



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

**DINAMICA DELLA SOSTANZA ORGANICA
NEI SUOLI FORESTALI**
**ORGANIC MATTER DYNAMICS IN FOREST
SOILS**

Tipo Tesi: compilativa

STUDENTE:
GIULIA MARINACCI

RELATORE:
PROF. CRISTIANO CASUCCI

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

| | |
|--|-----------|
| INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI..... | 1 |
| CAPITOLO 1 IL CONCETTO DI QUALITÀ DEL SUOLO | 2 |
| 1.1 La sostanza organica, un indicatore della qualità del suolo | 2 |
| 1.2 Caratteristiche della sostanza organica e sue interazioni..... | 2 |
| 1.3 Le sostanze umiche | 5 |
| <i>1.3.1 Caratteristiche delle sostanze umiche.....</i> | <i>6</i> |
| 1.4 Macrofauna del suolo | 6 |
| 1.5 Qualità della sostanza organica in relazione alla fertilità del suolo | 7 |
| 1.6 Trasformazione della lettiera sotterranea ad opera di radici e funghi micorrizici 8 | |
| <i>1.6.1 Radici</i> | <i>9</i> |
| <i>1.6.2 Funghi micorrizici</i> | <i>10</i> |
| CAPITOLO 2 RUOLO DEGLI ESSUDATI RADICALI NEL SEQUESTRO DEL CARBONIO NEL SUOLO | 11 |
| CAPITOLO 3 EFFETTI DEGLI INCENDI BOSCHIVI SULLE PROPRIETÀ DEL SUOLO... 14 | |
| 3.1 COSA SONO I FUOCHI PRESCRITTI E PERCHE' VENGONO UTILIZZATI..... | 16 |
| 3.2 PROPRIETA' CHIMICHE | 17 |
| <i>3.2.1 Carbonio organico nel suolo</i> | <i>17</i> |
| <i>3.2.2 pH del suolo</i> | <i>18</i> |
| <i>3.2.3 Azoto</i> | <i>19</i> |
| <i>3.2.4 Disponibilità di nutrienti.....</i> | <i>20</i> |
| 3.3 PROPRIETA' FISICHE..... | 21 |
| <i>3.3.1 Tessitura del suolo</i> | <i>21</i> |
| <i>3.3.2 Densità apparente del suolo</i> | <i>22</i> |
| <i>3.3.3 Stabilità degli aggregati nel suolo</i> | <i>23</i> |
| <i>3.3.4 Idrorepellenza del suolo.....</i> | <i>23</i> |
| 3.4 PROPRIETA' BIOLOGICHE DEL SUOLO | 25 |
| CONCLUSIONI | 26 |

| | |
|---------------------|----|
| RINGRAZIAMENTI..... | 28 |
| BIBLIOGRAFIA | 29 |

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

La sostanza organica è una componente fondamentale dei suoli; essa rappresenta la fonte principale di carbonio organico nel suolo e contribuisce attivamente alla creazione di un'insieme di relazioni con la parte abiotica del suolo come metalli, la struttura del suolo e la parte biotica costituita dai microrganismi e loro prodotti e dalle radici delle piante. Le relazioni comportano cambiamenti e trasformazioni di origine fisica, chimica e biologica, per questo la sostanza organica si differenzia in base alla composizione, alle caratteristiche morfologiche e allo stadio di decomposizione.

L'obiettivo dello studio è stato quello di evidenziare alcune tra le molteplici relazioni che si instaurano tra la sostanza organica e la componente biotica, nello specifico si sono presi in considerazione la macrofauna del suolo, le interazioni e le azioni delle radici delle piante e dei funghi micorrizici.

E' stato inoltre considerato un approfondimento relativo agli effetti provocati dagli incendi sul suolo relativamente alle sue proprietà chimiche, fisiche e biologiche.

Capitolo 1

IL CONCETTO DI QUALITÀ DEL SUOLO

Il suolo è riconosciuto come risorsa naturale, non rinnovabile e per questo esauribile, risulta pertanto di primaria importanza la comprensione di tutti quei processi che influiscono direttamente sulla qualità del suolo per far sì di tutelarlo (Nortcliff, 2002).

Gli aspetti principali che riguardano le proprietà del suolo sono la produttività biologica, la relazione tra il suolo e gli ambienti circostanti e la salute degli organismi vegetali e animali incluso l'uomo.

La qualità del suolo è vista separatamente in qualità intrinseca e qualità dinamica.

La qualità intrinseca del suolo riguarda la composizione di qualità del territorio che dipende da fattori pedogenetici come il clima, il tempo; mentre la qualità dinamica prende in considerazione le interazioni tra la qualità del suolo e le componenti artificiali dell'ecosistema (Doran e Zeiss, 2000).

La qualità del suolo è determinata da una moltitudine di indicatori, tra i quali le caratteristiche fisiche e chimiche.

1.1 La sostanza organica, un indicatore della qualità del suolo

La presenza della sostanza organica garantisce la qualità del suolo costituendo un apporto nutrizionale ed energetico per gli organismi presenti nel suolo (Stevenson, 1994) nonché la base dei nutrienti per le piante.

1.2 Caratteristiche della sostanza organica e sue interazioni

La struttura del suolo dipende anche essa dalla sostanza organica che è in grado di aumentare la porosità e l'equilibrio tra gli aggregati, questo si traduce in un buon drenaggio e aerazione del suolo, aumento della ritenzione idrica e un minor impatto dei fenomeni erosivi. Anche il bilancio termico risente della presenza della sostanza organica in quanto la sostanza organica umificata determina un colore scuro del suolo.

Dal punto di vista chimico la sostanza organica è una delle componenti del suolo che si presenta come la più reattiva. Una delle caratteristiche è quella di avere un'elevata superficie specifica; con la sostanza organica interagiscono metalli, minerali argillosi, essa compie l'azione di scambiatore ionico e rappresenta una riserva di azoto. La sostanza organica presenta importanti percentuali di fosforo (tra il 20 e 80%) e zolfo nei suoli non calcarei (maggiore del 90%).

Nel suolo la sostanza organica è la fonte energetica di microrganismi autotrofi e per i batteri azotofissatori liberi, inoltre contribuisce considerevolmente allo sviluppo dell'apparato radicale senza il quale la pianta non avrebbe possibilità di svilupparsi, sostiene il processo della fotosintesi e la fase di germinazione dei semi; induce ai processi metabolici cellulari e funge da filtro nei confronti di metalli pesanti e pesticidi che comporterebbero degli effetti tossici.

La sostanza organica ha anche un'importante funzione come fonte di riserva del carbonio nel suolo, raffigura la più grande riserva terrestre di carbonio, contiene 1500 miliardi di tonnellate di carbonio organico; in relazione nell'atmosfera l'anidride carbonica è presente con 720 tonnellate e la più piccola consistenza la troviamo nella biomassa vegetale con 560 tonnellate.

La funzione della sostanza organica di "sequestrare" l'anidride carbonica e ridurre la quantità immessa nell'atmosfera è emersa nell'ambito delle politiche ambientali quando questo problema ha contribuito ad innalzare sensibilmente la temperatura a livello globale.

La sostanza organica è rappresentata dall'insieme degli organismi presenti comprese le sostanze che essi producono e dai resti degli organismi morti nelle varie fasi di decomposizione.

Secondo il Glossary of Soil Science Terms è composta da:

- Biomasse vegetali, animali e microbiche;
- Necromasse integre o in fase di demolizione;
- Unità molecolari semplici che si svincolano dalle biomasse e necromasse successivamente a reazioni idrolitiche che coinvolgono i polimeri della struttura cellulare;
- Molecole umiche che si formano dalle biomasse e dalle necromasse a causa di reazioni di ossidazione, ciclizzazione, polimerizzazione e policondensazione. Si riscontrano come sostanze di struttura amorfa con colorazione più o meno scura.

Con il termine di sostanza organica facciamo riferimento quindi a un insieme eterogeneo di molecole che differiscono per la loro natura e origine diversa; fanno parte della componente del

suolo non vivente, che scaturisce dall'azione microbica e dalle alterazioni chimiche che interessano queste sostanze (Hayes & Swift, 1978).

