UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA

Corso di Laurea in
SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE
Dipartimento di Agricoltura, Alimentazione e Ambiente (Di3A)

Candidato: Carmelo Tilaro

BIOCHAR: UNA RISORSA ALTERNATIVA PER L'AGRICOLTURA E L'AMBIENTE

ELABORATO FINALE

Relatore: Chiar.mo Prof. Andrea Baglieri

Anno 2020-2021

Introduzione....3
1.1 Biochar: cos'è? 5
1.1.1 Pirolisi....6
1.1.2 Temperatura di pirolisi 10
1.2 Biomassa per produrre biochar....11
1.3 Caratteristiche Fisico-Chimiche 12
1.4 Aspetti di natura biologica....17
1.5 Industria del biochar 18
1.6 Aspetti agronomici e ambientali....19
1.7 Potere correttivo del biochar....25
1.8 Effetto dell'applicazione del biochar sulle piante 25
1.9 Legislazione italiana 27
1.10 Normativa Europea....28
1.11 Utilizzo del biochar in contesti non agricoli....29
1.11.1 Capacità di biochar di assorbire e trattenere gli inquinanti pericolosi 32
1.11.2 Biochar come materiale per una Barriera Reattiva Permeabile....34
1.12 Gli ostacoli economici relativi al biochar....37
1.13 Analisi Costi-Benefici 37
Conclusioni:....39
Bibliografia:....41

Introduzione

Il riscaldamento del sistema climatico terrestre è inequivocabile, come è ormai evidente dalle osservazioni dell'aumento delle temperature medie globali dell'aria e degli oceani, dallo scioglimento diffuso di neve e ghiacciai, e dall'innalzamento del livello del mare globale. Tutto molto probabilmente, è dovuto all'aumento delle concentrazioni di gas ad effetto serra (GHG, ovvero *Greenhouse Gases*) di origine antropica. L'aumento del contenuto di CO_2 in atmosfera è dovuto soprattutto all'utilizzo di combustibili fossili come il petrolio, ma anche da vari tipi di pratiche forestali ed agricole come la deforestazione, che porta all'ossidazione dell'humus del suolo forestale, l'agricoltura "taglia e brucia", praticata nelle zone tropicali, il prosciugamento di zone umide, che accelera la decomposizione della sostanza organica, e l'utilizzo di torba per scopi agricoli, ma questi sono solamente alcuni dei possibili esempi. Inoltre anche gli incrementi di CH_4 ed N_2O sono legati anche all'agricoltura (IPCC, 2007). Utilizzare fonti di

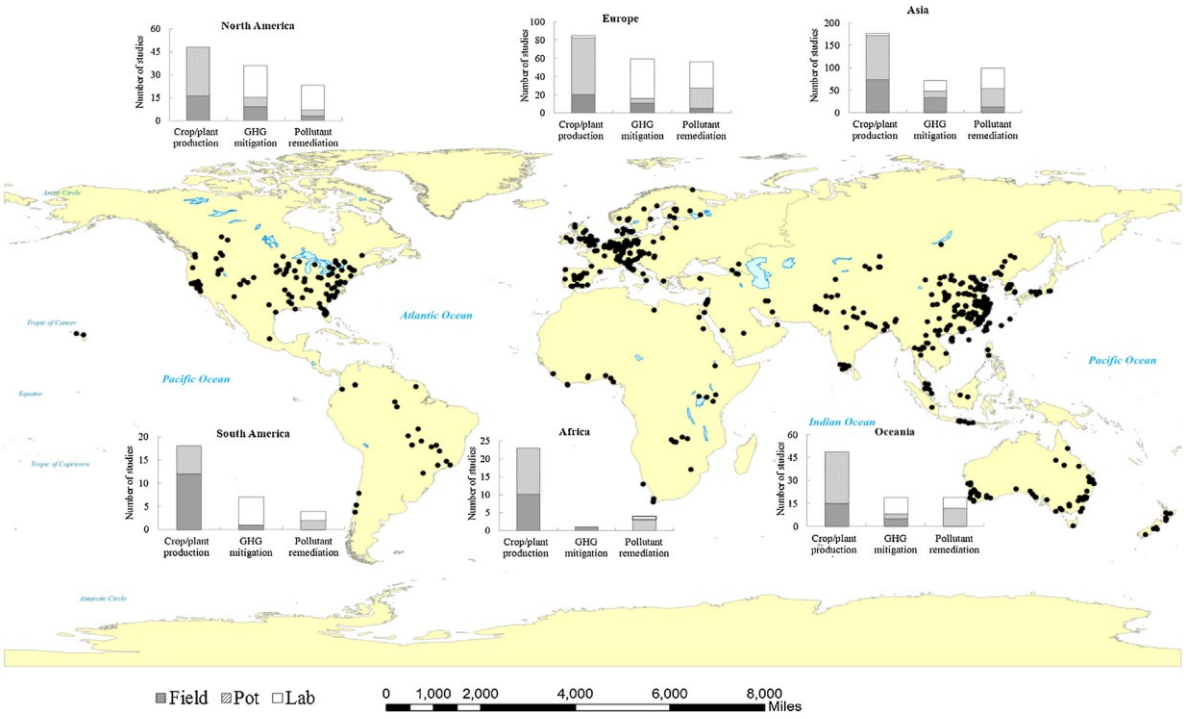


Fig. 1. Distribuzione globale degli studi sull'ammendamento dei suoli tramite il biochar, in termini di studi di laboratorio, in serra e in campo nei diversi continenti (El-Naggara et al., 2019).

energia rinnovabili e non inquinanti, non è però ipotizzabile per garantire la diminuzione delle emissioni, ma è necessario anche sequestrare il carbonio (C) già presente in atmosfera ed immobilizzarlo in "pozzi", quali per esempio le foreste, affinché esso rimanga fissato per tantissimi anni prima di ritornare in circolo nell'atmosfera. La presente tesi tratta del biochar o carbone vegetale prendendo in esame i vari studi e le ricerche che sono state prodotte in questi decenni, come si evince in figura 1. Un numero crescente di scienziati sostengono che l'uso del

biochar nei sistemi di coltivazione potrebbe contribuire alla risoluzione di due problemi globali ad alta priorità tra i quali garantire la produzione agroalimentare per la crescita della popolazione entro il 2050 modificando in modo sostenibile i suoli e riuscire anche a ridurre le emissioni di CO_2 intrappolando il carbonio nel suolo per parecchi anni senza che sia più necessario utilizzare concimi da incorporare. Per limitare le emissioni di CO_2 ed aumentare la capacità di trattenere il carbonio nel suolo, ma anche per migliorarne le caratteristiche fisiche, devono essere incentivate pratiche agricole meno impattanti, quali le arature superficiali, la semina su terreno sodo o non lavorato o le colture permanenti (Cerri et al., 2004).

1.1 Biochar: cos'è?

Il biochar è un carbone vegetale che si ottiene dalla pirolisi di diversi tipi di biomassa vegetale. Di particolare interesse risulta la sua produzione a partire da residui/sottoprodotti agricoli: potature, stoppie di mais o grano, lolla di riso, mallo di mandorla, fogliame secco, etc. La pirolisi permette di ottenere: un gas particolare (syngas) con un potere calorifico pari al GPL che può essere utilizzato in processi produttivi che necessitino di calore (es: l'essiccazione o la produzione di energia elettrica), e poi il biochar o carbone vegetale. Il biochar rappresenta il sottoprodotto della pirolisi con il 90% di contenuto di carbonio che, se applicato ai suoli, è un potente ammendante. La sua alta porosità aumenta la ritenzione idrica del suolo e incrementa gli elementi nutritivi che rimangono più a lungo disponibili per le piante, migliora inoltre la struttura del terreno e le sue proprietà meccaniche (Chan et al., 2007). Molti studi hanno già dimostrato l'impatto positivo dell'applicazione del biochar sulle rese agricole diminuendo il fabbisogno di acqua e fertilizzanti (Nishio, 1996; Hoshi, 2001; Lehmann et al., 2003; Yamato et al., 2006; Chan et al., 2007; Rondon et al., 2007, Baronti et al 2010; Vaccari et al. 2011). Sebbene ulteriori ricerche siano ancora necessarie, i risultati fino ad ora ottenuti sono positivi tant'è che il biochar è stato inserito nell'agenda dei prossimi negoziati internazionali sui cambiamenti climatici come la più promettente strategia di mitigazione del cambiamento climatico (Bellieni et al, 2017). Data la promettente possibilità di mitigare i cambiamenti climatici, in futuro potrebbe nascere un mercato economico intorno a questo prodotto con la vendita e l'acquisto di varie tipologie di biochar a seconda dei diversi utilizzi. Il particolare trattamento termico biologico della biomassa utilizzata per produrre biochar contribuisce alla sua capacità di persistere in suoli con un degrado biologico molto ridotto (Lehmann e Rondon 2006). I terreni di tutto il mondo contengono biochar depositato attraverso eventi naturali, come foresta e incendi di prati (Krull et al. 2008, Skjemstad et al. 2002). In effetti, le aree ad alto contenuto di biochar presenti in natura, come la prateria nordamericana (a ovest del Fiume Mississippi e ad est delle Montagne Rocciose), sono alcuni dei terreni più fertili del mondo. L'uso storico del biochar risale ad almeno 2000 anni fa (O'Neill et al. 2009). Nel bacino amazzonico, prova di un ampio uso di biochar può essere ritrovato nei terreni straordinariamente fertili conosciuti come Terra Preta e Terra Mulata, che sono stati creati da antiche culture indigene (O'Neill et al. 2009). A causa delle grandi quantità di biochar incorporato nei terreni, quest'area rimane ancora oggi molto fertile nonostante secoli di lisciviazione causati da forti piogge tropicali. Mentre i materiali organici decadono, i gas serra, come l'anidride carbonica e il metano (che è 21 volte più potente come gas serra rispetto alla

CO_2) vengono rilasciati nell'atmosfera. Bruciando il materiale organico, gran parte del carbonio diventa "fisso" in un'altra forma più stabile e quando viene applicato il biochar al suolo, il carbonio viene efficacemente sequestrato impedendo che ritorni in atmosfera (Liang et al. 2008). Si stima che l'uso di questo metodo per "legare" il carbonio ha del potenziale per ridurre le attuali emissioni di CO_2 globale fino al 10% (Woolf et al. 2010). Negli ultimi anni c'è stato un crescente interessamento per il potenziale che il biochar ha di perfezionare il sequestro di C e per il miglioramento della fertilità del suolo (Spokas et al., 2012), il ripristino di terre degradate (Beesley et al., 2011) e la riduzione delle emissioni di gas serra in agricoltura (Harter et al., 2014; Troy et al., 2013; Cayuela et al., 2014). Il biochar per essere incorporato nel terreno, distribuendo uniformemente la quantità desiderata sul terreno, poi lo si lavora a macchina o a mano, secondo le necessità e situazioni. In alcuni casi, come frutteti e altre colture perenni, può essere applicato alla superficie del suolo e, preferibilmente, ricoperto con altri materiali organici o applicati come miscela di compost o pacciamatura oppure applicato come impasto liquido se finemente macinato (su larga scala, questo potrebbe essere realizzato tramite una trinciatrice di tipo idraulica). Il biochar può avere benefici sinergici riuscendo ad aumentare l'attività microbica e ridurre le perdite di nutrienti (Dias et al. 2010). Durante il processo di trasformazione, diventa ricco di sostanze nutritive, ricoperto da microrganismi e con un pH bilanciato. Indipendentemente dal metodo di applicazione, è importante essere cauti quando lo si maneggia secco, in quanto molto polveroso e non deve mai essere distribuito in condizioni ventose. Questo può essere facilmente risolto bagnandolo leggermente prima dell'applicazione. Le caratteristiche del biochar, dipendono esclusivamente dal materiale di origine e dal processo di produzione. Un fatto importante è che il biochar può essere prodotto utilizzando un'ampia gamma di materiali organici tra i quali la biomassa agricola, i sedimenti di acque reflue, rifiuti forestali e residui della lavorazione agroalimentare (Malińska, 2012). Il biochar è spesso utilizzato per migliorare la qualità dei suoli (Lehmann et al. 2011) grazie alle sue ampie proprietà; per questo motivo sempre più attenzione è rivolta all'utilizzo del biochar sia in agricoltura che nella tutela ambientale.

1.1.1 Pirolisi

La parola deriva dal termine greco "Pirò" che significa fuoco e "lisi" che significa decomposizione o rottura in parti costituenti. Il biochar si ottiene dalla decomposizione di biomassa esposta a temperature comprese tra i 200 e i 900°C in atmosfera inerte con concentrazione di ossigeno bassa o assente. Questo processo, noto come pirolisi (Sohi, 2012), è spesso suddiviso in 3 tipologie: veloce, intermedio e lento a seconda del tempo di permanenza

(tempo necessario per completarlo) e della temperatura di esposizione della biomassa. (Lehman e Joseph, 2009). Il primo è caratterizzato da un tempo di permanenza breve e alte temperature (meno di 2 secondi, con temperature > 800 °C) ed è spesso utilizzato per produrre bio-olio da biomasse ottenendo una resa biochar di circa il 75% (Mohan et al., 2006). I processi di pirolisi lenta e intermedia avvengono con un tempo di permanenza da pochi minuti a diverse ore o addirittura giorni a temperature comprese tra 300 e 800 °C, con rese comprese tra 25-35% (Brown, 2009). Diversi studi hanno dimostrato che sia la temperatura di pirolisi che il materiale utilizzato hanno un effetto sulle caratteristiche di produzione del biochar per uso agricolo (Sohi, 2012). Gaskin et al. (2008) hanno affermato che il biochar prodotto da scarti di origine animale (esempio: lettiera di pollame) ha un contenuto minore di carbonio (intorno al 40%), mentre quello ottenuto da sottoprodotti vegetali (come i trucioli di pino) è vicino al 78%. Questi autori hanno anche riferito che il biochar prodotto da trucioli di pino ad una temperatura di 500°C nel processo di pirolisi ha originato un contenuto più elevato di nutrienti (P, K, Ca, Mg), rispetto ad una temperatura di 400°C. Infine, le qualità fisiche e chimiche del biochar sono anche condizionate da fattori come la dimensione e la densità della particelle pirolizzate, la concentrazione di composti inorganici (contenuto di ceneri, Ca, Mg) e organici (cellulosa, lignina ed emicellulosa) e il tipo di scarti agricoli utilizzati nel processo industriale di produzione (Lehmann e Joseph, 2009; Keiluweit et al., 2010). Il biochar ottenuto da foraggi, piante legnose o cactus mostra diverse caratteristiche fisiche e chimiche probabilmente legate al metabolismo di fissazione del carbonio di queste piante (Ahmad et al., 2014). Ad esempio, quello ottenuto dalle cosiddette piante CAM (ananas) ha mostrato un contenuto più elevato di nutrienti come N, P, K, Ca, Mg, Na, Zn, Cu, Fe e Al (Ch'ng et al., 2015).

