

Impiego del biochar come ammendante: effetti sul ciclo dell'azoto e tolleranza a condizioni di stress idrico in piante di vite allevate in vaso

Marta Petrillo – Libera Università di Bolzano

Damiano Zanotelli – Libera Università di Bolzano

Valentina Lucchetta – Centro di Sperimentazione Laimburg

Agnese Aguzzoni – Libera Università di Bolzano

Massimo Tagliavini – Libera Università di Bolzano

Carlo Andreotti – Libera Università di Bolzano

Abstract

L'impiego di biochar come ammendante dei suoli rappresenta un'interessante pratica di mitigazione ambientale (sequestro stabile di carbonio nel suolo), nonché di potenziale miglioramento della fertilità chimico-fisica dei suoli trattati. Allo stato attuale le evidenze scientifiche sulle proprietà agronomiche dell'ammendante biochar non sono però del tutto acquisite e, in ogni caso, appaiono fortemente influenzate da vari aspetti riconducibili alla natura del biochar impiegato, alle caratteristiche del processo di produzione, nonché alle proprietà di partenza del terreno ammendato. In questo capitolo si riportano i principali risultati ottenuti da una serie di esperimenti condotti in ambiente controllato e su piante di vite in vaso volti a determinare: i) l'effetto dell'impiego di biochar come ammendante sul ciclo dell'azoto interno alla pianta di vite; ii) le eventuali modifiche introdotte dall'uso del biochar sulle caratteristiche idriche dei terreni e sui potenziali aumenti o riduzioni delle perdite di azoto per lisciviazione; iii) la condizione fisiologica di piante di vite in crescita su substrato contenente biochar sottoposte a livelli crescenti di stress idrico. Per quanto attiene al ciclo interno alla pianta dell'azoto, l'impiego di un fertilizzante azotato marcato con l'isotopo ^{15}N ha permesso di evidenziare come la presenza di biochar nel substrato non modifichi in modo significativo l'assorbimento ed allocazione nei vari organi della pianta di vite dell'azoto. Il biochar modifica invece le capacità di ritenzione idrica del suolo, determinando un positivo aumento dell'acqua disponibile per le piante. In virtù della migliore disponibilità idrica,

in condizioni di stress idrico indotto, le piante di vite in crescita su substrato ammendato con biochar hanno mantenuto migliori performance fisiologiche come indicato da livelli di potenziale idrico fogliare meno negativi e da una maggiore attività fotosintetica. L'aggiunta di biochar al substrato come ammendante, quando non "attivato" con compost, aumenta le quantità di azoto perse a seguito di lisciviazione. Questo risultato appare una conseguenza dei livelli di umidità più elevati mantenuti nel suolo conseguenti all'apporto di biochar e dei successivi maggiori volumi di soluzione lisciviata raccolta a seguito di abbondanti apporti idrici. In conclusione, gli esiti di alcune prove condotte su piante di vite in vaso hanno consentito di evidenziare come, in condizioni di scarsi apporti idrici al suolo, il biochar possa aumentarne la riserva di acqua disponibile per le piante, riducendone quindi il livello di stress idrico. Particolare attenzione deve essere invece posta in suoli con umidità elevata alla gestione delle fertilizzazioni azotate in quanto la presenza di biochar nel terreno può comportare un aumento delle perdite per lisciviazione.

1. Impiego del biochar come ammendante: effetti sulla fertilità complessiva dei terreni e sulle *performance* di crescita delle piante

L'impiego del biochar come ammendante del suolo ha attratto negli ultimi anni una notevole attenzione soprattutto per effetto della molteplicità dei risultati che da essa si possono ottenere. Nell'attuale scenario di cambiamento climatico e riscaldamento globale, il biochar rappresenta innanzitutto un interessante strumento di mitigazione ambientale ottenuta tramite il sequestro stabile del carbonio nel terreno e, conseguentemente, il significativo rallentamento del suo ritorno in atmosfera sotto forma di CO₂ (Lehmann, 2007). Inoltre, l'aggiunta di biochar ai suoli agrari ne modifica le caratteristiche chimico-fisiche e biologiche (e dunque la fertilità complessiva), in un modo che dipende dalla natura e dalla quantità del biochar impiegato (Novak et al., 2009). Diversi studi hanno considerato in particolare l'effetto del biochar sulle perdite per lisciviazione degli elementi minerali. Le evidenze di questi esperimenti non sono del tutto concordi. Ad esempio, alcune prove hanno evidenziato che l'impiego di biochar può ridurre significativamente le perdite per lisciviazione dell'azoto (soprattutto nitrico) e di altri elementi a causa sia di

una riduzione del volume di lisciviato, che di una minore concentrazione della soluzione raccolta (Lehmann et al., 2003). La significatività di tale effetto sembra però variare in funzione del tempo intercorso fra l'interramento del biochar e le misure analitiche sul lisciviato (Ventura et al., 2012), nonché in funzione delle caratteristiche del materiale di partenza impiegato per la produzione del biochar stesso (Yao et al., 2012). Non mancano inoltre gli esempi in cui il biochar abbia, al contrario, aumentato la quantità di nutrienti persi per lisciviazione, come ad esempio nello studio condotto da Hardie et al. (2015) in un giovane meleto in Australia.

Diversi studi hanno inoltre messo in evidenza come l'uso del biochar possa migliorare anche le caratteristiche fisiche del terreno e, conseguentemente, la sua capacità di ritenzione idrica (Glaser et al., 2002). Tale effetto è riconducibile soprattutto all'incremento della stabilità degli aggregati e della microporosità dei substrati (Verheijen et al., 2010; Abel et al. 2013; Laird et al., 2010). Anche nell'ambito degli effetti del biochar sulle proprietà fisiche dei terreni è però possibile constatare in letteratura un'ampia variabilità di risultati. Tale variabilità è riconducibile alle caratteristiche dei biochar impiegati (diversi sia per tipologia di materiale impiegato per la sua produzione, che per le caratteristiche del processo di pirolisi) (Novak et al., 2012), alle diverse quantità e tipologie di formulato distribuito (in polvere, pellettato o a scaglie) (Laird et al., 2010; Abel et al., 2013; Andrenelli et al., 2016), nonché alla natura del terreno ammendato (Glaser et al., 2002). Come riportato da Hardie et al. (2014), è importante inoltre sottolineare come una parte rilevante degli studi che hanno evidenziato degli effetti del biochar sulle caratteristiche fisiche dei terreni abbiano un significato discutibile in ambito agrario in quanto realizzati su suoli non agrari, con dosaggi elevati di difficile implementazione in agricoltura (> di 50 t/ha), o in condizioni di laboratorio con terreno campionato e setacciato. La verifica *in situ* dei miglioramenti indotti dal biochar sulle proprietà fisiche del suolo è certamente più complessa ed in alcuni casi gli effetti di apporti anche consistenti di biochar (47 t/ha) sulle proprietà idriche del suolo (i.e. contenuto idrico alla capacità di campo, contenuto idrico al punto di appassimento permanente e acqua complessivamente disponibile per le piante) non sono risultati statisticamente significativi (Hardie et al., 2014).

