






CATENA

Volume 237, 30 March 2024, 107820




# The beneficial use of basalt flour combined to a microbial consortium to improve soil quality in basalt and carbonatic dismissed quarries

[Maria Cristina Moscatelli](#)<sup>a</sup>, [Luisa Massaccesi](#)<sup>a</sup>  , [Rosita Marabottini](#)<sup>a</sup>, [Fabio Primavera](#)<sup>b</sup>, [Alessandro Riccini](#)<sup>b</sup>, [Sara Marinari](#)<sup>a</sup>

[Show more](#) 

[+](#) Add to Mendeley [↻](#) Share [🗒](#) Cite

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107820>

[Get rights and content](#) 

## Abstract

The recovery of degraded soils to restore their capacity to carry out important ecological functions such as promoting nutrient cycling is a very topical issue. The aim of the present work was to assess soil quality changes within two different disused quarries in central Italy (named Cornale and Poggio Tabor) through the addition of **basalt** flour combined with a microbial consortium (BBF) (2.7kg of basalt flour and 54ml of microbial consortium inoculum at each supply date). Soil samples were collected within 9 plots where three treatments 1) Control (C) no treatment; 2) bioactive basalt flour (BBF) and 3) bioactive basalt flour and cover crop (BBF+CC) were randomly replicated three times per



[Link Catena  
Elsevier](#)

Catena 237 (2024), 107820, 0341-8162/© 2024 Elsevier B.V. All rights reserved.

## L'uso benefico della Farina di Basalto® combinata con un consorzio microbico per migliorare la qualità del suolo in cave dismesse di basalto e di carbonato

### AUTORI

Maria Cristina Moscatelli <sup>a</sup>, Luisa Massaccesi <sup>a,\*</sup>, Rosita Marabottini <sup>a</sup>, Fabio Primavera <sup>b</sup>, Alessandro Riccini <sup>b</sup>, Sara Marinari <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department for Innovation in Biological, Agrofood and Forest Systems, University of Tuscia, Via San Camillo de Lellis. 01100, Viterbo, Italy

<sup>b</sup> Basalti Orvieto, srl–Loc. Cornale snc 05014, Castel Viscardo, Italy

\*Corresponding author at: University of Tuscia, Via San Camillo de Lellis. 01100, Viterbo, Italy. E-mail address: luisa.massaccesi@cnr.it (L. Massaccesi).

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107820>

### Sommario

L'uso benefico della Farina di Basalto® combinata con un consorzio microbico per migliorare la qualità del suolo in cave dismesse di basalto e di carbonato..... 2

<b>Sintesi</b> .....	<b>4</b>
Premessa .....	4
Parole chiave .....	5
<b>1. Introduzione</b> .....	<b>6</b>
<b>2. Materiali e metodi</b> .....	<b>8</b>
2.1. Sito sperimentale .....	8
2.2. Disegno sperimentale .....	10
2.3. Campionamento del suolo .....	11
2.4. Indicatori chimici e biochimici della qualità del suolo .....	11
2.5. Analisi statistica.....	14
<b>3. Risultati</b> .....	<b>14</b>
3.1. Indicatori chimici.....	14
3.2. Indicatori biochimici.....	15
<b>4. Discussione</b> .....	<b>19</b>
4.1 Effetto sugli indicatori chimici.....	19
4.2 Effetto sugli indicatori biochimici .....	20
<b>5. Conclusioni</b> .....	<b>23</b>
<b>6. Ringraziamenti:</b> .....	<b>24</b>
<b>7. Riferimenti</b> .....	<b>24</b>

### INDICE DELLE TABELLE E DELLE FIGURE

Figura 1. Dati geografici e climatici dell'area di studio. In alto a sinistra: posizione dell'area di studio all'interno dell'Italia. In alto a destra: Mappe di Google Earth e fotografie dei due siti (Cornale e Poggio Tabor). In basso: temperatura media e precipitazioni dell'area relative agli anni 2020-2021. .... 9

Figura 2. Attività enzimatiche del suolo raggruppate per il ciclo di C, N, P e S misurate in diversi siti (a) Cornale, b) Poggio Tabor), trattamenti (BBF e BBF + CC) e stagioni (estate, inverno). Per ciascun gruppo

enzimatico, le colonne contrassegnate da lettere diverse differiscono significativamente per  $p < 0,05$ ... 12

Tabella 1. Principali caratteristiche chimiche dei suoli nei diversi trattamenti (BBF e BBF + CC) e nei siti di Cornale e Poggio Tabor. I numeri tra parentesi sono gli errori standard ( $n = 3$ ). Per ogni riga, i valori medi con lettere diverse differiscono significativamente per  $P < 0,05$ . ..... 15

Figura 3. a) attività butirrata esterasi nel suolo, b) rapporti stechiometrici  $\beta$ -gluc/nag + LAP, e c) NAG + LAP/fosforo misurati in diversi siti (Cornale, Poggio Tabor), trattamenti (BBF e BBF+CC) e stagioni (Estate, Inverno). Le barre di errore sono gli errori standard ( $n = 3$ ). All'interno del sito Cornale le diverse lettere minuscole indicano differenze significative con  $p < 0,05$ . All'interno del sito di Poggio Tabor, diverse lettere maiuscole indicano differenze significative con  $p < 0,05$ . ..... 17