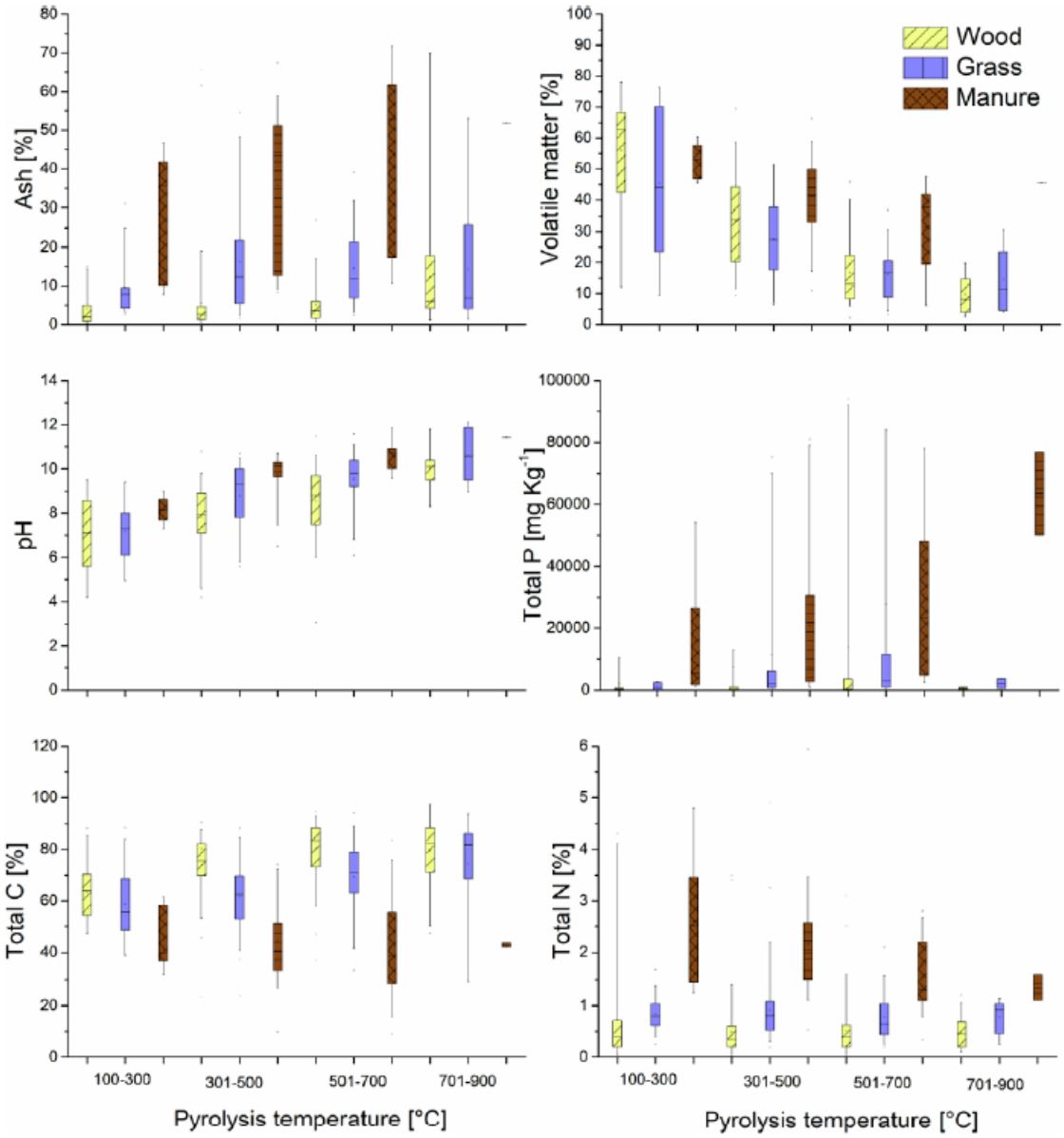


Fig. 2 Effetti della temperatura della pirolisi sulle proprietà finali del biochar.
(El-Naggare et al., 2019)

Solitamente questo processo viene utilizzato per la conversione termochimica di biomasse non adatte alla conversione biochimica come ad esempio materiali legnosi (Demirbas e Balat, 2007). Le caratteristiche del prodotto finale che si ottiene dipendono dalle condizioni operative con le quali viene condotta la pirolisi, tra cui temperatura, tempo di esposizione del materiale a tale trattamento e tipologia di materiale utilizzato per il processo (fig. 2). Tempi lunghi di esposizione a temperature controllate favoriscono la produzione di biochar, mentre un'esposizione limitata a temperature medio-alte massimizza la produzione delle frazioni liquide (Tabella 1).

Tabella 1. Contenuto percentuale dei prodotti di pirolisi a seconda del tipo di processo (Verheijen 2009).

Tipo	Condizioni	Frazione liquida	Biochar	Syngas
Pirolisi rapida	Temperatura moderata, ~500°C, breve tempo di permanenza del vapore caldo di ~ 1 secondo	75%	12%	13%
Pirolisi istantanea	Temperatura moderata, ~500°C, breve tempo di permanenza del vapore caldo di ~ 10–20 secondi	50%	20%	30%
Pirolisi lenta (carbonizzazione)	Bassa temperatura, ~400°C, tempo di permanenza molto lungo di sostanze solide	30%	35%	35%
Gassificazione	Alta temperatura ~800°C, tempo di permanenza lungo del vapore	5%	10%	85%

1.1.2 Temperatura di pirolisi

Due importanti parametri influenzati dalla temperatura sono la resa ed il contenuto di elementi nel biochar. Con l'aumentare della durata della pirolisi, si ha una riduzione della resa di prodotto (Lehmann, 2007; Zhao et al, 2013) dove il materiale di partenza perde materia organica in forma di idrogeno, ossigeno e azoto, ma con un aumento percentuale di sostanze inorganiche minerali in esso contenute (Al-Wabel et al., 2013; Bedussi 2015). Il contenuto di ceneri ed il pH aumentano con l'aumentare della temperatura nel processo (Lehmann, 2007; Al-Wabel et al., 2013; Zhao et al., 2013). Diversi studi (Antal e Grønli, 2003; Lehmann e Joseph, 2009) hanno rivelato che si ha un consistente aumento di carbonio nel biochar con il crescere della temperatura, questo è valido soprattutto per biochar derivanti dal legno. Biochar prodotti da materie prime di origine animale come il letame, hanno mostrato la tendenza totalmente opposta (Gaskin et al., 2008), forse a causa del loro elevato contenuto di ceneri. Secondo Gaskin et al. (2008), la concentrazione di carbonio nel biochar diminuisce con l'aumentare del contenuto di minerali nelle materie prime di origine. Sopra i 500°C il biochar è composto principalmente da forme altamente recalcitranti di materia organica, cioè carboni poli-aromatici condensati che risultano più stabili e resistenti alla degradazione microbica molto più a lungo di quelli prodotti alla più bassa temperatura di 300°C (Uchimiya et al., 2011). Molti ricercatori sottolineano inoltre la forte influenza che la temperatura del processo ha sulla struttura fisica del biochar come: la superficie totale e la distribuzione della dimensione dei pori (Li et al., 2008; Lehmann e Joseph, 2009; Uchimiya et al., 2010). Come precedentemente detto, la temperatura del processo influenza la quantità di composti organici volatili rilasciati dalla materia prima di partenza (Daud et al., 2001) con conseguente sviluppo di porosità; all'aumentare della temperatura più composti organici volatili sono rilasciati e più pori si andranno a formare. Si può quindi affermare che oltre alla temperatura del processo, l'area superficiale del biochar dipende da fattori come, la materia prima di partenza ed il suo contenuto di ceneri (Bedussi, 2015). Alcune proprietà come la resa di produzione del biochar ed il pH sono in prevalenza controllate dalla temperatura di produzione, mentre il contenuto di carbonio, la conducibilità elettrica, le concentrazioni di minerali e il contenuto in ceneri sono soprattutto influenzate dal materiale di partenza (Bedussi, 2015). Con una giusta combinazione di materie prime e di temperatura del processo si è in grado di produrre biochar con caratteristiche ideali per diverse applicazioni agronomiche. Ad esempio, un biochar ad elevata porosità può essere utilizzato come assorbente, quello ricco di sostanze nutritive e minerali o con alta capacita di

trattenimento dell'acqua, può essere utilizzato come ammendante per migliorare la qualità del suolo (Bedussi, 2015).

1.2 Biomassa per produrre Biochar

La biomassa di partenza ha un ruolo molto importante nel determinare le proprietà e caratteristiche finali del biochar che si vuole ottenere. Sia la composizione chimica che la struttura fisica dei materiali iniziali si riflettono molto sul prodotto finale (Zhao et al., 2013). Il biochar può essere ricavato dalla biomassa organica di diversa natura.

BIOMASSA	pH	C	N	P	K	C/N	Condizioni di produzione
			g kg^{-1}				
Legno	nd	708	10.9	6.8	0.9	65	empirico
Scarti verdi	6.2	680	1.7	0.2	1	400	450° C
Pollina	9.9	380	20	25.2	22.1	19	450° C
Fanghi di depurazione	nd	470	64	56		7	450° C
Lettiera di pollame	nd	258	7.5	48	30	34	700° C e flusso di vapore
Corteccia (*A. mangium*)	7.4	398	10.4	nd	nd	38	260°-360° C
Paglia di riso	nd	490	13.2	nd	nd	37	500° C
Scarti della canna da zucchero	nd	710	17.7	nd	nd	40	500° C
Gusci di noci di cocco	nd	690	9.4	nd	nd	73	500° C
Residui di Eucalipto	8.4	340	12	7.0	7.0	28	metodo "Moki"
Sansa di soia	nd	590	78.2	nd	nd	7.5	550° C
Eucaliptus deglupa	7.0	824	5.73	nd	nd	144	350° C
Legno di potatura fruttiferi	9.8	778	9.1	23.3	14.0	85.5	550 ° C

Tabella 2 Composizione elementare di alcune tipologie di biochar in funzione della biomassa e delle condizioni di il pirolizzazione. (Giovambattista Sorrenti, 2016)

Come si evince dalla Tabella 2, al momento la materia prima utilizzata, su scala commerciale o in strutture di ricerca include cippato e pellet (de Jong et al., 2003), fanghi di depurazione (Shinogi et al., 2003), residui di colture quali paglia, gusci di noce e lolla di riso (Shinogi e Kanri, 2003), scarti della lavorazione dell'oliva (Yaman, 2004), bagassa (residuo della macinazione e spremitura della canna da zucchero, usato come combustibile e nella preparazione di fibre cellulosiche) da parte dell'industria della canna da zucchero, (Erlich et al., 2006) e corteccia degli alberi (Mohan et al., 2011). Materiali di natura diversa hanno una composizione e quantità diversa di cellulosa, emicellulosa, lignina e minerali (Mohan et al., 2006). Queste differenze si riflettono in un comportamento diverso durante la pirolisi (Basu,

2010). Durante il trattamento termico, i componenti organici sono gradualmente degradati; il primo che subisce una degradazione è l'emicellulosa, ad una temperatura di 200-260°C, seguita dalla cellulosa, ad una temperatura di 240-350°C e per ultima la lignina, a 280-500°C. La percentuale di questi componenti nella biomassa di partenza ed il loro differente comportamento termico influenza il grado di reattività e determina i rapporti di carbonio volatile (bio-petrolio e gas), e carbonio stabile (char) nei prodotti della pirolisi (Basu, 2010). Infatti, per ottenere una maggiore resa in termini di prodotto solido si utilizza come materia prima quella con un alto contenuto di lignina come i residui forestali ed i gusci di noce (Demirbas, 2004). Nel prodotto solido della pirolisi viene mantenuta anche la struttura vascolare originale della pianta (Bedussi 2015). Ad esempio il legno è un materiale costituito da fibre, con pareti che hanno canali di trasporto di gas ed acqua (Keech et al., 2005), la dimensione di questi canali determina la dimensione dei pori nel biochar (Warnock et al., 2007). Per questo motivo, i biochar derivati da biomasse legnose hanno spesso superficie superiore rispetto a quelli originati da biomasse erbacee (Kloss et al., 2012). Inoltre specie di piante aventi molte celle di grande diametro nei loro tessuti staminali possono portare ad un biochar con grandi quantità di macropori (Lehmann e Joseph, 2009). La struttura fisica del biochar, la distribuzione e la dimensione dei pori, è legata alla sua capacita di trattenere l'acqua, nutrienti ed inquinanti dall'ambiente circostante; questa proprietà, a sua volta, influenza l'effetto una volta applicato al suolo. Per massimizzare i benefici del biochar, è fondamentale conoscerne le variazioni chimico-fisiche originate dal materiale utilizzato.

1.3 Caratteristiche Fisico-Chimiche

Le proprietà fisiche del biochar sono fondamentali nella determinazione delle sue possibilità e modalità di utilizzo nel settore agricolo e nel campo ambientale. Sono appunto le diverse proprietà fisiche a caratterizzare direttamente o indirettamente il biochar per le modifiche che il suo apporto può indurre nel suolo. Le proprietà dei suoli dipendono dalla composizione dei componenti minerali e organici, ed in particolare dai loro rapporti e dalle aggregazioni e relative interazioni. Come già detto in precedenza, l'apporto di biochar al suolo, può influenzare in modo essenziale le proprietà fisiche del suolo tra cui la tessitura, la struttura, la porosità e la consistenza (grandezza e distribuzione dei pori, densità e loro impaccamento). Lo sviluppo delle radici delle piante essendo collegate alla struttura fisica degli orizzonti del suolo, potrebbe essere condizionato nella crescita e nella produttività in terreni addizionati con biochar. Caratteristiche pedologiche che potrebbero essere influenzate dal suo apporto sono:

- L’affinità del suolo con l’acqua
- La sua aggregazione
- La maggiore lavorabilità durante la preparazione del suolo
- Il rigonfiamento e la permeabilità
- La capacità di ritenzione dei cationi
- La risposta del suolo alle variazioni di temperatura

Sono anche da considerare gli aspetti di natura biologica connessi alla fertilità del suolo, conseguenti alla modifica delle proprietà fisiche, quali lo sviluppo di siti attivi disponibili per le reazioni chimiche e di habitat vitali per i microbi del suolo. La materia organica di provenienza e la tecnologia produttiva sono determinanti per la definizione delle proprietà fisiche e delle caratteristiche strutturali del biochar. Matrici con diversa composizione chimica reagiranno in modo diversificato ai processi termici, modificando la loro struttura fisica con diverso grado di intensità. Pertanto, la diversa proporzione tra questi componenti, influenzerà il grado di reattività e di conseguenza il grado con cui la struttura fisica verrà modificata durante i processi termici. Inoltre, è da considerare anche la presenza di una frazione di componenti inorganici che avrà effetti sulla struttura finale del biochar. Alcune condizioni di processo possono originare fusione delle ceneri, che rappresentano il peggior cambiamento nella composizione fisica e strutturale del biochar. I principali parametri di processo da tenere in considerazione durante la pirolisi, per il loro stretto legame con le proprietà finali del biochar sono: la velocità di riscaldamento, la più alta temperatura di trattamento (HTT o high treatment temperature), la pressione, il tempo di residenza delle reazioni, il recipiente di reazione (dimensioni, regime di miscelazione, reazione di catalisi, ecc.), i pre-trattamenti (essiccamento, amminutamento, etc.), la portata delle componenti accessorie (azoto, CO_2, aria, vapore) e i post trattamenti (frantumazione, setacciatura, attivazione, etc). L'aggiunta di biochar a bassa densità al suolo può determinare un duplice effetto positivo. Principalmente, esso riduce la densità di massa, permettendo alle radici delle piante di penetrare maggiormente il terreno e crescere più facilmente. Inoltre, riducendo la densità, permette una maggiore ritenzione dell'umidità. Il fattore più significativo è la superficie molto elevata per unità di massa. Questa elevata area superficiale fornisce un habitat ideale per i microbi e i funghi del suolo e rappresenta un sito di deposito ricco di sostanze nutrienti del suolo. E’ stato dimostrato che ogni particella di biochar è composta sostanzialmente da due frazioni strutturali: fogli di grafene impilati e strutture aromatiche informi ordinate in modo casuale. Gli altri elementi H, O, N, P e S si trovano incorporati all'interno degli anelli aromatici come eteroatomi ovvero qualunque atomo diverso

dal carbonio presente in una struttura organica contenenti legami C-C. Il termine si riferisce ai composti ciclici ed in particolare in quelli aromatici. Si ritiene che la presenza di eteroatomi ha un ruolo molto importante nello sviluppo della chimica di superficie del biochar. La distribuzione granulometrica delle particelle nel biochar è influenzata soprattutto dalla natura delle materie prime della biomassa utilizzate e dalle condizioni dei processi di pirolisi. Le trasformazioni strutturali che si verificano nella sostanza organica, determinano la formazione di un insieme di particelle di dimensioni diversificate in relazione alle caratteristiche dei processi produttivi (Fig.3).