Il biochar è stato applicato in vigneto con risultati abbastanza discordanti. Da un'analisi dell'evidenze sperimentali appare chiaro come l'efficacia degli apporti di biochar sui comportamenti vegeto produttivi delle viti risulti fortemente dipendente dalle condizioni generali caratterizzanti il vigneto. In una prova poliennale condotta in un vigneto non irrigato in Toscana l'interramento di dosi pari a 22 e 44 t/ha di biochar ha significativamente modificato la capacità di ritenzione idrica del terreno (aumento dell'acqua disponibile per le piante fino a +45% per il trattamento a dose elevata di biochar rispetto al controllo non ammendato), con evidenti ricadute positive sullo stato idrico delle piante (potenziale idrico fogliare meno negativo, conduttanza stomatica e attività fotosintetica maggiore) (Baronti et al., 2014). Il migliore stato fisiologico generale delle piante in crescita sul terreno ammendato con biochar si è poi tradotto in più elevate performance produttive, in particolare nelle annate contraddistinte da precipitazioni inferiori e quindi da livelli di stress idrico estivo più severi (Genesio et al., 2015). Questo aumento di produttività per pianta, determinato principalmente da un maggiore peso medio degli acini e dei grappoli, non ha comportato differenze significative nei principali parametri qualitativi delle uve (solidi solubili, acidità totale e contenuto in antociani totale). Gli autori della ricerca attribuiscono quest'assenza di evidenze da un punto di vista qualitativo all'interazione complessa tra diversi fattori (stato nutrizionale, tempistiche dello stress idrico, temperatura del suolo etc.) direttamente o indirettamente influenzati dall'apporto di biochar al terreno (Genesio et al., 2015). In un contesto ambientale differente e caratterizzato da stagioni vegetative con disponibilità idrica non limitanti per le piante, apporti di biochar a dosi limitate (inferiori a 10 t/ha), in combinazione o meno con il compost, non hanno determinato alcuna differenza nella crescita e nello stato sanitario delle viti, nonché nei principali parametri qualitativi delle uve (Schmidt et al., 2014). Queste evidenze hanno portato gli autori a concludere che, nelle condizioni caratterizzanti il vigneto di studio, l'impiego di biochar come ammendante non ha alcuna conseguenza economicamente rilevante (Schmidt et al., 2014). Queste conclusioni non tengono peraltro conto di altri possibili servizi ecosistemici riconducibili all'uso del biochar in viticoltura, come ad esempio quello di ridurre la mobilità del rame in sistemi colturali come i vigneti sui quali grava un problema ambientale considerevole rappresentato

dallo storico accumulo di questo elemento nel suolo. Alcuni studi recenti (Soja et al., 2018; Pump et al., 2019) hanno infatti evidenziato come l'uso di biochar (in combinazione o meno con compost) sia in grado di limitare la mobilità del rame nel sistema vigneto, riducendone dunque la diffusione ed il potenziale negativo impatto ambientale, in modo particolarmente efficiente in condizioni di terreni a soluzione acida ed in relazione ad apporti recenti di rame.

Alla luce di quanto riportato e della variabilità delle evidenze sperimentali disponibili, appare quindi evidente come le nostre conoscenze in merito agli effetti dell'uso di biochar come ammendante del suolo risultino ancora incomplete. In particolare, alcuni aspetti relativi alle risposte fisiologiche delle piante al trattamento con biochar al terreno risultano meritevoli di ulteriori indagini. A questo scopo sono state condotte le seguenti prove sperimentali in ambiente controllato con l'obiettivo di: i) definire gli effetti dell'impiego di biochar (puro o in combinazione con il compost) sul ciclo dell'azoto in piante di vite coltivate in vaso; ii) valutare l'eventuale impatto dell'impiego di biochar come ammendante sulle perdite per lisciviazione di azoto; iii) comprendere come le modifiche alle proprietà idriche dei substrati conseguenti agli apporti di biochar incidano sullo stato idrico delle piante di vite sottoposte a successivi cicli di carenza idrica misurandone indicatori fisiologici di stress a livello fogliare.

2. Effetti dell'impiego di biochar sul ciclo dell'azoto in piante di vite coltivate in vaso

2.1 Metodologia impiegata

2.1.1 Materiale vegetale e disegno sperimentale

Per l'esperimento sono stati utilizzati 30 astoni di vite (cv. Pinot nero su portinnesto SO4) di due anni di età aventi un diametro del tronco di 2 cm circa e preparati, a seguito di potatura, con un capo a frutto portante quattro-cinque nodi. I substrati a confronto sono descritti in Tabella 1.

Tabella 1 – Substrati a confronto (trattamenti sperimentali)

Trattamenti sperimentali	Descrizione del substrato
Controllo	Controllo (terreno setacciato a 10mm). Densità volumetrica 0,91 g/cm ³
Compost	Compost 4,5% (0,9 kg di compost in 20 kg di terreno setacciato). Densità volumetrica 0.92 g/cm ³
Biochar	Biochar 2% (0,4 kg di biochar in 20 kg di terreno setacciato). Densità volumetrica 0,89 g/cm ³
Biochar + Compost	Biochar 2% + compost 4,5% (0,4 kg di biochar + 0,9 kg di compost in 20 kg di terreno setacciato). Densità volumetrica 0,87 g/cm ³

Le principali caratteristiche chimiche dei substrati in prova (sostanza organica, pH e concentrazione macroelementi) sono riportate nella Tabella 2.

Tabella 2 – Caratterizzazione analitica dei substrati a confronto (valori medi \pm deviazione standard)

Trattamento	Humus (%)	pH	Nmin (mg/kg)	P ₂ O ₅ (mg/100g)	K ₂ O (mg/100g)	MgO (mg/100g)
Controllo	5,3 \pm 0,5	7,0 \pm 0,01	2,61 \pm 1,13	28 \pm 0,58	24,33 \pm 0,33	22,33 \pm 0,33
Compost	5,5 \pm 0,3	7,1 \pm 0,01	2,17 \pm 0,44	33 \pm 0,58	46,67 \pm 1,67	25,67 \pm 0,33
Biochar + Compost	7,1 \pm 0,7	7,5 \pm 0,06	2,67 \pm 0,54	40 \pm 3,18	116,33 \pm 20,99	28,33 \pm 1,67
Biochar	6,7 \pm 0,3	7,5 \pm 0,03	1,15 \pm 0,57	29 \pm 0,00	97,33 \pm 3,53	26,33 \pm 0,33

Per l'esperimento sono state impiegate cinque repliche per trattamento (una pianta per replica) disposte secondo un disegno sperimentale a randomizzazione completa all'interno di un tunnel plastico ubicato nelle vicinanze del Centro di Sperimentazione Laimburg (Comune di Vadena, BZ). Gli astoni sono stati messi a dimora ad inizio giugno 2017 in vasi di plastica da 23 L di capienza riempiti con i quattro substrati posti a confronto. Sono inoltre stati invasati altri 10 astoni su substrato di controllo per consentire ulteriori specifici campionamenti come descritto in seguito. Le principali fasi dell'esperimento sono riportate nella Fig. 1.



Fig. 1 – Collocazione temporale delle principali fasi dell'esperimento svoltosi all'interno di un tunnel plastico nel corso del periodo giugno-settembre 2018

2.1.2 Fertilizzazione con azoto marcato (¹⁵N)

Nei mesi di giugno e luglio sono state realizzate le fertilizzazioni con un concime contenente azoto marcato isotopicamente. Nel dettaglio, l'apporto di fertilizzante è consistito nella distribuzione di 5 g di azoto sotto forma di concime nitrato d'ammonio (NH₄NO₃) in due successivi eventi (F1 e F2, vedi Fig. 1).

Dei 5 g di N complessivamente forniti alla pianta, 3 g risultavano arricchiti in ^{15}N mediante impiego di fertilizzante marcato $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ al 5% di ^{15}N . Tutte le piante in crescita sui substrati con biochar, biochar con compost, compost e controllo sono state fertilizzate. In aggiunta, ulteriori cinque piante in crescita su substrato di controllo non hanno ricevuto alcuna fertilizzazione.

Per l'intera durata dell'esperimento (a partire dalla prima fertilizzazione fino all'estirpazione finale delle piante) sono state raccolte e campionate tutte le foglie cadute prematuramente dalle piante dei diversi trattamenti. Tali campioni sono stati valutati per biomassa e contenuto in N (marcato e non) e computati assieme alle valutazioni fatte a fine esperimento. Infine, nel mese di settembre tutte le piante appartenenti ai quattro trattamenti fertilizzati (biochar, biochar + compost, compost e controllo), nonché le cinque piante di controllo non fertilizzate, sono state sradicate. Gli organi annuali (radici fini, germogli, foglie) e perenni (radici ad accrescimento secondario, tronco e capo a frutto) delle singole piante sono stati pesati, essiccati, macinati ed analizzati per il contenuto di N totale e azoto marcato (^{15}N), nonché per il contenuto fogliare di macro e microelementi (Fig. 2)



Fig. 2 – Preparazione delle piante di vite al termine dell'esperimento con azoto marcato. Le piante (A) sono state estirpate, suddivise nei diversi organi (radici, tronco e capo a frutto, germogli, foglie) (B e C) pesate ed essiccate. Campioni dei diversi organi sono quindi stati analizzati per il contenuto di N totale e di N marcato (^{15}N).

