

BIOCHAR: PRESENTE E FUTURO

1. INTRODUZIONE

Il biochar è un prodotto carbonifero stabile derivante da sottoprodotti, rifiuti o biomasse di origine vegetale e/o animale con applicazioni in agricoltura sostenibile e conservativa. D'accordo con la definizione della European Biochar Certificate il biochar deve essere considerato come un "materiale eterogeneo ricco di sistemi aromatici e minerali. Esso si deve ottenere per pirolisi di biomassa prodotta in modo sostenibile in condizioni controllate e con tecnologia pulita; deve avere proprietà per cui esso può essere usato per tutti gli scopi che non prevedano una rapida mineralizzazione in anidride carbonica e deve conservare delle caratteristiche che rendano possibile anche il suo uso come ammendante dei suoli".

Il biochar è prodotto in condizioni termiche riduttive. Il biochar deve essere ben strutturato e di qualità controllata. È utilizzato per il miglioramento delle proprietà fisiche e/o chimiche e/o biologiche del suolo e/o l'attività del suolo, ma non solo; infatti, può essere utilizzato anche in edilizia (come materiale per l'isolamento) o per la decontaminazione ambientale.

Un'ampia gamma di materie prime organiche possono essere impiegate per la produzione di biochar, soggetti a requisiti di sostenibilità quali: la non competizione con la produzione e la fornitura di alimenti per l'uomo, di mangimi per gli animali e di prodotti per la nutrizione delle piante; prodotti a partire da fonti e approvvigionamenti sostenibili dal punto di vista ambientale e dell'impatto sul clima

2. METODO DI PREPARAZIONE

Diversi metodi sono stati utilizzati per la preparazione del biochar. La tabella 1 riassume alcuni dei principali metodi di preparazione, delle condizioni di preparazione e della loro resa di biochar.

Preparation methods	Temperature (°C)	Heating rate	Reaction time	Yield (%)		
				Solid	Liquid	Gas
Slow pyrolysis	<700	Slow	Hours	35	30	35
Fast pyrolysis	<1000	Fast	Seconds	10	70	20
Flash pyrolysis	775–1025	Faster	SECONDS	10–15	70–80	5–20
Hydro-carbonization	<350	Slow	Minutes–hours	50–80	–	–
Gasification	700–1500	Faster	Seconds–minutes	10	5	85

Tabella 1

La pirolisi è il metodo più importante per la produzione del biochar. Il processo di pirolisi viene generalmente eseguito in assenza di ossigeno in un intervallo di temperatura compreso tra 200 e 1000 °C, ed è classificato in pirolisi lenta, flash e veloce in funzione del tempo di permanenza nella camera di pirolisi. Come mostrato nella Tabella 1, la resa maggiore di prodotto solido (35%) la si ottiene mediante pirolisi lenta, che pertanto può essere assunta come il principale metodo di preparazione del biochar tra le tre tecniche di pirolisi.

La pirolisi flash, quella veloce, così come anche la gassificazione e l'essiccazione possiedono una resa di biochar estremamente ridotta e vengono tipicamente utilizzate per la produzione di composti gassosi.

La carbonizzazione idrotermale (HTC) è un'altra importante tecnica per la preparazione del biochar. Il biochar formato da HTC

è più favorevole per l'assorbimento di inquinanti in mezzi acquosi, inoltre non si ha la produzione di sostanze tossiche da questo processo. Tuttavia, le principali limitazioni associate a questo metodo sono legate all'elevato costo operativo ed ai tempi di sintesi.

3. FATTORI CHE INFLUISCONO SULLE PROPRIETA' DEL BIOCHAR

Le prestazioni del biochar sono influenzate da una serie di fattori. Un primo fattore che influisce sulla proprietà del biochar sono le condizioni operative utilizzate per la sua sintesi. Il tipo di pirolisi (lenta, veloce o flash), la velocità di riscaldamento, la durata della pirolisi possono influenzare drasticamente la qualità del biochar risultante.