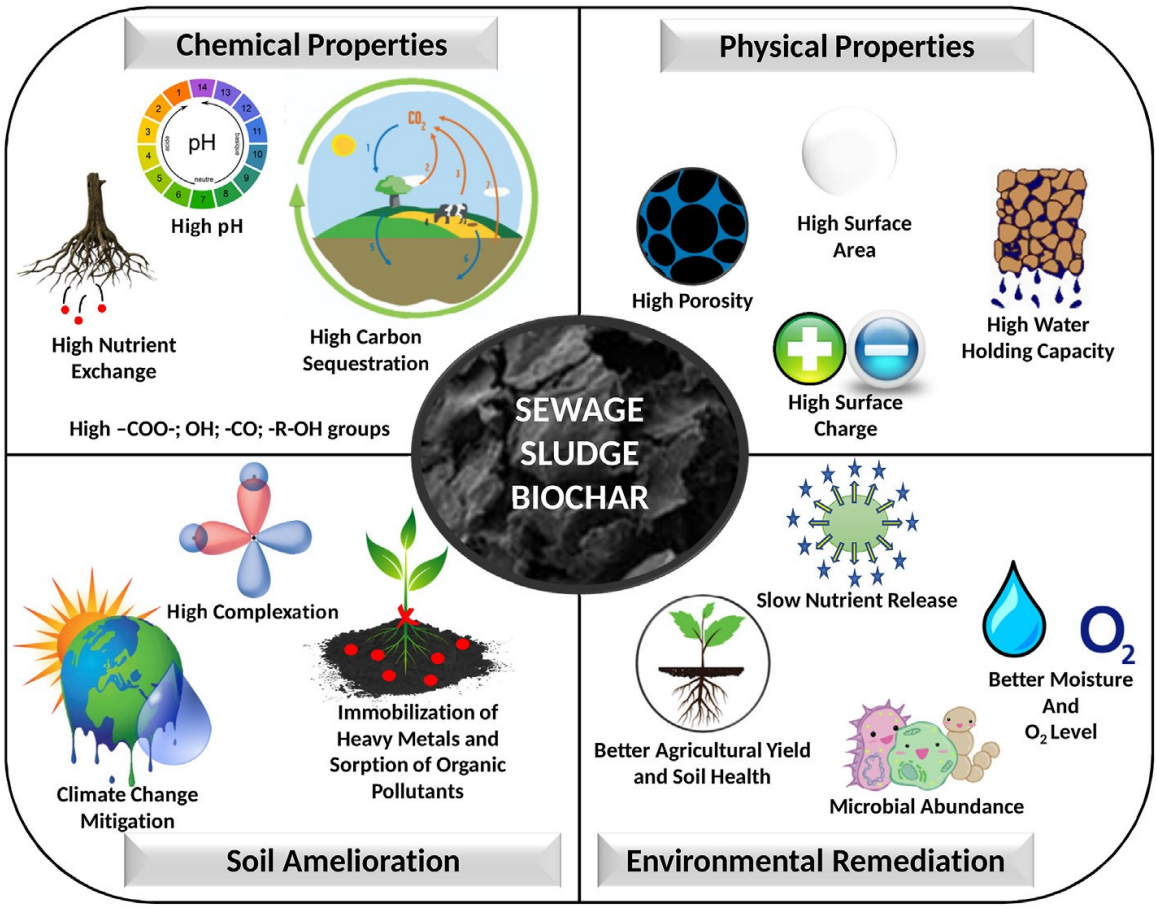


Fig. 3 Proprietà fisiche e chimiche, uso e applicazioni del biochar. (Singh S., at al. 2020).

La distribuzione granulometrica delle particelle nel biochar ha anche effetti decisivi per la definizione dell'idoneità di ogni prodotto biochar per una specifica e ben definita applicazione, così come per la scelta del metodo di applicazione più adeguato. Inoltre, bisogna considerare i problemi di salute e sicurezza relativi alla movimentazione, allo stoccaggio e al trasporto di biochar, anche in gran parte determinati dalla sua distribuzione granulometrica e in particolare, per quanto riguarda la sua frazione di polvere. Il biochar presenta al suo interno una grande variabilità in termini di composizione chimica, essendo derivato da una diversificata varietà di

biomasse. Questa ampia eterogeneità di composti presenti è anche determinata dai diversi processi termochimici che sono alla base del processo di produzione del biochar. Per cui, ogni biochar che si ottiene da una determinata biomassa, con specifici processi, avrà una propria miscela di fasi e di microambienti, che daranno luogo ad un peculiare insieme differenti di proprietà chimiche. In senso lato, si potrebbe assimilare la complessità chimica del biochar a quella dei suoli in formazione. Un'altra caratteristica particolare del biochar è il suo pH, infatti pur avendo il biochar una composizione strutturale e chimica altamente eterogenea, il suo pH, è in genere > 7, con valori di pH abbastanza omogenei. I valori di pH del biochar, provenienti da un'ampia varietà di materie prime hanno una media di pH 8, in un intervallo totale di pH tra 6,2 e 9,6. I valori più bassi caratterizzano spesso biochar prodotto da biomasse di rifiuti verdi, mentre quelli superiori da materie prime come quelli di lettiere avicole. Relativamente alla tecnologia di trattamento, i prodotti da processi di gassificazione sono caratterizzati da valori di pH decisamente alcalini, nei biochar da pirolisi veloce i valori sono più vicini alla neutralità, mentre con la pirolisi lenta si hanno valori con un intervallo molto ampio da acido ad alcalino (pH 4-10). Quindi mentre la maggior parte dei biochar hanno un pH basico (da 8 a 9,5), alcuni biochar hanno un pH più basso, a seconda del contenuto minerale del materiale originario. Tenendo conto che la maggior parte delle piante preferiscono crescere in terreni leggermente acidi, il biochar potrebbe determinare un aumento del pH di un terreno acido ad un livello più opportuno. Se invece il terreno ha già un pH adatto alla coltura il biochar può essere trattato mediante compostaggio per neutralizzare il suo pH. Le caratteristiche fisiche e chimiche di un biochar possono quindi alterare significativamente le proprietà del suolo e quindi è fondamentale una specifica caratterizzazione prima della sua applicazione al suolo. Le differenze nelle proprietà tra i diversi prodotti di biochar evidenziano la necessità di una valutazione, in ogni singolo caso, prima dell'incorporazione nel terreno in un sito specifico. La caratterizzazione è determinante per definire l'idoneità di ogni biochar per una data applicazione, le condizioni di trasporto e la valutazione della compatibilità ambientale. Il biochar presenta una composizione molto eterogenea di componenti stabili e labili. I costituenti principali sono carbonio (50-90%), sostanze volatili (0,5-40%), componenti minerali (0,3-5 %) e acqua (1-15%). Il contenuto di ceneri del biochar dipende dal tenore di ceneri nelle materie prime della biomassa. Da materie prime come, erba, pula di grano, paglia e residui di allevamenti si ottengono biochar in genere con alto contenuto di cenere, in contrasto con quelli da materie prime legnose. Per esempio, un biochar prodotto da pollina può contenere fino al 45% in peso di ceneri. Il contenuto delle sostanze di natura minerale dipende dalla biomassa di partenza utilizzata e dalle condizioni del trattamento. Il biochar derivato da matrici con alto

contenuto di lignina, è caratterizzato da bassi contenuti in ceneri minerali (<1% in peso) mentre se si utilizza biomassa di colture erbacee con alta concentrazione di silicati, si possono avere prodotti con contenuto di ceneri inorganiche fino al 24% in peso. Gli elementi inorganici che formano le ceneri nel biochar sono presenti in buona parte come fasi separate rispetto alla struttura carboniosa. Il biochar è in grado di modificare anche il colore del suolo, in particolare se utilizzato in elevate quantità (5 Kg/m^3) andando così a diminuirne l'albedo. Molto documentata è la capacità di trattenere molecole inquinanti, sia inorganiche che organiche, e potrebbe essere utilizzato nell'impiego di risanamento di suoli contaminati da piombo, cadmio, mercurio. Nella letteratura scientifica vigente vengono considerati metalli pesanti gli elementi: alluminio, arsenico, argento, bario, berillio, bismuto, cadmio, cobalto, cromo, ferro, manganese, mercurio, molibdeno, nichel, piombo, rame, stagno, selenio, tallio, vanadio e zinco. Alcuni di essi sono indispensabili per gli esseri viventi ma risultano tossici per gli organismi al di sopra di determinate concentrazioni: ferro, cobalto, cromo, rame, manganese, molibdeno, selenio e zinco.

Fig. 4 Funzioni del biochar come ammendante in un agro-ambiente. (Das S.K., Ghosh G.K., Avasthe R., 2020)

La linea di demarcazione fra carenza alimentare di tali elementi e tossicità è molto sottile; risulta evidente quanto sia importante conoscere la presenza e l'utilizzo di tali elementi nella vita quotidiana. Altri metalli sono prevalentemente tossici ed inquinanti: alluminio, arsenico, berillio, cadmio, mercurio, nichel e piombo. Quelli maggiormente responsabili di danni ambientali ed effetti tossici sugli esseri viventi sono: mercurio, cadmio, cromo e piombo. Un aspetto molto importane da non trascurare è l'elevata capacità di chelazione, che si rivela molto utile per risanare i terreni contaminati bloccando i composti chimici, organici e inorganici, aventi potenziale tossicità per l'uomo; miglioramento della struttura del suolo e quindi della sua

permeabilità e lavorabilità. In Figura 4 sono schematizzate alcune delle funzioni del biochar come ammendante in un agro-ambiente.

1.4 Aspetti di natura biologica

È stato riscontrato che l'uso di biochar ricavato da gusci di noci pecan e residui di erba può favorire l'aumento della temperatura del suolo in quanto esso conferisce un colore scuro associato ad una maggiore capacità del suolo di assorbire una maggiore quantità di energia solare. Questo aumento di temperatura del suolo, può giovare alle comunità microbiche e alla germinazione dei semi in terreni con basse temperature (Busscher et al., 2010). Per quanto riguarda l'impatto del biochar sui microrganismi del suolo, questo aspetto ha ricevuto minore attenzione rispetto alle proprietà fisiche e chimiche del suolo (Lehman et al., 2011). Anderson et al. (2011) hanno scoperto che l'applicazione del biochar promuove i batteri solubilizzanti il fosfato, alterando il flusso di carbonio nel suolo per aumentare l'abbondanza di famiglie batteri come *Streptosporangineae* (~ 6%), *Thermomonosporaceae* (~ 8%), *Bradyrhizobiaceae* (~ 8%) e *Hyphomicrobiaceae*, (vicino a ~ 14%), queste ultime due famiglie hanno un'importante partecipazione al ciclo dell'azoto soprattutto nel processo di denitrificazione dell'NO_3^- a N_2. L'abbondanza di questi microrganismi può favorire la degradazione dei composti di carbonio più recalcitranti e potenzialmente ridurre la presenza di batteri patogeni delle piante. L'applicazione di biochar può condizionare le associazioni tra piante e microrganismi. È l'influenza del biochar sulle proprietà biologiche del suolo l'effetto che meglio spiega i suoi benefici complessivi alle colture. Infatti, le particelle di biochar ricche di acqua e nutrienti costituiscono nel suolo, zone dove le popolazioni microbiche e fungine autoctone trovano un microambiente favorevole alla loro crescita e sviluppo. La maggior attività biologica, può favorire la competizione con microrganismi patogeni, stimolando in tal modo un effetto soppressivo, come visto in recenti studi sulla *Botrytis cinerea*, patogeno fogliare di numerose colture agrarie tra cui vite, lattuga e fragola. Una volta addizionato al suolo si è dimostrato capace d'influenzare la composizione della popolazione microbica della rizosfera, favorendo le popolazioni che promuovono la crescita delle piante e la resistenza agli stress biotici e abiotici. Ad esempio, Kolton et al. (2011) hanno scoperto che l'incorporazione di biochar nel suolo ha migliorato alcune comunità batteriche (*Flavioibacterium*) associate alla radice delle piante mature di peperone dolce (*Capsicum annuum* L.). Questi cambiamenti sono stati accompagnati da aumenti sia del pH che della disponibilità di fosforo nel terreno; questo indica che il pH può influire anche sui meccanismi di abbondanza delle micorrize nel suolo. In questo senso, molti

degli studi hanno rilevato che la biomassa microbica aumenta in seguito all'applicazione di biochar, ma si verificano cambiamenti significativi nella composizione delle comunità e nelle attività enzimatiche. Questi cambiamenti possono spiegare gli effetti biogeochimici di biochar sul ciclo dei nutrienti, la presenza di organismi fitopatogeni e la crescita delle colture (Spokas et al., 2009; Elad et al., 2010; Solaima et al., 2010). Tuttavia, si sa molto poco sui meccanismi attraverso i quali esso influenza l'abbondanza e la composizione delle comunità microbiche (Lehman et al., 2011). Proprio grazie alle proprietà microbiologiche, il biochar garantisce l'aumento della fertilità integrale del suolo e quindi il miglioramento quali-quantitativo delle produzioni agrarie.