Figura 4. a) respirazione basale microbica del suolo (BR), b) quoziente microbico ( $q_{mic}$ ), e c) quoziente metabolico ( $q_{CO_2}$ ) in diversi siti (Cornale, Poggio Tabor), trattamenti (BBF e BBF + CC) e stagioni (Estate, Inverno). Le barre di errore sono gli errori standard ( $n = 3$ ). All'interno del sito Cornale le diverse lettere minuscole indicano differenze significative a  $p < 0,05$ . All'interno del sito di Poggio Tabor, diverse lettere maiuscole indicano differenze significative con  $p < 0,05$ . ..... 18

## **Sintesi**

**Premessa:** Il recupero dei suoli degradati per ripristinare la loro capacità di svolgere importanti funzioni ecologiche, come la promozione del ciclo dei nutrienti, è un tema di grande attualità. Lo scopo del presente lavoro è stato quello di valutare i cambiamenti della qualità del suolo all'interno di due diverse cave dismesse dell'Italia centrale (denominate Cornale e Poggio Tabor) attraverso l'aggiunta di Farina di Basalto® combinata con un consorzio microbico (BBF) (2,7 kg di Farina di Basalto® e 54 mL di inoculo del consorzio microbico ad ogni data di fornitura). I campioni di suolo sono stati raccolti in 9 parcelle in cui sono stati effettuati tre trattamenti: 1) controllo (C) nessun trattamento; 2) Farina di Basalto bioattiva (BBF) e 3) Farina di Basalto bioattiva e cover crop (BBF + CC), replicati casualmente tre volte per cava. Gli indicatori chimici hanno mostrato pochi cambiamenti a causa dei diversi ammendanti, al contrario, quelli biochimici hanno mostrato che l'aggiunta di BBF ha incrementato le attività enzimatiche coinvolte nei cicli di C, N, P e S e ha promosso la crescita microbica e l'attività di mineralizzazione del C in entrambi i siti studiati. Presso il sito di Cornale, in estate, l'attecchimento della cover crop, attraverso la rizodeposizione, ha fornito i substrati carboniosi necessari per alimentare i microrganismi aggiunti mostrando un aumento del quoziente microbico di circa il 5% rispetto al suolo di controllo. Al contrario, nel sito di Poggio Tabor, la peculiare geomorfologia ha impedito la crescita della cover crop; pertanto, le risposte positive delle attività enzimatiche sono state evidenti solo nelle parcelle trattate con BBF.

Da un punto di vista gestionale, l'uso di Farina di Basalto bioattiva composta da Farina di Basalto® e consorzio microbico potrebbe essere una buona strategia per ripristinare la qualità del suolo in base alla funzione di ciclo dei nutrienti in un'area degradata. Tuttavia, in condizioni di elevata limitazione della sostanza organica, è fortemente consigliato un apporto esterno di carbonio organico per sostenere il consorzio microbico esogeno.

**L'uso benefico della Farina di Basalto combinata con un consorzio microbico per migliorare la qualità del suolo in cave dismesse di basalto e di carbonato**

**Pubblicato su** CATENA Anno 237 (2024), 107820, 0341-8162/© 2024 Elsevier B.V. All rights reserved.

**Parole chiave:** polvere di roccia silicatica; attività enzimatiche; biomassa microbica; suolo degradato; bioindicatori.

---

Data di presentazione: 16-06-2023

Data di accettazione: 07-01-2024

DATA DI PUBBLICAZIONE 15-01-2024

---

## **1. Introduzione**

Circa il 33% dei suoli della Terra è già degradato e oltre il 90% potrebbe degradarsi entro il 2050 (IPBES, 2018; FAO, 2019). L'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO) e il Gruppo tecnico intergovernativo sull'erosione dei suoli hanno identificato la perdita di materia organica, lo squilibrio dei nutrienti, l'acidificazione, la contaminazione, il ristagno idrico, la compattazione, l'impermeabilizzazione, la salinizzazione e la perdita di biodiversità come le dieci principali minacce alla qualità del suolo e responsabili dei processi di degrado (FAO e ITPS, 2015). Essendo il suolo una risorsa non rinnovabile, il probabile impatto del degrado sulla futura capacità del suolo di svolgere le sue numerose funzioni ecologiche e di supportare i bisogni umani è fonte di grande preoccupazione per la comunità scientifica. Tra i molti fattori che portano al degrado del suolo, le attività minerarie e/o estrattive sono state ampiamente segnalate per aumentare la contaminazione (Ferreira *et al.*, 2022), l'erosione (Sheoran *et al.*, 2010) e l'alterazione della reazione del suolo (Fu *et al.*, 2011). Inoltre, queste attività possono causare il cedimento del terreno e l'alterazione della fertilità e dell'ecologia del suolo (Ma *et al.*, 2019), l'accumulo di scarichi minerari con la modifica del profilo del suolo e la perdita di materia organica.

La bonifica è il processo con cui i terreni altamente degradati vengono restituiti alla produttività, attraverso il ripristino delle funzioni biotiche e della produttività. In particolare, a questo scopo, le strategie principalmente adottate sono l'aggiunta di terriccio, diversi tipi di ammendanti e l'imboschimento o la piantagione (Sheoran *et al.*, 2010). Tra queste, l'uso di polveri di rocce silicatica (SRP) ha recentemente dimostrato di offrire diversi vantaggi nel ripristinare il pool di nutrienti del suolo degradato e quindi la fertilità (Swoboda *et al.*, 2022).

