 ml di acqua demineralizzata, i campioni così preparati sono stati lasciati in frigorifero per una notte e, successivamente, agitati in un agitatore meccanico per quattro ore con l'aggiunta di sfere di acciaio in modo tale da mandare in sospensione le componenti più leggere e fungere da ulteriore separazione meccanica.



Figura 2.3.5: particolare dei campioni lasciati in frigorifero



Figura 2.3.6: particolare di POM e sabbia isolati

Una volta agitate e separate chimicamente le frazioni organiche si è proceduto a filtrarle in liquido attraverso un setaccio con maglie di larghezza 200 μm che hanno consentito di separare

il MAOM attraverso un lavaggio e, successivamente, il POM dalla SAND che è stata fatta precipitare alla base del setaccio.

Come sottolineato da *Gavinelli et al. (2008)* il setacciamento in liquido risulta essere il metodo più efficiente per la separazione della materia organica dalla componente minerale del suolo; tale processo potrebbe essere condotto anche attraverso sedimentazione ma questo metodo, meno oneroso dal punto di vista del tempo, comporta il rischio di mischiare le componenti organiche più leggere come il POM con la componente di argilla del suolo.

La prima componente del carbonio organico ad essere stata isolata è stata il MAOM; tale frazione è stata fatta filtrare, irrorandola con acqua utilizzando una spruzzina, attraverso un setaccio di maglie con larghezza pari a 200 μ m, la sospensione così ottenuta è stata trasferita in un becker e successivamente è stata aggiunta acqua per portare a volume unitario (1L); tale becker è stato agitato 30 volte per omogeneizzare il campione dal quale sono stati prelevati 100 ml e trasferiti in una provetta.

Il POM e la sabbia, isolati dalla prima fase di setacciatura, sono stati trasferiti in un altro contenitore, come mostrato in *Figura 2.6*, il POM è stato mandato in sospensione sempre attraverso l'utilizzo di acqua e trasferito in una provetta. La sabbia, infine, è precipitata sul fondo del detto contenitore dal quale è stata poi anch'essa trasferita in una provetta.

Le tre frazioni così isolate sono state trasferite in stufa per l'essiccamento condotto ad una temperatura costante di 40°C per tre giorni.

I campioni essiccati sono stati pesati separatamente; i pesi risultanti sono stati sommati per essere confrontati con la quantità iniziale di suolo in modo tale da verificare eventuali perdite; sottolineiamo che ogni campione recante una differenza maggiore o uguale al 5% rispetto alla massa di partenza è stata sottoposto nuovamente a preparazione e frazionamento.

Una volta isolate le frazioni di suolo d'interesse per lo studio si è passati alla fase di macinatura attraverso un macinatore meccanico che ha permesso di ridurre i campioni fino a conferire a questi una dimensione di circa 200 μ m, tale operazione è stata funzionale alle ultime analisi.

2.3.4 Misura di Carbonio e Azoto

Una volta ottenuti i campioni, setacciati, frazionati e macinati essi sono stati trasferiti presso l'Università degli studi di Milano-Bicocca dove è stata condotta l'analisi finalizzata a determinare le percentuali di carbonio e azoto presenti in ogni campione.

Per fare ciò inizialmente è stata prelevata una quantità standard di campione, macinato a 0,425 mm, compresa tra 20 e 40 mg che è stata trasferita all'interno di capsule di alluminio, tali capsule sono state poi analizzate attraverso un CHN analyzer Thermoscientific Flash 2000.

Il metodo utilizzato consiste nell'utilizzo di una fornace dove il campione viene riscaldato ad una temperatura superiore ai 1000°C in eccesso di ossigeno in modo tale da convertire tutto il carbonio presente in CO₂ e l'azoto in NO₂, i gas prodotti vengono poi trasferiti attraverso l'utilizzo di un gas inerte come l'elio per la determinazione percentuale delle due componenti che può avvenire sia per metodo titrimetrico che gravimetrico. (*Tabatabai, 1996*).

2.3.5 Determinazione del pH.

Come ultima analisi è stata effettuata la misurazione del pH del suolo attraverso un pHmetro in modo tale da determinare per via indiretta un'eventuale presenza di carbonati nei campioni, tale analisi ha consentito di verificare l'assenza di quest'ultima specie di carbonio inorganico, in quanto tutte le misure di pH effettuate hanno restituito valori inferiori a 7,5. Il pH è stato misurato su una sospensione di suolo e acqua in rapporto 1:2.5.

3. RISULTATI

3.1 Presentazione.

Prima di presentare i risultati è necessario fare una premessa riguardo alla nomenclatura dei campioni in modo tale da rendere più leggibili le tabelle e i grafici presentati in questa sezione.

Le 7 aree interessate dallo studio al Parco Nord Milano derivano, come sottolineato in *Introduzione 1.4.1* da 3 differenti usi del suolo antecedenti le campagne di piantumazione.

Ad ogni campione, è stato assegnato un codice costituente di un numero di *Stand* che identifica una delle 7 aree (da 1 a 7) sopracitate e un numero di *Plot* (da 1 a 3) che identifica il numero della prova ripetuta.

| ID | Destinazione d'uso precedente | Destinazione d'uso attuale | Anno piantumazione |
|----|-------------------------------|----------------------------|--------------------|
| S1 | | prato (controllo) | |
| S2 | | bosco | 2014 |
| S3 | | bosco | 2010 |
| S4 | | bosco | 2006 |
| S5 | | bosco | 1995 |
| S6 | | bosco | 1987 |
| S7 | | bosco | 1984 |

Tabella 3.1.1: tabella riassuntiva degli identificativi utilizzati, dell'anno di cambio d'uso del suolo e delle destinazioni d'uso precedente e attuale. (Elaborazione Excel).

Per ognuna delle aree sopra indicate sono stati raccolti campioni quali composite sample, campioni di biomassa e necromassa e campioni indisturbati di suolo a due profondità diverse in 3 punti come prescritto dalla metodologia di campionamento del *Progetto SUPERB. (Italy, Po Valley; Restoration Workplan)*.

3.1.1: Tessitura

Come precedentemente citato in *Materiali e metodi 2.3.1*, la prima analisi effettuata ha riguardato la stima della tessitura dei campioni di suolo raccolti in campo, si procede con la presentazione dei risultati ottenuti attraverso il metodo della sedimentazione.

| ID | Campione | sabbia | limo | argilla | classe tessiturale |
|----|-------------|--------|------|---------|--------------------|
| S1 | prato_0-20 | 50 | 36 | 14 | FRANCO |
| S1 | prato_40-60 | 48 | 36 | 17 | FRANCO |
| S2 | 2014_0_20 | 46 | 39 | 16 | FRANCO |
| S2 | 2014_40-60 | 65 | 21 | 14 | FRANCO SABBIOSO |

| | | | | | |
|----|------------|----|----|----|---------------------|
| S3 | 2010_0_20 | 45 | 39 | 16 | FRANCO |
| S3 | 2010_40-60 | 45 | 38 | 17 | FRANCO |
| S4 | 2006_0_20 | 46 | 39 | 15 | FRANCO |
| S4 | 2006_40-60 | 42 | 41 | 17 | FRANCO |
| S5 | 1995_0_20 | 36 | 43 | 21 | FRANCO |
| S5 | 1995_40-60 | 32 | 41 | 27 | FRANCO ARGILLOSO |
| S6 | 1987_0_20 | 52 | 32 | 16 | FRANCO |
| S6 | 1987_40-60 | 52 | 29 | 18 | FRANCO |
| S7 | 1984_0_20 | 52 | 32 | 16 | FRANCO |
| S7 | 1984_40-60 | 53 | 31 | 16 | FRANCO SABBIOSO |

Tabella 3.1.2: Risultato delle analisi di tessitura, la prima colonna a sinistra denota il sistema di nomenclatura da noi utilizzato per i campioni.

Come si evince dalla Tabella 3.1.2 i risultati indicano una discreta uniformità nella tessitura dei suoli che risultano essere per la maggior parte dei casi suoli franchi. In particolare, tutti i campioni superficiali sono franchi, mentre una variabilità un po' maggiore è osservabile nei campioni in profondità.

Tale aspetto risulta essere importante come riportato in *Introduzione 1.4.2* in quanto la quantità di carbonio organico immagazzinabile nel suolo dipende dalla tessitura e per valutare gli effetti della presenza delle piante rispetto ad un gradiente temporale in aree con età di piantumazione differenti l'omogeneità nella tessitura è un'ipotesi fondamentale per la confrontabilità dei dati.

3.1.2: Densità apparente.

La densità apparente è stata calcolata attraverso diversi metodi, sia diretti che indiretti, come citato in precedenza (tab. 3.1.3).

| ID | Profondità (cm) | BD (kg/dm ³) metodi diretti | BD (kg/dm ³) metodo indiretto | errore% |
|------|-----------------|---|---|---------|
| S1P1 | 9 | 1.3 | 1.31 | -1% |
| S1P1 | 50 | 1.37 | 1.43 | -5% |
| S1P2 | 50 | 1.59 | 1.25 | 21% |
| S1P2 | 9 | 1.48 | 1.35 | 9% |
| S1P3 | 9 | 1.07 | 1.24 | -16% |
| S1P3 | 50 | 1.26 | 1.38 | -9% |
| S2P1 | 9 | 0.8 | 1.26 | -58% |
| S2P1 | 9 | 1.28 | 1.21 | 5% |
| S2P1 | 50 | 1.16 | 1.21 | -4% |
| S2P1 | 50 | nd | 1.31 | nd |
| S2P2 | 9 | 0.8 | 1.2 | -50% |
| S2P2 | 50 | nd | 1.31 | nd |
| S2P2 | 50 | 1.15 | 1.25 | -9% |
| S2P2 | 9 | 1.05 | 1.33 | -27% |

| | | | | |
|------|----|------|------|-------|
| S2P3 | 50 | nd | 1.24 | nd |
| S2P3 | 9 | 1.2 | 1.34 | -11% |
| S2P3 | 50 | 1.17 | 1.32 | -13% |
| S2P3 | 9 | 1.17 | 1.36 | -17% |
| S4P1 | 50 | 1.05 | 1.23 | -18% |
| S4P1 | 9 | 1.21 | 1.33 | -11% |
| S4P2 | 9 | 1.01 | 1.24 | -23% |
| S4P2 | 50 | 1.14 | 1.29 | -13% |
| S4P3 | 50 | 0.51 | 1.17 | -131% |
| S4P3 | 9 | 1.04 | 1.25 | -21% |
| S5P1 | 9 | 1.24 | 1.27 | -3% |
| S5P1 | 50 | 1.32 | 1.34 | -2% |
| S5P2 | 50 | 1.06 | 1.22 | -15% |
| S5P2 | 9 | 0.92 | 1.36 | -49% |
| S5P3 | 50 | 1.43 | 1.21 | 15% |
| S5P3 | 9 | 1.13 | 1.33 | -18% |
| S6P1 | 9 | 0.77 | 1.09 | -42% |
| S6P1 | 50 | nd | 1.29 | nd |
| S6P2 | 9 | nd | 1.08 | nd |
| S6P2 | 50 | 1.07 | 1.28 | -19% |
| S6P3 | 50 | 0.56 | 1.02 | -81% |
| S6P3 | 9 | nd | 1.23 | nd |
| S7P1 | 50 | nd | 1.25 | nd |
| S7P1 | 9 | 1.37 | 1.31 | 4% |
| S7P2 | 50 | nd | 1.25 | nd |
| S7P2 | 9 | 1.22 | 1.37 | -12% |
| S7P3 | 50 | 1.41 | 1.25 | 11% |
| S7P3 | 9 | 1.24 | 1.38 | -11% |

Tabella 3.1.3: risultati parziali di densità apparente.

L'utilizzo di metodi diversi si è reso necessario poiché alcuni campioni presentavano difetti dal punto di vista del campionamento quali eccessive quantità di scheletro, o volumi del cilindretto incompleto, che non permettevano un calcolo preciso del volume e, quindi, restituivano risultati di densità apparente non coerenti con la profondità di raccolta dei campioni stessi. Per tali campioni è stato utilizzato sia un secondo metodo diretto attraverso l'utilizzo di paraffina, metodologia sintetizzata in *Grossman e Reinsch (2002)*, sia un metodo di calcolo indiretto mediante la funzione di pedotrasferimento sviluppata da *Hollis et al. (2012)*, e basato su parametri del suolo in nostro possesso quali, tessitura e percentuale di carbonio organico.

$$BD = 0.69794 + (0.750636 \times \text{Exp}(-0.230355 \times \text{OC}\%)) + (0.0008687 \times \text{Total sand}\%) - (0.0005164 \times \text{Clay}\%)$$

Nella *Tabella 3.1.3* è possibile osservare come alcuni valori si discostino in modo significativo dal calcolo teorico e come altri non siano presenti in quanto anche il secondo metodo diretto non è stato applicabile a causa della massiccia presenza di scheletro. I risultati finali (tab. 3.1.4) che verranno utilizzati nel calcolo dello stock di carbonio sono stati quindi aggiustati per i valori fuori scala grazie al metodo *Hollis et al. (2012)*; in particolare sono stati sostituiti i valori di densità apparente al di sotto della soglia di 1 g/cm³ per i campioni profondi.

| ID | Profondità (cm) | BD (g/cm ³) |
|------|-----------------|-------------------------|
| S1P1 | 9 | 1.30 |
| S1P1 | 50 | 1.37 |
| S1P2 | 50 | 1.59 |
| S1P2 | 9 | 1.48 |
| S1P3 | 9 | 1.07 |
| S1P3 | 50 | 1.26 |
| S2P1 | 9 | 0.80 |
| S2P1 | 9 | 1.28 |
| S2P1 | 50 | 1.16 |
| S2P1 | 50 | 1.31 |
| S2P2 | 9 | 0.80 |
| S2P2 | 50 | 1.31 |
| S2P2 | 50 | 1.15 |
| S2P2 | 9 | 1.05 |
| S2P3 | 50 | 1.23 |
| S2P3 | 9 | 1.20 |
| S2P3 | 50 | 1.17 |
| S2P3 | 9 | 1.17 |
| S4P1 | 50 | 1.05 |
| S4P1 | 9 | 1.21 |
| S4P2 | 9 | 1.01 |
| S4P2 | 50 | 1.14 |
| S4P3 | 50 | 1.17 |
| S4P3 | 9 | 1.04 |
| S5P1 | 9 | 1.24 |
| S5P1 | 50 | 1.32 |
| S5P2 | 50 | 1.06 |
| S5P2 | 9 | 1.36 |
| S5P3 | 50 | 1.43 |
| S5P3 | 9 | 1.13 |
| S6P1 | 9 | 0.77 |
| S6P1 | 50 | 1.28 |
| S6P2 | 9 | 1.08 |
| S6P2 | 50 | 1.07 |
| S6P3 | 50 | 1.02 |
| S6P3 | 9 | 1.23 |
| S7P1 | 50 | 1.25 |
| S7P1 | 9 | 1.37 |
| S7P2 | 50 | 1.25 |
| S7P2 | 9 | 1.22 |
| S7P3 | 50 | 1.41 |
| S7P3 | 9 | 1.24 |

Tabella 3.1.4: risultati finali di densità apparente (Elaborazione Excel)

3.1.3 Frazionamento.

I campioni utilizzati per il frazionamento derivano da una raccolta attraverso trivellate e dalla creazione di un *composite sample*, ottenuto miscelando ed omogeneizzando il suolo raccolto tramite tre carotaggi per ogni *Stand* e *Plot*.