2.1.3 Analisi isotopica dell'azoto

La concentrazione totale di N nei substrati e nei diversi organi della pianta è stata determinata tramite uno spettrometro di massa isotopica equipaggiato con analizzatore elementare (Isotopic Ratio Mass Spectrometer – IRMS, Thermo Scientific, Germany). L'eccesso di ^{15}N (% atomi) negli organi e nel fertilizzante rispetto all'abbondanza naturale di ^{15}N (0,366 % atomi), è stato calcolato come segue:

$$N \text{ da fertilizzante} = \frac{N \text{ totale organo (mg)} \times (\text{abbondanza } ^{15}\text{N} \text{ tessuto} - \text{abbondanza } ^{15}\text{N} \text{ naturale})}{(\text{abbondanza } ^{15}\text{N} \text{ fertilizzante} - \text{abbondanza } ^{15}\text{N} \text{ naturale})}$$

2.1.4 Analisi dei macro e micro elementi presenti nelle foglie

La concentrazione fogliare di azoto (N), potassio (K), magnesio (Mg), calcio (Ca), fosforo (P), rame (Cu), zinco (Zn), boro (B), ferro (Fe) e manganese (Mn) è stata determinata mediante analisi con una strumentazione ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, Thermo Scientific, Bremen, Germany) dopo digestione acida del campione di foglia (2,5 mL di HNO_3 - 65%, w/w - per 0,1 g di campione secco).

2.1.5 Analisi statistiche

I dati sono stati analizzati con il software R, versione 3.3.1. Differenze significative tra trattamenti sono state determinate tramite analisi della varianza ad una via (ANOVA) previa verifica degli assunti di normalità (attraverso il test di Shapiro-Wilk, $p > 0.05$) ed omogeneità della varianza (attraverso il test di Bartlett, $p > 0.05$). I confronti a coppie sono stati effettuati tramite test post-hoc Tukey HSD ($p < 0.05$). I dati espressi come percentuale, sono stati trasformati mediante trasformazione logaritmica prima di effettuare i test statistici. I dati in grafici e tabelle sono rappresentati come media \pm deviazione standard.

2.2 Risultati

Dal confronto tra la biomassa (g peso secco) presente al momento dell'espianto nei diversi organi (radici, fusto e capo a frutto, germogli, foglie) delle piante di controllo non fertilizzate e fertilizzate con NH_4NO_3 emerge, come atteso, una maggiore biomassa prodotta da parte delle piante fertilizzate (Fig. 3).

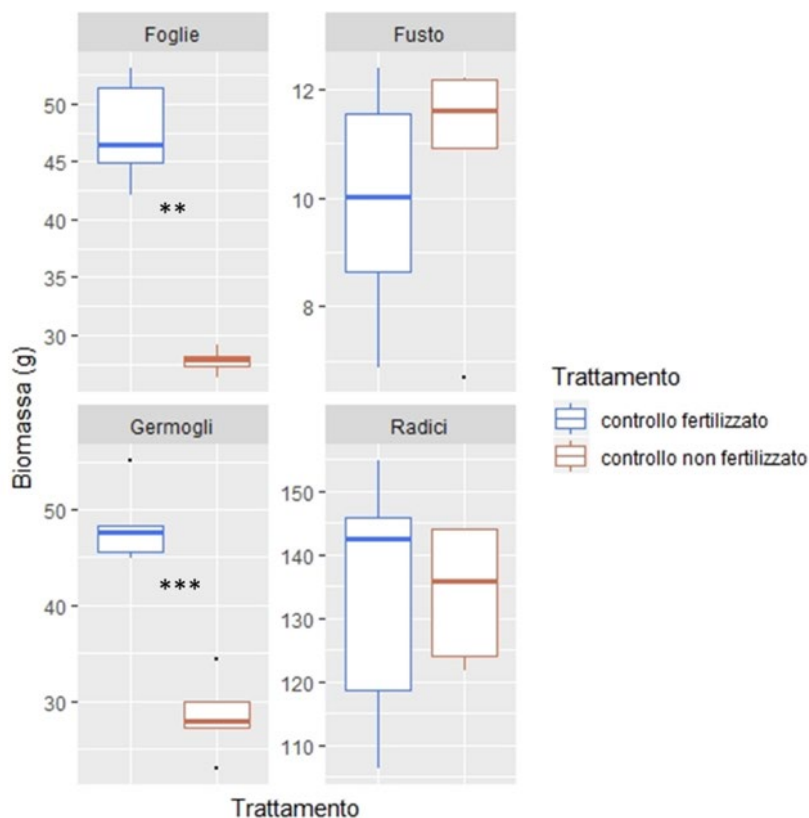


Fig. 3 – Biomassa (in g peso secco) dei diversi organi di piante di controllo fertilizzate con NH_4NO_3 e non fertilizzate misurata al termine dell'esperimento (epoca di espanto). Fusto e capo a frutto sono stati considerati insieme nel pannello "Fusto", il pannello "Radici" comprende le radici fini e le radici ad accrescimento secondario. I risultati in figura sono oggetto di una pubblicazione in preparazione per la rivista Italus Hortus

In particolare, la crescita degli organi annuali (germogli e foglie) è risultata significativamente inferiore nelle piante non fertilizzate che si caratterizzano inoltre per un'assenza di germogli laterali (femminelle). Dal confronto tra piante cresciute sui quattro substrati sottoposti a fertilizzazione, non sono emerse differenze significative per quanto attiene alla biomassa dei diversi organi (Fig. 4).

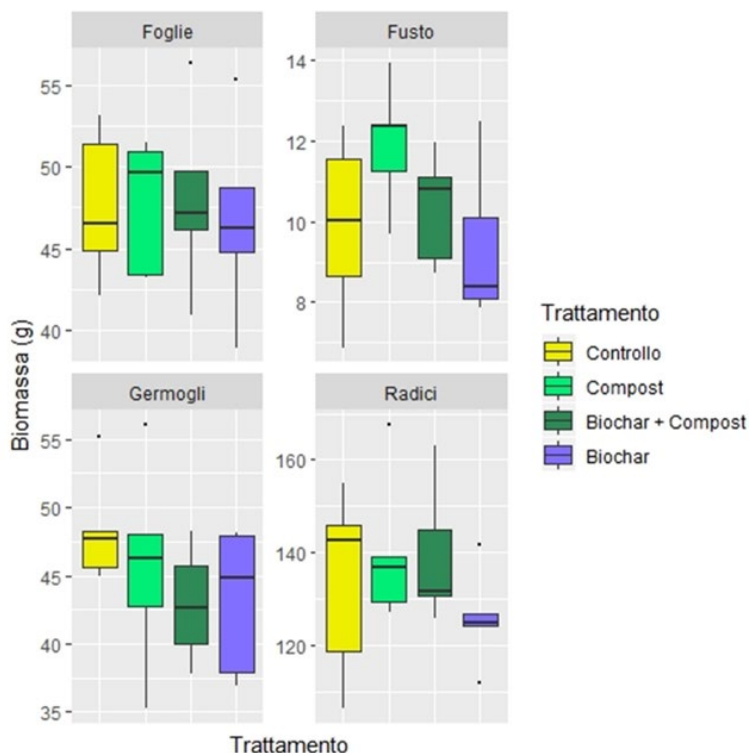


Fig. 4 – Effetto dei diversi substrati sulla biomassa (in g di peso secco) di foglie, germogli, tronco e radici di piante di vite estirpate al termine della prova. Vedi indicazioni in Fig. 3 per la descrizione della composizione delle diverse parti della pianta considerate. I risultati in figura sono oggetto di una pubblicazione in preparazione per la rivista Italus Hortus

In Fig. 5 sono riportate le quantità medie di N (in g) misurate nei singoli organi della pianta. Si tratta quindi del risultato combinato della concentrazione in azoto misurata all'interno degli organi della pianta e del peso secco degli organi stessi. Foglie e radici, che presentavano concentrazioni di azoto relativamente elevate (rispettivamente di circa il 2,5% e 1,5% di N), sono risultati gli organi con un quantitativo maggiore di questo elemento. L'apporto degli ammendanti biochar e compost (in combinazione o da soli) non ha modificato significativamente questo quantitativo rispetto alle piante cresciute su terreno non ammendato (controllo).