L'ammendamento dei suoli con rocce macinate è una pratica antica mantenuta nelle moderne pratiche agricole, come l'aggiunta di carbonati e gesso per il controllo del pH e di rocce fosfatiche come fertilizzanti a base di P (van Straaten, 2006). L'applicazione di polvere di rocce silicatica ha portato al miglioramento delle caratteristiche chimiche di vari tipi di suolo, come un'elevata efficienza nella neutralizzazione dell'acidità potenziale (Melo *et al.*, 2012) e un aumento della disponibilità di cationi alcalini (Silva *et al.*, 2012). Tra le SRP, i basalti sono tra le rocce più studiate perché forniscono nutrienti alle piante (Anda *et al.*, 2015; Ramos *et al.*, 2022). Alcuni autori hanno riportato che nei suoli altamente alterati delle regioni agricole tropicali l'aggiunta di basalto porta a un aumento della resa delle colture, del pH del suolo e della capacità di scambio cationico (Van Straaten, 2006; Hartmann *et al.*, 2013; Edwards *et al.*, 2017; Beerling *et al.*, 2020). Inoltre, i suoli prodotti da cave basaltiche hanno un potenziale di sequestro del carbonio inorganico attraverso la formazione di carbonati in situ, soprattutto se mescolati con materia organica

(Manning e Renforth, 2013). Oltre all'aggiunta di ammendanti organici (Soria *et al.*, 2022), l'inoculo microbico è ampiamente utilizzato come pratica agronomica per migliorare la qualità del suolo nei terreni degradati. L'inoculo microbico è un fertilizzante naturale o un biofertilizzante contenente una popolazione specifica di microrganismi (batteri e/o funghi) o un gruppo selezionato di microrganismi benefici da fornire ai suoli, migliorandone così la fertilità biologica (Rashid *et al.*, 2016; Okur, 2018). L'uso dell'inoculo microbico potrebbe essere racchiuso all'interno di pratiche di bioaumento in grado di supportare specie microbiche autoctone per la bonifica di un sito contaminato (Baskaran e Sathiavelu, 2022).

Inoltre, è stato dimostrato che l'effetto combinato di rocce in polvere e di un inoculo microbico è efficace nel mitigare la degradazione del suolo (ad esempio, la fissazione di N e la mobilitazione di P) e contribuisce allo stesso tempo all'immobilizzazione degli inquinanti del suolo (Gindri Ramos *et al.*, 2022). In generale, il contributo benefico dei microrganismi aggiunti può essere osservato sia nelle proprietà chimiche e biologiche sia in quelle fisiche del suolo (Rashid *et al.*, 2016; Suhag, 2016). Ribeiro *et al.* (2020) riportano come i processi della rizosfera combinati con agenti atmosferici biologici (frammentazione delle rocce indotta dai batteri) possano migliorare ulteriormente la dissoluzione dei minerali, poiché l'interazione tra minerali, piante e batteri determina il rilascio di macro e micronutrienti che migliorano lo stato dei nutrienti del suolo. Nel presente lavoro è stato adottato un approccio globale per testare la Farina di Basalto® con il trattamento del consorzio microbico per modificare i suoli di due cave dismesse nell'Italia centrale, nel tentativo di recuperare la qualità del suolo. La valutazione della qualità dei suoli di queste cave degradate è stata ottenuta integrando diverse categorie di indicatori pedologici (Moscatelli *et al.*, 2015; Moscatelli *et al.*, 2017; Bünemann *et al.*, 2018; Moscatelli *et al.*, 2022).

La scelta degli indicatori appropriati, in particolare quelli che riflettono le caratteristiche chimiche e biologiche, è stata fatta tenendo conto delle proprietà del suolo che potrebbero essere influenzate dagli ammendamenti con Farina di Basalto® e microrganismi. L'obiettivo generale di questa ricerca è stato quello di valutare l'efficacia della Farina di Basalto® combinata con il consorzio microbico come ammendante da utilizzare per il ripristino dei suoli di cava degradati. Lo studio si è concentrato sul miglioramento della qualità del suolo in base alla funzione del ciclo dei nutrienti dopo due trattamenti del suolo: (Farina di Basalto® + consorzio microbico, d'ora in poi denominata Farina di Basalto bioattiva (BBF) e Farina di Basalto® + consorzio microbico + cover crop, d'ora in poi denominata BBF + CC) in due cave dismesse. Abbiamo ipotizzato che le proprietà biologiche (bioindicatori) possano rappresentare indicatori sensibili dei cambiamenti del suolo, in grado di fornire risposte tempestive ai trattamenti del suolo in un contesto molto povero di nutrienti. Al contrario, altri attributi del suolo, come il contenuto di sostanza

organica e il rapporto C/N, hanno generalmente bisogno di un periodo molto più lungo per evidenziare cambiamenti significativi nel miglioramento della qualità del suolo (Bünemann *et al.*, 2018). In questo caso, abbiamo ipotizzato un effetto positivo del trattamento BBF + CC sulla ciclicità dei nutrienti del suolo in un periodo a breve termine attraverso l'attività delle piante di Farina di Basalto® e della rizosfera come fonte di forme di carbonio disponibile che innescano sia il consorzio microbico che la microflora autoctona del suolo. In base all'ipotesi generale, i due obiettivi specifici di questa indagine sono: i) stabilire se BBF e BBF + CC attivano gli indicatori biochimici del suolo, in particolare il ciclo dei nutrienti, come le attività enzimatiche, la respirazione basale e il carbonio della biomassa microbica, e ii) stabilire se BBF e BBF + CC esercitano cambiamenti sulle proprietà chimiche del suolo come il pH, capacità di scambio cationico (CEC), P disponibile e cationi scambiabili.