In pedologia, la sostanza organica è definita in tipi, classi e frazioni (Sequi, 1991).

La classificazione inerente ai tipi è basata sull'esame delle caratteristiche morfologiche della sostanza organica come di alcune proprietà chimiche, il grado di saturazione, la struttura, la presenza di specifici organismi viventi e l'umificazione.

| Tipo | Struttura | pH | C/N | Grado di saturazione | Umificazione | Organismi viventi |
|----------------------------------|---------------------------|---------------|---------------|----------------------|--|------------------------------------|
| Mull calcico | Grumosa stabile | 7 | 10 | 100 | Rapida, con formazione di complessi organo-minerali resistenti alla mineralizzazione | Lombrichi, batteri, attinomiceti |
| Mull forestale | Grumosa | 5,5 | 20 | 60 | Abbastanza rapida | Lombrichi, funghi |
| Moder | Grumosa debole | 4,0-5,0 | 15-25 | 10,0-20,0 | Media | Artropodi, funghi |
| Mor | Fibrosa in A ₀ | 3,5-4,5 | 25 | 10 | Abbondante formazione di composti organici solubili, mineralizzazione lenta | Alcuni acari e collemboli, funghi |
| Anmor | Plastica | Vario | 20 | Variabile | Completa; sostanza organica inferiore al 30%; mineralizzazione molto lenta | Fauna stagionale; batteri anaerobi |
| Torba oligotrofica (mesotrofica) | Fibrosa | 3,5-4 (7-7,5) | 30-40 (15-30) | 10 (90 - 100) | Incompleta; sostanza organica superiore al 30%; mineralizzazione molto lenta | Batteri anaerobi |

Tabella 1 - Tipologie della sostanza organica del suolo e loro caratteristiche

La ripartizione in classi è originata considerando lo stadio di evoluzione della sostanza organica. Le diverse classi non sono distinte con un limite definito, dal momento che i processi di decomposizione possono sovrapporsi.

Le classi si distinguono in:

1. Edaphon, rappresenta tutti gli organismi viventi presenti nel suolo
2. Biomassa morta non completamente decomposta, come ad esempio la lettiera nelle foreste
3. Sostanze in via di decomposizione, è ancora possibile visualizzare l'organizzazione dei tessuti e delle cellule

4. Humus, proviene da una rielaborazione, polimerizzazione e condensazione dei composti organici.

Queste classi sono presenti in tutti i suoli che mostrano un processo di decomposizione e umificazione; l'edaphon è la più semplice da riconoscere mentre le altre non sempre, tranne che nei suoli forestali.

La sostanza organica, sulla base della stabilità biochimica si differenzia in frazione labile definita dai prodotti semplici della composizione e frazione stabile (humus).

Anche la velocità di decomposizione è un parametro per classificare la sostanza organica, essa viene separata in due pool: uno di facile degradazione riguardante la frazione labile e il secondo più resistente corrispondente alla frazione stabile.

La frazione labile è composta da carboidrati, amminoacidi, peptidi, amminozuccheri, lipidi, cere, grassi, resine, lignine ed emicellulose (Piccolo, 1996). Questa frazione è presente solitamente nella lettiera o nello spessore più superficiale dei suoli (orizzonte) che non sono stati soggetti a lavorazioni. Le costituenti più semplici possiedono un'alta solubilità nella soluzione del suolo e sono facilmente fruibili dalla flora microbica per ottenere energia.

Le proteine con gli acidi nucleici e i polisaccaridi avendo un peso molecolare più alto vengono idrolizzati ad opera dei microrganismi a composti più semplici i quali in seguito fungono da fonte di energia. Al contrario le cere, i grassi, le resine e lignine sono più resistenti e difficili da attaccare dai microrganismi, per questo motivo risiedono nel suolo per tempi prolungati (Fiorentino, 2005).

La componente organica della sostanza organica costituisce la frazione stabile, la possiamo ritrovare con un massimo del 65% sul totale della materia organica presente. La sua persistenza nel suolo dipende dalla tipologia di ecosistema, va da alcune decine di anni a diverse centinaia di anni (Fiorentino, 2005). Le due frazioni sono strettamente correlate.

1.3 Le sostanze umiche

Uno dei processi che può subire la sostanza organica che arriva nel suolo è l'umificazione dalla quale derivano sostanze umiche o humus. Le trasformazioni che avvengono sono di tipo biologico e chimico. Le sostanze umiche sono formate da composti amorfi, il loro colore va dal giallo al bruno e possiedono un'elevata resistenza alla degradazione chimica e biologica.

La formazione dell'humus deriva solamente dalla sostanza organica vegetale poiché la sostanza organica animale viene mineralizzata in breve tempo, solo nel caso in cui la sostanza organica

animale sia miscelata con la fibra vegetale come nel caso del letame può partecipare al processo di umificazione.

1.3.1 Caratteristiche delle sostanze umiche

- Sono macromolecole costituite da unità non identiche, sono eteropolimeri;
- Hanno un nucleo centrale formatosi dall'unione di anelli aromatici, chinonici ed eterociclici ai quali si congiungono le catene alifatiche e i gruppi funzionali periferici;
- Possiedono elementi in forma quaternaria come il carbonio, idrogeno, ossigeno e l'azoto che può assumere forma eterociclica;
- Il carattere anionico e l'elevata capacità di scambio cationico sono attribuiti dalla presenza di gruppi funzionali come il gruppo carbossilico, idrossilico, fenolico e alcolico;
- Quando il peso molecolare è elevato c'è la possibilità che si policondensano e che i policondensanti umici attraverso ioni flocculanti originino micelle.

I residui vegetali attraverso il processo di umificazione alterano la loro composizione, questa variazione è dovuta all'azione dei microrganismi eterotrofi. Il rapporto C/N, il carbonio e l'idrogeno diminuiscono e nel mentre la quantità di azoto e ossigeno aumentano.

La prima degradazione fisica è importante ed è ad opera della fauna terricola; per prime vengono assalite le cellule vive vegetali, poi vengono attaccate le cellule morte che hanno pareti lignificate o suberizzate.

1.4 Macrofauna del suolo

L'attività della macrofauna è importante nel trasferimento della lettiera nel suolo minerale, i lombrichi hanno grande influenza nel processo di decomposizione dei rifiuti. La loro presenza è favorita da un materiale con Ph neutro negli strati più profondi del suolo e lettiera avente un basso contenuto di lignina e ricca di cationi; in particolare di calcio e sostanze nutritive principalmente azoto (Cindy E. Prescott.,2021; Lars Vesterdal, 2021). I lombrichi agiscono nella decomposizione dei rifiuti vegetali e alla loro stabilizzazione attraverso la trasformazione in biomassa microbica e necromassa (Cindy E. Prescott.,2021; Lars Vesterdal, 2021). La lettiera fogliare passando per l'intestino del lombrico viene in parte decomposta ma allo stesso tempo si arricchisce di muco il quale ha un effetto stimolante per l'attività microbica e per la biomassa, nello specifico i batteri (Cindy E. Prescott.,2021; Lars Vesterdal, 2021).

Per iniziare il processo di umificazione, la popolazione microbica eterotrofa ha l'esigenza di una fonte di energia biologica e di forme di azoto organico o inorganico per sintetizzare i nuovi composti cellulari.

L'energia è ottenuta tramite ossidazione di sostanze come la cellulosa, amido, pectine e lignina; vengono prodotte molecole umiche e avviene il rilascio di anidrite carbonica e produzione di acqua.

I terreni sono identificati sulla base del contenuto di humus in:

- o Umiferi > 10%
- o Ricchi di humus 5-10%
- o Sufficientemente dotati 3-5%
- o Mediocrementemente dotati 2-3%
- o Poveri di humus <2%

Le sostanze umiche in base alla reazione con alcali si distinguono in umina, è la frazione insolubile a qualsiasi valore di pH e humus solubile. L'humus solubile in relazione a solubilità con acidi o alcali si suddivide in acido umico e acido fulvico. Il primo si solubilizza in soluzione alcalina e precipita in soluzioni acide mentre l'acido fulvico solubilizza in entrambi i tipi di soluzione (Stevenson, 1994).