Tale processo ha condotto all'isolamento delle tre frazioni di carbonio organico trattenute nel POM (*Particulate Organic Matter*), nel MAOM (*Mineral Associated Organic Matter*) e nella sabbia.

Le tre frazioni sono state pesate, sommate e rapportate al peso di suolo iniziale utilizzato per le analisi, tutti i valori recanti differenze superiori al 5% sono stati sottoposti nuovamente alla procedura.

I campioni così separati sono stati macinati fino alla dimensione di 200 μm attraverso un macinatore meccanico, per poi essere analizzati da un analizzatore elementare CHN.

Sommando le percentuali di carbonio contenute in ogni frazione è stato possibile determinare la percentuale totale di Carbonio organico.

| ID | Profondità | C% POM | C% MAOM | %C SAND | % Corg |
|-------|------------|--------|---------|---------|--------|
| S1_P1 | 0-18 | 0,11 | 0,97 | 0,05 | 1,13 |
| S1_P2 | 0-18 | 0,12 | 1,46 | 0,05 | 1,63 |
| S1_P3 | 0-18 | 0,20 | 1,37 | 0,10 | 1,67 |
| S2_P1 | 0-18 | 0,11 | 1,23 | 0,15 | 1,49 |
| S2_P2 | 0-18 | 0,25 | 1,62 | 0,07 | 1,95 |
| S2_P3 | 0-18 | 0,26 | 1,73 | 0,04 | 2,04 |
| S3_P1 | 0-18 | 0,21 | 1,34 | 0,05 | 1,59 |
| S3_P2 | 0-18 | 0,20 | 1,42 | 0,08 | 1,70 |
| S3_P3 | 0-18 | 0,20 | 0,69 | 0,13 | 1,02 |
| S4_P1 | 0-18 | 0,32 | 1,25 | 0,13 | 1,71 |
| S4_P2 | 0-18 | 0,36 | 1,27 | 0,07 | 1,70 |
| S4_P3 | 0-18 | 0,46 | 1,21 | 0,63 | 2,29 |
| S5_P1 | 0-18 | 0,20 | 1,07 | 0,09 | 1,37 |
| S5_P2 | 0-18 | 0,34 | 1,32 | 0,08 | 1,74 |
| S5_P3 | 0-18 | 0,40 | 1,32 | 0,04 | 1,76 |
| S6_P1 | 0-18 | 0,52 | 2,71 | 0,07 | 3,30 |
| S6_P2 | 0-18 | 0,57 | 2,32 | 0,44 | 3,32 |
| S6_P3 | 0-18 | 0,65 | 3,31 | 0,21 | 4,17 |
| S7_P1 | 0-18 | 0,43 | 1,14 | 0,04 | 1,61 |
| S7_P2 | 0-18 | 0,28 | 1,33 | 0,05 | 1,65 |
| S7_P3 | 0-18 | 0,18 | 1,34 | 0,07 | 1,59 |

Tabella 3.1.5: Percentuali di Carbonio organico nelle tre frazioni riferite ai suoli superficiali.

| ID | Profondità | C% POM | C% MAOM | C% SAND | % Corg |
|-------|------------|--------|---------|---------|--------|
| S1_P1 | 40-60 | 0,00 | 0,24 | 0,04 | 0,28 |
| S1_P2 | 40-60 | 0,04 | 0,72 | 0,06 | 0,82 |
| S1_P3 | 40-60 | 0,00 | 0,61 | 0,05 | 0,66 |
| S2_P1 | 40-60 | 0,15 | 1,87 | 0,05 | 2,07 |
| S2_P2 | 40-60 | 0,10 | 0,88 | 0,26 | 1,25 |
| S2_P3 | 40-60 | 0,09 | 1,08 | 0,06 | 1,23 |
| S3_P1 | 40-60 | 0,08 | 0,80 | 0,06 | 0,94 |
| S3_P2 | 40-60 | 0,02 | 0,83 | 0,05 | 0,90 |
| S3_P3 | 40-60 | 0,06 | 0,61 | 0,04 | 0,71 |
| S4_P1 | 40-60 | 0,08 | 0,77 | 0,05 | 0,90 |
| S4_P2 | 40-60 | 0,03 | 1,16 | 0,06 | 1,25 |
| S4_P3 | 40-60 | 0,11 | 1,07 | 0,36 | 1,54 |
| S5_P1 | 40-60 | -0,04 | 0,75 | 0,03 | 0,74 |
| S5_P2 | 40-60 | 0,07 | 0,50 | 0,04 | 0,61 |
| S5_P3 | 40-60 | 0,10 | 0,66 | 0,05 | 0,81 |
| S6_P1 | 40-60 | 0,22 | 1,03 | 0,05 | 1,30 |
| S6_P2 | 40-60 | 0,22 | 1,05 | 0,12 | 1,39 |
| S6_P3 | 40-60 | 0,15 | 1,48 | 0,13 | 1,76 |
| S7_P1 | 40-60 | 0,19 | 0,90 | 0,04 | 1,14 |
| S7_P2 | 40-60 | 0,06 | 0,58 | 0,08 | 0,72 |
| S7_P3 | 40-60 | 0,04 | 0,52 | 0,09 | 0,65 |

Tabella 3.1.6: Percentuali di Carbonio organico nelle tre frazioni riferite ai suoli profondi.

| ID | Profondità | %POM | %MAOM | %SAND | %N |
|-------|------------|------|-------|-------|------|
| S1_P1 | 0-18 | 0,01 | 0,11 | 0,00 | 0,12 |
| S1_P2 | 0-18 | 0,01 | 0,19 | 0,00 | 0,20 |
| S1_P3 | 0-18 | 0,01 | 0,16 | 0,00 | 0,17 |
| S2_P1 | 0-18 | 0,01 | 0,14 | 0,00 | 0,14 |
| S2_P2 | 0-18 | 0,02 | 0,18 | 0,00 | 0,20 |
| S2_P3 | 0-18 | 0,01 | 0,19 | 0,00 | 0,20 |
| S3_P1 | 0-18 | 0,01 | 0,13 | 0,00 | 0,14 |
| S3_P2 | 0-18 | 0,01 | 0,15 | 0,00 | 0,16 |
| S3_P3 | 0-18 | 0,01 | 0,13 | 0,01 | 0,14 |
| S4_P1 | 0-18 | 0,02 | 0,12 | 0,00 | 0,13 |
| S4_P2 | 0-18 | 0,02 | 0,12 | 0,00 | 0,15 |
| S4_P3 | 0-18 | 0,02 | 0,12 | 0,00 | 0,14 |
| S5_P1 | 0-18 | 0,01 | 0,41 | 0,00 | 0,42 |
| S5_P2 | 0-18 | 0,02 | 0,13 | 0,00 | 0,15 |
| S5_P3 | 0-18 | 0,00 | 0,13 | 0,00 | 0,13 |
| S6_P1 | 0-18 | 0,03 | 0,25 | 0,00 | 0,28 |
| S6_P2 | 0-18 | 0,03 | 0,22 | 0,01 | 0,26 |
| S6_P3 | 0-18 | 0,05 | 0,29 | 0,00 | 0,34 |
| S7_P1 | 0-18 | 0,02 | 0,11 | 0,00 | 0,13 |
| S7_P2 | 0-18 | 0,02 | 0,15 | 0,05 | 0,21 |
| S7_P3 | 0-18 | 0,01 | 0,15 | 0,00 | 0,16 |

Tabella 3.1.7: percentuali di azoto riferite ai suoli superficiali.

| ID | Profondità | %POM | %MAOM | %SAND | %N |
|-------|------------|------|-------|-------|------|
| S1_P1 | 40-60 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,03 |
| S1_P2 | 40-60 | 0,00 | 0,09 | 0,00 | 0,09 |
| S1_P3 | 40-60 | 0,00 | 0,08 | 0,00 | 0,08 |
| S2_P1 | 40-60 | 0,01 | 0,20 | 0,01 | 0,21 |
| S2_P2 | 40-60 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 0,10 |
| S2_P3 | 40-60 | 0,01 | 0,13 | 0,00 | 0,14 |
| S3_P1 | 40-60 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 0,10 |
| S3_P2 | 40-60 | 0,00 | 0,09 | 0,00 | 0,09 |
| S3_P3 | 40-60 | 0,00 | 0,11 | 0,00 | 0,11 |
| S4_P1 | 40-60 | 0,00 | 0,09 | 0,00 | 0,10 |
| S4_P2 | 40-60 | 0,00 | 0,13 | 0,04 | 0,17 |
| S4_P3 | 40-60 | 0,00 | 0,10 | 0,01 | 0,11 |
| S5_P1 | 40-60 | 0,00 | 0,08 | 0,00 | 0,08 |
| S5_P2 | 40-60 | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 0,06 |
| S5_P3 | 40-60 | 0,00 | 0,08 | 0,00 | 0,08 |
| S6_P1 | 40-60 | 0,01 | 0,10 | 0,00 | 0,11 |
| S6_P2 | 40-60 | 0,01 | 0,14 | 0,00 | 0,15 |
| S6_P3 | 40-60 | 0,01 | 0,17 | 0,00 | 0,17 |
| S7_P1 | 40-60 | 0,01 | 0,09 | 0,00 | 0,10 |
| S7P_2 | 40-60 | 0,00 | 0,08 | 0,00 | 0,08 |
| S7_P3 | 40-60 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 |

Tabella 3.1.8: percentuale di azoto riferita ai suoli profondi

3.1.4 pH del suolo.

Come ultimi risultati vengono presentati i valori relativi al pH del suolo.

| ID | Profondità | pH |
|------|------------|------|
| S1P1 | 0-18 | 5.53 |
| S1P2 | 0-18 | 5.07 |
| S1P3 | 0-18 | 5.7 |
| S2P1 | 0-18 | 6.17 |
| S2P2 | 0-18 | 5.81 |
| S2P3 | 0-18 | 5.59 |
| S3P1 | 0-18 | 5.3 |
| S3P2 | 0-18 | 5.32 |
| S3P3 | 0-18 | 5.5 |
| S4P1 | 0-18 | 5.45 |
| S4P2 | 0-18 | 7.35 |
| S4P3 | 0-18 | 5.71 |
| S5P1 | 0-18 | 5.04 |
| S5P2 | 0-18 | 5.37 |
| S5P3 | 0-18 | 5.32 |

| | | |
|------|------|------|
| S6P1 | 0-18 | 7.49 |
| S6P2 | 0-18 | 5.43 |
| S6P3 | 0-18 | 7,27 |
| S7P1 | 0-18 | 4.38 |
| S7P2 | 0-18 | 4.68 |
| S7P3 | 0-18 | 4.45 |

Tabella 3.1.9 risultati delle analisi di pH per i suoli superficiali.

| ID | Profondità | pH |
|------|------------|------|
| S1P1 | 40-60 | 5.91 |
| S1P2 | 40-60 | 5.66 |
| S1P3 | 40-60 | 6.56 |
| S2P1 | 40-60 | 6.35 |
| S2P2 | 40-60 | 6.1 |
| S2P3 | 40-60 | 6.02 |
| S3P1 | 40-60 | 5.61 |
| S3P2 | 40-60 | 5.73 |
| S3P3 | 40-60 | 6.02 |
| S4P1 | 40-60 | 5.95 |
| S4P2 | 40-60 | 7.36 |
| S4P3 | 40-60 | 6.13 |
| S5P1 | 40-60 | 5.9 |
| S5P2 | 40-60 | 6.35 |
| S5P3 | 40-60 | 5.6 |
| S6P1 | 40-60 | 7.32 |
| S6P2 | 40-60 | 5.98 |
| S6P3 | 40-60 | 6.88 |
| S7P1 | 40-60 | 4.64 |
| S7P2 | 40-60 | 5.07 |
| S7P3 | 40-60 | 5.01 |

Tabella 3.1.10 risultati di pH per i suoli profondi.

3.2 Elaborazioni.

I dati ottenuti attraverso la campagna di rilevamenti in campo e attraverso le analisi di laboratorio sono stati rielaborati con lo scopo principale di verificare l'eventuale presenza di trend temporali, confrontando i parametri del suolo rilevati con l'anno di piantumazione delle varie aree interessate. Per le elaborazioni ci si è serviti del programma Excel che ha permesso di implementare grafici, curve di regressione e di quantificare la significatività statistica delle relazioni individuate.