1.5 Industria del biochar

Ci sono opportunità emergenti, ma nel complesso il mercato è ancora all'inizio del suo pieno sviluppo, la produzione è limitata e il costo è ancora abbastanza alto. Un rapporto del 2013 dell'Iniziativa Internazionale Biochar (IBI o International Biochar Initiative) ha fornito utili informazioni sullo stato attuale dell'economia del biochar. IBI conduce lavori sul campo in sei continenti e fornisce informazioni gratuite a produttori, giardinieri e ricercatori. Il rapporto è basato sui dati di un sondaggio di 43 società biochar insieme ad altre informazioni commerciali. Il rapporto ha rilevato che la maggior parte del mercato globale proviene dagli Stati Uniti (65%), seguito poi da Europa (25%), Asia (7%) e Africa (3%). Il novanta per cento (90%) dell'attività commerciale si concentra su piccoli mercati di vendita al dettaglio di specialità, principalmente vivai e centri di giardinaggio. Una piccola percentuale (10%) si concentra su mercati di più ampia scala, come l'agricoltura o i progetti di bonifica dei terreni. È stato riferito che il Giappone ha un'industria commerciale del biochar in crescita, con circa 15.000 tonnellate scambiate ogni anno (Okimori et al., 2003). Il prezzo per tonnellata per il biochar è molto più alto e i volumi molto più bassi. Le aziende che hanno risposto all'indagine IBI hanno riportato vendite di 911 tonnellate nel 2013, il sessantacinque per cento delle quali, 597 tonnellate, è stato prodotto in Nord America. Il prezzo medio del biochar negli Stati Uniti era di 1,29$ per libbra (circa 454 g) o 2,580$ per tonnellata. C'è un crescente interesse nello sviluppo di Biochar in nuovi prodotti che sfruttano le sue proprietà chimiche. Man mano che le aziende espandono la produzione, il prezzo del biochar dovrebbe diminuire e l'uso del biochar in agricoltura potrebbe iniziare ad essere un vantaggio economico, se i combustibili per i trasporti derivati dalla pirolisi diventassero commercialmente più redditizi, il biochar sarebbe un prodotto aggiuntivo e fonte di profitto per molte aziende.

1.6 Aspetti agronomici e ambientali

L'uso del biochar come ammendante nei terreni agricoli rappresenta una opportunità per combattere il cambiamento climatico, economicamente conveniente e concorrenziale alla semplice produzione di biocombustibili. Grazie ai miglioramenti ottenuti nel suolo**,** dovuti all'interramento di biochar, anche le rese agricole possono essere incrementate. Una maggior fertilità si traduce pure in una maggior efficienza fotosintetica della coltura, in un maggior sviluppo della biomassa e quindi in un maggior sequestro di carbonio. Se inoltre a fine ciclo colturale, la biomassa viene riutilizzata per produrre nuovamente il biochar, invece di bruciarla come accade con il pellet e le biomasse forestali, il ciclo si autoalimenta. Il fattore limitante per la produzione della coltura è la quantità di azoto disponibile. Il biochar ha un rapporto C/N molto alto (intorno a 200), ma una volta effettuata una concimazione con azoto ammonico o ureico, quest'ultimo verrà trattenuto e reso disponibile alle piante quando necessario, grazie all'elevata capacità di scambio cationico (CSC). E' anche possibile ricorrere a tecniche alternative per modificare il rapporto C/N del biochar, ovvero:

- La miscelazione di ammoniaca (prodotta con l'idrogeno proveniente dalla pirolisi stessa) in fase di pirolisi
- L'aggiunta a posteriori dei derivati dell'ammoniaca (carbonato d'ammonio, idrossilammina, urea) al biochar, per far depositare sali d'ammonio nei suoi micropori.

La salute del suolo è il fondamento di un sistema alimentare vigoroso. Le piante traggono il loro nutrimento dalla materia organica e dai minerali presenti nel suolo. Poiché la terra è coltivata, il processo agricolo disturba i sistemi naturali del suolo, compreso il ciclo dei nutrienti e il rilascio e l'assorbimento dei nutrienti. L'agricoltura moderna tende a ripetere la stessa coltura su più appezzamenti di suolo causando dopo alcuni anni l'impoverimento delle risorse naturali, una riduzione dei nutrienti e della sostanza organica del suolo con ripercussioni sulla produttività e sulla resa. Questo declino del suolo continua fino a quando le pratiche di gestione agronomica non vengono perfezionate utilizzando concimi di sintesi industriale, viene praticata la rotazione con le leguminose che fissano l'azoto o tramite un periodo di maggese che consenta un graduale recupero del suolo attraverso il naturale sviluppo ecologico. Oggi si tende a scegliere pratiche agronomiche che mettano in relazione resa e rispetto dell'ambiente cercando di sequestrare il carbonio atmosferico all'interno dei suoli. Il contenuto di carbonio nei suoli agricoli può essere incrementato adottando le cosiddette pratiche di gestione raccomandate

("Recommended Management Practices", RMP), (Lal, 2004). Un ulteriore aspetto importante da considerare riguarda la biodiversità nei suoli, che determina un impatto visibile nel riuscire a incrementare il quantitativo di carbonio nel suolo. A parità di altri fattori, gli ecosistemi ricchi di biodiversità sono in grado di sequestrare un maggior quantitativo di carbonio degli ecosistemi con meno biodiversità (Lal, 2004). Tra le varie pratiche di gestione raccomandate (Recommended Management Practices) che aumentano il quantitativo di carbonio nel suolo troviamo le colture di copertura (cover crops). Vengono piantate nella rotazione tra una coltura principale e la successiva, allo scopo di dare una copertura adeguata al suolo, apportare residui colturali (biomassa) al terreno allo scopo di stimolarne l'attività biologica.

Fig. 5 Il Biochar come ammendante organico (Fungo a pellet, 2020)

Le funzioni delle "cover crops" sono molteplici: protezione del suolo dall'erosione e dal compattamento, agevolare il controllo delle infestanti, aumentare il contenuto di sostanza organica nel terreno e migliorare la struttura del suolo (ERSAF, 2014). Un'applicazione a lungo termine di ammendanti riesce ad incrementare il contenuto di carbonio e può favorire fenomeni di aggregazione delle particelle del suolo, migliorandone così la struttura. Il potenziale che le pratiche di minima lavorazione presentano nel sequestro di carbonio, può essere ampliato applicando ammendanti organici nel suolo (Hao et al., 2002). Le applicazioni più recenti fanno riferimento proprio al biochar con varie ricerche e studi nel mondo scientifico inerente gli effetti a lungo termine di una sua applicazione nei suoli (Figura 5), come riportato in Tammeorg et al. (2016). La gestione della nutrizione è particolarmente critica nelle produzioni agricole in quanto il macronutriente l'azoto viene spesso perso per lisciviazione ed è l'elemento nutritivo che permette alle piante l'accrescimento in quanto contribuisce alla formazione della clorofilla, delle proteine, degli acidi nucleici e degli aminoacidi. L'azoto, pur costituendo il 78% dell'atmosfera terrestre, a causa della sua forma molecolare quasi inattiva, non può essere metabolizzato direttamente dalle piante superiori per le proprie funzioni metaboliche. Nel suolo è presente soprattutto in composti organici (Violante, 2013). Esso segue le complesse e medesime vicende della sostanza organica, per cui attraverso i processi di mineralizzazione e fissazione viene rinnovato. La mineralizzazione dell'azoto porta alla formazione di ammonio e nitrato, che hanno caratteristiche totalmente differenti. Lo ione nitrico (NO_3^-) è facilmente assorbito dalle piante,

non viene trattenuto dai colloidi del terreno e può essere facilmente dilavato dalle acque di irrigazione o di pioggia. L'azoto ammoniacale, viene invece fissato come catione (NH_4^+-N) dalla capacità di scambio cationico del suolo. Queste due forme di azoto sono le più attive, sebbene costituiscano una frazione molto ridotta, spesso inferiore al 2%. In letteratura sono presenti numerose relazioni sulle trasformazioni del ciclo dell'azoto nel suolo da parte del biochar (Clough et al., 2013; Nelissen et al., 2012), sia in modo diretto ovvero adsorbimento di NH_4^+-N e immobilizzazione di NO_3^-, sia con meccanismi indiretti, stimolazione dell'attività microbica, modifica del pH ed effetti positivi sulla ritenzione idrica. Il potere di ritenzione di NH_4^+-N. del biochar è stato ampiamente riportato come un possibile meccanismo che coinvolge non solo la capacità di scambio cationico, ma un vero e proprio ingabbiamento fisico nella struttura dei pori del biochar. Il ruolo potenziale del biochar rispetto all'adsorbimento di NH_4^+-N ed NO_3^- è stato chiarito in uno studio di Yao et al. (2012) in cui si descrive come la capacità di adsorbimento varia in base alla materia prima (feedstock) di partenza ed alla temperatura di pirolisi. Inoltre Clough et al. (2013) dimostrano che il biochar rimuove NO_3^- dalla soluzione circolante del suolo tramite adsorbimento e stimola la mineralizzazione in azoto organico. Tra gli altri elementi di cui la pianta necessita, e dei quali i biochar sono ricchi, il potassio ricopre un ruolo fondamentale nella crescita vegetativa. In un suolo gran parte del potassio è un elemento chimico che possiamo trovare nelle argille. Questa frazione può passare in soluzione grazie all'alterazione delle strutture cristalline tramite processi idrolitici. Il potassio in soluzione può essere lisciviato, essere assorbito dalle piante, essere di nuovo legato chimicamente in forme insolubili o essere intrappolato all'interno negli strati delle argille. Nelle piante il potassio non entra nella costituzione di composti organici ma esplica soprattutto la funzione di attivatore dei processi essenziali allo sviluppo della pianta tra i quali ricordiamo: la respirazione, la fotosintesi clorofilliana, la traslocazione degli elaborati, la moltiplicazione ed estensione cellulare, il metabolismo dei grassi e delle proteine, lo sviluppo dei cloroplasti e la fissazione dell'azoto nel suolo grazie alle leguminose (Marschner, 2012). Un rapido assorbimento degli ioni NH_4^+ da parte delle piante, è collegata all'aumento della disponibilità di potassio mantenendo, inoltre, la concentrazione di NH_3 a livelli poco elevati e non tossici per la pianta. Il biochar influenza la composizione della soluzione circolante nei substrati in vari modi. Per prima cosa il materiale di partenza e la temperatura di produzione influenzano il rilascio delle sostanze nutritive da parte del biochar, in particolare di cationi. Inoltre il potere alcalinizzante del biochar può controllare la solubilità dei nutrienti, fortemente dipendenti dal grado di reazione dell'ambiente. L'affinità del biochar verso altri nutrienti, oltre all'azoto e al potassio, è stata dimostrata in alcuni studi. Kintala et al. (2014) evidenziano una forte affinità di biochar

di diversa provenienza verso il fosforo solubile presente in suoli calcarei, che viene sottratto e adsorbito, mentre ne aumenta la biodisponibilità quando aggiunto a suoli acidi. In uno studio di Wang et al. (2014), gli autori dimostrano come il biochar possa essere considerato alla stregua di un fertilizzante fosfatico a lenta cessione, che contribuisce a incrementare le frazioni di fosforo nel suolo che sono strettamente collegate con la quota solubile.

Compost e biochar		pH	C. E. (µS/cm)
ABC-HU	Biochar da ossa animali	7.90	770
BC-DE	Biochar da biomasse vegetali	9.68	945
BC-FR	Biochar da biomasse vegetali	7.43	231
COHU1	Compost verde	8.58	301
COHU3	Compost verde	8.61	1296
CONL1	Compost verde	7.80	545
COES1	Compost da letami	8.29	4410
COES2	Compost da letami	7.26	2250
COES3	Compost verde	8.78	630
COES4	Compost da rifiuti organici	8.77	3700
COES5	Compost da scarti dell'industria olivicola	8.48	790
COPT1	Compost da rifiuti organici	8.86	3200
COIT1	Compost da rifiuti organici	8.12	1377
COIT2	Compost verde	7.89	753
COGB1	Compost da rifiuti organici	7.7	938

Tabella 3 Risultato del test di fitotossicità con *Lepidium sativum* su diversi compost e biochar prodotti in Europa. (Pugliese M., et al. 2015).

Il biochar ottenuto da ossa animali (Animal Bone Biochar) è un ottimo fertilizzante fosfatico organico a lenta cessione, e di origine naturale. Il biochar in questione si produce utilizzando ossa di animali sottoposte ad un trattamento termico con temperature comprese tra 600 e 650°C (Tabella 3) ed è composto principalmente da un alto contenuto di fosforo inorganico naturale proveniente da idrossiapatite, un minerale abbastanza raro che costituisce il maggiore componente delle ossa umane e animali. La composizione a basso contenuto di carbonio e l'alto contenuto di anidride fosforica (P_2O_5) fanno sì che abbia un effetto fertilizzante a lenta cessione di fosforo. Questa tipologia di biochar è ricco di macropori, dotato di una struttura ottimizzata che migliora l'attività microbiologica del suolo e garantisce una maggiore ritenzione idrica. Tra i sottoprodotti di origine animale, utilizzati per produrre questo specifico biochar, si adoperano vari materiali specifici non a rischio, quali ossa, corna e artigli che dopo trattamento termico,

posso essere utilizzati come ammendanti e fertilizzanti organici (Warrem e al., 2009; Lehmann al., 2011). Biochar oltre ad evitare perdita per lisciviazione di nutrienti è in grado di trattenere l'acqua nei suoi pori. L'acqua è considerata mobile quando è presente in pori di dimensioni dell'ordine di decine di micrometri (es. 30 μm) (Brady e Weil, 2008). In accordo con la definizione della *Soil Science Society of America* (1997), i macropori (>80 μm) portano ad un rapido flusso di acqua attraverso il suolo per azione della gravità e, dopo forti precipitazioni, possono causare eventi di lisciviazione molto notevoli (Renck e Lehmann, 2004). I mesopori (tra i 30 μm e gli 80 μm) permettono all'acqua di muoversi in risposta a differenze di potenziale matriciale, mentre i micropori (< 30 μm) trattengono l'acqua al loro interno. In alcuni biochar è stato riscontrato un elevato contenuto di micropori (< 2 $x10^{-3}$ μm) (Tseng e Tseng, 2006); questa porosità contribuisce all'adsorbimento dei nutrienti tramite la cattura delle sostanze nutritive contenute nell'acqua trattenuta capillarmente. Se il 95% dei pori del biochar è < 2 x 10^{-3} μm di diametro, la mobilità dell'acqua all'interno del suolo sarà minore. Nei suoli sabbiosi, dove la quantità di acqua trattenuta diminuisce drasticamente all'aumentare del potenziale matriciale, le particelle del biochar possono trattenere un cospicuo volume di acqua anche in presenza di elevati livelli di potenziale matriciale. Un altro vantaggio ecologico del biochar è che la sua presenza nel terreno impedisce la lisciviazione dei nitrati e fosfati con le piogge, salvaguardando così le acque superficiali e sotterranee dall'eutrofizzazione e dal pericolo di inquinamento. Una proprietà interessante ed utile consiste nella capacità di adsorbire e trattenere inquinanti persistenti e cancerogeni, in particolare quelli a struttura planare come gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA), proteggendo quindi gli organismi dalla bio-accumulazione.