Gli acidi fulvici sono presenti in quantità maggiore nei terreni con pH acido; nella loro forma libera rientrano nel trasporto e nella mobilità dei cationi nel terreno. L'acido umico invece ne consegue dalla reazione tra lignina, cellulosa e proteine ed ha maggior peso molecolare.

1.5 Qualità della sostanza organica in relazione alla fertilità del suolo

La sostanza organica del suolo è considerata uno tra i fattori più significativi della fertilità del suolo, ha un ampio spettro positivo dalla produzione delle colture alla difesa del territorio dal degrado, erosione; questo avviene specialmente nelle zone aride e semiaride (Turrión et al., 2010).

La sostanza organica ha un'azione diretta sulla crescita delle piante andando ad agire sulla loro fisiologia e un'azione indiretta che influenza i suoli nelle loro proprietà chimiche, fisiche e biologiche.

Il suolo è influenzato dalla qualità e quantità della sostanza organica, essa interagisce nella struttura, porosità, capacità di ritenzione idrica, regime termico, stabilità degli aggregati e permeabilità (De Nobili et al., 1993).

L'azione della sostanza organica è legata primariamente a interazioni chimiche e fisiche che essa esercita sulle altre componenti del suolo. Una sua minima alterazione può conseguire in variazioni della struttura del suolo.

Essa è in grado di cementare le particelle del suolo formando degli aggregati con dimensioni variabili che vanno tra i 20 e i 250 μm e il carbonio organico è contenuto in quantità massima negli aggregati con dimensione tra i 5 e 20 μm .

Anche la densità apparente del suolo è sotto l'azione della sostanza organica che influisce sul ricircolo di aria tellurica, sul drenaggio, sulla penetrazione delle radici e conferisce maggiore resistenza al suolo alla compattazione o alla polverizzazione.

La densità apparente nei terreni con contenuto medio di sostanza organica vede una brusca diminuzione, poiché direttamente proporzionale alla riduzione della sostanza organica, questo si spiega perché avviene la formazione di nuovi aggregati. Nei terreni invece che presentano una buona densità apparente, un conseguente aumento della sostanza organica non determina un aumento della densità apparente, questo perché si ha una buona struttura della saturazione dei legami.

Negli aggregati che si formano ci sono dei micropori con all'interno acqua, questa viene trattenuta dalle sostanze umiche ed è difficilmente usufruibile dalle piante ma allo stesso tempo la presenza di acqua nel suolo condiziona la temperatura; quando il contenuto di acqua è elevato il suolo abbassa e aumenta la temperatura rapidamente.

In suoli umidi con bassi livelli di ossigeno, la sostanza organica si potrebbe accumulare fino ad originare sfagni e delle torbiere.

1.6 Trasformazione della lettiera sotterranea ad opera di radici e funghi micorrizici

Le radici e le ife fungine micorriziche rappresentano fonti importanti di sostanza organica nel suolo. Le radici di ordine 1 e 2 sono radici fini, la loro decomposizione avviene lentamente come alcuni tipi di ife micorriziche. Il tempo di degradazione varia in funzione alla composizione della parete cellulare, ad esempio la presenza di lignine, melanine e glicoproteine rendono il processo più lungo.

A seconda delle caratteristiche del sito, la sostanza organica presente nel suolo può subire trasformazioni in modi differenti, questo perché le proprietà del sito e del suolo condizionano la comunità biotica che è responsabile della decomposizione della sostanza organica nel suolo.

Le trasformazioni della lettiera in sostanza organica nel suolo passano attraverso passaggi, i rifiuti fuori terra vengono convertiti in humus che si accumula sullo strato superiore del suolo e situazioni nelle quali i rifiuti in parte decomposti tramite bioturbazione, ossia consumo di rifiuti e trasporto nel suolo, vengono trasferiti nella parte minerale del suolo.

1.6.1 Radici

Le radici delle piante incrementano significativamente la fonte di sostanza organica nel suolo, il loro contributo consiste nell'apportare carbonio nel suolo. Questo può derivare da un tasso maggiore di produzione di lettiera radicale in relazione ad altre tipologie di lettiera.

Si è riscontrato che le radici fini appartenenti agli ordini radicali 1 e 2 hanno una decomposizione più prolungata delle radici degli ordini superiori 4 e 5 (Cindy E. Prescott.,2021; Lars Vesterdal, 2021).

La massa netta delle radici fini si perde lentamente perché contengono concentrazioni superiori di composti insolubili in acido e tannini rispetto alle radici più spesse (Cindy E. Prescott.,2021; Lars Vesterdal, 2021).

La composizione chimica delle pareti cellulari dell'epidermide influenzerebbe il lento processo di decomposizione delle radici fini. Le pareti cellulari esodermiche ed endodermiche hanno depositi di lamelle di suberina ed essa potrebbe condizionare la lenta decomposizione malgrado studi recenti dimostrino che la suberina non è particolarmente durevole (Cindy E. Prescott.,2021; Lars Vesterdal, 2021).

Un'ulteriore resistenza delle radici di ordine 1 e 2 alla degradazione è garantita da un contenuto maggiore di monomeri guaiacilici presenti nelle pareti cellulari prossime alla periferia, essi degradandosi in parte creano legami aril-arilici stabili (Cindy E. Prescott.,2021; Lars Vesterdal, 2021).

Si presume che la lenta decomposizione delle radici fini possa essere connessa alla loro colonizzazione da parte di funghi micorrizici. Il tessuto fungino costituisce per il 20-40% le radici ectomicorriziche e le punte di questo tipo di radici hanno una decomposizione più lenta rispetto alle radici non micorriziche (Cindy E. Prescott.,2021; Lars Vesterdal, 2021).

1.6.2 Funghi micorrizici

L'azione dei funghi micorrizici sulla necromassa fungina apporta una fonte importante di sostanza organica nelle foreste. La biomassa miceliale dei funghi ectomicorrizici è stimata da 100 a 600 kg/ha e la produzione in un anno nelle foreste boreali è stimata intorno ai 100 e 300 kg ha (Cindy E. Prescott.,2021; Lars Vesterdal, 2021).

Godbold et al. 2006 ha identificato che il transito dominante attraverso il quale il carbonio entrava nella sostanza organica nel suolo era mediante il micelio esterno micorrizico, superando l'ingresso tramite lettiera fogliare e ricambio delle radici fini.

Si pensa che il carbonio immagazzinato nello strato di humus delle foreste boreali ad opera delle radici e dai microrganismi ad esse associate specialmente funghi ectomicorrizici sia del 50-70% (Cindy E. Prescott.,2021; Lars Vesterdal, 2021).

I funghi micorrizici con concentrazione di azoto hanno un tasso di perdita di massa dei rifiuti positivo mentre i funghi micorrizici hanno un tasso negativo che è legato alla concentrazione di melanina (Cindy E. Prescott.,2021; Lars Vesterdal, 2021).

Le melanine sono componenti di colorazione scura della parete cellulare, si compongono di alcuni monomeri fenolici o indolici, si trovano generalmente complessati con proteine le quali conferiscono resistenza alla degradazione (Cindy E. Prescott.,2021; Lars Vesterdal, 2021).

Le ife che presentano melanina assorbono maggiormente i nutrienti minerali del suolo rispetto alle ife ialine questo ne favorisce l'incorporazione in sostanza organica del suolo (Cindy E. Prescott.,2021; Lars Vesterdal, 2021). Alcuni funghi possiedono una pellicola esterna nelle loro pareti cellulari composta da proteine idrofobiche che li rendono impermeabili, questa risulta un ostacolo per la decomposizione enzimatica (Cindy E. Prescott.,2021; Lars Vesterdal, 2021).



Foto 1. Confronto tra radice micorrizzata (sotto) e radice non micorrizzata (sopra).