Le elaborazioni presentate di seguito sono schematicamente divise rispetto alle due classi di profondità a cui sono stati prelevati i campioni: 0-18 cm (suoli superficiali) e 40-60 cm (suoli profondi).

3.2.1 pH del suolo.

Come prima rielaborazione sono stati considerati i risultati di pH, i diversi valori corrispondenti ai vari stand e prove ripetute sono stati confrontati seguendo il gradiente temporale.

| 0-18 cm | | | |
|---------|-----------------------|----------|---------|
| ID | Anno di piantumazione | media pH | dev. St |
| S1 | 1984 | 5.43 | 0.33 |
| S7 | 1984 | 5.86 | 0.29 |
| S6 | 1987 | 5.37 | 0.11 |
| S5 | 1995 | 6.17 | 1.03 |
| S4 | 2006 | 5.24 | 0.18 |
| S3 | 2010 | 6.46 | 1.46 |
| S2 | 2014 | 4.50 | 0.16 |

Tabella 3.2.1: Tabella riassuntiva dei valori medi di pH nei suoli superficiali per ogni stand con relative deviazioni standard. (Elaborazione Excel).

| 40-60 cm | | | |
|----------|-----------------------|----------|---------|
| ID | Anno di piantumazione | media pH | dev. St |
| S1 | 1984 | 6.04 | 0.46 |
| S7 | 1984 | 6.15 | 0.17 |
| S6 | 1987 | 5.78 | 0.21 |
| S5 | 1995 | 6.48 | 0.76 |
| S4 | 2006 | 5.95 | 0.37 |
| S3 | 2010 | 6.72 | 0.68 |
| S2 | 2014 | 4.90 | 0.23 |

Tabella 3.2.2: Tabella riassuntiva dei valori medi di pH nei suoli profondi per ogni stand con relative deviazioni standard. (Elaborazione Excel).

I valori riportati nelle tabelle soprastanti sono stati inseriti in un grafico a dispersione, i vari punti sono stati poi interpolati attraverso una retta di regressione in modo da evidenziare l'eventuale trend.

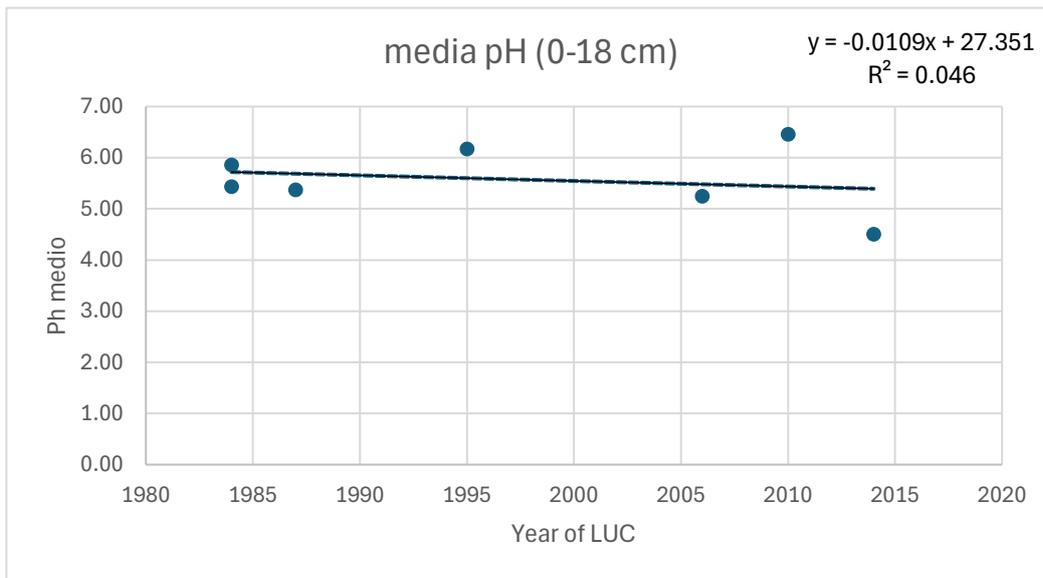


Figura 3.2.1: grafico a dispersione del valor medio di pH nei suoli superficiali. (Elaborazione Excel).

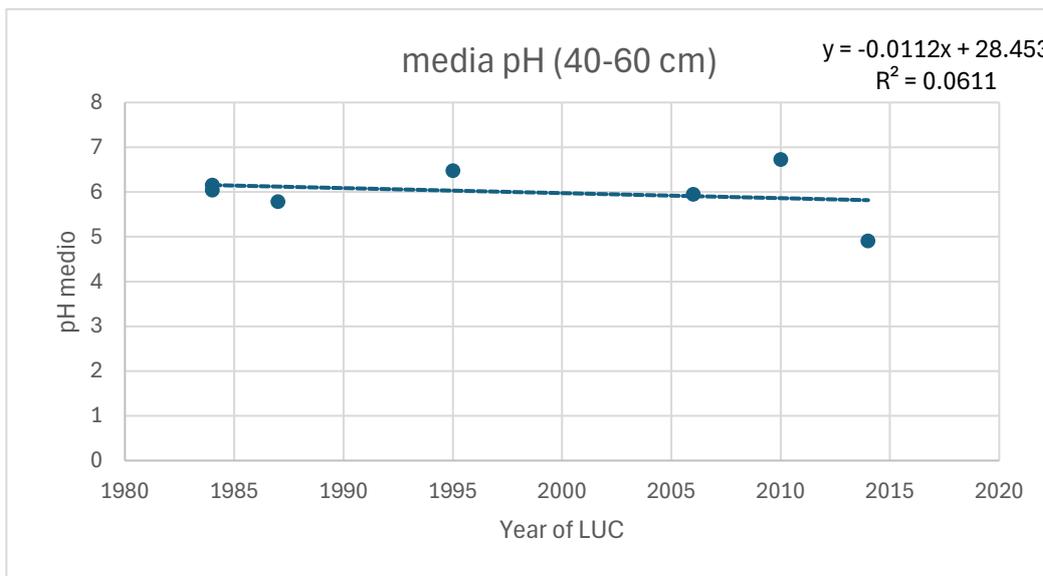


Figura 3.2.2: grafico a dispersione del valor medio di pH nei suoli profondi. (Elaborazione Excel).

Come è possibile verificare attraverso i grafici, il pH dei suoli, sia superficiali che profondi, non subisce variazioni significative, come indicato dal valore del coefficiente angolare della retta di regressione; tale risultato permette di concludere che la variabilità dei diversi valori di pH non è in relazione causale col gradiente temporale di riforestazione ma dipende esclusivamente dalle condizioni locali delle diverse aree considerate. L'aspetto posto in evidenza precedentemente consente di sottolineare il relativo effetto della vegetazione sul pH

nei suoli di pianura, più strettamente dipendente da variabili come il materiale parentale e le condizioni climatiche.

Si sottolinea, inoltre, la quasi coincidenza dei valori di pH relativi alla particella piantata nel 1984 con l'area di controllo a prato con l'uso del suolo invariato rispetto a tale anno. Una maggiore variabilità nel pH tra la particella forestata e il gruppo di controllo a prato si può notare per gli orizzonti più superficiali (0-18 cm) dove l'influenza della vegetazione nella formazione della lettiera può contribuire ad un diverso livello di attività biologica la quale concorre a determinare il pH del suolo.

In riferimento all'attività biologica possiamo notare, attraverso l'elaborazione presentata, che il pH dei suoli generalmente si attesta su valori neutro-acidi, tale aspetto può potenzialmente implicare un tasso di attività biologica significativo, le conseguenze di un tasso di attività biologica importante, che comprendono rimescolamento del terreno, respirazione e, quindi, potenzialità di stock, saranno riprese in seguito.

3.2.2 Qualità del carbonio.

Come già anticipato lo scopo di questo elaborato non riguarda esclusivamente il calcolo della quantità totale di C presente nelle diverse particelle forestate ma anche la qualità del carbonio in esse presente, dalla quale dipende il grado di alterabilità e, quindi, il tempo di residenza potenziale del carbonio nel pool del suolo. Tale quantità è rappresentata dal rapporto tra le tre diverse frazioni:

- POM: (Particulate Organic Matter) frazione del C organico del suolo non protetto da strutture minerali e, quindi, immediatamente disponibile per la respirazione da parte della comunità dei decompositori.
- MAOM (Mineral Associated Organic Matter): frazione del C inclusa nella componente granulometricamente più fine del suolo, la quale funge da barriera rispetto all'azione biologica di respirazione; in virtù di questa qualità il MAOM è considerata la frazione di C organico avente il tempo di residenza più lungo.
- SABBIA: una componente del C organico è associata anche alla frazione granulometricamente più grossa del suolo e solo parzialmente protetta dalle strutture di dimensioni maggiori che essa crea.

A partire dai dati analitici presentati nelle *Tabelle* da 3.1.5 a 3.1.8 si è considerata la quantità di carbonio contenuta nelle tre fasi, moltiplicando la percentuale ottenuta attraverso l'analisi al CHN analyzer per la massa del singolo campione; questo dato è stato poi rapportato al contenuto totale di carbonio del campione e mediato rispetto alle tre prove ripetute.

| ID | Anno piantumazione | media POM/Ctot 0-18 cm | dev. St. |
|----|--------------------|------------------------|----------|
| S1 | controllo | 0.10 | 0.02 |
| S7 | 1984 | 0.18 | 0.08 |
| S6 | 1987 | 0.16 | 0.01 |
| S5 | 1995 | 0.19 | 0.04 |
| S4 | 2006 | 0.20 | 0.01 |
| S3 | 2010 | 0.15 | 0.04 |
| S2 | 2014 | 0.11 | 0.03 |

Tabella 3.2.3: valori medi del contenuto di carbonio nel POM rispetto al carbonio totale per i suoli superficiali con relativa deviazione standard. (Elaborazione Excel)

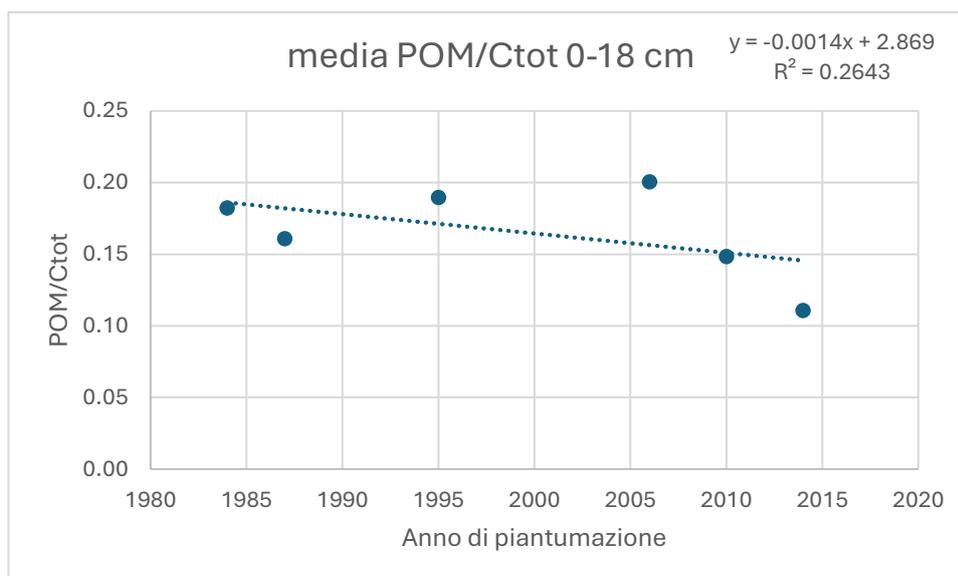


Figura 3.2.3 trend temporale dei dati medi per i suoli superficiali rispetto all'anno di piantumazione. (Elaborazione Excel).

| ID | Anno piantumazione | media POM/Ctot 40-60 cm | dev. St. |
|----|--------------------|-------------------------|----------|
| S1 | controllo | 0.02 | 0.03 |
| S7 | 1984 | 0.10 | 0.06 |
| S6 | 1987 | 0.14 | 0.05 |
| S5 | 1995 | 0.08 | 0.07 |
| S4 | 2006 | 0.06 | 0.03 |
| S3 | 2010 | 0.06 | 0.04 |
| S2 | 2014 | 0.08 | 0.01 |

Tabella 3.2.4: valori medi del contenuto di carbonio nel POM rispetto al carbonio totale per i suoli profondi con relativa deviazione standard. (Elaborazione Excel)

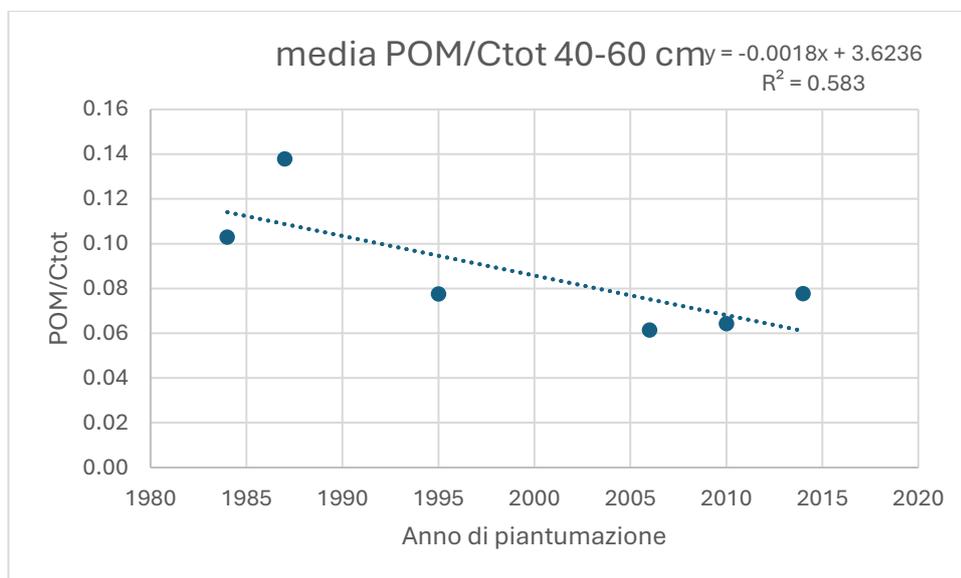


Figura 3.2.4 trend temporale dei dati medi per i suoli profondi rispetto all'anno di piantumazione. (Elaborazione Excel).