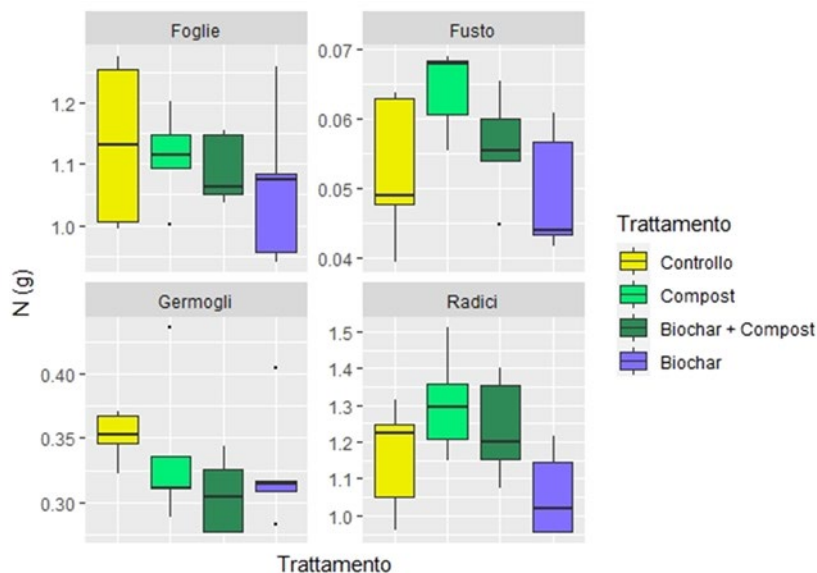


Fig. 5 – Quantità media di azoto (in g) presente nei diversi organi al momento dell'espianto, dopo fertilizzazioni. Vedi indicazioni in Fig. 3 per la descrizione della composizione delle diverse parti della pianta considerate. I risultati in figura sono oggetto di una pubblicazione in preparazione per la rivista Italus Hortus

La quantità di azoto marcato (^{15}N) proveniente dalle concimazioni con NH_4NO_3 è stata valutata per i vari organi delle piante e nei diversi substrati. Dei 3 g di N marcato distribuiti alle piante, circa il 50% è stato recuperato all'interno dei diversi organi delle piante di vite, mentre il rimanente è stato riscontrato nei substrati contenuti all'interno dei vasi. Non sono emerse differenze significative riconducibili ai diversi trattamenti per quanto attiene la quantità di ^{15}N misurato nelle piante e nei substrati (Fig. 6).

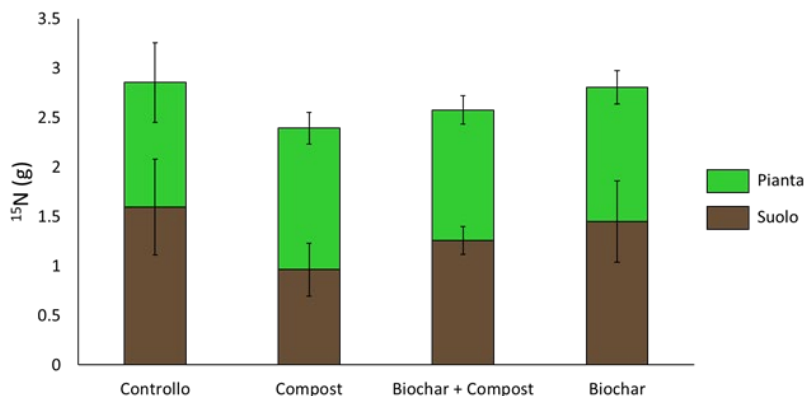


Fig. 6 – Quantità media di azoto marcato (in g, n=5) proveniente dalle fertilizzazioni con $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ presente nelle piante e nel suolo. Le barre di errore indicano la deviazione standard. I 3 g complessivi di N marcato distribuiti con le fertilizzazioni risultano coerentemente allocati nelle due componenti substrato e pianta. Lo scarto (variabile tra 0.2-0.6 g di N) rispetto al totale atteso (3 g) è da attribuirsi a possibili perdite di materiale vegetale verificatesi durante il ciclo di accrescimento. I risultati in figura sono oggetto di una pubblicazione in preparazione per la rivista *Italus Hortus*

La maggior parte dell'N somministrato con la concimazione è stata rilevata negli organi formati durante l'accrescimento annuale, prevalentemente a livello fogliare dove sono stati riscontrati in media circa 0,5 g N da fertilizzazione (Fig. 7A). Anche a livello degli organi permanenti della pianta non sono emerse differenze significative di allocazione tra i diversi trattamenti (Fig. 7B).

In Tabella 3 e 4 si riportano gli esiti delle analisi fogliari per alcuni macro e micro elementi. L'apporto di biochar (da solo o in combinazione con il compost) ha determinato una concentrazione inferiore di P (circa -35%) e Ca (-27%) rispetto alle piante di controllo. Al contrario, in accordo con i livelli più elevati di K trovati nei substrati ammendati con biochar, le concentrazioni di questo elemento nelle foglie sono risultati significativamente maggiori (+33%) rispetto al controllo. Non sono emerse differenze significative per quanto attiene la concentrazione fogliare di N (nel range 2,7-2,9%) e di Mg (0,27-0,30%). Infine, anche per i microelementi non si sono evidenziate concentrazioni significativamente diverse tra i trattamenti.

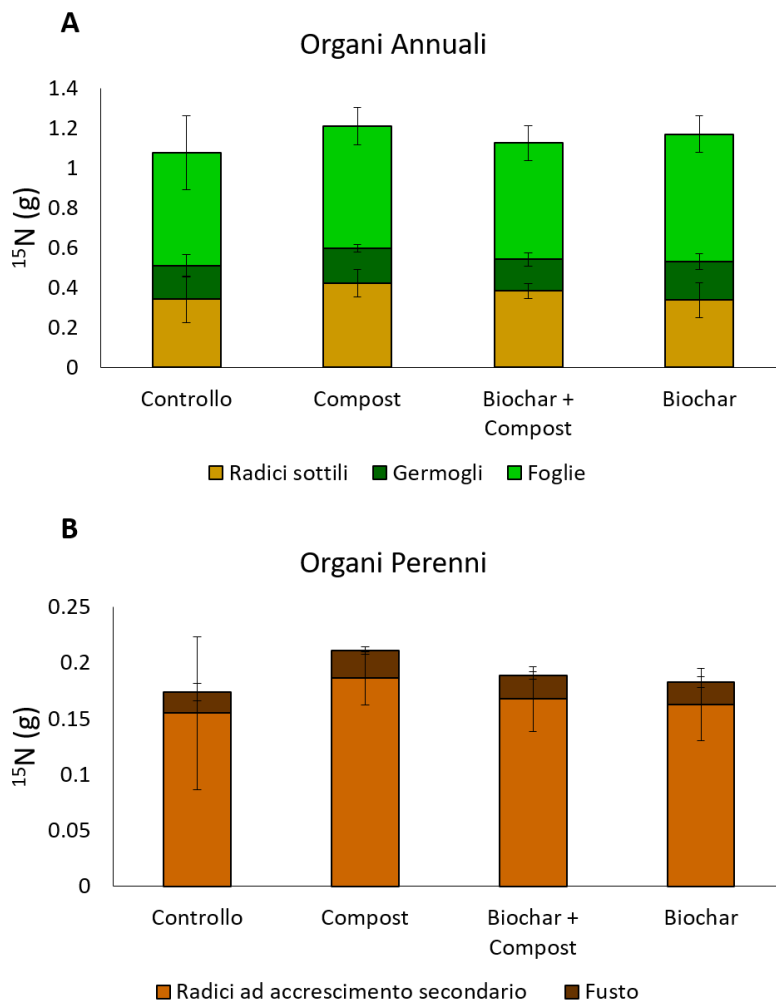


Fig. 7 – Quantità media di azoto proveniente dalle fertilizzazioni con N marcato (in g, n=5) presente negli organi annuali (A) e perenni (B) delle piante di vite. Le barre di errore indicano la deviazione standard. I risultati in figura sono oggetto di una pubblicazione in preparazione per la rivista *Italus Hortus*