Le basse temperature di pirolisi (< 500 °C) favoriscono la carbonizzazione parziale, producendo biochar con pori più piccoli e superficie ridotta, mentre aumenta la presenza di gruppi funzionali contenenti ossigeno, rendendolo ideale per la rimozione di inquinanti inorganici. Al contrario, il biochar prodotto ad alte temperature (> 500 °C) potrebbe essere applicato per l'adsorbimento di sostanze organiche, a causa della maggiore superficie specifica, che lo rende altamente adatto per il bio-risanamento ambientale dell'inquinamento organico e per le applicazioni di trattamento delle acque reflue, specifico per la rimozione di composti tossici, al posto del carbone attivo.

Il tempo di residenza e quantità di biochar utilizzato sono altri due fattori che influiscono in modo significativo sulla capacità d'azione del biochar.

Uno dei fattori più importanti che influenza le proprietà del biochar sono però i materiali di partenza da cui lo otteniamo. Per produrre biochar possono essere utilizzate diverse biomasse che presentano diverse proprietà fisiche, chimiche e strutturali.

La presenza e l'assenza di minerali aventi all'interno CO_3^{2-} , PO_4^{3-} influiscono sulla capacità di adsorbimento del biochar ottenuto, poiché questi minerali possono contribuire alla formazione di un ulteriore sito di assorbimento attivo. Inoltre, influisce sulla tipologia di gruppi funzionali superficiali presenti (idrossile, metile, carbonile e carbossile), sul contenuto di carbonio organico, la porosità e la superficie specifica.

Teoricamente, il biochar può essere preparato da qualsiasi tipo di biomassa.

Porto ad esempio alcune materie prime e la destinazione d'uso del biochar ottenuto:

- per la rimozione di composti organici che distruggono il sistema endocrino da soluzioni acquose è stato utilizzato un biochar preparato a partire dalla biomassa vegetale.
- La buccia di riso è stata utilizzata per la produzione di biochar con la capacità di rimuovere due coloranti, vale a dire safranina e blu di metilene
- Il biochar ottenuto da segatura può essere utilizzato per l'abbattimento di molti coloranti, metalli tossici e sali dalle acque reflue. Questo materiale contiene molti composti (come cellulosa, lignina ed emicellulosa) e gruppi polifenolici, che svolgono un ruolo fondamentale nel legarsi ai composti organici attraverso vari meccanismi, tra cui lo scambio ionico, la complessazione e il legame idrogeno
- A partire dalla buccia d'arancia otteniamo un biochar in grado di rimuovere i principali coloranti presenti all'interno degli effluenti industriali e domestici.
- Una miscela di fanghi di depurazione e microalghe permette l'ottenimento di un biochar di qualità superiore a quello ottenibile dalla pirolisi dei soli fanghi di depurazione, con il doppio vantaggio di avere il recupero di un materiale il cui

costo di smaltimento tradizionale è estremamente elevato e l'ottenimento di un prodotto destinabile a molteplici utilizzi, quali biocombustibile, ammendante, materiale per il biorisanamento.

4. UTILIZZI

Il biochar aumenta il pH del suolo, la capacità di scambio cationico e la quantità di fosforo assimilabile per le piante, mentre riduce la lisciviazione dei nitrati e dell'ammonio, aumenta la quantità di acqua disponibile per le piante e la densità apparente. Contribuisce infine a incrementare la produttività delle colture agrarie.

Alla luce di questi effetti generati, al momento viene utilizzato principalmente come ammendante per i suoli.

Utilizzi alternativi e potenziali tali vengono discussi qui di seguito.

4.1 Trattamento delle acque reflue

Il meccanismo di adsorbimento del biochar per rimuovere gli inquinanti organici e inorganici può essere basato sull'interazione elettrostatica, lo scambio ionico, il riempimento dei pori e la precipitazione. Ciò dipende dalle caratteristiche fisico-chimiche del biochar come dosaggio, temperatura di pirolisi, pH del mezzo/effluente.