Per quanto riguarda i dati presentati è stato necessario svolgere un'ulteriore elaborazione: attraverso l'analisi dei profili pedologici è emerso che uno degli stand, in particolare il numero 6 piantato nel 1987 presentava una quantità importante di suolo riportato molto scuro e ricco in sostanza organica, accumulato in superficie e in discontinuità con il suolo sottostante, con un'origine diversa rispetto agli altri suoli. È stato opportuno quindi rimuovere i dati provenienti da tale area e ripetere le elaborazioni che verranno presentate in seguito. I dati relativi ad ogni frazione del suolo verranno quindi presentati prima considerando tutte le aree e poi rimuovendo il dato outlier.

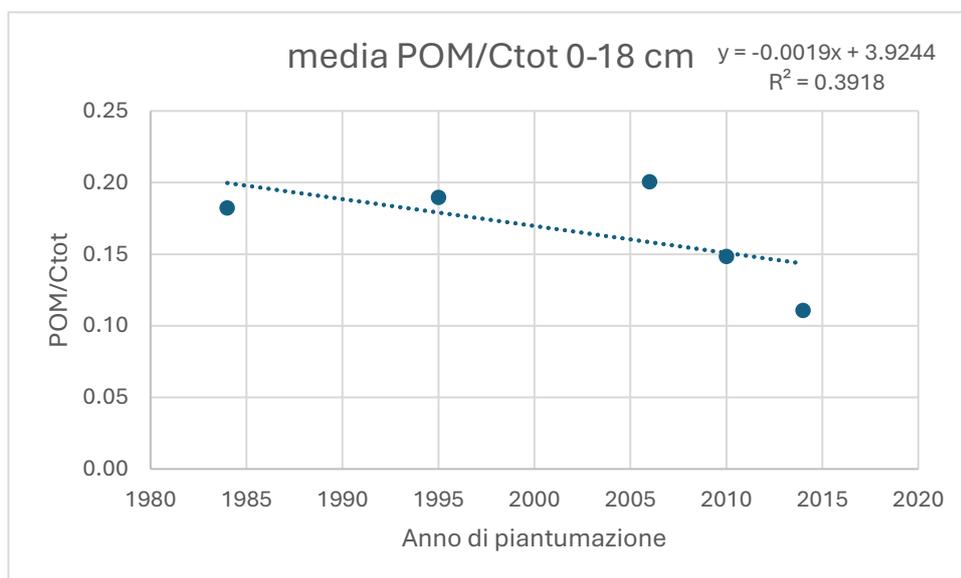


Figura 3.2.5 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto POM/Ctot nei suoli superficiali eliminando i valori anomali. (elaborazione Excel)

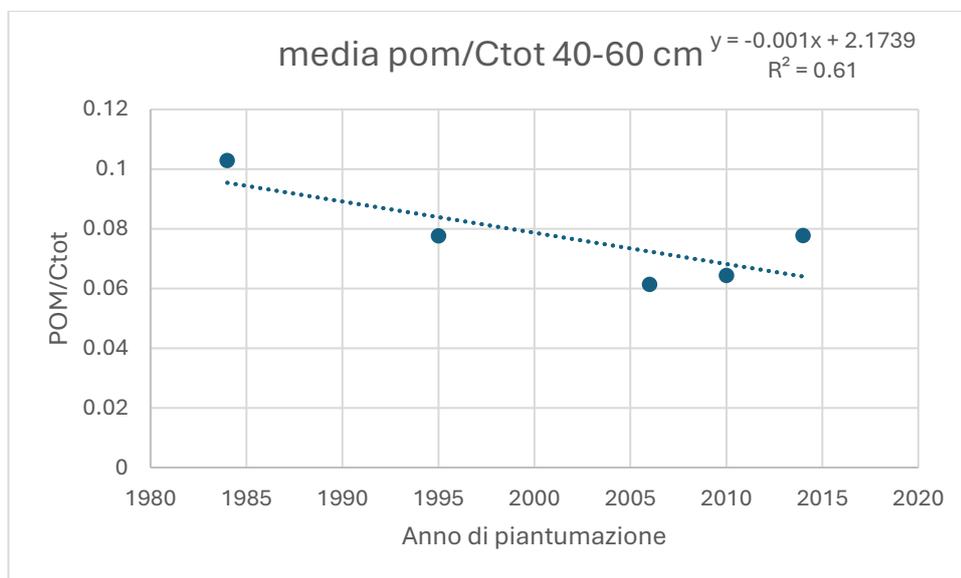


Figura 3.2.6 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto POM/Ctot nei suoli profondi eliminando i valori anomali. (elaborazione Excel)

Per quanto riguarda il POM, considerando sia i suoli superficiali che quelli profondi la quantità della frazione rispetto al carbonio totale rimane costante, dato confermato anche dai valori molto piccoli dei coefficienti angolari delle rette di regressione; tale aspetto può spiegarsi con la già sopracitata caratteristica di alterabilità del POM che non consente un aumento dello stock di carbonio in questo pool nel tempo in quanto esso viene rapidamente respirato per azione della pedofauna.

Considerando il grafico in cui sono stati eliminati i valori anomali è possibile osservare, in questo caso, che la quantità di POM aumenta con l'aumentare dell'età della particella nei campioni più vecchi, suggerendo un aumento della quantità di carbonio stoccata in questa frazione.

In relazione alla frazione del MAOM i risultati sono i seguenti:

| ID | Anno piantumazione | media MAOM/Ctot 0-18 cm | dev. St |
|----|--------------------|-------------------------|---------|
| S1 | controllo | 0.86 | 0.04 |
| S7 | 1984 | 0.79 | 0.07 |
| S6 | 1987 | 0.77 | 0.07 |
| S5 | 1995 | 0.77 | 0.02 |
| S4 | 2006 | 0.67 | 0.12 |
| S3 | 2010 | 0.78 | 0.09 |
| S2 | 2014 | 0.85 | 0.01 |

Tabella 3.2.5: valori medi del contenuto di carbonio nel MAOM rispetto al carbonio totale per i suoli superficiali con relativa deviazione standard. (Elaborazione Excel)

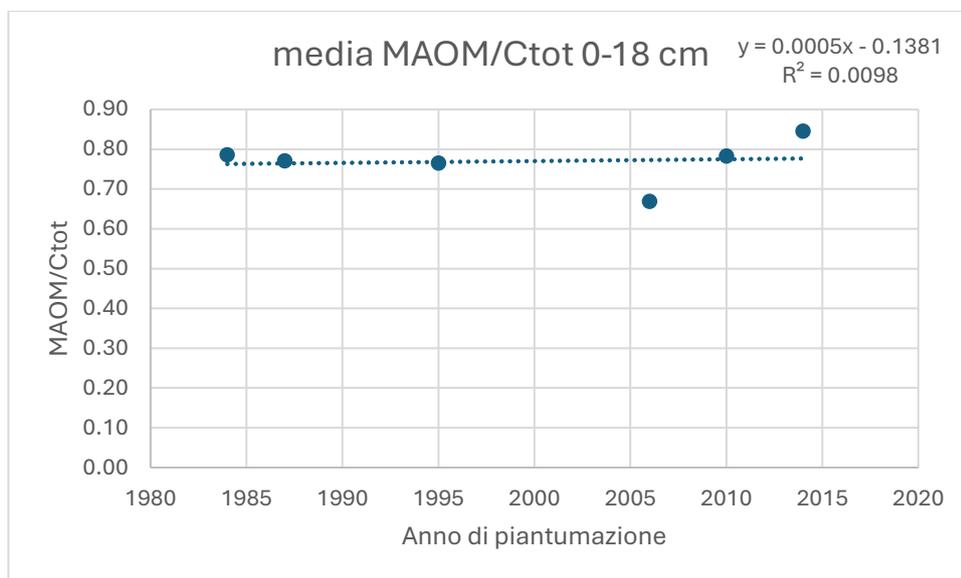


Figura 3.2.7 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto MAOM/Ctot per i suoli superficiali rispetto all'anno di piantumazione. (Elaborazione Excel).

| ID | Anno piantumazione | media MAOM/Ctot 40-60 cm | dev. St |
|----|--------------------|--------------------------|---------|
| S1 | controllo | 0.89 | 0.03 |
| S7 | 1984 | 0.80 | 0.01 |
| S6 | 1987 | 0.79 | 0.05 |
| S5 | 1995 | 0.88 | 0.11 |
| S4 | 2006 | 0.83 | 0.12 |
| S3 | 2010 | 0.88 | 0.04 |
| S2 | 2014 | 0.83 | 0.11 |

Tabella 3.2.6: valori medi del contenuto di carbonio nel MAOM rispetto al carbonio totale per i suoli profondi con relativa deviazione standard. (Elaborazione Excel)

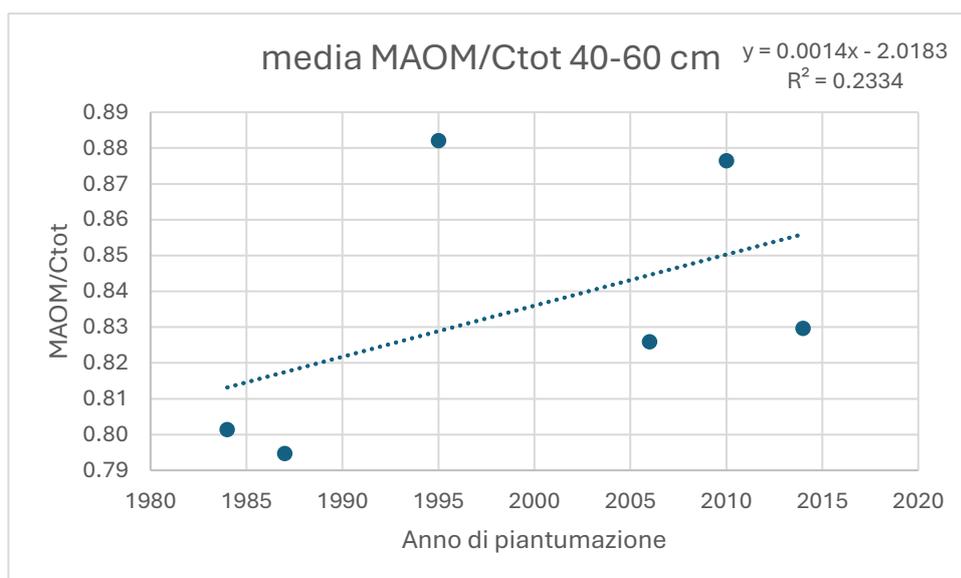


Figura 3.2.8 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto MAOM/Ctot per i suoli profondi rispetto all'anno di piantumazione. (Elaborazione Excel).

I grafici che, invece, non tengono conto dei dati anomali risultano i seguenti:

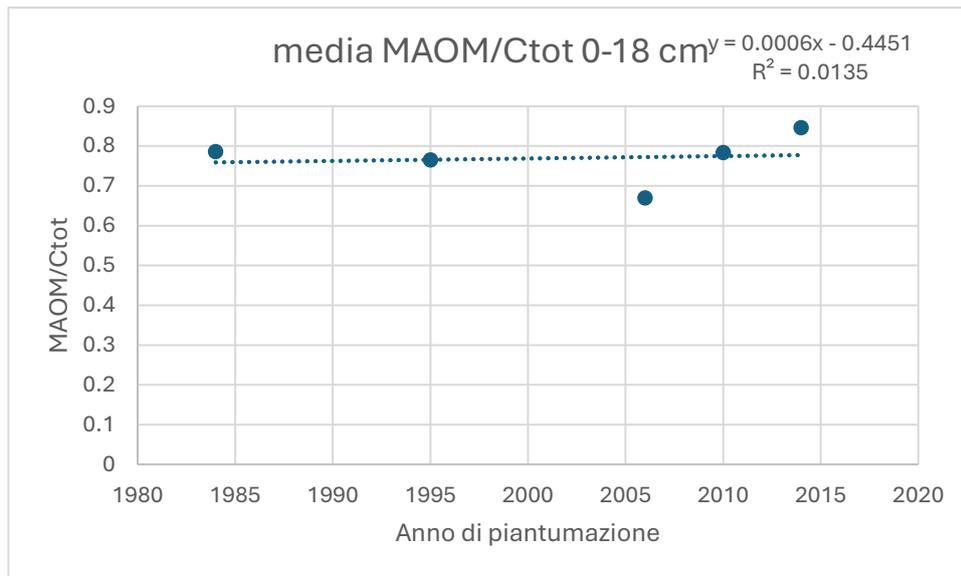


Figura 3.2.9 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto MAOM/Ctot nei suoli superficiali escludendo i valori anomali. (Elaborazione Excel).