Tabella 3 – Contenuto (% peso secco \pm deviazione standard) di macroelementi nelle foglie di piante appartenenti ai quattro trattamenti a confronto. Le lettere differenti indicano differenze significative tra i valori della stessa colonna (test Tukey HSD, $p < 0,05$). I risultati in tabella sono oggetto di una pubblicazione in preparazione per la rivista Italus Hortus

Trattamento	N%	P%	K%	Mg%	Ca%
Controllo	2,9 \pm 0,21	0,38 \pm 0,07a	1,61 \pm 0,21b	0,27 \pm 0,04	2,29 \pm 0,1a
Compost	2,9 \pm 0,19	0,28 \pm 0,01b	1,98 \pm 0,41ab	0,29 \pm 0,04	1,87 \pm 0,28ab
Biochar + Compost	2,7 \pm 0,2	0,27 \pm 0,05b	2,21 \pm 0,46ab	0,28 \pm 0,02	1,67 \pm 0,35b
Biochar	2,7 \pm 0,19	0,25 \pm 0,02b	2,41 \pm 0,21a	0,30 \pm 0,03	1,68 \pm 0,29b

Tabella 4 – Contenuto (ppm peso secco \pm deviazione standard) di microelementi nelle foglie di piante appartenenti ai quattro trattamenti a confronto. I risultati in tabella sono oggetto di una pubblicazione in preparazione per la rivista Italus Hortus

Trattamento	B	Mn	Fe	Cu	Zn
Controllo	46,06 \pm 5,24	16,81 \pm 1,22	146,27 \pm 13,72	8,06 \pm 2,21	31,99 \pm 3,82
Compost	46,56 \pm 6,63	15,78 \pm 2,18	139,13 \pm 20,38	9,07 \pm 0,72	37,93 \pm 8,45
Biochar + Compost	45,59 \pm 9,99	15,52 \pm 2,48	148,75 \pm 14,61	8,75 \pm 0,96	41,97 \pm 4,37
Biochar	43,76 \pm 10,29	16,18 \pm 3,98	161,55 \pm 40,81	8,70 \pm 1,04	39,40 \pm 4,53

3. Effetti dell'impiego di biochar sulle caratteristiche idriche dei substrati e sulle potenziali perdite di azoto per lisciviazione

3.1 Metodologia impiegata

3.1.1 Determinazione gravimetrica delle caratteristiche idriche dei substrati

Venti vasi con un volume di 23 L ciascuno sono stati riempiti con substrati corrispondenti ai quattro trattamenti descritti in Tabella 1. Per ciascun substrato a confronto sono stati preparati cinque vasi che sono poi stati posizionati su dei collari metallici di circa 10 cm di altezza collocati all'interno di sottovasi di plastica di dimensioni adeguate alla circonferenza dei vasi. I substrati sono stati quindi portati a saturazione idrica apportando acqua in eccesso, fino a verificare un'abbondante fuoriuscita di acqua dai vasi per percolazione. Terminata la fase di eliminazione dell'acqua gravitazionale dai vasi per percolazione (dopo circa 36 ore dall'iniziale apporto idrico), è stato determinato il peso dei singoli vasi e, per differenza con il loro peso secco, è stata calcolato il contenuto idrico dei diversi substrati alla capacità di campo.

3.1.2 Misura in continuo del contenuto idrico e del potenziale idrico suolo

Il contenuto idrico (m^3/m^3) ed il potenziale idrico (kPa) dei substrati è stato misurato in continuo mediante sonde di tipo capacitivo (tipo 10HS, Decagon Devices) e tensiometriche (MPS6, Decagon Devices) in precedenza calibrate per ciascuno dei quattro substrati a confronto. Dalle equazioni delle curve di ritenzione idrica determinate con le prove di calibrazione, è stato possibile definire i livelli di contenuto idrico dei substrati in relazione a potenziali idrici corrispondenti alla capacità di campo (-33 kPa), al punto di appassimento permanente (-1500 kPa) e, per differenza, stimare il volume di acqua disponibile per le piante.

3.1.3 Simulazione di un evento di lisciviazione

Con questo esperimento si è voluto simulare la condizione di un'abbondante pioggia immediatamente successiva ad un apporto di fertilizzante azotato in

forma nitrica (N-NO₃) allo scopo di poter stimare l'effetto dell'ammendante biochar sulle potenziali perdite per lisciviazione di questo elemento. I vasi sono stati portati alla capacità di campo e quindi fertilizzati con una soluzione contenente quattro g di N-NO₃ in 200 mL di acqua per vaso. Questo quantitativo corrisponde ad un apporto azotato di circa 20 kg/ha in un vigneto contraddistinto da una densità di 5.000 ceppi/ha. Trascorse circa 76 ore dalla fertilizzazione (necessarie per una buona penetrazione dell'N-NO₃ in soluzione lungo l'intero profilo dei vasi) è stata simulata una pioggia abbondante distribuendo ai vasi un uguale volume di 2 L di acqua (corrispondenti a circa 24 mm di precipitazione). Il lisciviato generatosi a seguito dell'apporto idrico è stato raccolto per intero nei sottovasi e quindi trasferito in cilindro graduato in modo da calcolarne il volume totale. Un'aliquota di lisciviato è stata conservata in fiale da 200 mL per poi essere analizzata per il contenuto di N-NO₃.

3.1.4 Analisi statistiche

I dati sono stati analizzati con il software R per confronti tra gruppi mediante analisi della varianza previa verifica degli assunti di normalità ed omogeneità della varianza. I risultati espressi in percentuale sono stati trasformati in valori logaritmici prima dell'esecuzione dell'analisi della varianza.

3.2 Risultati

3.2.1 Caratterizzazione delle proprietà idriche dei substrati ammendati con biochar

Dalla combinazione delle misure gravimetriche del contenuto idrico alla capacità di campo con le informazioni provenienti in continuo dalle sonde di misurazione del potenziale e contenuto idrico dei substrati, è stato possibile giungere ad una definizione degli effetti indotti dall'aggiunta di ammendanti sulle proprietà idriche dei substrati a confronto. La curva contenuto vs potenziale idrico del suolo risulta, nel caso dei substrati ammendati con biochar, più graduale (Fig. 8). Ne consegue quindi che con valori di umidità del terreno attorno al 16% nel substrato di controllo i valori di potenziale idrico siano già prossimi a quelli del punto di appassimento permanente, mentre nel caso dei substrati contenenti biochar tale livello si raggiunga con valori più bassi di contenuto idrico del terreno (attorno al 12%).