Capitolo 2

RUOLO DEGLI ESSUDATI RADICALI NEL SEQUESTRO DEL CARBONIO NEL SUOLO

Gli ecosistemi come quello delle foreste hanno il potenziale di incrementare i depositi di carbonio nel suolo tramite gli essudati radicali che rappresentano i composti organici del carbonio.

Gli essudati radicali comprendono composti organici solubili come zuccheri, amminoacidi e acidi organici (Poonam Panchal, 2022; Catherine Preece, 2022; Josep Peñuelas, 2022; Jitender Giri, 2022). Vengono secreti dall'apparato radicale di piante viventi e sono composti organici rilasciati attivamente o passivamente. Sono ad alto e basso peso molecolare.

Questi composti all'interno del suolo sono stabilizzati mediante gli essudati delle radici delle piante e anche dalle caratteristiche del suolo in questione, questa stabilizzazione contribuisce all'aumento della riserva di carbonio organico nel suolo.

I processi vegetali sotterranei apportano una quantità consistente di carbonio nel suolo (Poonam Panchal, 2022; Catherine Preece, 2022; Josep Peñuelas, 2022; Jitender Giri, 2022).

Il carbonio fissato derivante dalla fotosintesi si convoglia nella rizosfera come biomassa radicale, biomassa microbica ed essudati rappresentando la sostanza organica nel suolo.

Essi sono indicati come fonti labili di carbonio nel suolo (Poonam Panchal, 2022; Catherine Preece, 2022; Josep Peñuelas, 2022; Jitender Giri, 2022) che possono attivare l'attività dei microbi.

Il termine labile riferito agli essudati radicali indica la loro facile scomposizione da parte dei microrganismi presenti nel suolo. Gli essudati radicali nel momento in cui sono aggiunti hanno la possibilità di aumentare l'uso del carbonio organico nel suolo perché hanno un'azione stretta e diretta con l'aumento dell'attività dei microrganismi della rizosfera i quali rilasciano in atmosfera una quantità importante di anidrite carbonica. Di conseguenza questi composti inizialmente possono modificare le riserve di carbonio presenti nel suolo destabilizzandole, questo fenomeno prende il nome di "effetto di innesco" (Poonam Panchal, 2022; Catherine Preece, 2022; Josep Peñuelas, 2022; Jitender Giri, 2022).

La stabilizzazione del carbonio organico nel suolo e il suo reintegro ad opera degli essudati radicali dipende da alcuni fattori, questi comprendono la struttura del suolo, la biodiversità delle specie, la componente microbica rapportata alla qualità e alla quantità, il rapporto C/N, il rapporto esistente tra la rizosfera e il terreno circostante, la disponibilità di nutrienti, il clima e le fonti di carbonio preesistenti nel suolo (Poonam Panchal, 2022; Catherine Preece, 2022; Josep Peñuelas, 2022; Jitender Giri, 2022).

Dunque la liberazione o il sequestro del carbonio organico nel suolo sono dipendenti dalla quantità degli essudati radicali che possono determinare effetti di innesco “positivi” o “negativi” nella rizosfera (Poonam Panchal, 2022; Catherine Preece, 2022; Josep Peñuelas, 2022; Jitender Giri, 2022).

Negli ultimi anni alcuni studi hanno dichiarato che la stabilità del carbonio organico aggiunto al suolo è ampiamente condizionata da alcuni fattori; dalla natura e dalle caratteristiche del suolo e dell’ecosistema sotterraneo, ed è meno associata alla chimica dei composti aggiunti (Poonam Panchal, 2022; Catherine Preece, 2022; Josep Peñuelas, 2022; Jitender Giri, 2022).

Un esempio sono gli acidi organici che sono capaci di formare componenti stabili di carbonio organico nel suolo tramite legami con ossido di alluminio e di ferro o viceversa posso anche demineralizzare le riserve di carbonio organico già presenti (Poonam Panchal, 2022; Catherine Preece, 2022; Josep Peñuelas, 2022; Jitender Giri, 2022).

La stabilità del carbonio organico nel suolo risente anche della partecipazione dei microrganismi del suolo. I microrganismi all’interno della rizosfera sono attratti dagli essudati radicali (Poonam Panchal, 2022; Catherine Preece, 2022; Josep Peñuelas, 2022; Jitender Giri, 2022).

I microrganismi tramite respirazione destabilizzano il carbonio organico nel suolo mentre possono invece stabilizzarlo mediante accumulo di residui di biomassa microbica (Poonam Panchal, 2022; Catherine Preece, 2022; Josep Peñuelas, 2022; Jitender Giri, 2022).

Il carbonio organico del suolo (SOC) è spesso ripartito in due tipologie: carbonio organico particolato (POC) e carbonio organico associato ai minerali (MAOC) (Poonam Panchal, 2022; Catherine Preece, 2022; Josep Peñuelas, 2022; Jitender Giri, 2022). La frazione del carbonio organico particolato risulta più suscettibile alla decomposizione ad opera dei microrganismi mentre il carbonio associato ai minerali dimostra più resistenza dovuta alla protezione datagli dalla porzione minerale (Poonam Panchal, 2022; Catherine Preece, 2022; Josep Peñuelas, 2022; Jitender Giri, 2022).

Gli essudati radicali nei terreni ad alto contenuto di azoto sono rilevanti perché formano accumuli di carbonio organico minerale (Poonam Panchal, 2022; Catherine Preece, 2022; Josep Peñuelas, 2022; Jitender Giri, 2022).

E' conosciuto che con la formazione dei macro aggregati nel suolo è aiutata dalla ritenzione di carbonio nel suolo (Poonam Panchal, 2022; Catherine Preece, 2022; Josep Peñuelas, 2022; Jitender Giri, 2022).

La formazione di carbonio organico nel suolo ha una stabilità a lungo termine, superiore a dieci anni quando sono le radici labili di alta qualità a formarlo, la stabilità invece incentrata sulla lettiera ha una durata massima di dieci anni (Poonam Panchal, 2022; Catherine Preece, 2022; Josep Peñuelas, 2022; Jitender Giri, 2022). In questo modo, gli essudati radicali hanno la capacità di aumentare e stabilizzare il contenuto di carbonio organico nel suolo forestale avvalendosi delle proprietà del suolo circostante.

Capitolo 3

EFFETTI DEGLI INCENDI BOSCHIVI SULLE PROPRIETÀ DEL SUOLO

Gli incendi boschivi modificano significativamente l'ecosistema variando le componenti biologiche, chimiche, fisiche dei suoli forestali. L'entità della perturbazione del suolo ad opera del fuoco dipende molto dall'intensità, dalla durata e dalla frequenza dell'incendio, dal carburante presente e dalle caratteristiche del suolo. In base a questi fattori l'impatto risulterà diverso sulle proprietà del suolo. Il degrado delle proprietà del suolo riduce la sua qualità con effetti temporanei o permanenti.

I fattori che hanno un ruolo chiave nel peggiorare lo stato del suolo sono la deforestazione, gli incendi, l'erosione e la contaminazione (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Gli incendi sono considerati distruttivi per la maggior parte degli ecosistemi forestali delle aree tropicali, temperate e boreali (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022). Sono fenomeni globali che si verificano nella maggior parte delle aree terrestri.

Il fuoco cambia l'ecologia e il funzionamento delle foreste modificando il ricircolo dei nutrienti, l'idrofobicità, la composizione, la ripresa e la biodiversità ecologica delle specie. Gli incendi boschivi per la maggior parte delle volte sono opera dell'uomo mentre gli incendi di origine naturale rappresentano una piccola percentuale degli incendi totali (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Gli incendi boschivi mediante diversi meccanismi quali volatilizzazione, ossidazione, trasferimento di ceneri ed erosione diminuiscono l'insieme dei nutrienti (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Akburak et al. (2018) hanno riscontrato un calo significativo del carbonio da biomassa microbica originato da incendi boschivi di breve durata. Raison et al. (1986) hanno inoltre riportato un calo dei pool di nutrienti: azoto del 50-75%, fosforo del 35-50% e magnesio del 25-50%, questa diminuzione è causata da fenomeni di volatilizzazione e ossidazione. Metaix- Solera et al. (2011) ha analizzato che gli incendi boschivi aventi temperatura superiore a 300°C eliminano l'idrorepellenza del suolo, con conseguenze rilevanti sul ciclo dell'acqua attraverso il suolo e sulle caratteristiche dell'erosione (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Incendi che superano le temperature di 850°C possono essere favoriti dalla presenza di pozze di carburante pesanti e secche che causano effetti distruttivi per il suolo (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Alcuni nutrienti come il potassio, il calcio e il magnesio a seguito del fuoco possono verificare un aumento nella loro concentrazione o non subire alcun cambiamento mentre lo zolfo e l'azoto sono più vulnerabili in quanto a seguito di un incendio diminuiscono.