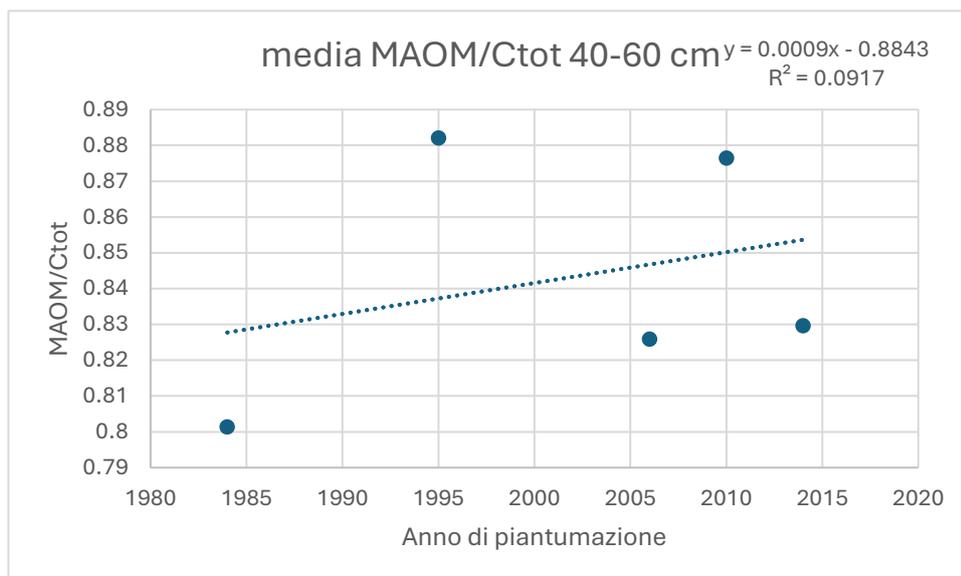


Figura 3.2.10 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto MAOM/Ctot nei suoli profondi escludendo i valori anomali. (Elaborazione Excel).

Per quanto riguarda il MAOM è possibile notare per i suoli profondi un leggero decremento nella quantità totale rispetto al tempo, tale dato suggerisce che il carbonio che, una volta ritornato al suolo, viene respirato più o meno velocemente impedendo che si possano formare le strutture organo-minerali di protezione, ricordiamo che alla formazione di dette strutture concorre l'attività microbica la quale consente attraverso la secrezione di essudati, principalmente esopolisaccaridi, di stabilizzare il carbonio in questa specie.

Tale relazione come è possibile osservare dal coefficiente angolare della retta di regressione non è particolarmente forte, a questo fatto possono concorrere alcune variabili quali l'orizzonte

temporale secondo il quale è stata impostata la cronosequenza; infatti un intervallo di tempo di trent'anni può essere considerato relativamente breve considerando i tempi scala a cui sono soggette le dinamiche legate al suolo. Considerando i grafici riguardanti i suoli superficiali è possibile osservare che il rapporto MAOM/Ctot è rimasto pressoché invariato nel tempo.

In ultimo presentiamo il rapporto tra carbonio contenuto nella sabbia e carbonio totale.

| ID | Anno piantumazione | media SAND/Ctot 0-18 cm | dev. St |
|----|--------------------|-------------------------|---------|
| S1 | controllo | 0.045 | 0.015 |
| S7 | 1984 | 0.032 | 0.011 |
| S6 | 1987 | 0.068 | 0.058 |
| S5 | 1995 | 0.045 | 0.021 |
| S4 | 2006 | 0.130 | 0.126 |
| S3 | 2010 | 0.068 | 0.051 |
| S2 | 2014 | 0.053 | 0.044 |

Tabella 3.2.7: valori medi del contenuto di carbonio nella SAND rispetto al carbonio totale per i suoli superficiali con relativa deviazione standard. (Elaborazione Excel).

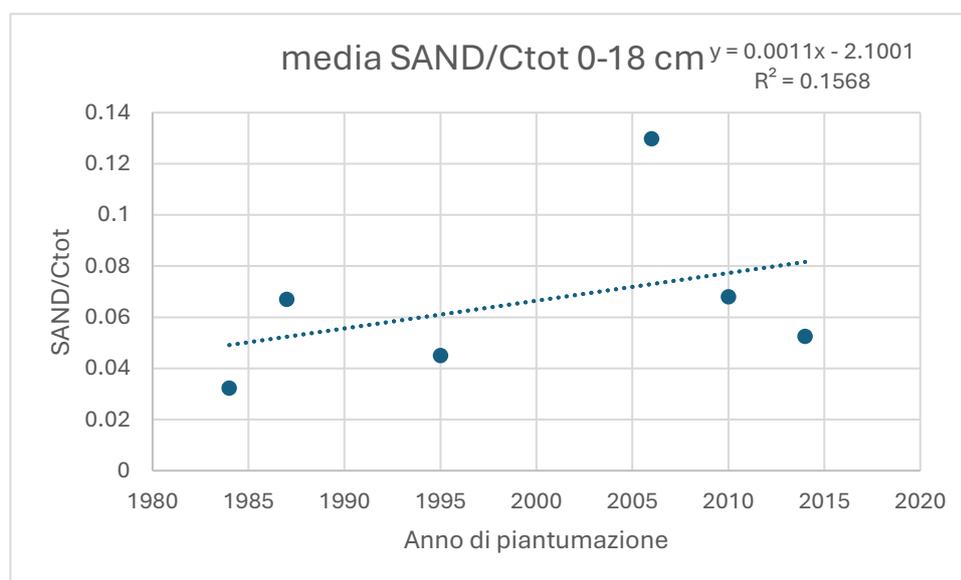


Figura 3.2.11 trend temporale dei dati medi per i suoli superficiali rispetto all'anno di piantumazione. (Elaborazione Excel).

| ID | Anno piantumazione | media SAND/Ctot 40-60 cm | dev. St |
|----|--------------------|--------------------------|---------|
| S1 | controllo | 0.09 | 0.03 |
| S7 | 1984 | 0.09 | 0.05 |
| S6 | 1987 | 0.07 | 0.02 |
| S5 | 1995 | 0.06 | 0.01 |
| S4 | 2006 | 0.11 | 0.11 |
| S3 | 2010 | 0.06 | 0.01 |
| S2 | 2014 | 0.09 | 0.10 |

Tabella 3.2.8: valori medi del contenuto di carbonio nella SAND rispetto al carbonio totale per i suoli profondi con relativa deviazione standard. (Elaborazione Excel).

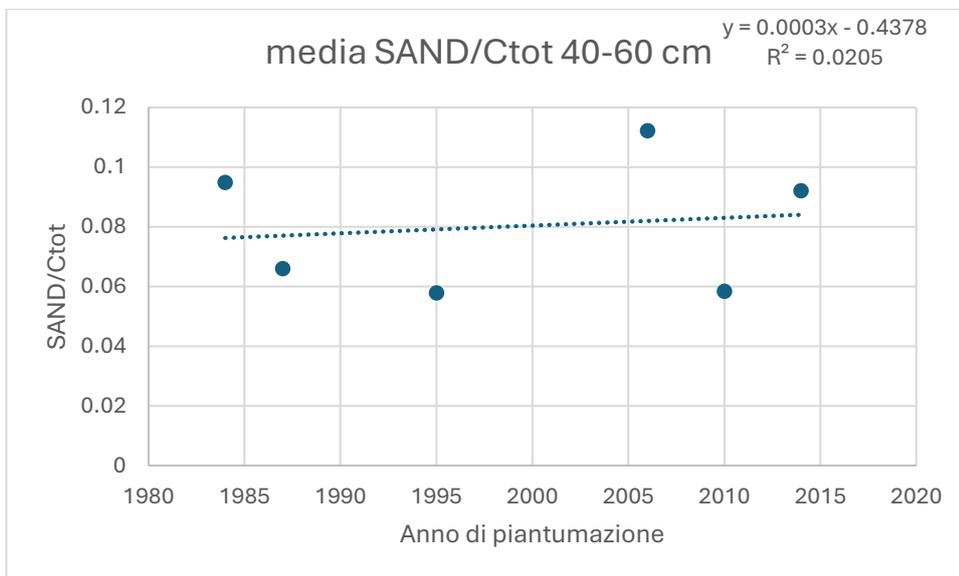


Figura 3.2.12 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto SAND/Ctot per i suoli profondi rispetto all'anno di piantumazione. (Elaborazione Excel).

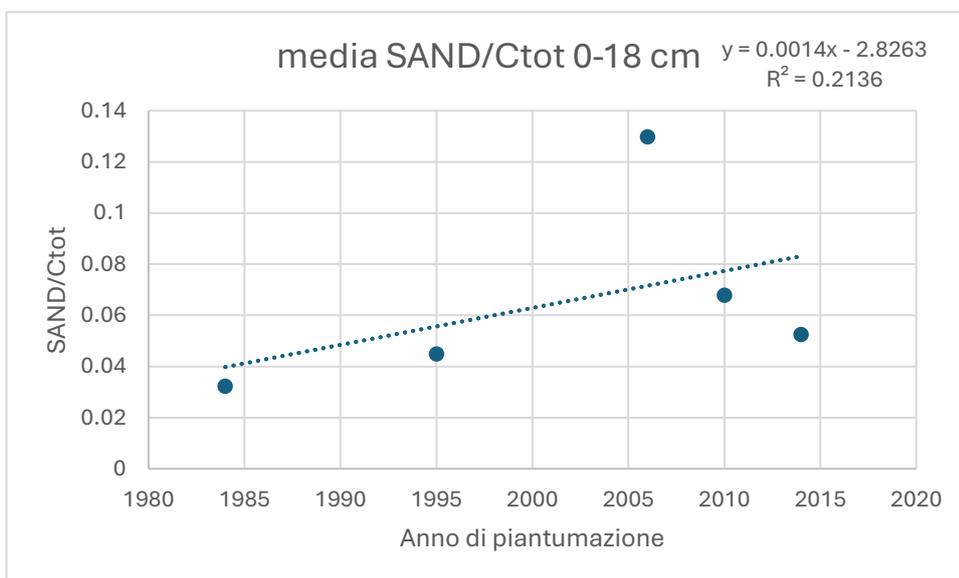


Figura 3.2.13 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto SAND/Ctot per i suoli superficiali eliminando i valori anomali. (Elaborazione Excel)

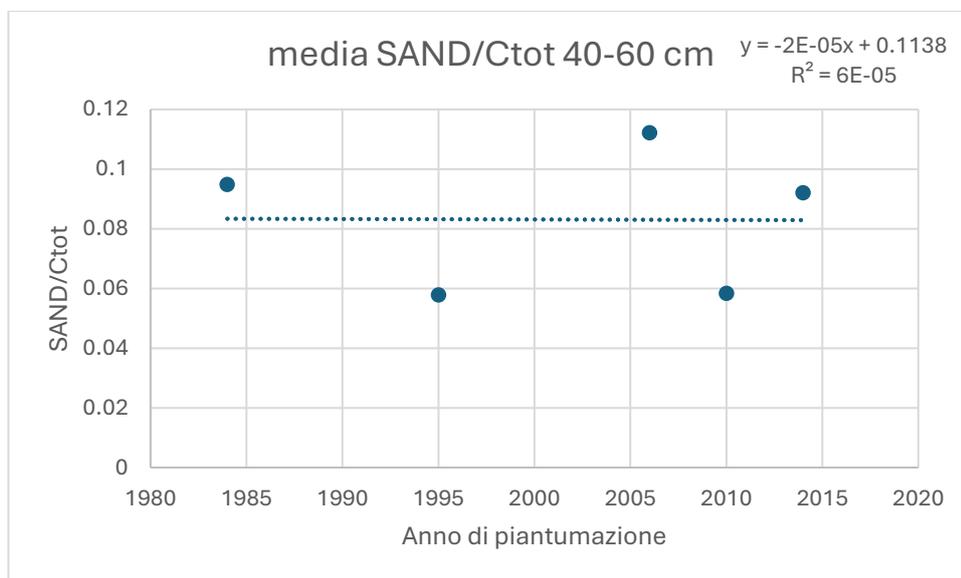


Figura 3.2.14 trend temporale dei dati medi riferiti al rapporto SAND/Ctot per i suoli profondi eliminando i valori anomali. (Elaborazione Excel)

Come è possibile notare attraverso le tabelle il contenuto di carbonio organico contenuto nella frazione della sabbia è sensibilmente minore rispetto alle altre due frazioni. Questo fatto dipende probabilmente dalle dimensioni dei granelli di sabbia che, a parità di volume, presentano molta meno superficie che implica una minore capacità di adesione per il carbonio.

Per quanto riguarda i trend per i suoli superficiali si vede una netta diminuzione del carbonio trattenuto nel tempo, sintomo della minore protezione offerta da questa frazione rispetto all'attività di respirazione biologica, attività che diminuisce sensibilmente nella componente più profonda così come mostrato in *Figura 3.2.14* dove il contenuto di carbonio nella sabbia risulta essere pressoché costante nel tempo.

3.2.3 Stock di carbonio.

Per calcolare lo stock di carbonio, ossia la quantità totale dell'elemento presente nel suolo, sono stati utilizzati i dati di bulk density derivati dai campioni indisturbati raccolti, a due classi di profondità differenti: 9 cm che nei risultati elaborati sarà indicata come profondità 0-18 cm e 50 cm che nei risultati sarà indicata con l'intervallo 40-60 cm. Il dato volumetrico di scheletro in ogni strato deve essere sottratto in quanto quel volume non partecipa allo stock di carbonio. La stima dello scheletro è avvenuta qualitativamente durante la descrizione dei profili aperti, usando come confronto le tavole Munsell.

Per il calcolo dello stock ci si è serviti anche dei risultati frutto del frazionamento delle componenti del carbonio, infatti tramite esse si è potuti risalire alla percentuale di carbonio organico in corrispondenza dei due orizzonti di profondità considerati.