## **2. Materiali e metodi**

### **2.1. Sito sperimentale**

I due siti oggetto di studio si trovano in Italia centrale e sono gestiti dalla Basalti Orvieto srl. Il primo, un'area di circa 800 m<sup>2</sup>, si trova a Cornale (provincia di Terni) a 500 m s.l.m., l'attività di estrazione del basalto è stata interrotta nel periodo 2017 (Fig. 2). Il secondo sito, denominato Poggio Tabor, si trova a Ficulles (provincia di Terni) a circa 20 km da Cornale ed è un'area di circa 1200 m<sup>2</sup> a 600 m s.l.m. Si tratta di una ex cava di calcare, dismessa nel 2010, utilizzata per l'estrazione di conglomerati sabbiosi ed è caratterizzata da un esteso affioramento di rocce (Fig. 1). I dati climatici (temperatura media e precipitazioni) dell'area oggetto di studio relativi agli anni 2020-2021 sono stati riportati nella Fig. 1. In tutti i siti, la vegetazione è spontanea e non omogenea, prevalentemente erbacea a Cornale ed erbaceo-arbustiva a Poggio Tabor (Tabella S2 e S3, rispettivamente). In tutti i siti, i suoli sono stati classificati come Technosols (IUSS WRB Working Group (2022)), quindi altamente incoerenti, eterogenei e con un'evidente alterazione del profilo. Inoltre, a Poggio Tabor è stata osservata una frazione consistente di ghiaia nei primi 15 cm di suolo (circa il 60%), mentre nel sito di Cornale è stata registrata una quantità inferiore (circa il 10%).



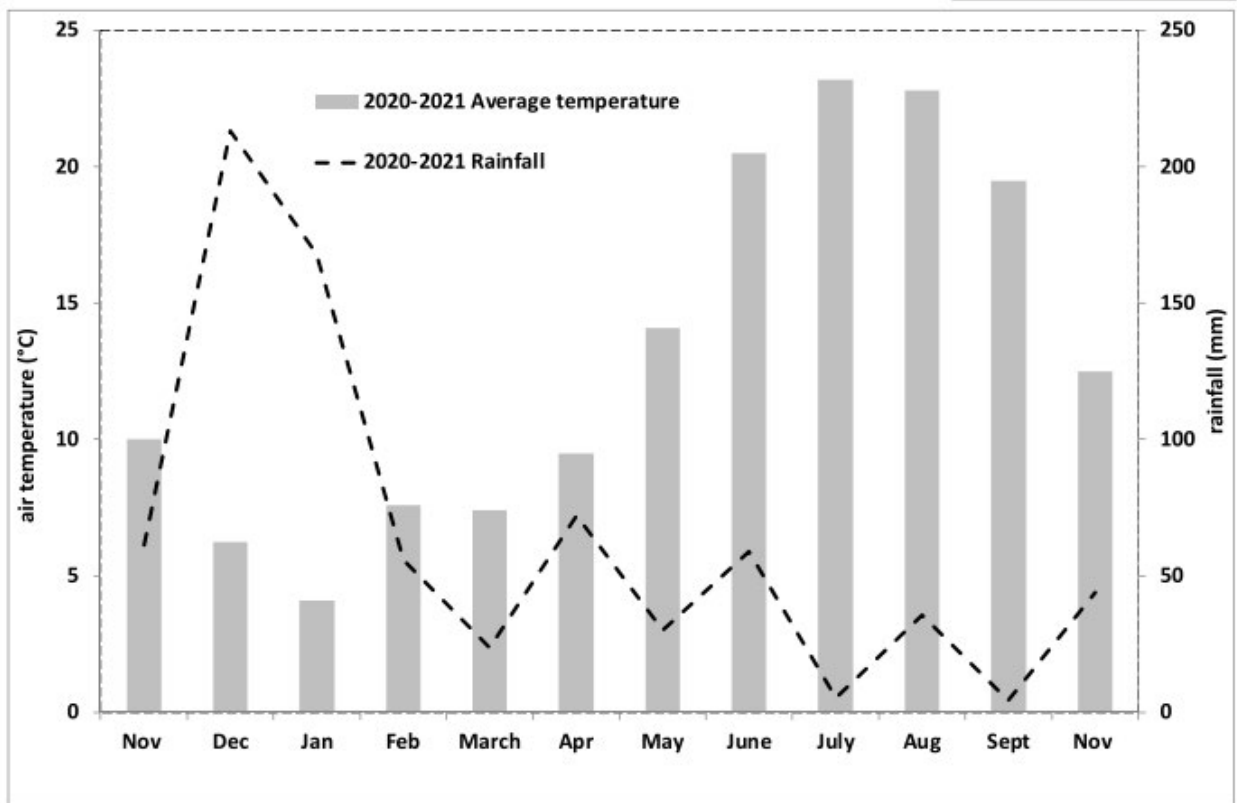
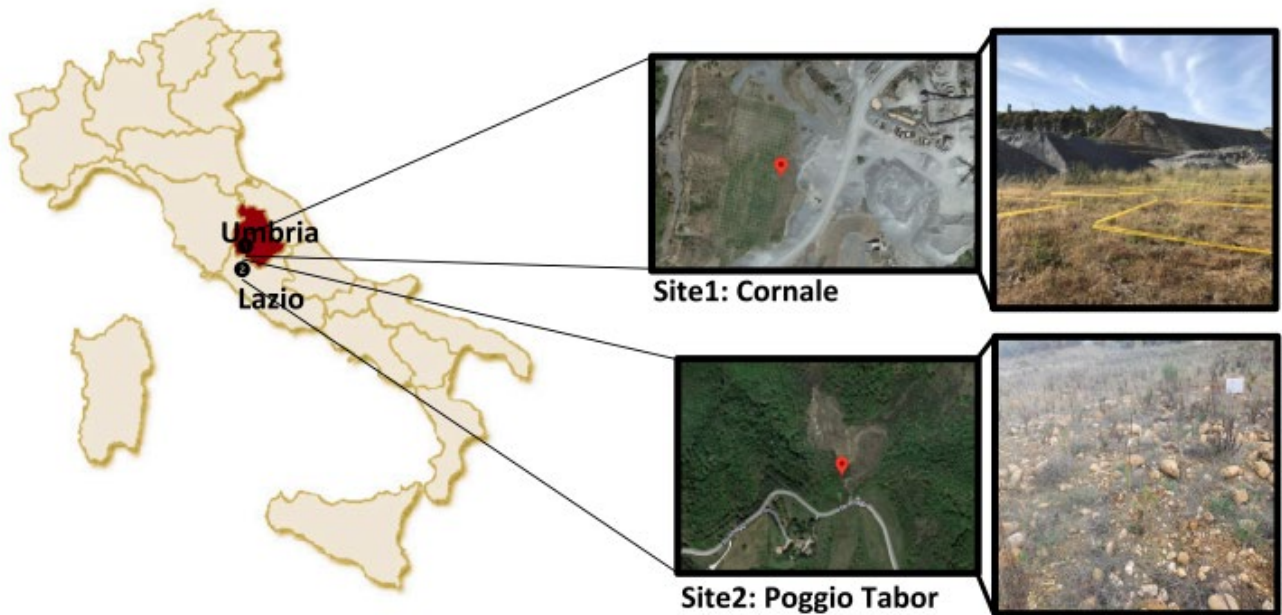