La volatilizzazione dei nutrienti presenti nel suolo è correlata direttamente alla temperatura che viene raggiunta dall'incendio. All'interno della sostanza organica, l'azoto comincia a volatilizzarsi ad una temperatura di 200°C (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022), a confronto il calcio necessita di 1484°C per vaporizzare. Incendi ad alta intensità sono capaci di mutare le proprietà fisiche del suolo e renderlo meno resistente all'esaurimento di nutrienti causato dall'erosione.

Incendi di boscaglia, incendi boschivi o incendi selvaggi, a prescindere dal nome colpiscono gravemente gli ecosistemi forestali.

L'impatto dell'incendio sulle caratteristiche del suolo dipende dalla sua intensità, frequenza e dalla sua durata (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022). L'intensità del fuoco, è misurata tramite potenza termica per superficie bruciata nell'unità di tempo, si classifica in bassa intensità (<100°C), media intensità (con il picco massimo di 250°C) ed alta intensità (>350°C) (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta-Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022). Gli incendi di moderata e alta intensità sono spesso collegati a proprietà fisiche e biologiche ridotte del suolo.

Varela et al. (2015), Dowing et al. (2017) e Heydari et al. (2017) hanno illustrato gli effetti negativi degli incendi sul contenuto d'acqua, capacità di idrorepellenza, densità apparente e aggregati stabili.

Knelman et al. (2015), Fernández-García et al. (2019a, b) and Moya et al. (2019) hanno riportato una minor presenza della massa microbica e una diminuzione dei processi enzimatici a seguito degli incendi boschivi.

Per questo motivo gli studi che mirano alla valutazione degli effetti degli incendi sono di primaria importanza per comprendere i cambiamenti che questi causano al suolo nelle sue proprietà, modifiche che possono persistere per breve o lungo termine.

3.1 COSA SONO I FUOCHI PRESCRITTI E PERCHE' VENGONO UTILIZZATI

Gli incendi prescritti o la combustione prescritta sono incendi a bassa intensità, sono utili nel caso si voglia seguire degli obiettivi per la gestione (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Questa tipologia di fuoco è usata preventivamente nelle aree boschive per prevenire o mitigare un possibile incendio. Si agisce regolando il materiale organico, il quale in caso di incendio funge da carburante (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Gli incendi prescritti sono da aiuto nel controllo delle malattie nelle foreste e gli insetti dannosi, agiscono sulla biodiversità vegetale e animale di ogni ecosistema, inoltre apportano modifiche sulle proprietà del suolo e nei processi ecologici ad esso connessi (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

A causa della bassa severità di questi incendi, ad essi sono riconducibili solitamente solo effetti positivi sulle proprietà del suolo (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Gli impatti positivi sono stati dimostrati da alcuni ricercatori (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022). Switzer et al. (2012), Badía et al. (2014), and Akburak et al. (2018) hanno verificato un aumento dei cationi di base a seguito della combustione prescritta, avvenuto per un accumulo di cenere sulla superficie del suolo. Muqaddas et al. (2015) and Franco et al. (2019) hanno appurato un aumento dei valori di pH nei suoli bruciati mediante fuoco prescritto. Anche la conduttività elettrica ha riscontrato un aumento in questi suoli soggetti a incendi prescritti di bassa intensità

successivamente ad un rilascio di ioni inorganici solubili e per la formazione di carbone nero (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Sebbene per la combustione prescritta vengano riconosciuti solo degli effetti benefici, il suo impiego potrebbe creare danni per l'ecosistema del suolo nel caso in cui le temperature superino la soglia massima per gli incendi di bassa intensità (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

3.2 PROPRIETA' CHIMICHE

Svariati studi hanno riportato l'impatto del fuoco sulle proprietà chimiche del suolo.

La cenere che si crea mediante completa o parziale combustione della biomassa organica e del materiale organico, quando si aggiunge e si incorpora nel suolo, modifica pesantemente la chimica del suolo (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Quando il suolo registra temperature superiori a 200°C dopo l'evento di un incendio boschivo, la materia organica subisce un incenerimento e si producono composti di carbone, che portano alla formazione di ceneri e ne consegue un aumento dei valori di pH.

3.2.1 Carbonio organico nel suolo

Il carbonio organico del suolo (SOC) è ampiamente studiato successivamente al verificarsi di un incendio perché ha molta rilevanza per la qualità del suolo (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

I cambiamenti relativi al carbonio organico nel suolo non sono sempre gli stessi e dipendono dalla variazione della durata dell'incendio, dalla biomassa disponibile nel suolo e il contenuto di umidità, dall'intensità dell'incendio e dalla sua tipologia (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

A seguito di queste variazioni ne deriva una perdita quasi totale della sostanza organica nel suolo, carbonizzazione, una piccola distillazione di composti minori, e/o un aumento di circa il 30% del carbonio organico del suolo uguale alla combustione prescritta (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022). La perdita del carbonio organico nel suolo si verifica quando vengono raggiunte temperature intorno ai 200-250°C. La combustione completa invece si ha con valori di temperatura all'incirca

di 460° fino a 500°C (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Gli impatti del fuoco sul suolo variano; gli incendi a bassa intensità determinano una variazione minima o maggiore del carbonio organico nel suolo, al contrario gli incendi ad alta intensità apportano una riduzione del carbonio organico nel suolo (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

I fattori che rientrano nella diminuzione del carbonio organico nel suolo a seguito di incendi ad alta intensità sono molteplici, interviene la combustione della sostanza organica nel suolo, l'aumento dei livelli di mineralizzazione del carbonio, solubilizzazione e volatilizzazione del carbonio per pH elevato (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Con il sostantivo di black carbon ci si riferisce alle ceneri prodotte dalla combustione del carbonio durante gli incendi boschivi a bassa intensità (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022). Dopo un incendio si formano i carboni neri, questi sono intensamente condensati, hanno la capacità di resistere all'attività dei microrganismi. Con la loro presenza nel suolo, ne consegue una maggiore quantità di accumulo di sostanza organica (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

3.2.2 pH del suolo

Gli incendi boschivi comportano una perdita di biomassa e di strati organici e apportano cenere contenente sostanze nutritive sulla superficie del suolo; in questo modo si verifica un aumento del pH il quale riveste molta importanza per le proprietà chimiche e biologiche del suolo. Un pH elevato si registra nei suoli che riportano una maggiore gravità di ustione per le temperature maggiori ai 450°C (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022). Questo aumento dei valori di pH soprattutto dopo il verificarsi di un incendio ad alta intensità, può dipendere da un aumento delle ceneri contenenti nutrienti, come i cationi di base, a seguito della combustione di materiali organici e della denaturazione dei gruppi organici della materia organica (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Sebbene un aumento del pH può scaturire da un aumento del contenuto di ceneri nel suolo, si considerano altri fattori per spiegare questo cambiamento. Si tengono in considerazione il pH iniziale del suolo, il contenuto di nutrienti di cui è dotato il terreno e dalla quantità di cenere

presente al suolo (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Alcuni studi si sono trovati in contrasto poiché nei rapporti è stato riportato che il pH del suolo non ha subito modifiche dopo un incendio (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Questo potrebbe essere ricondotto alle condizioni ambientali che si presentano in seguito a un incendio (per esempio fenomeno di erosione Fernández-García et al. 2019a, b) e incendi di bassa e moderata intensità (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Dal pH del suolo dipende la disponibilità dei nutrienti, con valori bassi il fosforo non è più utilizzabile perché forma minerali insolubili, mentre con alti valori di pH il calcio immobilizza il fosforo (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