I calcoli eseguiti per determinare lo stock vengono riportati di seguito. Per evitare ripetizioni, visto l'alto numero di prove, si riporta il calcolo eseguito solo per alcuni orizzonti, il calcolo è stato svolto in modo analogo per ogni area divisa per *Stand e Plot*.

| ID | Spessore | V cilindro | % scheletro | V scheletro | V terra fine | Massa terra fine | Densità apparente |
|-------|----------|-----------------|-------------|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|
| Unità | cm | cm ³ | | cm ³ | cm ³ | g | g/cm ³ |
| S1P1 | 10 | 100 | 1 | 1 | 99 | 128.7 | 1.30 |
| S1P1 | 40 | 100 | 7 | 7 | 93 | 127.41 | 1.37 |
| S1P2 | 10 | 100 | 1 | 1 | 99 | 146.52 | 1.48 |
| S1P2 | 40 | 100 | 5 | 5 | 95 | 151.05 | 1.59 |
| S1P3 | 10 | 100 | 1 | 1 | 99 | 105.93 | 1.07 |
| S1P3 | 40 | 100 | 7 | 7 | 93 | 117.18 | 1.26 |
| S2P1 | 10 | 100 | 10 | 10 | 90 | 72 | 0.80 |
| S3P1 | 40 | 100 | 25 | 25 | 75 | 87 | 1.16 |
| S2P2 | 10 | 100 | 7 | 7 | 93 | 119.04 | 1.28 |
| S2P3 | 40 | 100 | 20 | 20 | 80 | 104.8 | 1.31 |
| S3P3 | 10 | 100 | 20 | 20 | 80 | 74.4 | 0.80 |

Tabella 3.2.9: Calcoli parziali per lo stock di carbonio. (Elaborazione Excel).

| ID | Densità apparente | %Corg | V terra fine | massa terra fine | stock (kg/m ²) |
|-------|-------------------|-------|----------------|------------------|----------------------------|
| Unità | kg/m ³ | | m ³ | kg | kg/m ² |
| S1P1 | 1300.00 | 1.13 | 0.09 | 129.98 | 1.46 |
| S1P1 | 1370.00 | 0.28 | 0.39 | 547.90 | 1.52 |
| S1P2 | 1480.00 | 1.63 | 0.09 | 147.98 | 2.41 |
| S1P2 | 1590.00 | 0.82 | 0.39 | 635.92 | 5.23 |
| S1P3 | 1070.00 | 1.67 | 0.09 | 106.98 | 1.78 |
| S1P3 | 1260.00 | 0.65 | 0.39 | 503.91 | 3.30 |
| S2P1 | 800.00 | 1.49 | 0.09 | 79.92 | 1.19 |
| S3P1 | 1160.00 | 2.07 | 0.39 | 463.71 | 9.58 |
| S2P2 | 1280.00 | 1.95 | 0.09 | 127.91 | 2.48 |
| S2P3 | 1310.00 | 1.24 | 0.39 | 523.73 | 6.52 |
| S3P3 | 800.00 | 2.04 | 0.09 | 118.91 | 2.42 |

Tabella 3.2.10: Calcoli finali per lo stock di carbonio. (Elaborazione Excel).

Noti il volume del ring di raccolta e la percentuale di scheletro è stato possibile determinare il volume di terra fine come differenza tra i due precedenti parametri, sfruttando poi il dato di densità apparente è stata calcolata la massa di terra fine. Lo stock di carbonio è stato calcolato per ognuno dei due intervalli di profondità (0-10 e 10-50). I risultati relativi sono stati sommati in modo tale da ottenere una quantificazione dello stock per ogni profilo di ogni prova ripetuta. Infine è stata calcolata la media delle tre prove ripetute con relativa deviazione standard in modo tale da avere un valore rappresentativo per ogni area.

| ID | Anno di piantumazione | Media stock C (kg/m ²) | Dev. St. |
|----|-----------------------|------------------------------------|----------|
| S1 | controllo | 5.32 | 3.30 |
| S2 | 2014 | 6.54 | 2.33 |
| S3 | 2010 | 6.50 | 1.50 |
| S4 | 2006 | 7.60 | 1.86 |
| S5 | 1995 | 5.48 | 1.22 |
| S6 | 1987 | 10.35 | 1.67 |
| S7 | 1984 | 6.30 | 1.19 |

Tabella 3.2.11: tabella riassuntiva della media dello stock di carbonio per ogni Stand riferito ai singoli stand. (Elaborazione Excel).

La media dei dati è stata posta in relazione con il tempo in modo tale da valutare la presenza di un trend per la quantità di carbonio stoccata. Le medie dello stock di carbonio riferite ai diversi stand sono state poste in un grafico a colonne rispetto al tempo in modo tale da evidenziare un eventuale correlazione nei dati.

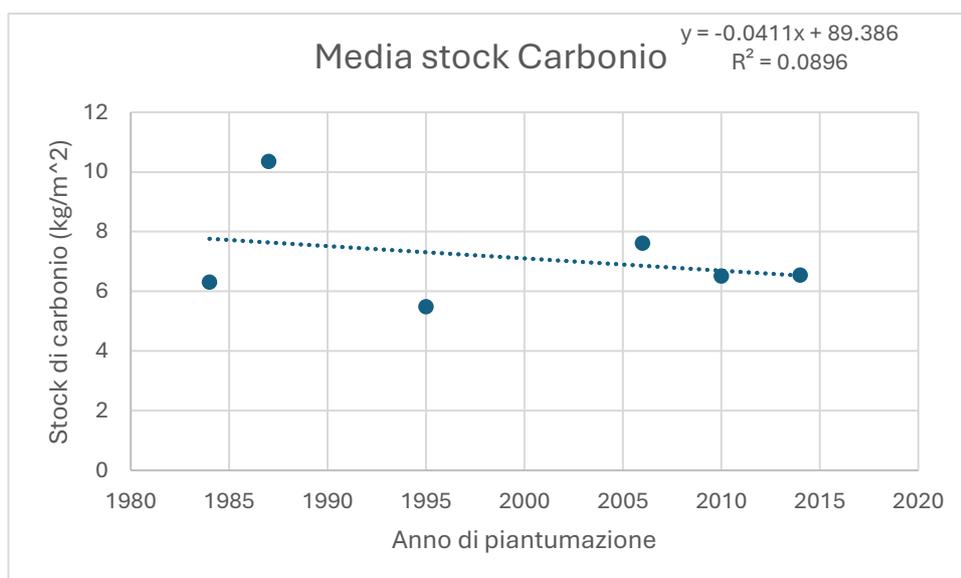


Figura 3.2.15: media dello stock di carbonio rispetto all'età di piantumazione dei boschi. (Elaborazione Excel).

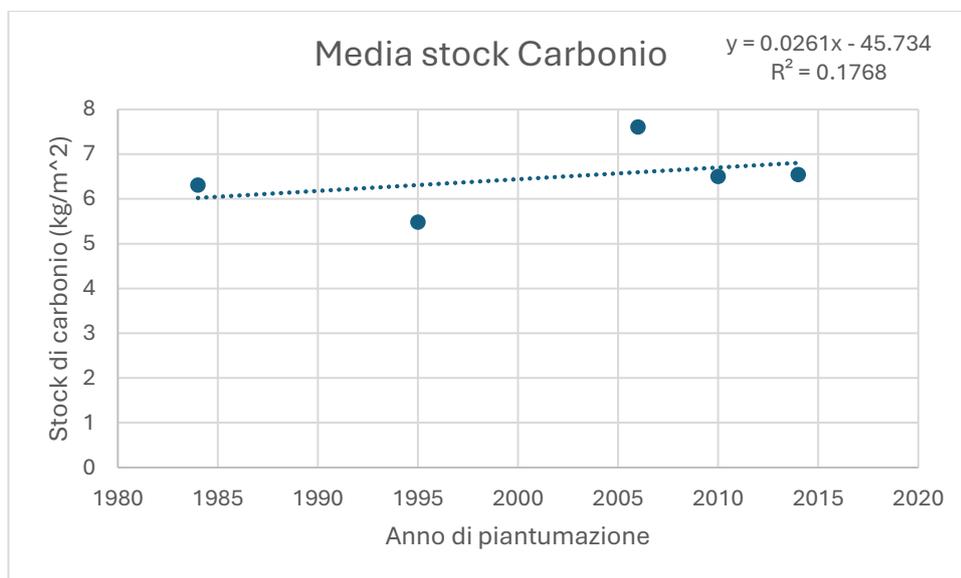


Figura 3.2.16: media dello stock di carbonio rispetto all'età di piantumazione dei boschi non considerando i valori anomali. (Elaborazione Excel)

Come è possibile evincere dai grafici soprastanti la prima elaborazione ha dimostrato un trend positivo per lo stock di carbonio, tale risultato è stato fortemente influenzato dallo stand piantumato nel 1987 che risulta avere la massima quantità di carbonio stoccato. Il dato riguardante lo stand citato deve, però, essere eliminato in quanto è stato dimostrato che tale stand si caratterizza per la presenza di suolo riportato e non può essere considerato, quindi, rappresentativo dell'area interessata dallo studio.

Rimuovendo il valore corrispondente allo stand del 1987 è possibile constatare una leggera diminuzione nello stock di carbonio negli anni, tale andamento deve essere contestualizzato ed analizzato tenendo conto delle possibili limitazioni per la crescita delle piante arboree, delle condizioni di attività biologica e della quantità del carbonio nelle diverse frazioni, le quali sono le direttamente correlate con la capacità in quanto da esse dipende direttamente il tempo di ritenzione dell'elemento nell'ecosistema suolo. Una analisi più approfondita dei trend osservati sarà svolta nella sezione *Discussione*.

3.2.4 Analisi dei profili pedologici

Si passa ora a descrivere i suoli dal punto di vista qualitativo attraverso il confronto dei profili, tale operazione è utile a determinare i processi che interessano e hanno interessato il suolo in modo tale da poter riconoscere, ad esempio, limitazioni per la crescita delle piante o per valutare in modo più diretto il grado di attività biologica del suolo che, come accennato in precedenza, è uno dei principali fattori limitanti le potenzialità di stock di un suolo.



Figura 3.2.17: profilo pedologico sito S1.

| ID | S1P2 |
|-----------|--|
| Orizzonte | OF di 3 cm di spessore, colore scuro, struttura grumosa grossolana da lombrico. |
| Orizzonte | A 17 cm di spessore, molto umido, colore bruno rossiccio 7.5YR 5/4, tessitura franco-argillosa con struttura debole o lamellare, presenza di poche radici molto fini fino ad una profondità massima di 25 cm. Presenza di frammenti di mattoni. |
| Orizzonte | B 25 cm di spessore, colore leggermente più scuro dell'orizzonte precedente 7.5 YR 4/4, tessitura franco-argillosa struttura lamellare da compattamento da mezzi agricoli, assenza di radici. |
| Note | l'humus ritrovato rientra nella categoria di humus MULL tipico di ambiente di prateria, con struttura da lombrico indica l'assenza di limitazioni ambientali per la pedofauna. La principale limitazione per la crescita delle piante si riscontra in prossimità degli orizzonti compattati dalle lavorazioni. |

Tabella 3.2.12: analisi del profilo pedologico sito S1



Figura 3.2.18: profilo pedologico sito S2.

| | |
|-----------------------|--|
| ID | S2P3 |
| Anno di piantumazione | 2014 |
| Orizzonte | OL composto da foglie secche di latifoglie. |
| Orizzonte | Ap 30 cm di spessore, poco umido tessitura franco-sabbiosa, scheletro da scarso di piccole dimensioni ad assente colore bruno 2.5 YR 4/2, con struttura poliedrica subangolare mediamente espressa, sono presenti radici da fini a grosse. |
| Orizzonte | Bw 15 cm di spessore, colore più chiaro dell'orizzonte soprastante, tessitura franco-sabbiosa, scheletro scarso ma di dimensioni leggermente maggiori, struttura poliedrica subangolare debole, radici rare e grosse. |
| Note | La vegetazione è composta da un bosco di latifoglie quali <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Prunus padus</i> , <i>Quercus cerris</i> , <i>Ostria carpinifolia</i> , <i>Tilia cordata</i> e <i>Populus nigra</i> . Anche in questo caso l'humus trovato appartiene alla categoria MULL. La principale limitazione per gli apparati radicali riguarda il compattamento del terreno. |

Tabella 3.2.13: analisi del profilo pedologico sito S2



Figura 3.2.19: profilo pedologico sito S3.

| ID | S3P1 |
|-----------------------|--|
| Anno di piantumazione | 2010 |
| Orizzonte | OL composto da rami e foglie secche, Ah1 1 cm di spessore, molto secco e chiaro con struttura grumosa grossolana da lombrico. |
| Orizzonte | Ah2 3.5 cm di spessore, secco, colore chiaro 9YR 3/1, struttura grumosa fine, radici abbondanti da fini a medie. |
| Orizzonte | Ap: 40 cm di spessore, secco, colore chiaro 7.5 YR 3/2, struttura poliedrica subangolare ben espressa, presenza di segni di compattamento, tessitura franca, presenza di radici solo nei primi centimetri di medie e grosse dimensioni, scheletro mediamente presente e di piccole dimensioni. |
| Note | La vegetazione è composta da un bosco misto di latifoglie ed aghifoglie, le specie presenti sono: <i>Prunus avium</i> , <i>Quercus cerris</i> , <i>Pinus pinaster</i> , <i>Fraxinus ornus</i> , <i>Malus sylvestica</i> . In questo caso è particolarmente evidente la limitazione da lavorazioni agricole tramite la totale assenza di radici profonde. |

Tabella 3.2.14: analisi del profilo pedologico sito S



Figura 3.2.20: profilo pedologico sito S4.

| | |
|------------------------------|---|
| ID | S4P3 |
| Anno di piantumazione | 2006 |
| Orizzonte | OL composto da aghi e foglie secche di latifoglie; A1 con presenza di coproliti, radici fini e medie abbondanti al limite inferiore dell'orizzonte. |
| Orizzonte | Ah 30 cm di spessore, secco, colore bruno chiaro 10 YR 3.5, struttura grumosa fine o lamellare da compattamento, tessitura franca, discreta presenza di scheletro anche di medie dimensioni, presenza abbondante di radici di medie e medie-grandi dimensioni. |
| Orizzonte | B 15 cm di spessore con colore leggermente più chiaro dell'orizzonte superiore, presenza più massiccia di scheletro di dimensioni da piccole a grandi, radici rare e solo di medie dimensioni. |
| Note | La vegetazione è composta da un bosco misto di latifoglie e aghifoglie, le specie presenti sono: <i>Prunus avium</i> , <i>Quercus robur</i> , <i>Acer campestre</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Quercus cerris</i> . |

Tabella 3.2.15: analisi del profilo pedologico sito S4.