È utilizzato principalmente per l'adsorbimento di metalli potenzialmente tossici, inquinanti organici, ma può essere utilizzato anche per l'adsorbimento di fosforo e azoto.

Il biochar ha un'elevata affinità verso gli inquinanti organici. La tabella 2 riassume le prestazioni dei diversi biochar nella rimozione di inquinanti organici come pesticidi, antibiotici, erbicidi e coloranti presenti nelle acque reflue.

Type of biochar	pH	Temp. (°C)	Targeted species	Concentration range (mg/L)	Langmuir adsorption capacity (mg/g)	References
P-(acrylamide)-wood biochar	–	25	Phenol	5–50	23.14	Karakoyun et al. (2011)
Rice husk biochar	–	40	Phenol	100–15,000	409.8	Liu et al. (2011)
Hardwood (Laurel oak, Quercus)	–	–	Humic acid	0–13	–	Mukherjee and Zimmerman, (2013)
Orange peel biochar	–	25	Naphthalene	18	–	Zhou et al. (2014)
Wood char	7	25	Pyrene	0.002–0.12	–	Peng et al. (2011)
Pine needle biochar	–	–	m-dinitrobenzene	0.02–1.0	–	Chen and Chen, (2009)
Peanut straw char	5–9	25	methyl violet	40–816	104.61	Xu et al. (2011)
kenaf fibre char	8.5	30	methylene blue	50–200	18.18	Xu et al. (2011)
Rice straw-derived char	5	30	Malachite green	25–300	128.14	Han et al. (2015)
Bamboo biochar	1	40	Acid black 172	50–500	358.14	Han et al. (2015)
Sewage sludge/			2,4-Dichlorophenol	100% removal	–	Kalderis et al. (2017)
Corn straw	5	22	Bisphenol	500	–	Zhao et al. (2017)
Dissolved black carbon biochar (DBC)	5	25	Naphthalene	91	–	Fu et al. (2018)
Miscanthus-derived biochar	5	30	Naphthalene	4–35	–	Kim and Hyun (2018)
Bamboo hydrochars	1	35	Congo red	100	–	Li et al. (2018)
Sugarcane bagasse biochar	7	25	Malachite green	3000	–	Vyavahare et al. (2018)
Corn straw	5	22	Atrazine	70	–	Zhang et al. (2018)
Macadamia nutshells	7	30	Phenanthrene	60	–	Yang et al. (2018)

Tabella 2

Il biochar ha un'elevata capacità di adsorbire inquinanti inorganici come i metalli pesanti attraverso diversi meccanismi di interazione come l'adsorbimento fisico, la precipitazione, lo scambio ionico e l'attrazione elettrostatica. Le capacità di adsorbimento di vari biochar per i metalli pesanti sono riportate nella Tabella 3.