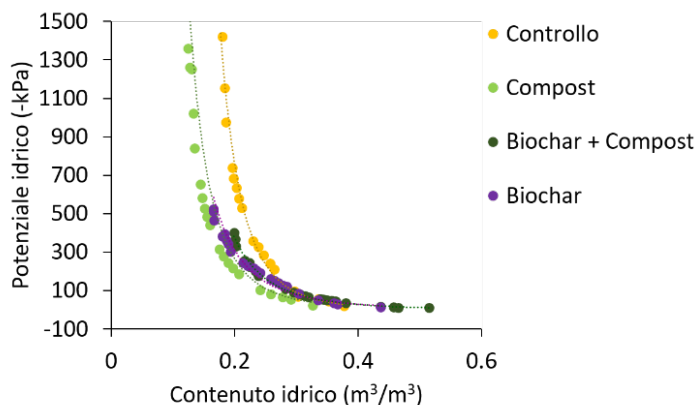


Fig. 8 – Curve di ritenzione idrica (contenuto idrico in m^3/m^3 vs potenziale idrico in -kPa) dei substrati a confronto. I risultati in figura sono oggetto di una pubblicazione in preparazione per la rivista Italus Hortus

L’acqua disponibile per le piante, calcolata come differenza tra il contenuto idrico dei substrati alla capacità di campo ed al punto di appassimento permanente, è risultata significativamente aumentata dall’apporto dell’ammendante biochar (Tabella 5). In particolare, sia il trattamento con biochar attivato con il compost che il trattamento con solo biochar sono risultati in grado di incrementare il volume d’acqua disponibile per le piante di circa il 30% rispetto al controllo, mentre l’apporto del solo compost ha comportato un incremento minore (circa 19%), ma comunque significativo.

Tabella 5 – Effetto dei trattamenti con ammendanti sul contenuto idrico dei substrati alla capacità di campo e sul volume di acqua disponibile per le piante. Le lettere differenti indicano differenze significative tra i valori della stessa colonna (test Tukey HSD, $p < 0.05$). I risultati in tabella sono oggetto di una pubblicazione in preparazione per la rivista Italus Hortus

Treatmento	Contenuto idrico alla capacità di campo (m^3/m^3)	Acqua disponibile per le piante (m^3/m^3)
Controllo	0.38d ¹	0.22c
Compost	0.39c	0.27b
Biochar + Compost	0.43a	0.31a
Biochar	0.42b	0.31a

3.2.2 Effetto dell'impiego di biochar sulle perdite di azoto per lisciviazione

In Fig. 9 è riportata la percentuale di N-NO₃ perso per lisciviazione al termine della simulazione della precipitazione piovosa. Tale valore percentuale è quindi il risultato combinato del contenuto di N-NO₃ determinato su campioni dei diversi substrati a seguito della fertilizzazione ed immediatamente prima dell'evento piovoso, del volume complessivo della soluzione di lisciviazione raccolta e della concentrazione in N-NO₃ misurata nella suddetta soluzione. Le perdite per lisciviazione sono risultate mediamente comprese tra circa il 10 e il 16% dell'N-NO₃ inizialmente presente nei vasi. Nel confronto tra i trattamenti, il compost e il biochar sono risultati quelli contraddistinti da perdite superiori rispetto al controllo. L'aggiunta di compost al biochar riduce significativamente le perdite di N-NO₃ rispetto al solo biochar ed al solo compost, attestandosi su valori non differenti da quello del controllo (11,3 e 10,8%, rispettivamente).

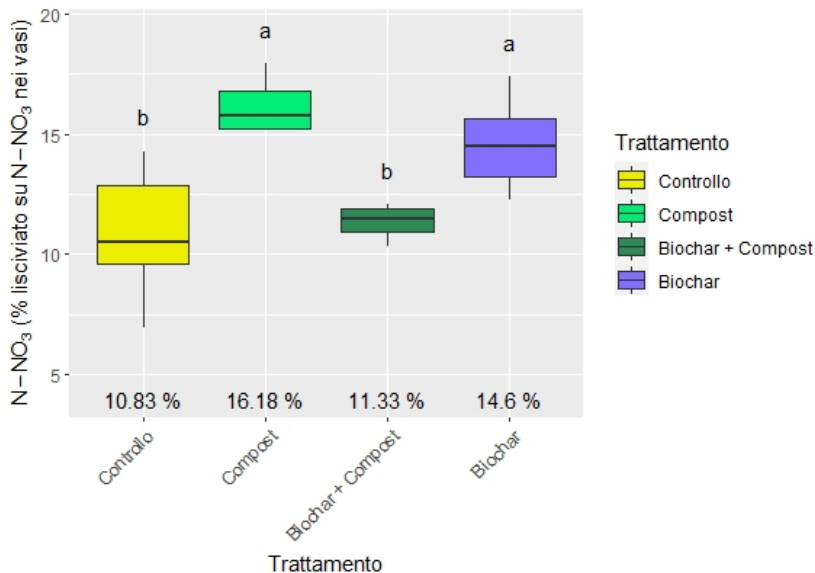


Fig. 9 – Percentuale di azoto nitrico (N-NO₃) perso per lisciviazione sul totale di N-NO₃ presente nei vasi dopo la fertilizzazione ed immediatamente prima dell'evento di lisciviazione. I risultati in figura sono oggetto di una pubblicazione in preparazione per la rivista Italus Hortus

4. Effetti dell'impiego di biochar sullo stato fisiologico di piante di vite sottoposte a livelli crescenti di stress idrico

4.1 Metodologia impiegata

4.1.1 Materiale vegetale ed applicazione dello stress idrico

La prova è stata condotta impiegando astoni di vite di due anni appartenenti alla cv. Pinot nero innestata sul portinnesto SO4. Sei piante per ciascuno dei quattro trattamenti riportati in Tabella 1 sono state trapiantate ad inizio maggio 2019 in vasi da 23 L e lasciate crescere all'interno di un tunnel plastico sino al pieno sviluppo della chioma. Le piante, che si presentavano sufficientemente uniformi per vigoria e sviluppo della superficie fogliare, sono quindi state sottoposte ad un periodo di asciutta (esclusione di qualsiasi apporto irriguo) durante il quale il progressivo svilupparsi dello stress idrico è stato monitorato mediante la ripetuta misurazione dei parametri fisiologici descritti in seguito. Nel dettaglio, sono stati condotti due cicli di stress idrico su altrettanti set di piante. Il primo ciclo ha avuto una durata di 17 giorni e si è svolto da metà luglio ad inizio agosto, mentre il secondo ciclo è stato condotto nel periodo tra fine agosto e metà settembre ed è durato 20 giorni in totale. In entrambi i casi, al raggiungimento di un livello soglia di stress prestabilito e corrispondente ad un valore di potenziale idrico del fusto misurato a mezzogiorno inferiore a -1.5 MPa, le piante sono state nuovamente irrigate abbondantemente e la ripresa dalla condizione di stress monitorata da un punto di vista fisiologico.

4.1.2 Monitoraggio dello stato fisiologico delle piante a livelli crescenti di stress idrico

Il progressivo instaurarsi dello stress idrico nelle piante di vite escluse da qualsiasi apporto irriguo è stato monitorato tramite la determinazione dei seguenti parametri fisiologici misurati a livello fogliare:

- Potenziale idrico del fusto a mezzogiorno (Ψ_{MD} , valori in MPa) misurato su una foglia per pianta (tre misurazioni per trattamento e per epoca). Le misure sono state condotte mediante camera a pressione (Pump-up Pres-

sure Chamber, PMS Instrument Comp. USA) ad intervalli di 3-4 giorni durante entrambi i cicli di stress, nonché durante la ripresa successiva ad irrigazione (rewatering);

- Assimilazione netta di CO₂ (o fotosintesi netta, $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$) misurata su una foglia per pianta (tre misurazioni per trattamento e per epoca). Per le misurazioni è stato impiegato un analizzatore di scambi gassosi portatile ad infrarossi (LC-pro ADC, Hoddesdon Bioscientific, Ltd., UK).

4.1.3 Analisi statistiche

I dati sono stati analizzati con il software R per confronti tra gruppi mediante analisi della varianza previa verifica degli assunti di normalità ed omogeneità della varianza.