Figura 1. Dati geografici e climatici dell'area di studio. In alto a sinistra: posizione dell'area di studio all'interno dell'Italia. In alto a destra: Mappe di Google Earth e fotografie dei due siti (Cornale e Poggio Tabor). In basso: temperatura media e precipitazioni dell'area relative agli anni 2020-2021.

## 2.2. Disegno sperimentale

In ogni sito è stato stabilito un disegno a blocchi randomizzati di 9 parcelle, ciascuno delle quali misura 3 m × 3 m. I tre trattamenti sono stati: 1) controllo (C): nessun trattamento; 2) Farina di Basalto bioattiva (BBF) e 3) Farina di Basalto bioattiva e cover crop (BBF + CC). Ogni trattamento è stato replicato casualmente tre volte in ogni sito. La Farina di Basalto® (Farina di Basalto® micronizzata da Basalti Orvieto srl) è composta da ossidi di Si, Al, K, Fe, Ca, Mg, Na in concentrazione rispettivamente di 45-49 %, 20-26 %, 8-10 %, 5,2-8,5 %, 7,5-8,5 %, 1,9-2,6 %, 2,2-4,9 % e presenta una concentrazione EC di 1,14 dS m<sup>-1</sup>, pH 9,0 e CEC di 9,0 cmol kg<sup>-1</sup>. La scelta della Farina di Basalto® si basa sul fatto che essa presenta due caratteristiche fondamentali che ne determinano la notevole efficacia nel ripristino della fertilità del suolo: la prima è quella di avere un contenuto completo ed equilibrato di oligoelementi essenziali per la vita nel suolo (Fe, K, P, Ca Zn, Mg, Mn, B e altri); la seconda è legata alla struttura del minerale che è microcristallina o, addirittura, vetrosa. Questa caratteristica unica, non riscontrabile in altre rocce vulcaniche, permette il rilascio continuo degli elementi, sotto forma di ossidi, immediatamente disponibili per la nutrizione delle piante.

Come riportato, il termine Farina di Basalto bioattiva (BBF) si riferisce alla roccia basaltica in polvere combinata con un consorzio microbico; questo è stato considerato un passaggio preliminare necessario per innescare i processi biogeochimici responsabili dell'attività biologica del suolo. In particolare, il BF è stato aggiunto nel dicembre 2019 e nel dicembre 2020, mentre l'apporto del consorzio microbico è stato effettuato nelle seguenti date: dicembre 2019, aprile, maggio, giugno, dicembre 2020, maggio, giugno, settembre e ottobre 2021. Il consorzio microbico utilizzato deriva sia da colture batteriche provenienti da letame bovino raccolto da animali non sottoposti a regolari terapie antibiotiche e di pascolo, sia da microrganismi estratti da suoli organici attraverso terreni di coltura selettivi per i principali generi utili al corretto sviluppo del microbioma del suolo. Il consorzio microbico è stato appositamente formulato presso Basalti Orvieto s.r.l., la sua maturazione è stata ottenuta definendo le condizioni redox ottimali (pH, temperatura, umidità, O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>) e il contenuto di nutrienti. È stato fermentato e concentrato ed è costituito da batteri lattici (*Lactobacillus* spp., 1×10<sup>6</sup> UFC g<sup>-1</sup>), lieviti (*Saccharomyces* spp., 1×10<sup>6</sup> UFC/g) e un consorzio di microbi compostatori (conta microbica totale: 1×10<sup>9</sup> UFC g<sup>-1</sup>).