3.2.3 Azoto

L'azoto tra tutti i nutrienti è valutato il più limitante in campo colturale e forestale. Nella matrice del suolo è presente come azoto disponibile o minerale e azoto in forma organica (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

L'azoto in seguito a incendi boschivi si esaurisce mediante volatilizzazione, avviene quando la temperatura del suolo supera i 200°C e potrebbe verificarsi una perdita di azoto anche ad opera dell'erosione e della lisciviazione (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

La volatilizzazione rappresenta il motivo principale delle perdite di azoto nei suoli minerali inseguito a incendi boschivi (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

L'azoto può presentarsi con contenuto maggiore principalmente dopo incendi di bassa intensità per la deposizione di cenere ricche di azoto e per un tasso maggiore di mineralizzazione dei rifiuti organici che liberano una quantità più elevata di azoto (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Successivamente la manifestazione di incendi boschivi avviene un aumento della temperatura del suolo e un incremento dei valori del pH, entrambi influenzano l'azoto inorganico nei processi

legati alla mineralizzazione e alla nitrificazione (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Dopo il passaggio degli incendi boschivi, la parte dell'azoto che non ha subito effetti di volatilizzazione, viene mineralizzato e può avvenire anche la nitrificazione se persistono le condizioni favorevoli al processo (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

3.2.4 Disponibilità di nutrienti

In seguito agli incendi boschivi la disponibilità di nutrienti aumenta notevolmente per la deposizione di ceneri e per la combustione di materiale organico.

La decomposizione della materia organica condiziona la disponibilità dei nutrienti e la distribuzione di essi all'interno dei depositi di cenere (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

E' presente una relazione che descrive come le concentrazioni di cationi scambiabili, fosforo e azoto mineralizzato, aumentino direttamente quando ci sono condizioni di maggiore intensità del fuoco (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Il fosforo è classificato dopo l'azoto come secondo nutriente meno disponibile per le piante, esso viene richiesto dalle piante in forma di fosfato (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Durante gli incendi boschivi, il fosforo organico contenuto nella materia organica viene mineralizzato ottenendo ortofosfato assimilabile dalla pianta (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

L'aumento dei cationi scambiabili è correlato al fenomeno della combustione del materiale organico che tramite la produzione di ceneri immette ioni nella matrice del terreno (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022). I cationi scambiabili presentano elevata resistenza a livelli alti di vaporazione e quindi subiscono minore volatilizzazione (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

La maggiore concentrazione di cationi scambiabili nel suolo inseguito a un incendio può risultare di breve durata e i livelli potrebbero tornare presto alla condizione antecedente il fenomeno (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

A causa della proprietà dei cationi di avere livelli elevati di vaporizzazione, le perdite relative ad essi potrebbero dipendere dall'erosione delle ceneri, dalla lisciviazione dei cationi e senza dubbio dall'assorbimento delle piante successivamente l'incendio (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

3.3 PROPRIETÀ FISICHE

Le proprietà fisiche del suolo insieme alle proprietà chimiche influiscono sulla crescita delle piante.

Alcuni ricercatori hanno studiato gli effetti degli incendi boschivi sulle caratteristiche fisiche del suolo. E' stato fatto un focus sulla densità apparente, la porosità, la stabilità degli aggregati, il contenuto di acqua e la repellenza del suolo (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

3.3.1 Tessitura del suolo

La tessitura del suolo rappresenta la distribuzione granulometrica nel suolo, indica gli elementi inorganici inferiori ai 2 mm del suolo minerale. Le porzioni sabbia, limo e argilla hanno soglie di temperatura elevate pertanto la tessitura non risente eccessivamente degli effetti degli incendi boschivi (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

La soglia più alta è quella della sabbia e del limo (1414°C) mentre l'argilla registra una soglia inferiore tra 400 e 800°C (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022), per questo motivo l'argilla subisce cambiamenti nella consistenza.

Sebbene ci sia una diminuzione delle particelle di argilla nei confronti di sabbia e limo, quasi tutti i ricercatori non hanno riscontrato cambiamenti nella tessitura del suolo (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Tuttavia la maggior presenza delle particelle di sabbia e limo dopo un incendio dipende dal collasso e dalla distruzione della struttura reticolare argillosa (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022). Il collasso della maglia reticolare argillosa comporta l'unione di particelle più fini per creare particelle di sabbia e limo di dimensioni maggiori.

Heydari et al. (2017) ha dimostrato tramite risultati che se il suolo presenta temperature elevate, si attua una eliminazione irreversibile di ioni idrossile (OH-) e il disfacimento della struttura cristallina dell'argilla; questo comporta una cementificazione e aggregazione delle particelle di argilla di grandezza della sabbia.

3.3.2 Densità apparente del suolo

Gli incendi boschivi influenzano negativamente la densità apparente del suolo (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022) con effetti anche sulla porosità del suolo. In letteratura sono presenti risultati discordanti riguardo la densità apparente del suolo. Vari studi hanno dimostrato che la densità apparente del suolo risulta essere inferiore a seguito di un incendio, mentre altri non hanno riportato modifiche significative sulla densità apparente (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

La densità apparente del suolo vede un aumento successivamente a un incendio perché avviene un collasso dell'aggregazione del suolo e della distruzione della materia organica presente nel suolo (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Heydari et al. (2017) riscontrando risultati simili ha definito che la densità apparente aumenta mediante la distruzione della struttura e dei pori insieme al declino della materia organica.

Verna et al. (2019) ha inoltre aggiunto che l'aumento della densità del suolo deriva dal riempimento di spazi e fori da parte della cenere e delle particelle di argilla disperse nel corso degli incendi boschivi.

La densità apparente del suolo risulta essere inversamente proporzionale alla porosità del suolo, verificandosi un aumento della densità apparente del suolo si ha una diminuzione della porosità, ne conseguono maggiori ramificazioni del corso dell'acqua attraverso il suolo (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Alcuni studiosi contrariamente hanno riportato valori minori della densità apparente in seguito ad eventi di incendi boschivi. Hanno scoperto che livelli di densità apparente minori erano derivati dall'aumento della materia organica in parte decomposta insieme all'espansione del vapore nel suolo.

Sono opportune ulteriori ricerche per comprendere a pieno gli effetti degli incendi boschivi sulla densità apparente del suolo.

3.3.3 Stabilità degli aggregati nel suolo

Le temperature del suolo tra i 30 e i 60°C agiscono in modo positivo sulla stabilità degli aggregati del suolo attraverso la trasformazione termica dei sesquiossidi che favoriscono il legame tra le particelle di argilla per costituire particelle di limo resistenti.

La materia organica contribuisce anch'essa avendo un'azione cementificante per le particelle del suolo.

Temperature del suolo comprese tra i 200 e i 460°C comportano la carbonizzazione o l'ossidazione completa della materia organica, ne consegue la distruzione della struttura del suolo tramite la disgiunzione e la rottura dei macropori del suolo (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Nella letteratura sono presenti differenze sugli effetti del fuoco che agiscono sulla stabilità degli aggregati del suolo.

La stabilità degli aggregati del suolo ha riportato un aumento, questo è attribuito allo sviluppo di un complesso organo-minerale risultante dall'unione della parte organica della materia con la componente minerale del suolo, con la creazione di uno strato idrofobico sugli aggregati (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Questo aumento della stabilità degli aggregati del suolo dimostra il ruolo importante della sostanza organica come agente cementificante.

Metaix-Solera et al. (2011) ha esaminato che la stabilità degli aggregati del suolo diminuisce in base all'intensità dell'ustione, dalla tipologia del suolo e dal tipo e dalla quantità della materia organica come agente cementante.

Quando gli aggregati presentano minore stabilità questa viene associata alla scomposizione o alla disfacimento della materia organica.