4.2 Risultati

Le piante non irrigate hanno evidenziato, indipendentemente dal substrato, livelli crescenti di stress idrico come testimoniato, per entrambi i cicli di stress, da valori progressivamente inferiori di Ψ_{MD} (Fig. 10A e 11A). In particolare, per quanto attiene al primo ciclo di stress, dopo 17 giorni senza alcuna irrigazione sono stati raggiunti valori di Ψ_{MD} inferiori a -1,6 MPa ritenuti caratteristici di un livello di stress elevato per la vite (Fig. 10A). Nel corso del secondo ciclo di stress, svoltosi in agosto-settembre, i livelli più severi di stress idrico sono stati raggiunti dopo circa 20 giorni con valori di Ψ_{MD} di circa -1.4 MPa in media (Fig. 11A). Per il parametro di Ψ_{MD} non sono emerse differenze statisticamente significative tra i trattamenti, anche se al termine di entrambi i cicli di stress le piante in crescita sul substrato ammendato con biochar risultavano contraddistinte da valori mediamente superiori (minore stress idrico della pianta). In analogia con quanto evidenziato per il parametro Ψ_{MD} , anche la fotosintesi netta è risultata, per entrambi i cicli di misurazione, fortemente ridotta in condizioni di stress idrico crescente (Fig. 10B e 11B). Nel corso del primo ciclo (Fig. 10B), in corrispondenza del livello di stress più elevato, la fotosintesi netta di foglie appartenenti ai trattamenti di controllo e compost è risultata prossima allo zero, mentre le piante in crescita su substrato ammendato con biochar erano ancora in grado di fotosintetizzare (circa 3 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)

mostrando quindi un comportamento significativamente diverso. Tale tendenza (maggiore fotosintesi delle piante in crescita su biochar a livelli elevati di stress idrico) si è confermata anche nel secondo ciclo di stress idrico (Fig. 11B), anche se le differenze non sono risultate significative al test statistico. Alla ripresa dell'irrigazione, in entrambi i cicli, le piante hanno evidenziato un rapido recupero dalla condizione di stress tornando su valori di Ψ_{MD} e fotosintesi simili a quelli pre-stress. Il recupero è stato completo al termine del primo ciclo, mentre solo parziale (per il parametro fotosintesi netta) al termine del secondo probabilmente anche per effetto della fase fenologica più avanzata delle foglie. Infine, nella fase di recupero dallo stress le piante non hanno evidenziato differenze significative imputabili ai trattamenti.

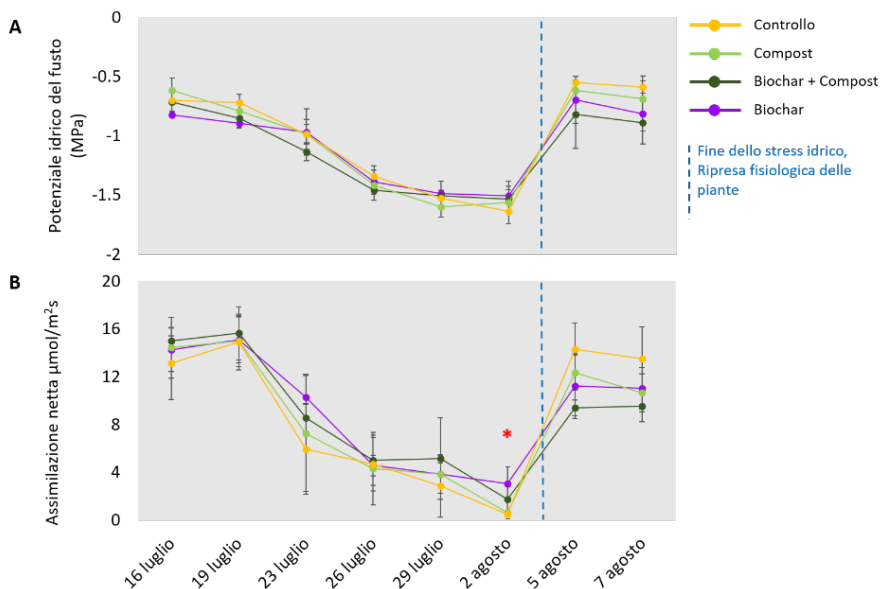


Fig. 10 – Primo ciclo di stress idrico. A) Potenziale idrico del fusto (MPa); B) Assimilazione (fotosintesi) netta ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$). Le barre di errore indicano la deviazione standard. I valori relativi alle ultime due date si riferiscono alla fuoriuscita dalla condizione di stress successiva alla ripresa dell'irrigazione. I risultati in figura sono oggetto di una pubblicazione in preparazione per la rivista Italus Hortus

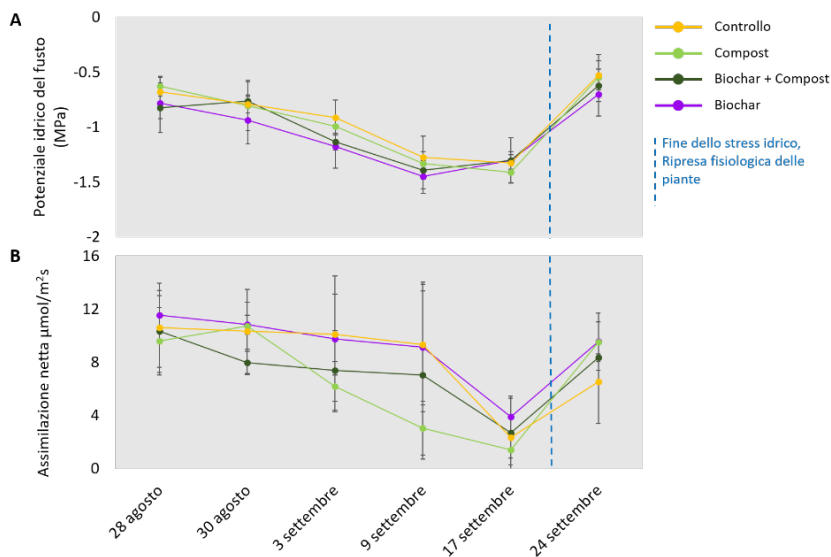


Fig. 11 – Secondo ciclo di stress idrico. A) Potenziale idrico del fusto (MPa); B) Assimilazione (fotosintesi) netta ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$). Le barre di errore indicano la deviazione standard. I valori relativi all'ultima data si riferiscono alla fuoriuscita dalla condizione di stress successiva alla ripresa dell'irrigazione. I risultati in figura sono oggetto di una pubblicazione in preparazione per la rivista *Italus Hortus*

5. Considerazioni conclusive

Gli esperimenti condotti su piante di vite cresciute in vaso su substrati ammendati con biochar e fertilizzati con nitrato d'ammonio marcato hanno chiarito che il biochar non altera in maniera significativa le dinamiche di assorbimento e redistribuzione dell'azoto all'interno dei vari organi della pianta (Fig. 7). L'applicazione della tecnica del tracciante isotopico per lo studio dell'effetto del biochar sul ciclo dell'azoto in piante di vite rappresenta, per quanto possiamo sapere, una novità. Lo studio ha inoltre consentito di stabilire come anche l'aggiunta di compost al biochar non determini differenze significative nella dinamica di assorbimento e riallocazione interna alle piante di azoto proveniente da fertilizzazioni. La tematica dell'impatto dell'apporto di biochar sull'efficienza delle fertilizzazioni azotate deve inoltre considerare gli aspetti