Type of biochar	pH	Temp. (°C)	Targeted species	Con. range (mg/L)	Langmuir adsorption capacity (mg/g)	References
Pinewood char	5	25	Pb ²⁺	2–1036	4.13	Mohan et al. (2011)
Celery	5	25	Pb ²⁺	270–305		Zhang et al. (2017)
Peanut straw char	4.5	25	Cu ²⁺	6–318	12.52	Mubarak et al. (2013a, b)
Soybean straw char	4.5	25	Cu ²⁺	158–954	33	Tong et al. (2011)
Rice husks	5	24	Cu ²⁺	1–20	3.49	Pellera et al. (2012)
Pig manure biochar	5	20	Zn ²⁺	0.065–0.2	62.13	Kołodzyńska et al. (2012)
Cow manure biochar	5	20	Zn ²⁺	0.06–0.2	58.11	Kołodzyńska et al. (2012)
Dairy manure biochar	–	–	Cu ²⁺	0–318	48.11	Xu et al. (2013)
Dairy manure biochar	–	–	Zn ²⁺	0–327	32.95	Xu et al. (2013)
Dairy manure biochar	–	–	Cd ²⁺	0–6575	32.03	Xu et al. (2013)
Oak Wood char	2	25	Cr ⁶⁺	1–100	3.03	Mohan et al. (2014)
Sugar beet tailing biochar	2	22	Cr ⁶⁺	50–800	123	Dong et al. (2011)
Coconut coir derived char	3	25	Cr ⁶⁺	10–500	–	Kim et al. (2012)
Pine needle biochar	6	25	U ⁶⁺	5–30	2.12	Park et al. (2011)
Corn straw	5	22	Hg ²⁺	0–139	–	Wang et al. (2018)
Pinewood biochar	2	25	F ⁻	1–100	7.66	Ahmad et al. (2012)
Digested sugar beet tailing biochar	7	22	PO ₄ ³⁻	15–640	133.085	Yao et al. (2011a, b)
undigested sugar beet tailings	7	22	PO ₄ ³⁻	61.5	–	Yao et al. (2011a, b)
Orange peel biochar	–	25	PO ₄ ³⁻	0–12	0.007	Chen et al. (2011)
Banana peels	5	25	Cu ²⁺	60–80	38.2	Ahmad and Gao (2018)
Banana peels	6	22	Pb ²⁺	70–250	87.5	Ahmed et al. (2018)
Corn straw	5	22	As ³⁺	0–7	–	He et al. (2018)
Corn straw	5	22	Hg ²⁺	140	5.03	Wang et al. (2018)

Tabella 3

Il biochar è stato anche testato per rimuovere l'azoto e il fosforo dalle acque reflue industriali per ridurre l'impatto dell'eutrofizzazione sull'ecosistema.

4.2 IPA nei sedimenti

Gli IPA sono composti pericolosi derivati dal petrolio rilasciati nell'ambiente principalmente da attività antropogeniche.

Le tecnologie biologiche, fisico-chimiche e di bonifica termica sono state applicate per far fronte al problema dei sedimenti contaminati da IPA e sono tutte associate a diversi inconvenienti come rispettivamente la bassa efficienza, il rilascio di sottoprodotti tossici (es. IPA ossigenati) e costi elevati (es. a causa delle alte temperature di esercizio).

L'applicazione di assorbenti carboniosi come il biochar è particolarmente efficace, economica e rispettosa dell'ambiente per la bonifica di sedimenti contaminati da IPA.

Biochar è un materiale adatto per la bonifica di siti contaminati da contaminanti organici (es. IPA) grazie alle sue strutture porose, all'elevata superficie e ai diversi gruppi funzionali.

Le interazioni tra IPA e biochar durante l'assorbimento possono essere classificate come idrofobiche (es. partizionamento, forze di Van der Waals) e specifiche.

L'interazione idrofobica è un meccanismo entropico che può verificarsi in due fasi principali: a) la prima fase in cui l'IPA è partizionato nel dominio idrofobico del biochar a causa del coefficiente di partizione; b) la seconda fase in cui l'IPA viene debolmente assorbito sulla superficie del biochar tramite le forze di Van der Waals.

L'interazione attraverso il partizionamento degli IPA e le forze di Van der Waals si verifica principalmente con biochar pirolizzato a bassa temperatura.

È stato ampiamente accettato che il desorbimento degli IPA dal biochar è limitato a causa dei forti meccanismi di assorbimento e della presenza di micro pori che possono fungere da trappola fisica per gli IPA assorbiti. Tuttavia, i cambiamenti nelle condizioni

ambientali (es. pH), così come la degradazione abiotica o biologica del biochar, possono favorire il desorbimento degli IPA dal biochar al sedimento, evidenziando l'importanza di indagare questo aspetto nella ricerca futura.

È importante notare che anche altri fattori, tra cui il tipo di sedimento, il livello di contaminazione, il tempo di bonifica, la dose di biochar nel sedimento (p/p) e la dimensione delle particelle, svolgono un ruolo durante l'assorbimento degli IPA.

4.3 Implementazione della digestione anaerobica

La digestione anaerobica (DA) è un processo microbico che trasforma i materiali organici in biogas e liquame digerito. Il processo DA crea bioenergia e può ridurre considerevolmente le emissioni di gas ad effetto serra (GHS) e la domanda di combustibili fossili.