Figura 3.2.21: profilo pedologico sito S5.

| | |
|------------------------------|--|
| ID | S5P3 |
| Anno di piantumazione | 1995 |
| Orizzonte | OL composto da foglie secche di erica e latifoglie. Ah di 2 cm di spessore con struttura grumosa da fine a grossolana. |
| Orizzonte | Ap 48 cm di spessore, poco umido, colore bruno 10 YR 3/2, tessitura franco-argillosa, struttura poliedrica subangolare grande con segni molto evidenti di compattamento da lavorazioni, poche radici da fini a medie, qualche radice medio-grande negli ultimi centimetri di profilo, discreta presenza di scheletro di dimensioni da piccole a medie. |
| Note | Come è possibile notare la vegetazione erbacea è abbondante ed è costituita principalmente da erica, la vegetazione arborea è costituita da un bosco misto di latifoglie tra cui: <i>Quercus cerris</i> , <i>Acer campestre</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>Quercus robur</i> , <i>Tilia baccata</i> , <i>Sorbus torminalis</i> , <i>Tilia cordata</i> , <i>Acer monosperulanum</i> . |

Tabella 3.2.16: analisi del profilo pedologico sito S5.



Figura 3.2.22: profilo pedologico sito S6.

| | |
|-----------------------|---|
| ID | S6P2 |
| Anno di piantumazione | 1987 |
| Orizzonte | OL discontinuo, composto da rami e foglie secche di latifoglie; |
| Orizzonte | A 20 cm di spessore di colore bruno scuro 10 YR 2.5/3 con struttura grumosa media, soffice, radici scarse fini, poca presenza di scheletro di piccole dimensioni. |
| Orizzonte | Ab, 5 cm di spessore radici abbondanti fini e medie; B 36 cm di spessore di colore più chiaro 10 YR 5/4, tessitura franca, struttura assente o poliedrica subangolare debole, massiccia presenza di scheletro da fine a medio grande, presenza di radici di medie dimensioni. |
| Note | La vegetazione è composta da un bosco misto di latifoglie composto da: <i>Celtis australis</i> , <i>Quercus cerris</i> , <i>Alnus cordata</i> , <i>Ulmus minor</i> , <i>Fraxinus ornus</i> , <i>Acer platinoides</i> , <i>Acer campestre</i> , <i>Robinia pseudoacacia</i> e <i>Morus nigra</i> . |

Tabella 3.2.17: analisi del profilo pedologico sito S6.



Figura 3.2.23: profilo pedologico sito S7.

| | |
|------------------------------|---|
| ID | S7P3 |
| Anno di piantumazione | 1984 |
| Orizzonte | OL composto da foglie secche di latifoglie, A1 5 cm di spessore con struttura grumosa fine, presenza di coproliti, presenza di poche radici fini e medie. |
| Orizzonte | A 6 cm di spessore, colore bruno chiaro 10 YR 5/2, tessitura franca, struttura grumosa fine con poche radici sottili, presenza di frammenti di mattone e scheletro quasi assente. |
| Orizzonte | Bt 14 cm di spessore, colore bruno rossastro 7.5 YR 5/4, struttura poliedrica subangolare mediamente espressa, presenza di poche radici sottili e medie , presenza di scheletro anche di medie dimensioni. |
| Orizzonte | B 29 cm di spessore, colore bruno 10 YR 4/3, tessitura franco-sabbiosa, struttura non evidente o lamellare da compattamento, pochissime radici di medie dimensioni e poco scheletro di medie dimensioni. |
| Note | La vegetazione è composta da un bosco misto di latifoglie tra cui : <i>Ulmus minore</i> , <i>Quercus cerris</i> , <i>Fraxinus ornus</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i> e <i>Celtis australis</i> . |

Tabella 3.2.18: analisi del profilo pedologico sito S7.

4. DISCUSSIONE

Dall'analisi dei dati emersi è possibile ricavare alcune considerazioni riguardo alla salute dei suoli e dare una valutazione riguardante i progetti di forestazione avvenuti negli anni, tali valutazioni sono basate principalmente sugli andamenti temporali dei vari parametri indagati nello studio.

In prima battuta per quanto riguarda il pH del suolo è emerso che, nonostante la differente copertura del suolo, in quanto nei vari stand si trovano specie differenti ed età di riforestazione corrispondenti differenti, i valori assunti dal pH sono per lo più costanti, con una variabilità imputabile esclusivamente alle differenze puntuali nelle condizioni delle particelle; tale fatto consente di concludere che per quanto riguarda questo parametro del suolo il cambiamento d'uso non ha condotto a differenze significative col gruppo di controllo.

Un'analisi più approfondita dovrebbe essere rivolta, invece, al contenuto di carbonio presente nelle differenti frazioni, si ricorda a tal proposito che la capacità di stoccaggio di carbonio nel suolo dipende strettamente dalle qualità che esso assume una volta giunto nel suolo stesso.

Attraverso l'elaborazione dei dati è stato possibile osservare come la componente più recalcitrante del carbonio, ossia quella parte di carbonio associata a complessi minerali (MAOM), sia rimasta, entro un certo margine d'errore, per lo più costante rispetto al gradiente temporale, con un possibile aumento limitato al suolo superficiale, mentre per il suolo profondo il trend suggerisce una netta diminuzione. Riguardo alla costanza nel trend del rapporto tra MAOM e carbonio totale bisogna sottolineare che dalle elaborazioni basate sui dati completi, ossia non privati della particelle forestata nel 1987, emerge un leggero aumento di questa specie nel tempo, in virtù di ciò potrebbe essere utile approfondire meglio l'eventuale presenza di suolo alloctono nello stand citato in modo da conferire maggiore robustezza ai dati e alle analisi successive.

Nel caso si stabilisse la validità dei dati qui considerati come valori anomali si potrebbe valutare positivamente il programma di forestazione considerato, in quanto essi dimostrerebbero un aumento nello stock di carbonio a lungo termine; mentre un risultato opposto (più probabile) potrebbe sottolineare la non capacità di questi tipi di suoli di aumentare la loro capacità di stock, caratteristica derivante da potenziali limitazioni sulla cui indagine andrebbe posta attenzione.

Per quanto riguarda specie meno recalcitranti, ossia le specie di carbonio più suscettibili ai processi di respirazione quali il particolato organico (POM), si è osservato un aumento della loro concentrazione nel tempo, ciò implica che nel suolo è aumentata la frazione organica più disponibile per la pedofauna andando potenzialmente ad aumentare il tasso di degradazione biologica del carbonio.

Considerando il gradiente di profondità nel trend riferito al particolato si sottolinea che non si sono rilevate differenze nei due andamenti.

L'aumento del POM nei suoli sotto impianti più vecchi potrebbe essere dovuto alla maggiore produzione di biomassa da parte degli alberi di dimensioni maggiori, che raggiunge il suolo ma non riesce a trasformarsi in MAOM per via dell'attività biologica senza limitazioni edafiche.

Per quanto riguarda il confronto tra le elaborazioni condotte utilizzando l'intero dataset e quelle non considerando i potenziali valori anomali in questo caso non sono state rilevate differenze significative se non un leggero aumento nel parametro R^2 per la correlazione riferita ai suoli superficiali implicando un migliore accordo tra i dati e la retta di regressione.

I trend riferiti al carbonio contenuto nella sabbia indicano una diminuzione nel tempo di questa frazione in particolare nei suoli superficiali, sia considerando che trascurando i potenziali valori anomali; tale aspetto si trova in linea con le previsioni teoriche in quanto anche questa frazione del carbonio è caratterizzata da una bassa stabilità in quanto non protetto da strutture organo-minerali.

Se si considerano gli orizzonti più profondi ai quali è riferito il trend della concentrazione di carbonio nella sabbia è possibile invece osservare una costanza o, al più, una leggera crescita nel tempo; ciò può essere spiegato ipotizzando una minore attività da parte della pedofauna in profondità dove sono stati rilevati, attraverso l'analisi dei profili pedologici, importanti segni di compattamento del terreno.

Considerando esclusivamente la quantità totale di carbonio contenuto nel suolo, trascurandone, quindi, qualità e tempo di permanenza, è possibile commentare i risultati riferiti allo stock di carbonio, un ulteriore parametro in grado di contribuire a valutare lo stato di salute di un suolo.

Le elaborazioni condotte utilizzando l'intero dataset esprimono un aumento nella quantità totale di carbonio stoccato indicando potenzialmente una migliorata capacità di stock, in riferimento a ciò si sottolinea, però, che come è possibile evincere dal grafico del trend esso è visibilmente distorto dai valori relativi all'anno 1987, se si considera quindi il grafico privato del potenziale valore anomalo è possibile constatare la leggera diminuzione nella quantità totale di carbonio.

Un risultato di questo tipo andrebbe indagato più a fondo in quanto potrebbe significare che nonostante il progetto di riforestazione che ha interessato l'area quest'ultima sia diventata una *source* di carbonio dal suolo nel medio periodo, tale aspetto potrebbe influenzare pesantemente la valutazione di impatto sul suolo del progetto stesso; perciò, come già affermato in precedenza bisognerebbe porre l'attenzione sulla validazione dei dati ottenuti nello stand 6.

Come si è potuto evincere dall'analisi dei profili pedologici il tasso di respirazione da attività biotica nel suolo è, potenzialmente, elevato; infatti attraverso tale analisi è emersa come tipologia di humus dominante il tipo MULL, caratteristico di praterie e foreste di latifoglie, il quale implica un'assenza di limitazioni per quanto riguarda i processi legati alla fauna del suolo. L'abbondanza di lombrichi e delle loro strutture conferma un'altissima attività biologica all'interno di tutti i profili osservati. La presenza del tipo di humus MULL e degli associati lombrichi considerata congiuntamente con la potenziale diminuzione sul medio periodo della specie di carbonio stoccabile a lungo termine (MAOM) suggerisce che un alto tasso di attività biologica possa interferire con la capacità dell'ecosistema suolo di stoccare l'anidride carbonica sequestrata dagli alberi.

Un'ulteriore possibile fattore limitante per le capacità di stock può essere rappresentato dalla destinazione d'uso precedente del suolo; nello studio è emerso, infatti, che tutti i suoli da noi osservati presentassero limitazioni simili per la crescita delle piante arboree.

Sempre attraverso l'analisi dei profili pedologici è stato possibile osservare che, anche considerando gli orizzonti più superficiali è stata costante la presenza di segni di compattamento del terreno dovuta al ripetuto passaggio dei macchinari agricoli; ricordiamo che le aree del Parco Nord Milano, prima che quest'ultimo fosse istituito negli anni '70 erano destinate principalmente alle attività agricole ed industriali della periferia della città di Milano. In corrispondenza dei segni più evidenti di compattamento si è notata un'evidente incapacità per gli apparati radicali di approfondirsi; la presenza di una tale limitazione può avere importanti effetti sulle capacità di accrescimento delle piante e sulla loro efficienza nell'assorbimento dell'anidride carbonica.

Per sottolineare questo aspetto è interessante confrontare i dati dello stock di carbonio riferiti allo stand 5, piantumato nel 1995, con le osservazioni emerse dal profilo pedologico. Lo stand 5 risulta essere lo stand con la minor quantità di carbonio stoccata che si attesta intorno ai 5.5 kg/m², il profilo scavato in quest'area è risultato essere quello con i più evidenti segni di compattamento con assenza quasi totale di radici fini entro i primi 40 cm di suolo e con una scarsità di radici anche negli orizzonti più profondi; l'approfondimento di una eventuale correlazione causale tra limitazioni per la crescita degli alberi e stock di carbonio potrebbe essere funzionale a spiegare questo risultato.

In ultimo, l'apporto di nuova sostanza organica degradabile nel suolo può condurre al cosiddetto *priming effect negativo*, infatti è stato dimostrato come un aumento nella quantità di carbonio degradabile possa aumentare l'attività biotica nel suolo, il che può condurre a lungo termine ad una diminuzione complessiva nello stock di carbonio inficiando, quindi, la capacità del suolo di massimizzare i servizi ecosistemici legati alla regolazione del ciclo del carbonio.

Sarebbe importante approfondire tale risultato in quanto è stato sottolineato più volte il ruolo fondamentale del suolo nella dinamica di regolazione dei livelli di anidride carbonica soprattutto se consideriamo che l'implementazione di soluzioni *Nature Based* quali i ripopolamenti forestali ha come obiettivo principale il sequestro di questo elemento; le limitazioni osservate devono, quindi, essere considerate in un'ottica di pianificazione che miri a massimizzare i servizi ecosistemici offerti da foreste e suolo.

5. CONCLUSIONE.

Attraverso quanto emerso dalla ricerca bibliografica è stato possibile sottolineare come il suolo partecipi in modo essenziale alla mitigazione del cambiamento climatico grazie alla sua capacità di stoccare il carbonio assorbito dalle piante e in esso trasferito; oltre a garantire importanti servizi ecosistemici riguardanti l'adattamento al cambiamento climatico stesso.

Considerando inoltre i trend di degradazione dei suoli a qui stiamo assistendo a livello globale, risulta impellente monitorare lo stato di salute di questi ultimi oltre a valutare l'efficacia di progetti di ricostituzione naturale e, in un'ottica di più ampio respiro, fornire eventuali linee guida per compiere tali valutazioni attraverso la creazione di indicatori che si basino su parametri quali stock di carbonio e qualità del carbonio stoccato oltre ad altre variabili quali biodiversità e regolazione dell'idrologia.

Nonostante ciò gli impatti derivanti dall'adattamento alla pressione antropica che si esplica in processi quali il cambiamento d'uso del suolo e dalle strategie di gestione del verde sono ancora poco quantificati.