Per questo motivo sono necessarie maggiori ricerche sulla stabilità degli aggregati del suolo postuma all'avvenimento degli incendi, legata alla gravità dell'ustione, dal tipo di terreno e all'azione della tipologia di agente cementante.

3.3.4 Idrorepellenza del suolo

L'idrorepellenza del suolo è un importante caratteristica fisica del suolo e subisce l'influenza del fuoco (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022). L'idrorepellenza diminuisce la parte di acqua che

defluisce nel suolo e ne aumenta il deflusso, da questo ne deriva un maggior effetto erosivo del suolo (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

L'idrorepellenza del suolo può nascere, aumentare o diminuire ad opera degli incendi boschivi (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022). L'aumento dell'idrorepellenza si verifica per l'azione dello strato idrofobico situato sulle particelle minerali nel corso della combustione della materia organica (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Il mantello idrofobo si forma quando durante un incendio, i composti idrofobici si spostano verso il basso nel terreno e si condensano su particelle di temperatura più fredde.

Zavala et al. (2010) ha studiato che l'idrorepellenza di solito tende ad aumentare quando il suolo ha una temperatura vicina ai 200°C e viene invece eliminata con temperature oltre i 300°C. Viceversa una minore idrorepellenza del suolo sui suoli superficiali risulta da varie situazioni.

La struttura del suolo: nei terreni con tessitura fine l'idrorepellenza diminuisce in maggior misura a differenza dei suoli con tessitura grossolana (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

La materia organica insieme al contenuto di umidità: un livello basso di materia organica e un elevato contenuto di acqua nel terreno aumentano l'idrorepellenza del suolo dopo gli incendi (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

La profondità dei suoli: l'idrorepellenza maggiore la hanno i profili più profondi, essa deriva dalla condensazione del materiale organico idrofobo sulle particelle di origine minerale più fredde (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Le temperature superficiali: l'idrofobicità del suolo è totalmente eliminata quando le temperature superficiali del suolo sono elevate a causa della combustione (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

L'idrorepellenza del suolo è strettamente associata ai fenomeni di idrorepellenza e di erosione, l'idrorepellenza permette un aumento del movimento dell'acqua in superficie diminuendo l'infiltrazione.

3.4 PROPRIETA' BIOLOGICHE DEL SUOLO

Le proprietà biologiche del suolo (microrganismi, attività e comunità del biota, invertebrati del suolo) subiscono fluttuazioni a causa del riscaldamento dei suoli dovuto dagli incendi prescritti.

Il fuoco provoca l'uccisione o denaturazione diretta del biota del suolo mediante la combustione o attraverso azioni indirette che riguardano il recupero delle piante post-incendio o modifiche della sostanza organica nel suolo (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Alcaniz et al. (2018) ha osservato che una parte significativa della materia biologica viene uccisa da temperature del suolo che variano dai 50 ai 120°C. Santín e Doerr (2016) ha dimostrato che le temperature con un intervallo dai 50 ai 150°C comportano l'uccisione delle radici fini, dei batteri, dei funghi e dei semi all'interno del suolo.

La diminuzione del carbonio da biomassa microbica potrebbe dipendere dalla perdita di biomassa microbica per azione del fuoco, dalla minore disponibilità di nutrienti e dal rilascio di composti che ostacolano la crescita dei funghi (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Ciò nonostante, alcuni ricercatori hanno evidenziato un aumento della biomassa microbica nei suoli bruciati da incendi che potrebbe derivare dall'aggiunta di ceneri minerali e dall'eccesso del carbonio labile (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

I cambiamenti delle comunità microbiche possono dipendere dall'aumento del valore del pH e alla disponibilità dei cationi di base post incendio (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

Il fuoco oltre che agire modificando le comunità microbiche, influisce anche sulle attività enzimatiche nei terreni bruciati. Knelman et al. (2015), Fultz et al. (2016), and Moya et al. (2019) hanno costatato una diminuzione dell'attività della β -glucosidasi nei suoli forestali bruciati e hanno collegato il declino all'efficacia degli incendi e all'abbondanza dei nutrienti contenuti dalle ceneri.

Fernández-García et al. (2019a,b) and Moya et al. (2019) hanno osservato una diminuzione della fosfatasi acida in seguito agli incendi boschivi e questo potrebbe derivare da danni o da cali nell'attività dei microrganismi. Allo stesso modo la diminuzione della fosfatasi acida potrebbe essere causata da una maggiore disponibilità di fosforo presente maggiormente nel suolo successivamente a un incendio (Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022; Simon Abugre, 2021-2022; Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022; Richard Awuah, 2021-2022).

CONCLUSIONI

DECOMPOSITION AND TRANSFORMATIONS ALONG THE CONTINUUM FROM LITTER TO SOIL ORGANIC MATTER IN FOREST SOILS

La natura e la quantità della lettiera che vengono trasferite al suolo minerale scaturiscono dalle caratteristiche del sito che influenzano in modo diretto l'abbondanza di fauna bioturbante del suolo. Nei suoli con presenza di fauna bioturbante i rifiuti, una volta decomposti, vengono trasformati attraverso il passaggio dell'intestino in materiale fecale e successivamente sono uniti con terreno minerale portando alla formazione di un terriccio ricco di sostanze organiche.

La decomposizione delle radici è strettamente correlata alla composizione delle pareti cellulari. La presenza di lignine e tannini ad esempio comportano una lenta decomposizione nelle radici fini (ordini 1 e 2).

La scissione di questi materiali unita alle successive trasformazioni determina una perdita apparente di massa della lettiera originata da radici fini.

Allo stesso modo, le melanine componenti della parete cellulare dei funghi micorrizici, possono provocare la perdita apparente di massa di alcuni tessuti fungini micorrizici.

La decomposizione in base a diversi fattori come le condizioni del clima, le caratteristiche del suolo, il materiale di partenza e la vegetazione può intraprendere percorsi diversi. La conoscenza delle caratteristiche e delle condizioni del sito possono aiutare nella comprensione del fenomeno della decomposizione che è più probabile che avvenga e il riconoscimento delle riserve di carbonio dove è prevedibile il sequestro di carbonio stesso.

SOIL CARBON SEQUESTRATION BY ROOT EXUDATES

Gli essudati radicali sono dei composti all'interno del suolo che apportano carbonio organico. Essi sono riconosciuti come fonti labili del carbonio in quanto favoriscono l'azione della fauna microbica. Nel momento in cui sono aggiunti all'interno del suolo possono determinare un maggior consumo di carbonio organico ad opera dei microrganismi portando ad un rilascio consistente di anidrite carbonica in atmosfera. Questo fa sì che gli essudati radicali in un primo momento destabilizzino le riserve di carbonio presenti nel suolo.

I microrganismi possono anche stabilizzare il carbonio organico attraverso l'accumulo di residui di biomassa microbica.

La stabilizzazione del carbonio organico nel suolo e il suo reintegro da parte degli essudati radicali è legata a importanti fattori come le caratteristiche del suolo, la varietà di specie e i microrganismi. La stabilità del carbonio organico nel suolo varia inoltre anche di durata in funzione alla tipologia di radici che lo formano: se è originato da radici labili di alta qualità la stabilità del carbonio ha una durata superiore a dieci anni, se invece proviene dalla lettiera la durata massima che può raggiungere è di dieci anni.

La quantità degli essudati radicali dunque è una componente importante per definire la liberazione o il sequestro di carbonio organico nel suolo.

A REVIEW OF THE EFFECTS OF FOREST FIRE ON SOIL PROPERTIES

L'impatto degli incendi boschivi sulle proprietà del suolo è influenzato dalla gravità dell'ustione determinata dall'intensità e dalla durata dell'incendio. Gli incendi boschivi e gli incendi prescritti agiscono sulle proprietà biologiche, chimiche e fisiche del suolo.

Il fuoco provoca la combustione completa o parziale della materia organica e contribuisce alla deposizione di ceneri sulla superficie del suolo. La chimica del suolo viene alterata quando le ceneri e i materiali organici in parte bruciati si miscelano.