L'inoculo è stato distribuito alla dose di 6 mL m<sup>-2</sup> (60 L ha<sup>-1</sup>) mentre la Farina di Basalto® alla dose di 0,3 kg m<sup>-2</sup> (3 t ha<sup>-1</sup>), quindi ogni parcella ha ricevuto BBF come 54 mL di consorzio microbico + 2,7 kg di Farina di Basalto® ad ogni data di fornitura come descritto sopra. Durante l'esperimento sono state eseguite le seguenti pratiche gestionali: l'area è stata lavorata con un'erpatura superficiale all'inizio

dell'esperimento, il BBF è stato distribuito sulla superficie del terreno. Prima della semina della CC, tutte le parcelle sono state lavorate in superficie (primi 15-20 cm di terreno). La CC è stata falciata alla fine della fioritura e lasciata sulla superficie del suolo. La composizione della CC scelta per il terzo trattamento è riportata nei materiali supplementari (Tabella S1). Durante la durata dell'esperimento, l'attecchimento e la crescita della cover crop sono stati discreti a Cornale, mentre sono stati scarsi a Poggio Tabor, probabilmente a causa della geomorfologia del sito unita a un'estate molto secca. I dati meteorologici sono stati raccolti in una centralina meteorologica situata a metà strada tra i due siti durante il periodo sperimentale e sono riportati nella Fig. 2.

### **2.3. Campionamento del suolo**

Il progetto sperimentale è stato messo a punto nel dicembre 2019. I campioni di suolo sono stati raccolti nell'estate e nell'inverno del 2021. I dati presentati in questo articolo si riferiscono al secondo anno del progetto. Le analisi chimiche sono state eseguite alla prima data di campionamento, mentre quelle biochimiche sono state ripetute alle due date per tenere conto delle variazioni stagionali dovute alla diversa gestione. I campioni di suolo sono stati raccolti in quattro punti all'interno di un appezzamento di circa 10 m<sup>2</sup>. In ogni punto di raccolta, il suolo superficiale è stato raccolto a una profondità massima di 15 cm. Il suolo proveniente dalle 4 fosse dello stesso appezzamento è stato poi riunito in un campione misto di circa 500 g. Pertanto, in ogni data di campionamento sono stati portati in laboratorio un totale di 27 campioni di suolo. I campioni di suolo sono stati essiccati all'aria e setacciati con una maglia di 2 mm. Prima delle analisi biochimiche, i campioni di suolo sono stati inumiditi al 60% della loro capacità di ritenzione idrica e incubati a temperatura ambiente per cinque giorni.

### **2.4. Indicatori chimici e biochimici della qualità del suolo**

Le analisi fisiche e chimiche dei suoli hanno incluso: tessitura, pH (H<sub>2</sub>O), C organico (TOC), contenuto di N totale (TN), C e N estraibile (C<sub>ext</sub> e N<sub>ext</sub> rispettivamente), conducibilità elettrica (EC), capacità di scambio cationico (CEC), P disponibile (P<sub>av</sub>) ed elementi scambiabili come Ca<sub>ex</sub>, Mg<sub>ex</sub>, Na<sub>ex</sub>, K<sub>ex</sub>. L'analisi della tessitura è stata effettuata in conformità al Soil Survey Laboratory Methods Manual (Soil Survey Staff, 2014). Il pH del suolo è stato misurato potenziometricamente in una sospensione di acqua deionizzata 1:2,5 (p/v) (van Reeuwijk, 2002). Il C organico totale (TOC) e il contenuto di azoto (TN) sono stati determinati con un analizzatore elementare vario-MACRO cube Elementar. Il fosforo disponibile è stato