Attraverso l'analisi congiunta di qualità del carbonio e quantità totale stoccata è stato possibile sottolineare l'importanza della valutazione riguardo la stabilità delle varie specie dalla quale dipendono le potenzialità di stock di un ecosistema.

In questo elaborato è emerso come considerando congiuntamente anche solo due parametri quantitativi riferiti al suolo, ossia quantità e qualità del carbonio, le analisi e le interpretazioni di queste risultino essere complesse, sottolineando la difficoltà nel determinare i rapporti causali tra i diversi fattori.

A fronte delle pressioni climatiche il successo di progetti *Nature Based Solutions* rappresenta un'importante punto di forza in una strategia di assorbimento delle emissioni di anidride carbonica, risulta importante, quindi, integrare la tipologia di dati da noi raccolta con ulteriori parametri correlati con la salute di un suolo in modo tale da poter avere una visione di insieme riguardante gli effetti di un progetto NBS.

Il confronto dei dati quantitativi e dei rilevamenti in campo quali i profili pedologici ha permesso di ipotizzare eventuali relazioni esistenti tra destinazione d'uso precedente del suolo e quantità di carbonio presente in esso contribuendo a sottolineare l'importanza anche di tale variabile e la necessità di legare dati quantitativi ed osservazioni.

Si vuole sottolineare in ultimo, considerando quanto emerso, che oltre alla progettazione di interventi di forestazione risulta fondamentale la valutazione di un gran numero di variabili per poter ottimizzare la fornitura dei servizi ecosistemici che si vogliono ottenere tramite le forestazioni stesse, l'implementazione di un approccio basato su valutazione e monitoraggio di tali progetti risulta di primaria importanza.

6. BIBLIOGRAFIA

Abu El Khair D. *Studio delle caratteristiche dei suoli in impianti forestali periurbani di pianura, Università degli studi di Milano-Bicocca, Dipartimento di Scienze dell'ambiente e del territorio. 2012.*

Adhikari K., Hartemink A. E., *Linking soil to ecosystem services – A global review. Geoderma, Volume 262, 2016. pp 101-111.*

Allen et al. *A global overview of drought and heat induced tree mortality reveals emerging climate change risk for forests.. Forest Ecology Management 2010. pp. 259.*

Barrios E. *Soil biota, ecosystem services and land productivity. Ecological Economics, Volume 64, 2007. pp. 269-285.*

Bond-Lamberty B., Bailey V.L., Chen M., Gough e Vargas R. *Globally rising soil heterotrophic respiration over recent decades. Nature, Volume 560, 2018. pp 80-83.*

Bouma J., McBratney A. *Framing soil and actor when dealing with wicked environmental problems. Geoderma, Vol 200, 2013. pp 130-139.*

Broadbent F.E., Nakashima T., *Mineralization of Carbon and Nitrogen in soil amended with Carbon-13 and Nitrogen-15 labeled plant material. Soil Science Society of America Journal, Volume 38, 1974. pp 313-315.*

Bronick C.J., Lal R. *Soil structure and management: a review. Geoderma, Volume 124 2005. pp 3-22.*

Caravanca et al. *Aggregate stability and carbon characteristics of particle-size fractions in cultivated and forested soils of semiarid Spain. Soil and Tillage Research 2004. pp 83-90.*

Cheng W. Kuzyakov Y. *Root effects on soil organic carbon matter decomposition. Roots and soil management. Volume 48, 2005.*

Cotruflo M. F. et al. *Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. Nature geoscience, Volume 12 2019. pp 989-994.*

Crowther T. W. et al. *Quantifying global soil carbon losses in response to warming. Nature, Volume 540, 2016. pp 104-108.*

Daily G. C. et al. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. Animal conservation, Cambridge University Press, Volume 1, 1997.*

Darrah S.E. et al. *Improvements to the wetland extent trends (WET) index as a tool for monitoring natural and human-made wetlands. Ecological Indicators, Volume 99, 2019. pp 294-298.*

Davidson N. C. *How much wetlands has the world lost? Long term and recent trends in global wetland area. Marine and freshwater research, Volume 65, 2014.*

Delgado A. Gomez J. A. *The soil. Physical, Chemical and Biological properties. Principle of Agronomy and Sustainable Agriculture.* 2017

Dixon K. et al. *Overcoming topsoil deficits in restoration of semiarid lands: designing hydrologically favourable soil covers for seedling emergence. Ecological Engineering, Volume 105, 2017. pp 102-117.*

Don A. et al. *Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. Global Change Biology, Volume 17, 2010. pp 1658-1670.*

Dupouey J.L. et al. *Irrversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. Ecology Journal of the Ecological society of America, Volume 83, 2002. pp 2978-2984.*

Garcia Ruiz J. et al. *A meta-analysis of soil erosion rates across the world. Geomorphology, Volume 239, 2015. pp 160-173.*

Giorgi F., Lionello P. *Climate change projections for the Mediterranean region. Global and Planetary Change, Volume 63, 2008. pp 90-104.*

Guo J.H. et al. *Significant acidification in major Chinese croplands. Science, Volume 327, 2010. Pp 1008-1010.*

Hu W. et al. *Soil environmental quality in greenhouse vegetable production systems in eastern China: Current status and management strategies. Chemosphere, Volume 180, 2017. pp 183-185.*

IPCC. Report 2003.

IPCC. Report 2007.

IPCC. Report 2024.

Lal R. *Mechanism of Carbon Sequestration in Soil Aggregates. Critical review in Plant Sciences, Volume 23, 2004. pp 481-504.*

Lal R. *Soil Carbon Sequestration impacts on global climate change and food security. Science, Volume 304, 2004. pp 1623-1627.*

Kates R. W. et al. *Transformational adaptation when incremental adaptations to climate change are insufficient. PNAS, Volume 109, 2012.*

Khanna D.R. et al. *Comparison between organic and inorganic soil microbial diversity of different agronomic fields. International Journal for Environmental Rehabilitation and Conservation, Volume 1, 2010. pp 43-51.*

Krishnaswamy J. et al. *The groundwater recharge response and hydrologic services of tropical humid forest ecosystem to use and reforestation: Support for the “infiltration-evapotranspiration trade-off hypothesis”. Journal of Hydrology, Volume 489, 2013. pp 191-209.*

- Kuzyakov Y. Domanski G.** Carbon inputs by plants into the soil. Review. *Journal of Plant nutrition and Soil science*, Volume 163, 2000. pp 421-431.
- Laganiere J. et al.** Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation : a meta-analysis. *Global Change Biology*, Volume 16, 2009. pp 439-453.
- Lambin E.F. et al.** The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, Volume 11, 2001. pp 261-269.
- Marks E. et al.** Conservation of soil organic carbon, biodiversity and the provision of other ecosystem services along climatic gradients in West Africa. *Biogeosciences*, Volume 6; 2009. pp 1825-1838.
- Marziliano P.A. et al.** La gestione del paesaggio forestale urbano: l'esperienza del Parco Nord Milano a 25 anni dai primi impianti. 2009
- Menard I. et al.** Multi-model approach to integrate climate change impact on carbon sequestration potential of afforestation scenarios in Quebec, Canada. *Ecological Modelling*, Volume 473, 2022. pp 110-144.
- Minasny B. et al.** Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, Volume 292, 2017. pp 59-86.
- Mirzabaev A. et al.** Economics of Land Degradation and Improvement – A global assessment for sustainable development. Springer Open, 2016.
- Montanarella L.** The importance of land restoration for achieving a land degradation – neutral world. *Land Restoration, Reclaiming Landscapes for a Sustainable Future*, 2016. pp 249-258.
- Montgomery D.R.** Soil erosion and agricultural sustainability. *PNAS*, Volume 104, 2007.
- Pendergrass A.G. et al.** Flash droughts present a new challenge for subseasonal to seasonal prediction. *Nature Climate Change*, Volume 10, 2018. pp 191-199.
- Porter J.R. et al.** Soil-based ecosystem services : a synthesis of nutrient cycling and carbon sequestration assessment methods. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, Volume 10, 2014. pp 177-186
- Ramankutty N. et al.** The global distribution of cultivable lands: current patterns and sensitivity to possible climate change. *Global Ecology and Biogeography*, Volume 11. pp 377-392.
- Rossi L.M.W.** Embankement as a carbon sink : a study on carbon sequestration pathways and mechanisms in topsoil and exposed subsoil. Université de Montpellier, 2019.
- Sanesi G. et al.** Assessing the current status of urban forest resources in the context of Parco Nord, Milan, Italy. *Landscape and Ecological Engineering*, Volume 3, 2007. pp 187-198.
- Settele J. et al.** Agricultural landscapes and ecosystem services in South-East Asia – The LEGATO – Project. *Basic and Applied Ecology*, Volume 16, 2015. pp 661-664.

Showers K.B. *Imperial gullies: soil erosion and conservation in Lesotho.* Ohio University Press, 2005.

Sorensen L.H. *Rate of decomposition of organic matter in soil as influenced by repeated air drying – rewetting and repeated additions of organic material.* *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 6, 1974. pp 287-292

Szabolcs I. *Soil resilience and sustainable land use. Second workshop on the Ecological Foundations of Sustainable Agriculture, Budapest, 1992.*

Van Eekeren N. et al *Ecosystem services in grassland associated with biotic and abiotic soil parameters.* *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 42, 2010. pp 1491-1504

Wang S., Yao H. *Determinants of soil organic carbon sequestration and its contribution to ecosystem carbon sink of planted forest.* *Global Change Biology*, Volume 26, 2020. pp 3163-3173

Warren R. et al. *The implications of the United Nations Paris Agreement on climate change for globally significant biodiversity areas.* *Climatic change*, volume 147, 2018. pp 395-409

Xiarong W. et al. *Accumulation of soil organic carbon in aggregates after afforestation on abandoned farmland.* *Biology and Fertility of Soils*, Volume 49, 2012. pp 637-646

William A., Hedlund K. *Indicators of soil ecosystem services in conventional and organic arable fields along a gradient of landscape heterogeneity in southern Sweden.* *Applied Soil Ecology*, Volume 65, 2013. pp 1-7

Witzgall K. et al. *Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon.* *Nature communications*, Volume 12 2021.

Wu J. *Formation and destruction of microbial biomass during the decomposition of glucose and ryegrass in soil.* *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 25, 1993. pp 1435-1441

Xiarong W. et al *Dynamics of soil aggregate – associated organic carbon along an afforestation chronosequence.* *Plant and Soil*, Volume 391, 2015. pp 237-251

Young I.M., Crawford J. W. *Interactions and Self–Organization in the soil – microbe complex.* *Science*, Volume 304, 2004. pp 1634-1637

7. SITOGRAFIA

FAO, Food and agriculture organization: [Home | Food and Agriculture Organization of the United Nations \(fao.org\)](#)

United Nations Department of Economic and Social Affairs: The 4 per mille Initiative: The "4 per 1000" Initiative and its implementation | Department of Economic and Social Affairs (un.org)

The international 4 per mille Initiative: The international "4 per 1000" Initiative Soils for food security and climate (4p1000.org)

SUPERB Upscaling Forest Restoration: SUPERB: Upscaling Forest Restoration - SUPERB (forest-restoration.eu)

IPCC The intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change

IUCN International Union for Conservation of Nature: [About IUCN | IUCN](#)

Government of Canada: [Home - Canada.ca](#)

Ringraziamenti

Giunto alla fine di questo percorso trovo quantomeno doveroso esprimere la mia gratitudine a tutti coloro che più o meno direttamente hanno visto nascere ed hanno contribuito a creare questo elaborato.

Il primo ringraziamento va, ovviamente, ai miei relatori; ringrazio quindi il dottor Michele Eugenio D'amico e il dottor Lorenzo Matteo Walter Rossi per il loro costante supporto e la loro importante presenza, senza le quali non avrei mai imparato a orientarmi tra dati, elaborazioni e letteratura; vi ringrazio per la passione che mettete nel vostro lavoro e per avermi fatto appassionare in modo viscerale alla ricerca che insieme abbiamo condotto.

Un secondo pensiero va ai miei compagni di lavoro in campo e in laboratorio, ringrazio Dario Notarangelo e Simone Cavenaghi per l'aiuto e l'impegno profuso nelle fasi più embrionali di questo lavoro; grazie ai ragazzi di FORESTLAB per l'ospitalità durante le lunghe mattinate di preparazione dei campioni e, soprattutto, per le stimolanti chiacchierate che hanno reso meno pesante tutto il lavoro.

Giungo ora alla parte più difficile in quanto sarà impossibile citare tutti gli amici che in un modo o nell'altro hanno fatto in modo che io, oggi, sia arrivato fino a qui... Grazie agli amici di sempre: Luca, Sam, Davide e Francesco senza i quali io non sarei la persona che sono oggi, grazie dal più profondo del cuore per avermi insegnato a dare valore al proprio lavoro e a mettere passione in tutto ciò che si fa, provando sempre a dare il meglio.

Grazie al gruppo de "il battesimo del fuoco": Dani, Lori, Gibo, Fra e Marco compagni di infinite serate più o meno sobrie (spesso meno) al mitico Santo Bevitore, avete seguito passo per passo la genesi di questo elaborato, contribuendo a rendere meno insensati i miei sproloqui, grazie per il sostegno che, da parte vostra non è mai mancato.

Come posso non citare ora la mia cara Nene, una delle persone che, più di tutte, è stata in grado di aiutarmi, supportarmi e soprattutto sopportarmi durante questi mesi lunghi, difficili e, a tratti disperati; grazie per la pazienza che hai avuto con me, grazie per l'amore che mi hai dimostrato giorno per giorno, non esistono parole che possano ripagarti per quello che hai fatto; senza di te, ora, tutto avrebbe un sapore diverso.

Da buono studente italiano non posso che concludere questi ringraziamenti citando mia mamma, pilastro di sostegno insostituibile che, insieme a me, ha attraversato tutti questi anni supportandomi sotto ogni punto di vista; dirti grazie, mamma, non è assolutamente abbastanza.