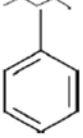
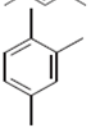
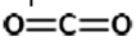
Molecule	Chemical structure	Initial mole fraction (−)	Molecular diffusion coefficient D (cm^2/s)	Henry's law constant H (−)	Vapor pressure (Pa)
n-pentane		0.068	0.082[a]	50.67[b]	56,549.48[c]
n-hexane		0.113	0.074[a]	68.38[b]	17,255.65[c]
n-octane		0.062	0.064[a]	120.67[b]	1460.09[c]
n-decane		0.099	0.057[a]	293.05[b]	159.28[c]
n-dodecane		0.046	0.051[a]	293.05[b]	39.82[c]
Cyclohexane		0.066	0.079[a]	7.33[b]	12,609.90[c]
Methylcyclo-pentane		0.116	0.079[a]	14.65[b]	18,583.01[c]
Methylcyclo-hexane		0.130	0.073[a]	4.23[b]	4911.22[c]
Isooctane		0.171	0.064[a]	132.35[b]	5442.17[c]
Toluene		0.035	0.078[a]	0.26[b]	2920.19[c]
m-xylene		0.046	0.072[a]	0.26[b]	1194.62[c]
1,2,4-trimethylbenzene (1,2,4 TMB)		0.048	0.066[a]	0.27[b]	192.52[c]
CO_2			0.17[d]	0.75[c]	Not used
Sulfur hexafluoride			0.093[a]	125.82[c]	Not used

Tabella 4 Composizione e proprietà chimiche di idrocarburi e inquinanti.

(K. M. Bushnaf, et al. 2011).

La Tabella 4 sopra mostra a livello molecolare, la struttura chimica ed il coefficiente di diffusione molecolare dei principali composti cancerogeni, che grazie al biochar vengono bloccati al suo interno impedendone la lisciviazione ed il rischio di bio-accumulo negli organismi viventi. Questo fatto apre interessanti prospettive per un suo utilizzo nel campo della bonifica ambientale. Grazie alla sua capacità recalcitrante alla decomposizione nel suolo, singole applicazioni di biochar possono fornire effetti benefici per più stagioni colturali. Pertanto, non è necessario applicarlo a ciascuna coltura. Tuttavia, la frequenza di applicazione può aumentare poiché essa dipende dal sistema di gestione agronomica e dalla disponibilità della fornitura del materiale carbonioso. Un aspetto di grande interesse del sistema biochar (produzione e applicazione al suolo) è quello relativo all'impatto ambientale**.** Ma il più grande vantaggio è proprio il sequestro di carbonio: ad esempio, una distribuzione di 10 t/ha di biochar al 70% di carbonio, del quale un massimo del 10% viene dissipato dopo la prima distribuzione, sottrae quasi 24 t/ha di emissioni di CO_2.

1.7 Potere correttivo del biochar

Un fattore importante che influenza la capacità correttiva di un biochar è la matrice da cui esso viene originato e la temperatura di processo. Il suo potere correttivo nel suolo è tuttavia condizionato dalle dosi di impiego e dal potere tampone del suolo stesso (Gundale e DeLuca, 2006). Un maggior effetto correttivo del biochar si manifesta probabilmente nei substrati di coltivazione, dove l'aggiunta di biochar può essere nettamente superiore e le condizioni ambientali maggiormente forti (temperature più elevate, umidità ottimale ecc.). L'apporto dei nutrienti è un effetto minore, a causa della relativa scarsità di nutrienti nelle maggior parte delle biomasse che originano i biochar, a cui fanno eccezione materiali ricchi di azoto come i letami e i compost. Inoltre si è visto in recenti studi che il biochar è in grado di trattenere nel suolo, a livello della rizosfera, nutrienti come i nitrati; di migliorare l'utilizzo dell'azoto da parte delle piante, agendo direttamente sui processi biologici di ammonificazione e nitrificazione; di migliorare la disponibilità dei microelementi, come ferro, manganese, zinco e nichel, in particolare nei suoli calcarei dove la loro presenza nella soluzione circolante del terreno è insufficiente (Bedussi, 2015).

1.8 Effetto dell'applicazione di biochar sulle piante

Proprio grazie alle proprietà chimico-fisiche e microbiologiche, il biochar garantisce l'aumento della fertilità del suolo e quindi il miglioramento quali-quantitativo delle produzioni. Prove in campo in Italia dimostrano la sua efficacia nel riuscire a incrementare la produzione agricole aggiungendo al suolo piccole percentuali di biochar ottenuto da scarti di potatura di olivo, e poi miscelato tramite erpicatura. Dagli studi emerge un miglioramento dei parametri morfometrici delle piante, quali: altezza, numero di foglie prodotte, area della superficie fogliare o LAI (Leaf area index), contenuto in sostanza secca della pianta o delle sue singole parti (fusto, foglie e frutti), miglioramento dei parametri qualitativi su ortaggi da foglia (cicoria, radicchio, lattuga), miglioramento dei parametri qualitativi su ortaggi da frutto (pomodoro e zucchino). Tra i risultati positivi troviamo anche un aumento delle rese di circa il 20%, un aumento dei funghi micorrizici arbuscolari (Amf o arbuscular mycorrhizal fungi) ed infine ma non per questo meno importante, il risparmio idrico (Monteleone e Libutti, 2013). L'ottimo risultato ottenuto in pieno campo fa ben sperare per un possibile utilizzo del biochar nei terricci e nei substrati di crescita utilizzati nelle colture del settore florovivaistico. Sono ancora pochi gli studi sull'utilizzazione del biochar in coltivazioni fuori suolo, anche se negli ultimi anni il numero di articoli scientifici pubblicati è aumentato. La maggior parte di questi studi ha riportato gli effetti benefici

sull'utilizzo di biochar in substrati di crescita, sia in termini di incremento delle prestazioni della pianta (Graber et al., 2010; Dumroese et al., 2011; Tian et al., 2012; Vaughn et al., 2013; Headlee et al 2014) che a livello ambientale, con la riduzione delle perdite di preziosi nutrienti a causa della lisciviazione (Brockhoff et al., 2010; Beck et al., 2011; Altland e Locke 2012). Il processo di carbonificazione è in grado di creare materiali a differente granulometria ad elevata porosità, che aiuta a trattenere l'acqua e le sostanze nutritive (Laird, 2008; Novak et al., 2010). Gli effetti positivi dovuti all'utilizzo del biochar sono stati osservati in ricerche condotte da Glaser et al. (2002) e Rondon et al. (2007) dove rilevano un aumento della produzione di biomassa, un maggiore disponibilità di sostanze nutritive ed un miglioramento della qualità del substrato. Rosenani et al. (2014) hanno riportato come l'applicazione al suolo di biochar prodotto a partire da lolla di riso, aumenti la resa di Ipomoea. Suppadit et al. (2012) utilizzando biochar come ammendante di un suolo contaminato da cadmio, hanno riscontrato, oltre alla riduzione della biodisponibilità del metallo, un aumento della resa produttiva di *Jatropha curcas* L. riconducibile all'apporto ed al miglioramento della disponibilità di nutrienti nel suolo. Gli effetti del biochar sulle colture sembrano favorire le rese, come osservato nel riso e nel fagiolo dove l'incremento in biomassa era rispettivamente del 17 e del 43% (Lehmann et al., 2003). Gli autori attribuiscono la crescita positiva delle colture all'incremento della nutrizione in P, K e Ca derivante dall'applicazione del biochar. Altri studi affermano, invece, che le risposte delle piante sono da attribuire non tanto alla presenza dei nutrienti nel biochar, quanto alla capacità del biochar di renderli più facilmente disponibili per la pianta. Alcune di queste sono anche da attribuire alla capacità del biochar di mantenere costante o aumentare i valori del pH del suolo. Applicando il biochar su suoli forestali, insieme a fertilizzanti naturali o di sintesi, si è visto un incremento della biodisponibilità e di assorbimento da parte delle piante di elementi quali fosforo, metalli alcalini e altre tracce di metalli di natura diversa (Steiner et al., 2007). Nella letteratura scientifica, diversi studi hanno riportato effetti positivi sulle rese delle colture con una gamma molto vasta di dosi che vanno da 0.5 a 100 t/ha. Come già detto in precedenza, data la sua resistenza alla degradazione nel suolo, il suo utilizzo può avere effetti benefici su più stagioni colturali e quindi non è necessario adoperarlo per ogni coltura. La frequenza di applicazione potrebbe aumentare in base alla scelta del sistema di gestione agronomica adoperato e dalla disponibilità del materiale carbonioso.

1.9 Legislazione italiana

Dal 2015, con l'aggiornamento del 22 giugno dell'allegato 2, il biochar è rientrato nella classificazione degli ammendanti riconosciuti in Italia dal Decreto Legislativo n.75 (29 April 2010) "Riordino e revisione della disciplina in materia di fertilizzanti" (Gazzetta Ufficiale n. 121 del 26 maggio 2010 - Supplemento ordinario) che definisce le caratteristiche per la classificazione e commercializzazione degli ammendanti e dei fertilizzanti (Bedussi, 2015).

N.	Denominazione del tipo	Modo preparaz. e componenti essenziali	Titolo minimo in elementi e/o sostanze utili	Altre indicazioni di denomin. del tipo	Elementi o sostanze utili il cui titolo deve essere dichiarato	Note
16	Biochar da pirolisi o da gassificazione	Processo di carbonizzazione di prodotti e residui di origine vegetale provenienti dall'agricoltura e dalla silvicoltura, oltre che da sanse di oliva, vinacce, cruscami, noccioli e gusci di frutta, cascami non trattati della lavorazione del legno, in quanto sottoprodotti delle attività commesse. Il processo di carbonizzazione è la perdita di idrogeno, ossigeno e azoto da parte della materia organica a seguito di applicazione di calore in assenza, o ridotta presenza, dell'agente ossidante, tipicamente l'ossigeno. A tale decomposizione termochimica è dato il nome di pirolisi o piroscissione. La gassificazione prevede un ulteriore processo ossido-riduttivo a carico del carbone prodotto da pirolisi.	C tot di origine biologica(#) % s.s. ≥ 20 Conducibilità elettrica (salinità) mS/m ≤ 1000(5) $pH_{(H2O)}$ 4-12 Umidità % ≥ 20 per prodotti polverulenti (°) Ceneri % s.s. ≤ 60 H/C (molare) (*) ≤ 0,7	Occorre dichiarare il tipo di processo di produzione impiegato (pirolisi o gassificazione) e le tipologie di biomasse utilizzate (es. pirolisi di legno di conifere)	Umidità % C tot di origine biologica % s.s. Ceneri % s.s. pH Conducibilità elettrica (salinità) mS/m Rapporto H:C (molare) Granulometria (passante mm 0,5-2-5) azoto tot % s.s. potassio tot % s.s. fosforo tot % s.s. calcio tot % s.s. magnesio tot % s.s. sodio tot % s.s. % C da carbonato max ritenzione idrica % m/m	(#) sottratto il C da carbonati (5) per utilizzo quale componente dei substrati di coltivazione (allegato 4) ≤ 1000 (°) dato comunque da dichiarare. Per prodotto polverulento si intende, in questa sede, un prodotto nel quale la frazione < 2 mm risulta > del 50% (*) indice di stabilità del carbonio. Per il calcolo si deve utilizzare il dato del parametro C tot di origine biologica Sono inoltre fissati i seguenti parametri chimico-biologici: - test di fitotossicità / accrescimento (UNI EN 16086-1:2012) - prova di crescita in vaso con orzo primaverile): l'inibizione alla germinazione e/o alla crescita (con dose di utilizzo del prodotto del 25%) deve essere inferiore al 25% - IPA < 6 mg/kg s.s. - PCB < 0,5 mg/kg s.s. - Diossine < 9 ng I-TEQ/kg

Tabella 5 Caratteristiche del biochar per essere usato come ammendate (Dlgs 75/10, allegato 2).

Per essere utilizzati o commercializzati i concimi devono soddisfare gli obblighi derivanti dalle direttive normative della legge italiana e devono essere inclusi in un registro nazionale. Per l'inserimento di nuovi prodotti nelle liste di fertilizzanti, essi devono soddisfare alcuni requisiti. Per esempio, le proprietà devono essere accuratamente caratterizzate dal punto di vista chimico, fisico e tossicologico utilizzando metodi ufficiali. Il loro processo di produzione ed il loro utilizzo devono essere tracciabili e standardizzati, e la società produttiva deve essere registrata nei registri dei produttori di fertilizzanti (Bedussi, 2015). Dal momento che ogni biochar prodotto ha caratteristiche uniche, dovute alla diversa biomassa di partenza ed ai diversi processi produttivi, non è possibile includere genericamente tutti i biochar nell'elenco degli ammendanti. Infatti, secondo la legge italiana, ogni singolo tipo di biochar dovrebbe essere caratterizzato, descritto, testato ed approvato per l'uso. Per risolvere questo problema a livello mondiale, l'organizzazione International Biochar Initiative (IBI) sta promuovendo un programma di certificazione del biochar, il cui obiettivo primario è quello di creare un sistema standardizzato e riconosciuto di certificazione. Per ottenere la certificazione, i materiali devono

essere conformi alle norme dell'IBI quindi rientrare nei requisiti fisico-chimici e passare i test svolti ad identificare la presenza di potenziali sostanze tossiche. Lo scopo finale del programma e quello di fornire ai produttori di biochar l'opportunità di certificare i loro prodotti per consentirne l'uso o la vendita come ammendante ed allo stesso tempo garantirne la loro sicurezza (Bedussi, 2015).

1.10 Normativa Europea

Indipendentemente dal percorso legislativo nazionale, il biochar dovrà confrontarsi nei prossimi anni con il nuovo regolamento europeo sui fertilizzanti, regolamento (UE) 2019/1009 del Parlamento europeo e del Consiglio del 5 giugno 2019, che stabilisce norme relative alla messa a disposizione sul mercato di prodotti fertilizzanti dell'UE, che modifica i regolamenti (CE) n. 1069/2009 e (CE) n. 1107/2009 e che abroga il regolamento (CE) n. 2003/2003. Il nuovo testo è entrato in vigore il 15 luglio 2019, ma sarà applicato solo a partire dal prossimo 16 luglio 2022, giorno in cui cesserà di valere l'attuale regolamento CE 2003/2003 che norma esclusivamente i concimi minerali. Il nuovo piano legislativo sarà valido per chi vuole immettere sul mercato europeo i propri prodotti con marchio CE. In Italia resta al momento in vigore la normativa nazionale (Dlgs. 75/2010) con cui sono obbligati a confrontarsi, fino a futura revisione, tutti i fabbricanti che immettono prodotti fertilizzanti sul territorio nazionale. Il nuovo regolamento europeo classifica i fertilizzanti in sette diverse categorie funzionali di prodotto:

- concimi – correttivi;
- ammendanti;
- substrati di coltivazione;
- inibitori;
- biostimolanti;
- miscele di prodotti fertilizzanti.