La produzione di biogas tramite il processo di DA da rifiuti alimentari è una tecnologia matura, ma esiste ancora un problema di stabilità e ottimizzazione del sistema, oltre ad un basso tasso di produzione.

L'applicazione di biochar ha il potenziale per migliorare il processo di DA di rifiuti alimentari:

1. Contrastando gli inibitori di processo (ammoniaca, VFA, batteri solfo-riduttori)

L'entità dell'inibizione dell'ammoniaca dipende dalla concentrazione di azoto nel substrato nonché dal pH e dalla temperatura di esercizio del processo di DA. Un'elevata concentrazione di ammoniaca libera inibisce la metanogenesi che si traduce nell'accumulo di VFA e in una bassa resa di metano. Tra le molte strategie di contrasto all'inibizione dell'ammoniaca potenzialmente vi è

l'ottimizzazione della materia prima mediante l'aggiunta di biochar. Questa potrebbe essere la tecnica più semplice ed economica per ridurre al minimo la tossicità e la concentrazione di ammoniaca.

Un altro fattore principale che inibisce la DA nell'ultima fase del processo è la degradazione degli acidi organici e dei VFA in acido acetico. Da un punto di vista operativo, l'inibizione indotta dal substrato è causata da uno squilibrio tra i microrganismi acidogeni e metanogeni, che porta a brusche fluttuazioni dei livelli di pH e delle concentrazioni di VFA.

Molti ricercatori hanno riportato nei loro studi che l'inibizione potrebbe essere alleviata aggiungendo biochar a causa della sua natura alcalina, che può aumentare la generazione di CH_4 bilanciando il pH dalla conversione di CO_2 a HCO^{-3} .

Il processo di DA può anche essere inibito dalla presenza di batteri solfato-riduttori che competono con i microrganismi che formano metano per le risorse disponibili. Inoltre, un'elevata concentrazione di solfuro è anche tossica per vari gruppi batterici. La presenza di un alto contenuto di cationi (come calcio, sodio, potassio e magnesio) nel rifiuto alimentare può anche inibire il processo di DA.

2. Migliorando la qualità del digestato attraverso la ritenzione di nutrienti

Il biochar ha elevate concentrazioni di sostanze nutritive. Per ottenere rese elevate di biogas/metano in un sistema di DA, si desidera mantenere concentrazioni ottimali di nutrienti all'interno del sistema, per ottenere una crescita e un'attività batterica ottimale.

3. Contribuendo alla capacità tampone del sistema

4. Creando una superficie per la colonizzazione di microrganismi metanogeni

L'immobilizzazione del microrganismo può essere realizzata naturalmente mediante adsorbimento sulla superficie dei pori del biochar o mediante intrappolamento.

5. Ridurre la fase di latenza microbica al suo valore ottimale

4.4 Cambiamento climatico

Il biochar contiene tra l'80 ed il 90% di carbonio. Quindi ogni tonnellata di biochar si genera da una quantità di anidride carbonica (CO₂) atmosferica pari a circa tre volte il suo peso. Se immettiamo nel suolo una tonnellata di biochar, si sottraggono 3 tonnellate di CO₂ dall'atmosfera.

Il biochar, grazie alla sua recalcitranza alla degradazione quando aggiunto al suolo rimane quasi interamente inalterato per centinaia/migliaia di anni, permettendo quindi il sequestro della CO₂.

Uno studio ha mostrato come gli effetti del biochar sulle emissioni di CO₂, N₂O e CH₄ (principali gas ad effetto serra GHG) da parte del suolo siano considerevolmente dipendenti dalle proprietà fisico-chimiche del biochar (rapporto pH e C:N) e del suolo (pH, classe strutturale e rapporto C:N).

Ad esempio, è stato osservato come l'utilizzo di biochar in suoli a tessitura fine abbia comportato significativi incrementi nell'emissione di CO₂; tuttavia, all'interno dei terreni grossolani ha ridotto significativamente le emissioni di N₂O e CH₄.