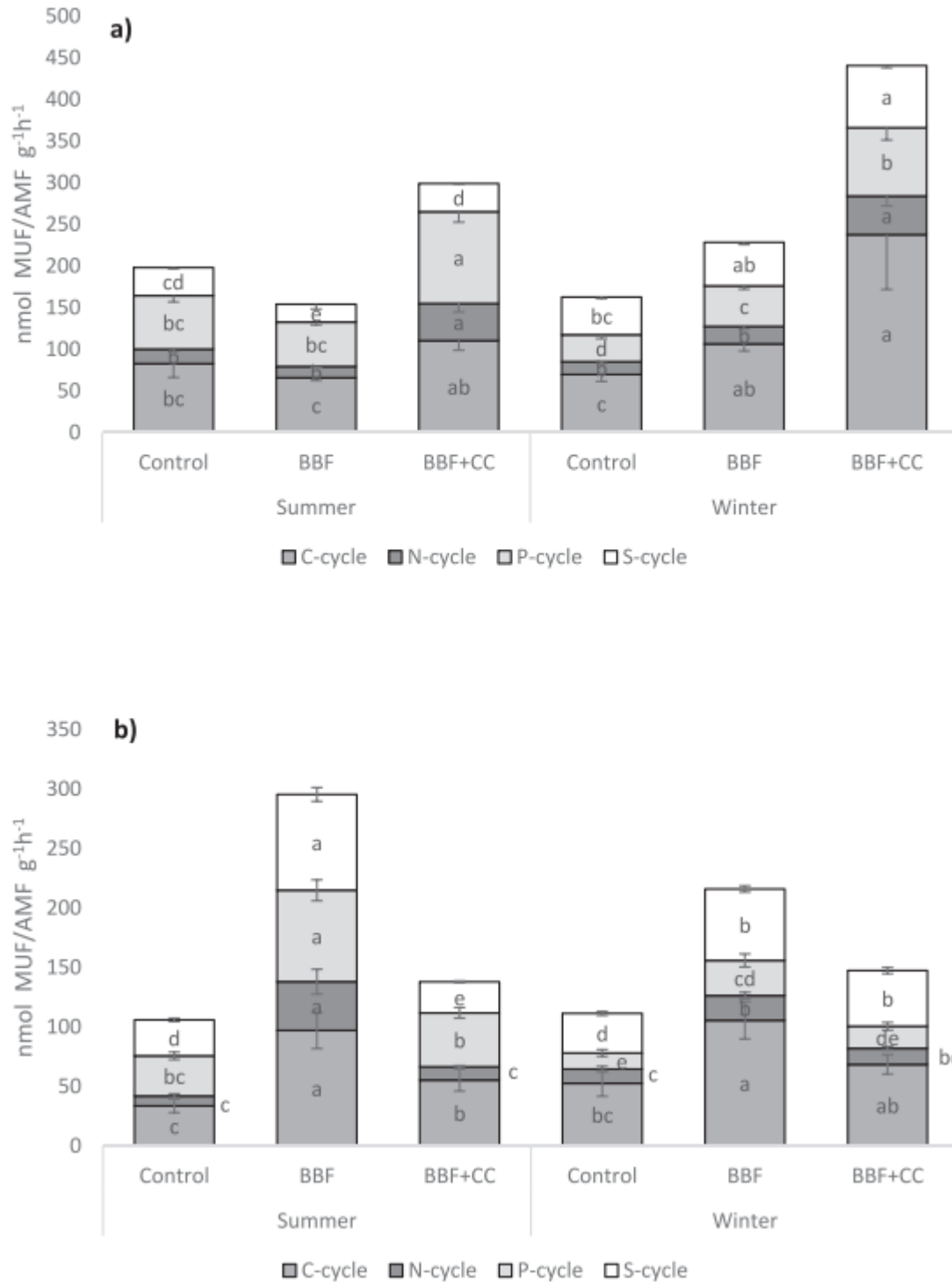


Figura 2. Attività enzimatiche del suolo raggruppate per il ciclo di C, N, P e S misurate in diversi siti (a) Cornale, b) Poggio Tabor), trattamenti (BBF e BBF + CC) e stagioni (estate, inverno). Per ciascun gruppo enzimatico, le colonne contrassegnate da lettere diverse differiscono significativamente per  $p < 0,05$ .

valutato dopo estrazione acida con 1 M  $\text{NH}_4\text{F}$  (Bray e Kurtz, 1945). La capacità di scambio cationico (CEC) è stata misurata dopo l'estrazione con  $\text{BaCl}_2$  a pH 8,1. La conducibilità elettrica (EC) è stata determinata con un conduttimetro WTW multi 340i (Weilheim, Germania) in sospensioni 1:2,5 suolo:acqua (w:v). Il contenuto di elementi scambiabili è stato valutato mediante ICP-OES. In breve, 5 g di ciascun campione di suolo sono stati estratti con 25 mL di acetato di ammonio 1 M ( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ) (pH 7,0) (van Reeuwijk, 2002). Ogni campione è stato agitato orbitalmente per 30 minuti a 150 giri al minuto e poi filtrato attraverso carta da filtro Whatman n. 42. Le basi scambiabili Ca, Mg, Na e K sono state determinate mediante ICP-OES (8000 DV, PerkinElmer, Shelton, CT, USA) dotato di un nebulizzatore Scott. Il carbonio della biomassa microbica del suolo (MBC) è stato valutato secondo Vance *et al.* (1987) con il metodo dell'estrazione per fumigazione. Su estratti di suolo  $\text{K}_2\text{SO}_4$  0,5 M, derivanti da suoli non fumigati, sono state valutate le forme di C e N estraibili ( $C_{\text{ext}}$  e  $N_{\text{ext}}$ ), utilizzate come proxy dei pool labili di C e N. È stato misurato anche il quoziente microbico (qMIC, rapporto tra MBC e C organico). La respirazione microbica basale ( $R_{\text{mic}}$ ) è stata misurata incubando 10 g di suolo a temperatura e umidità controllate per 25 giorni (Badalucco *et al.*, 1992). La  $\text{CO}_2$  evoluta è stata intrappolata, dopo 1, 3, 7, 10, 15 giorni di incubazione, in 2 mL di NaOH 1 M e determinata mediante titolazione dell'eccesso di NaOH con HCl 0,1 M. La  $\text{CO}_2$  totale evoluta alla fine dell'esperimento è considerata la respirazione cumulativa ( $MR_{\text{cum}}$ ) mentre la produzione media oraria di  $\text{CO}_2$  è la respirazione basale (BR). Le attività enzimatiche sono state misurate con il metodo dei substrati fluorogenici di metilumbelliferil (MUF) (Marx *et al.*, 2001). Sono stati analizzati i seguenti enzimi idrolitici:  $\beta$ -cellobioidrolasi (CELL; EC 3.2.1.91), Nacetil- $\beta$ -glucosaminidasi (NAG; EC 3.2.1.30),  $\beta$ -glucosidasi ( $\beta$ -GLUC; EC 3.2.1.21),  $\alpha$ -glucosidasi ( $\alpha$ -GLUC; EC 3.2.1.20),  $\beta$ -xilosidasi (XYL; EC 3.2.2.27), fosfatasi acida (AP; EC 3.1.3.2), butirrato esterasi (BUT; EC 3.1.1.1) e leucina aminopeptidasi (LAP; EC 3.4.11.1). I rispettivi substrati erano 4-MUF  $\beta$ -D-cellobioside, 4-MUF-N-acetil  $\beta$ -glucosaminide, 4-MUF  $\beta$ -D-glucoside, 4-MUF  $\alpha$ -D-glucoside, 4-MUF-7- $\beta$ -D-xyloside, 4-MUF-fosfato, 4-MUF-butirrato e L-leucina-7-ammino-4-metilcumarina (AMC). La fluorescenza (eccitazione 360 nm; emissione 450 nm) è stata misurata con un lettore automatico di piastre fluorimetriche (Fluoroskan Ascent, Labsystem, Francoforte, Germania) dopo 0, 30, 60, 120 e 180 minuti (Marinari *et al.*, 2013). I risultati sono stati espressi come nmoli di prodotto (MUF o AMC) di ciascuna reazione enzimatica rilasciata per g di suolo per unità di tempo in relazione a una curva standard eseguita con concentrazioni crescenti di MUF o AMC e incubata alle stesse condizioni sperimentali. Le attività coenzimatiche di acquisizione di C/N e N/P sono state misurate dai rapporti di  $\beta$ -glucosidasi/(chitinasi + leucina aminopeptidasi) [ $\beta$ -gluc/(NAG + LAP)] e (chitinasi + leucina aminopeptidasi)/fosfatasi acida [(NAG + LAP)/fosfato], rispettivamente (Sinsabaugh *et al.*, 2009). Questi