Per la preparazione di questi ultimi si potranno utilizzare solo specifici materiali raggruppati a oggi in undici categorie, fra le quali sostanze e miscele di materiale grezzo, piante, compost, digestato, sottoprodotti, microrganismi, polimeri. Il biochar non figura al momento nell'elenco dei materiali costituenti per la produzione dei fertilizzanti, ma è citato nel nuovo testo, unitamente ad altri materiali, come matrice per cui, in virtù della richiesta di mercato, la Commissione adotterà immediatamente modalità di valutazione, che, se positiva, ne produrrà

l'inclusione. Stante quanto sopra, il biochar, su cui opera uno specifico gruppo di lavoro tecnico a livello europeo (Strubias TWG), dovrebbe rientrare entro il 2021 come nuovo materiale costituente (CMC), ma non sono ancora molto chiari alcuni aspetti indispensabili tra i quali la definizione del prodotto, i processi di produzione ammessi, le materie prime di origine utilizzate per il suo processo di sviluppo (forse ampliate a matrici di origine animale), i parametri di qualità, nonché i limiti imposti. Il compito dell'associazione, a seguito dell'inclusione del biochar nel nuovo regolamento europeo, dovrà essere quello di tentare di incidere nella maniera più efficiente sugli organi europei e nazionali per rivendicare la posizione del biochar italiano, un prodotto con requisiti di qualità già sanciti e applicati. Una buona notizia è giunta nel dicembre del 2019 con il riconoscimento, della possibilità di impiego del biochar in agricoltura biologica, ciò a seguito della pubblicazione sulla Gazzetta ufficiale dell'Unione europea del regolamento esecutivo (UE) 2019/2164 che integra gli allegati del Reg CE 889/08 relativo alla *produzione biologica*. Il biochar è stato inserito nell'elenco dei fertilizzanti utilizzabili in agricoltura biologica insieme ai gusci di molluschi, ai gusci d'uovo e agli acidi umici e fulvici. Tale inclusione, che rappresenta un passo fondamentale per l'affermazione del prodotto biochar nell'agricoltura italiana, è un riconoscimento importante per l'Associazione italiana biochar (Ichar) poiché, a differenza di quanto mostrato nell'ambito del nuovo regolamento europeo sui fertilizzanti, il gruppo di esperti specializzati nell'offrire consigli in materia di produzione biologica (*Expert Group for Technical advice on Organic Farming*), chiamato a esprimere un parere sulla compatibilità del materiale, ha inteso il biochar come il prodotto della pirolisi di materiali vegetali non trattati o trattati con appositi prodotti ammessi; inoltre è stato attribuito un limite massimo di idrocarburi policiclici aromatici (IPA) o definiti dall'acronimo PAH (dall'inglese, polycyclic aromatic hydrocarbons) pari a 4 mg per kg di sostanza secca prodotta, in linea con il limite della legislazione italiana (6 mg/kg), spesso considerata troppo restrittiva.

1.11 Utilizzo del biochar in contesti non agricoli

Dopo aver parlato di cos'è il biochar, come si produce, da quale tipologia biomassa si può ricavare e delle sue utili funzioni in ambito agricolo passiamo adesso a discuterne del suo utilizzo in contesti non agricoli. Si tratta di utilizzarlo come combustibile domestico, filtro e purificatore nei trattamenti di liquami cittadini e industriali, additivo per mangimi animali, additivo alimentare o additivo per scopi farma-nutraceutici, agente riducente dell'industria metallurgica.

Questi sono esempi da tenere in considerazione ma non dobbiamo dimenticare di menzionare i suoi utilizzi più o meno innovativi come carboncino da disegno, nell'industria dei pigmenti, nella bioedilizia (fig.6) come regolatore di umidità.

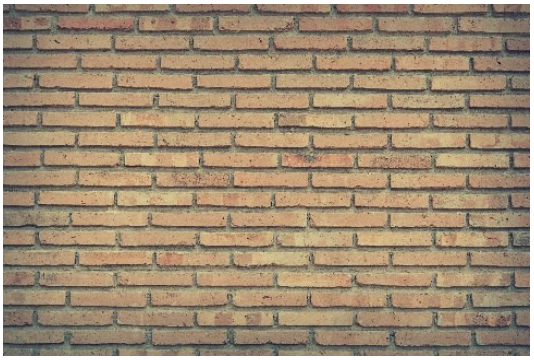


Fig. 6 Il Biochar nel settore della bioedilizia (Fungo a pellet, 2020)

Fig. 7 Il Biochar nel settore cosmesi (Fungo a pellet, 2020)

E' inoltre testato nella cosmesi (fig.7) per produrre scrub e saponi. In molti paesi viene adoperato il carbone da legna come combustibile domestico e viene utilizzato quotidianamente

per cuocere le varie pietanze, invece nei paesi industrializzati il suo uso ha avuto un radicale cambiamento diventando il simbolo di cucina all'aperto, come combustibile per la cottura alla brace e le grigliate nei boschi e nelle campagne.

Il carbone vegetale è ottimo come carbonella da barbecue dato che la sua combustione produce un fumo più pulito e meno pericoloso per le vie respiratorie, riuscendo a sviluppare temperature più elevate rispetto alla classica carbonella da legna.

Fig. 8 Il Biochar nel settore energetico.
(Fungo a pellet, 2020)

Attualmente i produttori di Biochar per il barbecue sono paesi esteri, tra cui il Sud-America, ma purtroppo viene prodotto con metodi in disuso e poco sostenibili dal punto di vista ambientale ed ecologico. Il biochar data la sua porosità può essere utilizzato anche come elemento filtrante negli impianti di trattamento delle acque. Per avere un elevato potere assorbente e filtrante viene convertito appositamente, per questo scopo, in carbone attivo, un particolare tipo di carbone che può essere adoperato in vari modi tra i quali: purificazione dell'acqua potabile, trattamento dei liquami cittadini e industriali (fig.8), purificazione dell'aria da gas nocivi e inquinanti, recupero dei solventi, controllo degli odori (domestici o industriali) e maschere antigas. Ricordando la sua capacità di riuscire a bloccare l'anidride carbonica nel suolo e della materia decomposta sta trovando impieghi anche in veterinaria (fig.9): aggiungendolo ai mangimi animali, infatti, si possono ridurre le emissioni di metano dei ruminanti che, dopo le produzioni risicole, sono la seconda voce passiva nel bilancio di queste emissioni e quindi una tra le varie cause dell'effetto serra.

Fig. 9 Il Biochar nel settore zootecnico e veterinario.
(Fungo a pellet, 2020)

I gruppi di animali nella cui dieta è stato aggiunto il biochar hanno mostrato vari effetti positivi, come l'assorbimento di alcune tossine tra cui il botulino, una digestione migliore, una maggiore efficienza del mangime che porta ad una maggiore crescita dell'animale e del suo peso corporeo, una riduzione delle emissioni di metano e dei valori del sangue decisamente migliorati. Questo probabilmente legato ad un aumento del pH, visto che la maggior parte dei tipi di carbone vegetale presenti in natura sono soprattutto alcalini. Migliora l'attività microbica con riduzione dei danni al sistema digestivo dell'animale con un incremento del suo sistema immunitario che giova alla sua salute.

Fig. 10 Il Biochar come colorante alimentare

Viene anche utilizzato come colorante alimentare (E 153) (fig. 10) con apposite restrizioni sul contenuto di carbonio e sulla sua purezza: oltre al suo notevole impatto visivo, apporta anche effetti benefici nell'organismo. Studi hanno dimostrato che le fibre vegetali dopo la pirolisi diventano porose ed acquistano una maggiore capacità di assorbire i gas intestinali, venendo in seguito eliminate naturalmente dal corpo umano, migliorando così i problemi intestinali con effetti positivi anche sul controllo dei livelli di colesterolo nel sangue.

1.11.1 Capacità di biochar di assorbire e trattenere gli inquinanti pericolosi

In letteratura sono presenti alcuni studi (Garcia-Perez M. et al., 2008) sul potenziale sviluppo di pericolose sostanze tossiche nel biochar come risultato del processo di pirolisi della biomassa e l'impatto che hanno questi sull'ambiente. In particolare, è stata studiata la possibile formazione, durante la pirolisi, di policlorodibenzofurani (PCDF o polychlorinated dibenzofuran), policlorodibenzo-p-diossine (PCDD o polychlorinated dibenzo-p-dioxins) e idrocarburi policiclici aromatici (IPA o polycyclic aromatic hydrocarbons). Ulteriori studi hanno dimostrato la possibile formazione di IPA e diossine nei biochar che potrebbero essere biodisponibili per gli organismi. Il loro sviluppo è legato alla tipologia di biomassa di partenza e dalla temperatura e dal tempo di pirolisi. Le loro concentrazioni diminuiscono all'aumentare del tempo e della temperatura di pirolisi (Hale et al., 2012). Quindi, prima di ogni possibile applicazione di biochar, è opportuno effettuare apposite analisi per evitare di introdurre sostanze indesiderate nel suolo, difficile poi da poter bonificare se con costi esorbitanti. Si è visto che l'applicazione di biochar è in grado di migliorare la capacità complessiva di assorbimento nei suoli verso comuni composti organici di origine antropica (es. IPA ed erbicidi), e quindi influenzando la tossicità, il trasporto e il destino di questi contaminanti (Verheijen et al., 2010). Come spiegato da Blackwell et al. (2009), il biochar può rappresentare anche un pericolo di incendio. Infatti le particelle di polvere di biochar possono formare miscele esplosive con l'aria in spazi ristretti, e vi è il pericolo di riscaldamento spontaneo e accensione quando il biochar è impacchettato strettamente. Ciò si verifica perché il biochar fresco assorbe

rapidamente ossigeno e umidità, e questi processi esotermici, possono portare ad un potenziale raggiungimento di alte temperature e successiva accensione del materiale. Per ridurre al minimo i rischi di incendio possono essere aggiunte apposite sostanze chimiche al biochar per diminuirne l'infiammabilità come ad esempio l'acido borico o il solfato ferroso (Blackwell et al., 2009). Anche l'acqua può ridurre l'infiammabilità, seppure la sua efficacia non è molto nota. Il modo migliore per evitare incendi del biochar è quello di immagazzinarlo e trasportarlo in un'atmosfera priva di ossigeno (Blackwell et al., 2009). Prodotti formulati a base di biochar come miscele con compost, concimi, o la produzione di complessi di biochar-minerali possono invece fornire prodotti che sono molto meno infiammabili e allo stesso tempo utili come ammendanti o fertilizzanti (Blackwell et al., 2009). L'EPA (conosciuta pure come USEPA, United States Environmental Protection Agency) e l'EEA (Environmental Protection Agency) hanno stabilito i limiti per i valori di IPA nei composti bio-solidi applicati al suolo: di 6 mg/kg per l'EPA e tra 3 e 6 mg/kg per la EEA, in relazione ai diversi paesi della Comunità Europea (EPA, 2002; EEA, 2004). Le policlorodibenzodiossine (PCDD) e i policlorodibenzofurani (PCDF), comunemente indicate con il nome generico di "diossine", sono due famiglie di contaminanti ambientali con caratteristiche fisiche, chimiche e tossicologiche molto simili. PCDD e PCDF non sono sostanze prodotte intenzionalmente, ma sono sottoprodotti di reazioni di vario genere, generate da attività umane e naturali. Oggi le diossine sono introdotte nell'ambiente soprattutto in conseguenza di processi di combustione incontrollata come l'incenerimento dei rifiuti delle attività agricole e del giardinaggio, gli incendi boschivi o gli incendi di siti industriali. La struttura chimica di base comune a tutte e due le famiglie di composti è costituita da due anelli aromatici clorurati legati fra loro da un anello centrale su cui sono presenti uno (furani) o due (diossine) atomi di ossigeno. Le caratteristiche chimico-fisiche dei 210 composti o "congeneri" variano con il grado di clorurazione: all'aumentare del numero di atomi di cloro diminuisce la solubilità in acqua e aumenta la solubilità nei grassi. Tutti i congeneri hanno inoltre un alto punto di fusione, una notevole resistenza ai processi di degradazione e lunghe emivite nell'ambiente. Queste proprietà rendono PCDD e PCDF contaminanti organici persistenti. Dall'ambiente PCDD e PCDF possono entrare nelle catene alimentari e raggiungere l'uomo. L'esposizione a tali sostanze può coinvolgere l'uomo in un'ampia gamma di effetti tossici, la cui natura e intensità sono decisamente influenzate dal numero e dalla posizione degli atomi di cloro all'interno delle molecole. Tra i duecentodieci congeneri che compongono il gruppo delle PCCD e dei PCDF, solo diciassette hanno un interessamento tossicologico molto importante a causa del loro potenziale cancerogeno e dei possibili effetti negativi sulla riproduzione e sul sistema immunitario umano. Il carbone è stato

per lungo tempo utilizzato per rimuovere impurità dai sistemi idrici (Ippolito et al., 2012b). Partendo da questo ragionamento la ricerca sul biochar si è estesa per comprendere il suo potenziale uso per sequestrare dal terreno metalli pesanti, sostanze inquinanti e composti altamente tossici e cancerogeni. Uchimiya et al. (2012) hanno scoperto che per la stabilizzazione nel biochar, i metalli necessitano di interagire con il biochar per via elettrostatica, scambio ionico, assorbimento tramite scambio di protoni o specifici sistemi di legame. Gli autori hanno studiato l'assorbimento del Pb, Cu, Ni e Cd da un Ultisol (suoli in cui si manifesta illuviazione di argilla in un orizzonte argillico secondo l'USDA) della Carolina del Sud ammendato con differenti tipi biochar (tra cui pollina, lettiera da allevamento di tacchini, scarti di produzione casearia, deiezioni suine) pirolizzati ad una temperatura di 350 o 700°C. L'assorbimento del piombo è apparso essere collegato positivamente con la temperatura di pirolisi, come funzione sia del pH aumentato e sia dei complessi donatore-accettore di elettroni. L'assorbimento del Cd non ha mostrato un chiaro effetto della temperatura di pirolisi, mentre il nickel, il metallo meno impattato dall'applicazione di biochar, potrebbe essere condizionato dalla competizione con metalli maggiormente trattenuti come il rame. Ippolito et al. (2012b) hanno osservato che il biochar è in grado di sequestrare più di 42 mg di Cu per kg di biochar. I risultati sono solo alcuni esempi degli studi pubblicati in letteratura, ma suggeriscono che il biochar può diventare un valore aggiunto nella bonifica di suoli saturi da metalli pesanti o inquinanti pericolosi.

1.11.2 Biochar come materiale per una Barriera Reattiva Permeabile: Uno studio in Corea

Nel mondo spesso è accaduto lo sviluppo e la diffusione di malattie pericolose tra gli animali tra cui l'afta epizootica e l'influenza aviaria, e per motivi sanitari le aree colpite hanno abbattuto migliaia e migliaia di animali infetti o con sospetto di possibile contagio. Tra le molte opzioni di smaltimento delle carcasse di animali, il seppellimento in azienda è stato quello più frequentemente utilizzato in Corea poiché è generalmente considerato un metodo abbastanza svelto ed economico rispetto al metodo di incenerimento, ma le carcasse di animali durante la decomposizione generano contaminanti come il catione ammonio.