La materia prima da cui deriva il biochar è di estrema importanza per gli effetti che può dare per quanto riguarda l'emissione dei GHG. È stato infatti osservato come il biochar derivato da materiale lignocellulosico abbia comportato un incremento delle emissioni di CO₂. Allo stesso modo, il biochar derivato dal letame ha aumentato significativamente le emissioni di N₂O, sebbene abbia mostrato un forte potenziale di mitigazione nei confronti della CO₂. Nel caso del CH₄, il biochar derivato dal legno ha mostrato il più alto potenziale di mitigazione.

L'elevata temperatura di pirolisi (>600 °C) è stato un altro indicatore chiave di prestazione del biochar, che ha dimostrato un forte effetto di mitigazione sulle emissioni di CO₂ e CH₄, sebbene la riduzione delle emissioni di N₂O fosse principalmente dovuta al biochar prodotto a bassa temperatura di pirolisi (≤ 500 °C).

Pertanto, questa studio suggerisce che la scelta della materia prima, la temperatura di pirolisi e il tasso di applicazione appropriato (valutato in ≤ 30 t/ha), dovrebbero essere pianificate attentamente al fine di mitigare le emissioni di GHG dai suoli agricoli.

5. CRITICITA'

Oltre agli effetti positivi del biochar, sono stati osservati anche effetti avversi: uno dei più frequenti è la fitotossicità.

Durante la pirolisi può verificarsi la ricondensazione di liquidi e gas di pirolisi. Questi vengono quindi intrappolati nei pori del biochar o adsorbiti sulla superficie delle particelle e il biochar stesso può diventare un vettore di inquinanti.

Il numero di composti organici legati al biochar dipende fortemente dalle condizioni e dalla tecnologia di pirolisi.

La natura della materia organica disciolta derivata dal biochar influisce fortemente su numerosi processi nel suolo, inoltre, un altro notevole rischio agroambientale e per la salute umana è la presenza di radicali liberi persistenti ambientali (EPFR), che si evolvono durante la pirolisi della biomassa.

Tra i composti organici, i fenoli e gli IPA hanno l'influenza più notevole sul processo di germinazione dei semi.

I fenoli, insieme ad acidi organici, chetoni, aldeidi, alcoli, furani e IPA sono prodotti durante la pirolisi e costituiscono il componente principale del liquido pirolitico.

La fitotossicità dei composti fenolici è correlata alla composizione chimica; infatti, sono in grado di interagire con i nutrienti, limitando così la biodisponibilità di azoto e fosforo.

Pertanto, è essenziale stabilire criteri specifici che riducano al minimo i potenziali rischi per la salute dell'ambiente e dell'uomo.

6. NORMAZIONE

A livello nazionale, a partire dal 2015, il biochar è incluso nella lista degli ammendanti utilizzabili nell'agricoltura tradizionale (All. 2 del D.Lgs. 75/2010), ma non in quella biologica nonostante il Regolamento di Esecuzione (UE) 2019/2164 della Commissione (17 dicembre 2019), modificando il Regolamento (CE) 889/2008, lo abbia ufficialmente incluso nell'elenco degli ammendanti utilizzabili in agricoltura biologica (autorizzazione a norma del regolamento CE 834/2007).

Le nuova norma Europea sui fertilizzanti (Regolamento UE 2019/1009 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 5 giugno 2019), in vigore dal luglio 2019, sarà in applicazione a decorrere dal 16 luglio 2022, con contestuale abrogazione del Regolamento CE 2003/2003 relativo ai concimi minerali a marchio CE.

Il nuovo regolamento norma tutti i fertilizzanti a marchio CE utilizzabili in agricoltura (classificati come PFC – Categorie Funzionali di Prodotti), che sono prodotti a partire da definite categorie di materiali costituenti (CMC).