relativi ai fenomeni di lisciviazione. Nelle condizioni sperimentali in precedenza descritte, la presenza di biochar nel substrato aumenta significativamente le perdite per lisciviazione per una percentuale del 5-6% rispetto al controllo (Fig. 9). Quest'indicazione appare essere in parziale contrasto con quanto riportato in alcuni lavori scientifici richiamati nell'introduzione (Lehmann et al., 2003; Ventura et al., 2012; Yao et al., 2012) che evidenziano una riduzione delle perdite per lisciviazione di vari elementi, ma è peraltro in accordo con altre ricerche condotte in frutteto, in condizioni di pieno campo. In particolare, in analogia con quanto riportato da Hardie et al. (2015), nelle condizioni sperimentali descritte sono stati misurati volumi superiori di soluzione di lisciviata raccolti dai substrati trattati con biochar e, in presenza di concentrazioni non differenti di azoto in soluzione. Questo ha determinato delle maggiori perdite di questo elemento per lisciviazione. Una chiara evidenza delle prove da noi condotte è infatti quella dell'impatto del biochar sulla capacità di ritenzione idrica del substrato. In analogia con altri studi (vedi review di Glaser et al., 2002), l'apporto di biochar aumenta in modo significativo il contenuto idrico del terreno alla capacità di campo, nonché il volume d'acqua complessivamente disponibile per le piante (Fig. 8 e Tabella 5). La presenza di biochar nel substrato aumenta il periodo di tempo in cui il terreno si mantiene in condizioni prossime alla capacità di campo. Se da un punto di vista della conservazione di un'adeguata disponibilità idrica per le piante quest'aspetto può considerarsi in modo positivo, dal punto di vista del rischio di perdite per lisciviazione di nutrienti (in particolare azoto) deve essere visto in maniera problematica. Nel caso infatti di eventi piovosi ripetuti che mantengono livelli di umidità nel terreno superiori alla capacità di campo, eventuali precedenti apporti di fertilizzanti (in specie di azoto) possono tradursi in maggiori perdite per lisciviazione proprio in terreni ammendati con biochar rispetto ad equivalenti terreni non ammendati. Quindi, all'atto pratico, in suoli ammendati con biochar ed in periodi contraddistinti da precipitazioni frequenti, una particolare attenzione andrà posta nel sincronizzare gli apporti di nutrienti mobili nel terreno con i livelli di umidità dello stesso. Andranno quindi privilegiati apporti frazionati di fertilizzanti (minore quantità di nutrienti eventualmente esposti a lisciviazione) realizzati in periodi il più

possibile stabili dal punto di vista meteorologico (minore probabilità di precipitazioni).

La maggiore disponibilità di acqua nel terreno ammendato con il biochar si è tradotta in una maggiore resilienza delle piante di vite in condizioni di stress idrico severo (Fig. 10 e 11). In particolare, a livelli di Ψ_{MD} inferiori a $-1,6$ MPa, le piante di vite in crescita sul substrato contenente biochar hanno mantenuto livelli significativamente superiori di scambi gassosi, come testimoniato dai valori di fotosintesi netta misurati a livello fogliare. Questi risultati confermano quanto indicato da Baronti et al. (2014) e da Genesio et al. (2015) che riportano come, proprio in annate contraddistinte da condizioni di aridità elevate, le migliori condizioni fisiologiche generali delle piante di vite in vigneti ammendati con biochar si siano tradotte in un miglioramento significativo delle loro performance in termini di assimilazione netta, crescita vegetativa e di produttività rispetto al controllo non ammendato.

In conclusione, gli esiti di alcune prove condotte su piante di vite in vaso hanno consentito di evidenziare la sostanziale assenza di elementi ostativi di natura agronomica all'impiego di biochar come ammendante dei terreni, a fronte del permanere del valore aggiunto di natura ambientale rappresentato dall'interramento del biochar nel terreno come misura di mitigazione del cambiamento climatico (riduzione del C nell'atmosfera e suo confinamento in forma stabile nei suoli). In condizioni di aridità, il biochar può aumentare la disponibilità idrica per le piante, migliorandone la tolleranza a livelli severi di stress. In condizioni di terreni con umidità elevata o costantemente prossimi alla capacità di campo, particolare attenzione deve essere posta alla gestione delle fertilizzazioni in quanto la presenza di biochar nel terreno può comportare un aumento delle perdite per lisciviazione.

Bibliografia

- Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M., Wessolek, G. (2013). Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*, 202–203, 183–91. Accesso via <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.03.003>
- Andrenelli, M.C., Maienza, A., Genesio, L., Miglietta, F., Pellegrini, S., Vaccari, F.P., Vignozzi, N. (2016). Field application of pelletized biochar: Short term effect on the hydrological properties of a silty clay loam soil. *Agricultural Water Management*, 163, 190–6. Accesso via <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.017>
- Baronti S., Vaccari, F.P., Miglietta, F., Calzolari, C., Lugato, E., Orlandini, S., Pini, R., Zulian, C., Genesio, L. (2014). Impact of biochar application on plant water relations in *Vitis vinifera* (L.). *European Journal of Agronomy*, 53, 38–44. Accesso via <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.11.003>
- Genesio, L., Miglietta, F., Baronti, S., Vaccari, F.P. (2015). Biochar increases vineyard productivity without affecting grape quality: Results from a four years field experiment in Tuscany. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 201, 20–5. Accesso via <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.11.021>
- Glaser, B., Lehmann, J., Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - A review. *Biology and Fertility of Soils*, 35(4), 219–30. Accesso via <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>
- Hardie, M., Clothier, B., Bound, S., Oliver, G., Close, D. (2014). Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant and Soil*, 376(1–2), 347–61. Accesso via <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1980-x>
- Hardie, M.A., Oliver, G., Clothier, B.E., Bound, S.A., Green, S.A., Close, D.C. (2015). Effect of Biochar on Nutrient Leaching in a Young Apple Orchard. *Journal of Environmental Quality*, 44(4), 1273–82. Accesso via <https://doi.org/10.2134/jeq2015.02.0068>
- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., Karlen, D. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3–4), 436–42. Accesso via <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.012>
- 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 and Soil*, 249(2), 343–57. Accesso via <https://doi.org/10.1023/A:1022833116184>
- Lehmann, J. (2007). A handful of carbon. *Nature*, 447, 143–144. Accesso via <https://doi.org/10.1038/447143a>
- Novak, J., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J., Steiner, C., Das, K., Ahmedna, M., Rehrach, D., Watts, D., Busscher, W. (2009). Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science*, 3(1), 195–206
- Novak, J.M., Busscher, W.J., Watts, D.W., Amonette, J.E., Ippolito, J.A., Lima, I.M., Gaskin, J., Das, K.C., Steiner, C., Ahmedna, M., Rehrach, D., Schomberg, H. (2012). Biochars impact on soil-moisture storage in an ultisol and two aridisols. *Soil Science*, 177(5), 310–20. Accesso via <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e31824e5593>
- Pump, C., Keiblinger, K.M., Scheiblauber, E., Johnen, S., Lehto, N.J., Soja, G., Zehetner, F. (2019). Temporal Changes in the Efficiency of Biochar- and Compost-Based Amendments on Copper Immobilization in Vineyard Soils. *Soil Systems*, 3(4), 78. Accesso via <https://doi.org/10.3390/soilsystems3040078>
- Schmidt, H.P., Kammann, C., Niggli, C., Evangelou, M.W.H., Mackie, K.A., Abiven, S. (2014). Biochar and biochar-compost as soil amendments to a vineyard soil: Influences on plant growth, nutrient uptake, plant health and grape quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 191, 117–23. Accesso via <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.04.001>
- Soja, G., Wimmer, B., Rosner, F., Faber, F., Dersch, G., von Chamier, J., Pardeller, G., Ameer, D., Keiblinger, K., Zehetner, F. (2018). Compost and biochar interactions with copper immobilisation in copper-enriched vineyard soils. *Applied Geochemistry*, 88, 40–8. Accesso via <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.06.004>
- Ventura, M., Sorrenti, G., Panzacchi, P., George, E., Tonon, G. (2013). Biochar Reduces Short-Term Nitrate Leaching from A Horizon in an Apple Orchard. *Journal of Environmental Quality*, 42(1), 76–82. Accesso via <https://doi.org/10.2134/jeq2012.0250>

- Verheijen, F.G.A., Jeffery, S., Bastos, A.C., van der Velde, M., and Diafas, I. (2009). *Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions*. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg
- Yao, Y., Gao, B., Zhang, M., Inyang, M., Zimmerman, A.R. (2012). Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. *Chemosphere*, 89(11), 1467–71. Accesso via <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.06.002>