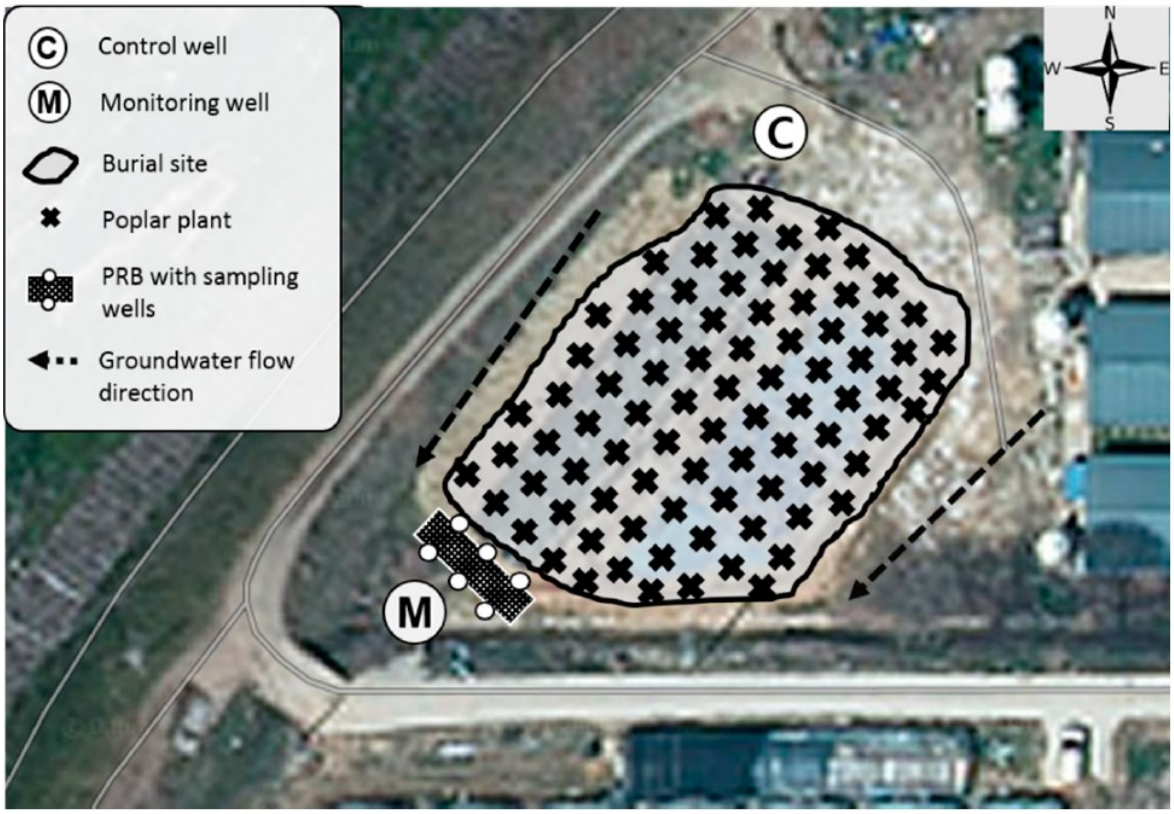


Fig. 11 Layout dei pozzi di campionamento del percolato, barriera reattiva permeabile e zona di impianto (400 piante) nel sito di sepoltura.
(Y. Jung-Hwan, et all. 2017).

Lo studio che riporto (fig.11), mirava a testare il biochar come materiale per una barriera reattiva permeabile in combinazione con specie arboree a crescita rapida (*Populus euramericana*) per mitigare l'inquinamento delle acque sotterranee dai siti di sepoltura degli animali (Y. Jung-Hwan, et all. 2017). Il biochar testato è stato ottenuto dalla lolla di riso e la sua efficienza per limitare la migrazione di contaminanti da un sito di sepoltura di carcasse di suino è stata testata utilizzando, come parametri di monitoraggio, la conduttività elettrica e il pH. Sono stati utilizzati pozzi di monitoraggio a valle del luogo di sepoltura. Sono stati campionati e studiati i percolati da un pozzo di monitoraggio, da tre pozzi all'interno del sito di sepoltura vicino alla barriera reattiva permeabile e da tre pozzi al di fuori del sito di sepoltura vicino alla barriera reattiva permeabile per quattro anni dall'installazione. Il pH, la conduttività elettrica e lo ione ammonio dei campioni di percolato raccolti dall'esterno del sito di sepoltura vicino alla barriera reattiva permeabile si sono ridotti rispetto a quelli dall'interno del sito di sepoltura vicino alla barriera reattiva permeabile. Le concentrazioni di ione ammonio nel percolato dal monitoraggio si sono mantenute al di sotto del valore di soglia di 10 mg / L per due anni dalla costruzione della barriera reattiva permeabile. Inoltre, la crescita delle piante di pioppo sembrava essere aumentata attraverso l'assorbimento di N e P resi disponibili e rilasciati dai siti

di sepoltura. I risultati ottenuti indicano che le barriere reattive permeabili ricoperte da biochar possono essere utilizzate per mitigare *in situ* il rilascio di contaminanti dalle carcasse di animali sepolti. Vi è una preoccupazione più che giustificata per quanto riguarda il rischio di percolato contenente alte concentrazioni di contaminanti, tra cui il catione ammonio (NH_4^+), ione nitrato (NO_3^-), ione cloruro (Cl^-). Questi contaminanti derivanti dalla decomposizione della carcassa possono influenzare negativamente la qualità del suolo e delle acque sotterranee attorno ai siti di sepoltura. MacArthur e Milne (2003) e Yuan et al., (2013) hanno riportato concentrazioni molto elevate di ione ammonio nei siti di sepoltura dei percolati (rispettivamente a 3294 mg/L e 14.640 mg/L), rispetto al valore soglia di 10 mg/L nel percolato proveniente dai pozzi di monitoraggio. Sono state misurate anche le concentrazioni di ione cloruro che sono aumentate (circa 2600 mg/L). Pratt e Fonstad (2009) hanno scoperto che i componenti del percolato possono variare a seconda del tipo di carcassa animale sepolta: pollame (NH_4^+ a 10.400 mg/L e Cl^- a 2570 mg/L), bovini (NH_4^+ a 14.100 mg/L e Cl^- mg/L a 2600 mg/L) e suino (NH_4^+ a 13.300 mg/L e Cl^- a 2380 mg/L). Pratt e Fonstad hanno osservato che contaminanti come ammonio e cloruro sono stati rilevati nel percolato raccolto 2 anni dopo la sepoltura della carcassa. Hanno anche verificato che la concentrazione di ammonio nelle prime fasi era la più bassa (circa 5000 mg/L), mentre è aumentata regolarmente per 2 anni con il progredire del disfacimento della carcassa animale. Pertanto, le contromisure per limitare la lisciviazione dei contaminanti nelle falde devono essere applicate nei siti di sepoltura delle carcasse degli animali. Un approccio innovativo è stato l'installazione di barriere reattive permeabili combinate con specie arboree a crescita rapida, come *Populus* spp. La barriera reattiva permeabile è una tecnologia passiva ed economica per il risanamento *in situ* delle acque sotterranee contaminate. Le barriere reattive permeabili possono degradare i contaminanti disciolti o immobilizzarli all'interno della parete reattiva. Una barriera reattiva permeabile contenente un materiale reattivo idoneo è probabilmente uno strumento utile per la bonifica *in situ* del suolo sotterraneo contaminato da metalli pesanti. Possono essere utilizzati vari materiali tra cui ferro zero valente, carbone attivo, zeolite e anche recentemente il biochar. Quest'ultimo è stato introdotto come adsorbente conveniente per inquinanti organici, metalli pesanti e antibiotici. In generale, i biochar hanno un'elevata capacità di scambio cationico che gli permette di adsorbire contaminanti nel percolato come metalli pesanti e ione ammonio. In studi precedenti di Yoon e Kim e Kim et al., hanno scoperto che il biochar ottenuto dalla buccia di riso può adsorbire alte concentrazioni di ione ammonio. Inoltre, Kim et al., hanno studiato il potenziale di bonifica delle acque sotterranee contaminate utilizzando barriere reattive

permeabili riempite con biochar ottenuto da lolla di riso e hanno scoperto che potrebbero ridurre significativamente lo ione ammonio e lo ione fosfato.

1.12 Gli ostacoli economici relativi al biochar

Come visto nei precedenti paragrafi il biochar proposto come ammendante del suolo nella produzione agricola risulta un'arma vincente, sia per i presunti aumenti dei raccolti che per il sequestro del carbonio nella materia organica del suolo. Circa l'11% della superficie terrestre globale è utilizzata dall'agricoltura per la produzione di colture cerealicole, orticole e arboree causando il 13% dei gas serra globali di origine umana (GHG, ovvero Greenhouse Gases, gas a effetto serra). La maggiore conseguenza dei gas ad effetto serra è di essere responsabili delle emissioni di CO_2. Un numero crescente di scienziati sostiene l'uso del biochar nei sistemi di coltivazione per contribuire alla risoluzione di due importanti problemi globali: garantire la produzione agroalimentare per una popolazione mondiale sempre più in crescita nei prossimi decenni, modificando in modo sostenibile i suoli e ridurre le emissioni di CO_2. Le scelte degli agricoltori di utilizzare il biochar nei loro campi dipenderanno principalmente dai benefici agronomici e/o dai ritorni economici. La grande variabilità nell'effetto del rendimento può essere spiegata da vari fattori, tra i quali l'ampia varietà di prodotti biochar che si possono ottenere, i vari parametri del processo di carbonizzazione, materie prime diverse, se miscelato con compost, letame o digestato e le loro reciproche interazioni con le condizioni delle diverse tipologie di suolo e la particolare coltura presa in considerazione. Tuttavia, l'incertezza che ne deriva crea un grosso ostacolo nonostante l'utilizzo mondiale del biochar in agricoltura. Due decenni di ricerca sul biochar hanno continuato a produrre un gran numero di pubblicazioni ed è difficile tenere il passo con la profusione di temi emergenti nel mondo del biochar. L'entusiasmo nei confronti del biochar in America e Asia contrasta con la posizione talvolta contraria, di alcuni gruppi di cittadini ed enti statali nel vecchio continente.

1.13 Stime dei costi del biochar

Le valutazioni economiche del biochar devono ancora stabilire definitivamente il valore della tecnologia, principalmente a causa della discrepanza tra i benefici agronomici osservati e le aspettative del biochar come ammendante del suolo. Collison et al. (2009) hanno dimostrato che l'applicazione del biochar potrebbe migliorare la redditività dell'agricoltura arabile migliorando la resa e la qualità delle colture, e riducendo i costi dall'acquisto di fertilizzanti ma non tentano di stimare i costi di acquisizione e applicazione del biochar, lasciando quindi le

loro valutazioni di redditività incomplete per giudicare correttamente il suo valore economico. Galinato et al. (2011) stimano il valore economico dell'applicazione del biochar sui terreni agricoli considerando sia i benefici derivati dal sequestro del carbonio sia il suo utilizzo per aumentare il pH del suolo e migliorare le rese di una singola rotazione del grano invernale. Sebbene questi studi siano informativi, le aspettative di biochar come ammendante duraturo suggeriscono che le valutazioni dovrebbero essere estese a scenari di lungo periodo. Tale analisi è difficile a causa della mancanza di dati completi e di lunga durata e dell'incertezza sulla permanenza del biochar, anche a causa delle complessità sul lato della fornitura di Biochar e dei costi di produzione, con una considerevole variabilità possibile nelle materie prime e nelle tecniche di produzione (Roberts et al., 2010). Il ciclo di vita economico e la sua longevità rispetto al fertilizzante inorganico, un materiale di breve durata, il biochar è promosso come incremento di rese agricole a lungo termine (IBI, 2012). Tuttavia, l'esatta durata dei benefici agricoli di biochar è poco compresa con prove e stime attuali che vanno da poche stagioni di crescita fino a secoli (Heckenberger et al., 2003; Neves et al., 2003; Glaser & Birk, 2012). Spesso il costo del biochar è direttamente correlato al costo della materia prima, ai costi della raccolta e del trasporto, al metodo di lavorazione della materia prima in uso e al valore de eventuali co-prodotti; è facile dedurre quindi la difficoltà nello stabilire un prezzo univoco per tale materiale, in quanto esso dipende da molte variabili che mutano al mutare della materia prima utilizzata. Oggi vengono stimati costi bassi da biochar prodotto dai resti di lettiere di pollame e fanghi di acque reflue, in quanto è assimilabile a quello del loro smaltimento, mentre risulta sempre maggiore il costo del biochar prodotto dalla macinazione e dalla spremitura della canna da zucchero, e quello prodotto dallo scarto di rifiuti verdi e di legname.

Conclusioni

Oggi sempre più si parla di lotta ai cambiamenti climatici, riduzione delle emissioni di gas serra (greenhouse gases) e salvaguardia dell'ambiente perché gli effetti di un'economia non circolare basata sullo sfruttamento massiccio delle risorse del sottosuolo, disboscamenti incontrollati, produzione smisurata di beni economici e altro, ha portato a situazioni note ormai a tutti e si tenta di riparare ai danni compiuti con politiche ambientali, progetti ed idee di transizione ecologica. Sperperare il cibo prodotto dalle aziende non è solo una questione di etica morale ma porta ad un esaurimento delle risorse del sottosuolo già limitate. Lo sperpero di cibo avviene spesso in casa o da errori di spesa al supermercato con acquisti più del dovuto. Nel 2050 si prospetta un aumento di 2.3 miliardi di persone sul pianeta, questo richiederà un aumento della produzione di alimenti pari al 60-70% in tutto il mondo. Quello di cui non ci rendiamo conto è che quasi un miliardo di persone sul globo ha a disposizione da mangiare meno di un quarto di tutto quello disponibile per una persona che vive in Europa o negli Stati Uniti. Non bisogna sprecare cibo ma imparare a usarlo razionalmente per rallentare il cambiamento climatico. Se dal riciclo di scarti agricoli è possibile ricavare un grande aiuto che possa essere adoperato in vari ambiti ma soprattutto essere carbon negative, espressione che indica un sistema in grado di rimuovere dall'atmosfera un quantitativo di anidride carbonica maggiore di quello prodotto e di sequestrare il carbonio nel sottosuolo per parecchi anni se non centinaia, perché non promuoverlo? La maggior parte dei piani nazionali vuole raggiungere l'obiettivo nei prossimi 30-40 anni di ridurre le emissioni di CO_2 attraverso tecniche come il rimboschimento o la creazione di molti spazi verdi nelle città con parecchi effetti benefici. Tuttavia, la quantità di CO_2 compensata attraverso tali soluzioni naturali di carbonio negativo può essere difficile da misurare e quantificare perché ogni specie vegetale la assorbe in quantità differenti in base all'ambiente in cui cresce. Tra le soluzioni ancora in fase di studio e ricerca che rimuovono la CO_2 dall'atmosfera è presente proprio il biochar. Esso se apportato al suolo promuove attività microbiche, trattiene acqua e nutrienti essenziali, assorbe inquinanti pericolosi, etc. È prevedibile che un giorno le grandi aziende mondiali proporranno idee, fondi appositi per l'innovazione climatica e progetti specifici carbon-negative ed ecologici per l'ambiente. Un tale processo tratterebbe la CO_2 come un prezioso materiale di input, trasformandolo dal più grande problema a un'opportunità di innovazione economica e di salvaguardia ambientale. Nel corso della consultazione di ricerche scientifiche per la stesura di questa tesi, con dati e prove sul campo sono emersi vari pareri contrapposti, come giustamente succede in ambito scientifico sul possibile rischio di usarlo come la sola arma in grado di fare miracoli per il pianeta ma a

mio parere l'idea di utilizzarlo per supportare le produzioni agrarie senza utilizzare concimi di sintesi, ma semplicemente riciclando gli stessi scarti aziendali, non è per niente da sottovalutare e spero in futuro continuino ricerche e progetti a prova della sua validità. Il prossimo passo sarà una produzione agricola più ecologicamente sostenibile, in grado di stare al passo con l'incremento numerico della popolazione mondiale riuscendo a sfamare tutti. Gli sviluppi della tecnologia in questo campo nei prossimi anni spero possano portare nuove idee, ricerche e dati sempre più precisi a supporto del biochar.