Il biochar, non incluso nella prima stesura del Regolamento, è in fase di inserimento come “CMC 14 – materiali da pirolisi o gassificazione”.

A livello europeo, inoltre è stato definito il certificato europeo del biochar (EBC) al fine di garantire uno standard di qualità affidabile sulla base di processi ben studiati, applicabili, legalmente supportati ed economicamente sostenibili.

Attualmente, il certificato europeo biochar è uno standard industriale volontario.

7. CONCLUSIONI

È stato dimostrato che il biochar è un materiale promettente per il trattamento delle acque e il mantenimento e la bonifica della fertilità del suolo agricolo. Tuttavia, gli studi dedicati al contributo del biochar alla rimozione dei contaminanti dalle acque reflue, all'influenza di diverse fonti di alimentazione sulla qualità del biochar e ai fattori fisico-chimici che influenzano l'efficienza di rimozione dei contaminanti rimangono in una fase iniziale.

Pertanto, le seguenti aree di ricerca dovrebbero essere considerate nel prossimo futuro:

1. Stabilire il modello per il meccanismo di adsorbimento del biochar. È fondamentale modificare la funzionalità della superficie e la porosità a seconda dell'applicazione. Per fare ciò, processi come l'amminazione, la solfonazione, l'ossidazione superficiale e la modifica della struttura dei pori possono portare alla preparazione biochar selettivi.

2. Sviluppo di metodi per migliorare l'efficienza di adsorbimento.
3. Il biochar attivato con sostanze chimiche ha mostrato una maggiore capacità di rimozione degli inquinanti rispetto a quelli non attivati. Tuttavia, i meccanismi di assorbimento necessitano di ulteriori indagini.
4. La standardizzazione e la certificazione delle caratteristiche dei prodotti finali sono le chiavi per un'implementazione di successo nell'economia circolare.

In generale, in queste aree sono stati condotti solo pochi studi, per cui sono necessarie ulteriori ricerche su temi legati al rapporto tra materie prime, parametri di lavorazione, nonché sulla rigenerazione del biochar per evitare rischi per l'ambiente.

8. BIBLIOGRAFIA

- Shakoob, A., Arif, M. S., Shahzad, S. M., Farooq, T. H., Ashraf, F., Altaf, M. M., . . . Ashraf, M. (2021). Does biochar accelerate the mitigation of greenhouse gaseous emissions from agricultural soil? - A global meta-analysis. *Environmental Research*, 202 doi:10.1016/j.envres.2021.111789
- Ambaye, T. G., Vaccari, M., van Hullebusch, E. D., Amrane, A., & Rtimi, S. (2021). Mechanisms and adsorption capacities of biochar for the removal of organic and inorganic pollutants from industrial wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(10), 3273-3294. doi:10.1007/s13762-020-03060-w
- Ambaye, T. G., Rene, E. R., Nizami, A. -, Dupont, C., Vaccari, M., & van Hullebusch, E. D. (2021). Beneficial role of biochar addition on the anaerobic digestion of food waste: A systematic and critical review of the operational parameters and mechanisms. *Journal of Environmental Management*, 290 doi:10.1016/j.jenvman.2021.112537
- Bolognesi, S., Bernardi, G., Callegari, A., Dondi, D., & Capodaglio, A. G. (2021). Biochar production from sewage sludge and microalgae mixtures: Properties, sustainability and possible role in circular economy. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(2), 289-299. doi:10.1007/s13399-019-00572-5
- Ruzickova, J., Koval, S., Raclavska, H., Kucbel, M., Svedova, B., Raclavsky, K., . . . Scala, F. (2021). A comprehensive assessment of potential hazard caused by organic compounds in biochar for agricultural use. *Journal of Hazardous Materials*, 403 doi:10.1016/j.jhazmat.2020.123644
- Bianco, F., Race, M., Papirio, S., Oleszczuk, P., & Esposito, G. (2021). The addition of biochar as a sustainable strategy for the remediation of PAH-contaminated sediments. *Chemosphere*, 263 doi:10.1016/j.chemosphere.2020.128274