Esistono diverse tipologie di incendi che variano per la loro intensità e per gli effetti che comportano al suolo. Gli incendi a bassa intensità modificano la disponibilità dei nutrienti aumentandola e agiscono ulteriormente sul pH tramite il deposito di ceneri. Gli incendi invece ad alta intensità diminuiscono la presenza di materia organica nel suolo e dell'azoto totale a causa dei fenomeni di combustione e volatilizzazione.

In seguito al fenomeno degli incendi si vengono a creare suoli idrorepellenti o essi possono aumentare di numero. Questi suoli mediante l'idrorepellenza riducono l'infiltrazione di acqua e questo comporta un deflusso idrico maggiore sulla superficie del suolo che facilita il processo di erosione.

Gli incendi provocano effetti negativi anche al microbiota del suolo, il quale è altamente suscettibile ai cambiamenti ambientali. Quando si registrano temperature del suolo superiori a 120° viene definitivamente ucciso.

L'uso di incendi a bassa intensità, quelli a combustione prescritta, sono utilizzati per la gestione del carico di carburante nelle aree boschive affinché si riduca al massimo la possibilità che avvengano incendi boschivi.

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare il Prof. Casucci per avermi offerto il suo aiuto e avermi guidato durante il percorso della stesura della tesi.

Ringrazio i miei genitori e parenti per avermi supportato nei momenti belli e in quelli brutti. Sono stati per me fonte di forza e di determinazione durante questi tre anni.

Ringrazio il mio fidanzato con cui ho condiviso il percorso universitario. E' stato un compagno di studi fidato, ci siamo aiutati nelle difficoltà e abbiamo gioito dei nostri traguardi. Lo ringrazio per la sua infinita pazienza, per il tempo dedicatomi e per la sua costante presenza.

Un caloroso ringraziamento ai miei colleghi di corso per essermi stati accanto in questo periodo intenso. Li ringrazio per essersi resi sempre disponibili ad aiutarmi e per avermi regalato attimi di gioia e serenità.

Infine, dedico questa tesi a me stessa, ai miei sacrifici e alla mia tenacia che mi hanno permesso di arrivare fino a qui.

BIBLIOGRAFIA

- Alex Amerh Agbeshie, 2021-2022. Department of Environmental Management, University of Energy and Natural Resources (UENR), Sunyani, Ghana. A review of the effects of forest fire on soil properties. Springer 2022.
- Angst, G., Mueller, C.W., Prater, I., Angst, Š., Frouz, J., Jílková V., Peterse, F., Nierop, K. G.J., 2019. Earthworms act as biochemical reactors to convert labile plant compounds into stabilized soil microbial necromass. *Communications Biology* 2, 441.
- Catherine Preece, 2022. Plants and Ecosystems (PLECO), Biology Department, University of Antwerp, BE-2610 Wilrijk, Belgium. CREAM, Cerdanyola del Vallès 08193, Catalonia, Spain. Soil carbon sequestration by root exudates. *Trends in Plant Science*, Month 2022.
- Cindy E. Prescott.,2021. Department of Forest and Conservation Sciences, Faculty of Forestry, The University of British Columbia, 2424 Main Mall, Vancouver, BC V6T1Z4, Canada. Decomposition and transformations along the continuum from litter to soil organic matter in forest soils. <https://www.elsevier.com/locate/foreco>.
- De Nobili, M., Maggioni, A., 1993. Influenza della sostanza organica sulle proprietà fisiche del suolo. In: *Ciclo della sostanza organica del suolo*, AA.VV. a cura di Paolo Nannipieri. Pàtron Editore, Bologna.
- Desie, E., Van Meerbeek, K., De Wandeler, H., Bruehlheide, H., Domisch, T., Jaroszewicz, B., Joly, F., Vancampenhout, K., Vesterdal, L., Muys, B., Briones, M., 2020. Positive feedback loop between earthworms, humus form and soil pH reinforces earthworm abundance in European forests. *Funct. Ecol.* 34, 2598–2610.
- Doran, J.W., Zeiss, M.R., 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*. Vol.15, pp. 3–11.
- Fiorentino, G., 2005. Caratterizzazione molecolare delle sostanze umiche da suolo vulcanico. UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II. Dottorato di Ricerca in Valorizzazione e Gestione delle Risorse Agro-forestali (Indirizzo: Bonifica e Difesa del Suolo).
- Frouz, J., 2018. Effects of soil macro- and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization. *Geoderma* 332, 161–172.

- Hayes, M.H.B., Swift, R.S., 1978. —• The chemistry of soil organic colloids• in: The chemistry of soil constituents. Greenland & Hayes ed., pp. 179-320.
- Jitender Giri, 2022. National Institute of Plant Genome Research, Aruna Asaf Ali Marg, New Delhi 110067, India. Soil carbon sequestration by root exudates,l. Trends in Plant Science, Month 2022.
- Josep Peñuelas, 2022. CREAM, Cerdanyola del Vallès 08193, Catalonia, Spain. CSIC, Global Ecology Unit CREAM-CSIC-UAB, Bellaterra 08193, Catalonia, Spain. Soil carbon sequestration by root exudates. . Trends in Plant Science, Month 2022.
- Lars Vesterdal, 2021. Københavns Universitet, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning Rolighedsvej 23, 1958 Frederiksberg C, Denmark. Decomposition and transformations along the continuum from litter to soil organic matter in forest soils. <https://www.elsevier.com/locate/foreco>.
- Lubbers, I., van Groenigen, K., Fonte, S., Six, J., Brassard, L., van Groenigen, J.W., 2013. Greenhouse-gas emissions from soils increased by earthworms. Nat. Clim. Change 3, 187–194.
- Mueller, K.E., Hobbie, S.E., Chorover, J., Reich, P.B., Eisenhauer, N., Castellano, M.J., Chadwick, O.A., Dobies, T., Hale, C.M., Jagodzinski, A.M., Kalucka, I., Kieliszewska Rokicka, B., Modrzynski, J., Rozen, A., Skorupski, M., Sobczyk, L., Stasinska, M., Trocha, L.K., Weiner, J., Wierzbicka, A., Oleksyn, J., 2015. Effects of litter traits, soil biota, and soil chemistry on soil carbon stocks at a common garden with 14 tree species. Biogeochemistry 123, 313–327.
- Nortcliff, S., 2002. Standardisation of soil quality attributes. Agriculture Ecosystem and Environment. Vol. 88, pp. 161-168.
- Piccolo, A., 1996. —"Humus and soil conservation" in: Humic substances in terrestrial ecosystems. Piccolo A. ed., Amsterdam, pp. 225-264.
- Poonam Panchal, 2022. National Institute of Plant Genome Research, Aruna Asaf Ali Marg, New Delhi 110067, India. Soil carbon sequestration by root exudates. Trends in Plant Science, Month 2022.
- Richard Awuah, 2021-2022. Department of Environmental Management, University of Energy and Natural Resources (UENR), Sunyani, Ghana. A review of the effects of forest fire on soil properties. Springer 2022.
- Schelfhout, S., Mertens, J., Verheyen, K., Vesterdal, L., Baeten, L., Muys, B., De Schrijver, A., 2017. Tree species identity shapes earthworm communities. Forests 8, 85.
- Sequi, P., 1991. Le funzioni agronomiche della sostanza organica. In Chimica del suolo (P. Sequi Ed.), pp. 279-292. Pàtron Bologna.

Simon Abugre, 2021-2022. Department of Forest Science, University of Energy and Natural Resources (UENR), Sunyani, Ghana. A review of the effects of forest fire on soil properties. Springer 2022.

Stevenson, F.J., 1994. Humus chemistry. Genesis, composition, reactions. 2nd Ed. John Wiley and Sons, New York, NY.

Thomas Atta• Darkwa, 2021-2022. Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Energy and Natural Resources (UENR), Sunyani, Ghana. A review of the effects of forest fire on soil properties. Springer 2022.

Turrión, M.B., Lafuente, F., Mulas, R., López, O., Ruipérez, C., Pando, V., 2010. Effects on soil organic matter mineralization and microbiological properties of applying compost to burned and unburned soils. *Journal of Environmental Management* xxx, 1–5.