Bibliografia:

Adger A, Aggarwal P, ecc., 2007. Climate Change 2007- Gli Impatti dei Cambiamenti Climatici, l'Adattamento e la Vulnerabilità Il Quarto Rapporto del Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico IPCC, Bruxelles, Belgio.

Allen R.M., Laird D.A., 2013. Quantitative prediction of Biochar soil changes by near infrared reflectance spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*: pp.1784–1794.

Arkhipchenko I.A., Salkinoja-Salonen M.S., Karyakina J.N., Tsitko I., 2005. Studio di tre fertilizzanti prodotto da rifiuti agricoli. *Ecologia del suolo applicata*, vol. 30: pp. 126-132.

Bach M., Wilske B., Breuer L., 2016. Current Economic Obstacles to the use of biochar in agriculture and climate change mitigation. *Carbon Management*, vol.7: pp. 3-4, 183-190.

Baronti, S., Alberti, G., Delle Vedove, G., Di Gennaro, F., Fellet, G., Genesio, L., Miglietta, F., Peressotti, A., Vaccari, F.P., 2010. The biochar option to improve plant yields: first results from some field and pot experiments in Italy. Ital. J. Agron. 5, 3–12.

Bedussi F., 2015. Valutazione delle potenzialità del biochar come componente dei substrati di coltivazione, Tesi di Dottorato. Università degli studi di Milano.

Bedussi F., et al., 2014. Biochar, ritorno al passato. Terra è vita, https://terraevita.edagricole.it/nova/nova-frutticoltura-e-orticoltura/biochar-ritorno-al-passato/, consultata il 28/02/2021.

Bellieni M., Brenna S. e col., Il Contributo allo Stoccaggio di Carbonio nei Suoli Agricoli alla mitigazione del Cambiamento Climatico, 2017.

Cerri C. C., Bernoux M., Cerri C. E. P., Feller C., 2004: Carbon cycling and sequestration opportunities in South America: the case of Brazil Soil Use and Management 20, 248–254.

Cha J.S., Park S.H., Jung S.C., Ryu C., Jeon J.K., Shin M.C., Park Y.K., 2016. Biochar production and use: a review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 40: pp. 1-15.

Chan, K.Y., L. Van Zwieten, I. Meszaros, A. Downie, and S. Joseph. 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. Aust. J. Soil Res. 45:629-634. doi:10.1071/SR07109.

Cheng C.H, Lehmann J., Engelhard M., 2008. Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular shape and surface charge along a climatic sequence. Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 72: pp. 1598-1610.

Czekala W., Jezowska A., Chelkowski D., 2018. The Use of Biochar for the Production of Organic Fertilizers. Journal of Ecological Engineering, vol. 20. Poland: pp. 1-8.

Czekała W., Jeżowska A., Chełkowski D., 2019. The Use of Biochar for the Production of Organic Fertilizers. Journal of Ecological Engineering, Volume 20: pp 1–8.

Das S.K., Ghosh G.K., Avasthe R., 2020. Application of biochar in agriculture and environment, and its safety issues. *Biomass Conversion and Biorefinery.*

DECRETO LEGISLATIVO 29 aprile 2010, n.75 - Riordino e revisione della disciplina in materia di fertilizzanti, a norma dell'articolo 13 della legge 7 luglio 2009, n. 88.

Dias B.O., Silva C.A., Higashikawa F.S., Roig A., Sanchez-Monedero M.A. 2010. Use of biochar as a bulking agent for composting manure: effect on degradation and humification of organic matter. *Tecnologia Bioresource*, vol. 101. Spagna: pp. 1239-1246.

Dickinson D., Balduccio L., Buysse J., Ronsse F., van Huylenbroeck G., Prins W., 2014. Analisi costi-benefici dell'utilizzo di biochar per migliorare l'agricoltura cerealicola. *GCB Bioenergy,* vol. 7. Belgio: pp. 850-864.

Ecoscienza, vol. 2. Italia.

El-Naggara A., El-Naggarb A. H., Shaheend S.M., Sarkarg B.,Changi S.X., Tsangj D. C.W., Rinklebee J., Sik Oka Y., 2019. Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, and potential environmental risk: A review. Agriculture, Ecosystems and Environment, vol. 226. Elsevier B.V., Nanjing, Republic of Korea: pp. 458–467.

Farm4trade suit, 2017. L'uso di biochar nell'alimentazione degli animali per ridurre i gas serra. Italia.

Giovambattista Sorrenti, 2016. Il potere fertilizzante del Biochar. Università di Bologna.

Hunt J., DuPonte M., Sato D., Kawabata A., 2010. The Basics of Biochar: A Natural Soil Amendment. *Soil and Crop Management*. College of Tropical Agricolture and Human Resources, University of Hawaii at Manoa.

Hoshi T., 2001: Growth promotion of tea trees by putting bamboo charcoal in soil, *Proceedings of 2001 Internetional Conference on O-Cha (Tea) Culture and Science, Session II (Production), p. 147-150 (2001).*

Ichar, 2009. Biochar Background. Associazione Italiana Biochar. Italia.

Indonesia. Strategie di mitigazione e adattamento per il cambiamento globale, vol. 8: pp. 261-280.

K. M. Bushnaf, S. Puricell, S. Saponaro, D. Werner, 2011. Effect of biochar on the fate of volatile petroleum hydrocarbons in an aerobic sandy soil. Journal of Contaminant Hydrology vol. 126: pp. 208–215.

Jinhua Y., Ren-Kou X., 2011. The forms of alkali in biochar produced by crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology,* vol. 102: pp. 3488–3497.

Jung-Hwan Y., Young-Nam K., Dong-Chun S., Kwon-Rae K., Kye-Hoon K., 2017. Management of Animal Carcass Disposal Sites Using a Biochar Permeable Reactive Barrier and Fast Growth Tree (Populus euramericana): A Field Study in Korea. Department of Environmental Horticulture, University of Seoul, Seoul 02504, Korea.

Laboratorio Caim Group, 2020. Metalli-Inquinanti Tossici Persistenti. https://www.caimgroup.it/metalli/#:~:text=Altri%20metalli%20sono%20prevalentemente%20tossici,Il%20laboratorio%20C.A.I.M, consultato il 10/03/2021.

Laird D.A., Fleming P.D., Davis D.D., Horton R., Wang B., e Karlen D.L., 2010. Impact of biochar amendments on the quality of typical Midwestern farmland. *Geoderma 158*: pp. 443-449.

Laird D.A., Fleming P.D., Karlen D.L., Wang B., Horton R., 2010. Impact of biochar amendments on the quality of typical Midwestern farmland. *Geoderma 158*: pp. 436-442.

Laura C., 2014. Ambiente, Biochar e Agricoltura Sostenibile: sfida fra alti costi e normativa. *LaPresse*,16 Settembre 2014. Torino. Italia.

Lehmann, J., da Silva, J.P., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., Glaser, B., 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central Amazon Basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. Plant Soil 249, 343–357.

Lehmann J., 2007. A handful of carbon. *Nature*, vol.447: pp. 143-144.

Lehmann J, Joseph S., 2009. Biochar for environmental management: an introduction. Biochar for Environmental Management. Science and Technology. UK: Earthscan; p. 33-46.

Lehmann J., Rillig M. C., Thies J., Masiello C. A., Hockaday W. C., Crowley D., 2011. Effects of Biochar on Soil Biota - A Review. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 43: pp.1812-1836.

Maestri E, Marmiroli N e col.. 2020. Rifiuti o residui: valorizzazione energetica ed agronomica del biochar. Università di Parma. Italia.

Malińska K. 2012. Biochar - a response to current environmental issues (in polish). Inżynieria i Ochrona środowiska, 4, 387-403.

Mohan D, Pittman CU, Steele PH, 2006. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. Energy Fuels.;20:848– 889.

Marisi G., 2013. Sintesi e proprietà di biochar da biomasse residuali. Tesi di laurea magistrale in Analisi Chimica Della Qualità Ambientale. Università degli studi di Bologna.

Miliotti E., Chiaramonti D., Casini D., 2018. Biochar: materie prime, processi e caratteristiche del prodotto. Campus lab, Torino, Italia.

Mohan D, Rajput S, Singh VK, Steele PH, Pittman Jr CU. Modeling and evaluation of chromium remediation from water using low cost bio-char, a green adsorbent. J Hazard. Mater. 2011;188:319–333. Doi: https://doi. org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.127.

Montanarella L., Lugato E., 2013. The Application of Biochar in the EU: Challenges and Opportunities. *Agronomy 3*. European Commission, DG Joint Research Centre, Ispra 21020, Italy: pp. 462-473.

Mukherjee A., Lal A.,2014. The biochar dilemma. *Soil Res*, vol. 52: pp. 217-230.

Nishio M., 1996: Microbial fertilizers in japan, *FFTC-Extension Bulletins 1–12. National Institute of Agro-Environmental Sciences, Ibaraki, Japan, http://www.agnet.org/library/eb/430/.*

Okimori Y., Ogawa M., Takahashi F., 2003. CO2 emission reduction potential by carbonizing biomass waste from industrial tree plantations in South Sumatra, Indonesia. Mitigation and adaptation strategies for global change, vol. 8: pp. 261-280.

Ouni Y., Ghnaya T., Montemurro F., Abdelly Ch. Lakhdar A., 2014. The role of humic substances in mitigating the harmful effects of soil salinity and improving plant productivity. *International Journal of Plant Production*, vol. 8: pp. 353-374.

Pozzi A., Valagussa M., 2020. La normativa sul Biochar e le prospettive d'uso. *Ecoscienza*, vol.2. Italia.

Pugliese M., Gullino M.L., Garibaldi A., 2015. Il progetto Refertil: standardizzazione di compost e biochar e risultati in Piemonte. Centro di Competenza per l'innovazione in Campo Agroambientale Agroinnova, Università degli Studi di Torino, Grugliasco, Torino.

Pugliese G., 2016. Biochar, oltre la torba. Mensile di Orticoltura e Floricoltura Professionale. https://coltureprotette.edagricole.it/orticoltura/biochar-oltre-la-torba/

Gazzetta Ufficiale dell'Unione europea-REGOLAMENTO (UE) 2019/1009 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO, 2019.

Rondon, M., J. Lehmann, J. Ramírez, and M. Hurtado. 2007. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris L.*) increases with biochar additions. Biol. Fertil. Soils 43: 699-708.doi: 10.1007/s00374-006-0152-z.

Rosato M.A., 2017. Risparmiare acqua e fertilizzanti con il biochar. *Agronotizie.* https://agronotizie.imagelinenetwork.com/fertilizzanti/2017/03/17/risparmiare-acqua-e-fertilizzanti-con-il-biochar/53350, consultato il 17/03/2021.

Rosato M.A., 2019. La dicotomia del biochar. Agronotizie. https://agronotizie.imagelinenetwork.com/bio-energie-rinnovabili/2019/07/10/la-dicotomia-del-biochar/63704, consultato il 17/03/2021.

Saifullah, Dahlawi S., Naeem A., Rengel Z., Naidu R., 2018. Biochar application for the remediation of soils affected by salt: challenges and opportunities. *Science of The Total Environment*, vol. 625: pp. 320-335.

Sanchez-Reinoso A.D., Avila-Pedraza E.A., Restrepo-Diaz H., 2020. Use Of Biochar In Agriculture. Acta biologica Colombiana. Universidad Nacional de Colombia: pp.327-338.

Singh S., Kumar V., 1, Dhanjal D.S., Datta S, Bhatia D, Dhiman J., Samuel J., Prasad R., Singh J., 2020. A sustainable paradigm of sewage sludge biochar: Valorization, opportunities, challenges and future prospects. Journal of Cleaner Production, vol. 269, 122259, India.

Sohi S.P., Krull E., Lopez-Capel E., Bol R., 2012. A review of biochar and its use and function in soil. Adv. Agron. 105.

Steinbeiss et al., 2009. Effects of the biochar amendment on the carbon balance in the soil and on the microbial activity of the soul. Soil biology and biochemistry, vol. 41: pp. 1301-1310.

Tagliapetra M., 2017. EIPP, il portale europeo per gli investimenti un'opportunità anche per l'agricoltura? *PianetaPSR*, numero 64. Italia.

Tumminelli D.A., 2011. Proprietà nutritive del biochar e risposte delle colture prodotte. Tesi di Dottorato. Università degli studi di Palermo.

Vaccari F.P., Baronti S, Lugato E. et al. (2011) Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. European Journal of Agronomy, 34, 231–238.

Verheijen, F.G.A. 2009, Biochar application to soils-a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. In: EUR 24099 EN. Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Volta A., Ghegardi G., Villani G., Marletto V., 2020. Il Biochar è importante per il sequestro del carbonio.

Woolf D., Amonette J.D., Street-Perrott F.A. et al., 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nat. Commun.1*, articolo 56.

Yamato M, Okimori Y, Wibowo IF, Ashori S, Ogawa M (2006) Effects of the application of charred bark of Acacia mangium on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia. Soil Sci Plant Nutr 52:489-495.

Zhang D., Pan G., Wu G., Kibue G.W., Li L., Zhang X., Zheng J., Zheng J., Cheng K., Joseph S., Liu X., 2016. Biochar helps improve corn productivity and reduce greenhouse gas emissions under balanced fertilization in a rain-fueled low-fertility inceptisol. *Chemosphere*, vol.142: pp.106-113.

Zhang D. et al., 2016. Is current biochar research addressing global soil constraints for sustainable agriculture? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 226. Elsevier B.V., Nanjing, China: pp. 25–32.