rapporti rappresentano il limite microbico per l'N rispetto al C e al P, rispettivamente.

## **2.5. Analisi statistica**

Per verificare le differenze tra le proprietà chimiche e biochimiche del suolo è stata eseguita un'analisi della varianza (ANOVA) a due vie. Per le proprietà chimiche sono state considerate le variabili sito e trattamento, per le analisi biochimiche le variabili stagione e trattamento. La normalità e l'omoschedasticità dei dati sono state verificate mediante analisi grafica dei residui. Quando queste assunzioni non sono state soddisfatte, è stata selezionata la trasformazione logaritmica mediante la procedura di massima verosimiglianza ideata da Box e Cox (1964), implementata nella funzione Box-Cox del pacchetto Modern Applied Statistics with S (MASS) (Venables e Ripley 2002) nell'ambiente statistico R (R Core Team, 2020). Tutti gli effetti significativi sono stati valutati mediante il test post-hoc di Fisher a  $p < 0,05$ . Le analisi statistiche sono state eseguite utilizzando il software statistico R 3.5.0 (R Core Team, 2020).

## **3. Risultati**

### **3.1. Indicatori chimici**

Le principali caratteristiche chimiche dei siti di Cornale e Poggio Tabor sono mostrate nella Tabella 1. I valori di TOC e TN non erano statisticamente diversi tra i trattamenti, ma nelle parcelle di Poggio Tabor trattate con BBF i contenuti di TOC e TN erano significativamente più alti rispetto alle parcelle trattate a Cornale. Per quanto riguarda le forme estraibili, BBF + CC a Cornale ha mostrato i valori più elevati di  $C_{ext}$  e  $N_{ext}$  (rispettivamente  $174,9 \mu\text{g C/g}$  e  $18,3 \mu\text{g C/g}$ ). Il pH è risultato più elevato a Poggio Tabor rispetto a Cornale e, all'interno di Cornale, le due parcelle trattate (BBF, BBF + CC) hanno mostrato un valore leggermente superiore rispetto alla parcella di controllo. La CEC ha mostrato due comportamenti diversi nei due siti. A Cornale la parcella BBF + CC ha mostrato valori inferiori ( $4,2 \text{ cmol}_{(+) } \text{ kg}^{-1}$ ), mentre a Poggio Tabor le due parcelle trattate hanno mostrato valori superiori (BBF =  $13,4$  e BBF + CC =  $10,6 \text{ cmol}_{(+) } \text{ kg}^{-1}$ ) rispetto al controllo ( $6,3 \text{ cmol}_{(+) } \text{ kg}^{-1}$ ) (Tabella 1). L'EC è sempre stata più alta a Poggio Tabor rispetto al sito di Cornale senza differenze tra i trattamenti, mentre la parcella BBF + CC ha mostrato il valore più alto a Cornale ( $1064 \mu\text{S cm}^{-1}$ ). Il P disponibile,  $Mg_{ex}$ ,  $K_{ex}$ ,  $Na_{ex}$  hanno mostrato valori più alti a Cornale rispetto a Poggio Tabor, mentre il  $Ca_{ex}$  è risultato più basso a Cornale rispetto a Poggio Tabor, senza differenze tra i trattamenti (Tabella 1).

**Tabella 1. Principali caratteristiche chimiche dei suoli nei diversi trattamenti (BBF e BBF + CC) e nei siti di Cornale e Poggio Tabor. I numeri tra parentesi sono gli errori standard (n = 3). Per ogni riga, i valori medi con lettere diverse differiscono significativamente per P < 0,05.**

Texture		Pr(>F)	Cornale			Poggio Tabor		
			Control loam	BBF sandy clay loam	BBF + CC sandy loam	Control sandy clay loam	BBF sandy clay loam	BBF + CC sandy clay loam
TOC (g kg <sup>-1</sup> )	Treatment	0.895	3.70(0.05)b	3.99(0.05)b	4.39(0.06)b	5.53(0.09)ab	7.53(0.29)a	4.53(0.12)ab
	Site	0.037	*					
	Treatment*Site	0.444						
TN (g kg <sup>-1</sup> )	Treatment	0.901	0.53(0.01)ab	0.46(0.01)b	0.49(0.01)b	0.67(0.02)ab	0.95(0.04)a	0.58(0.01)ab
	Site	0.069						
	Treatment*Site	0.535						
C <sub>ext</sub> (µg C g <sup>-1</sup> )	Treatment	<0.001	122.3(4.9)bc	140.9(6.7)b	174.9(12.7)a	102.7(3.3)c	124.2(12.2)bc	115.6(7.6)bc
	Site	<0.001	***					
	Treatment*Site	0.06						
N <sub>ext</sub> (µg C g <sup>-1</sup> )	Treatment	0.197	10.3(1.5)ac	13.0(2.9)ab	18.3(3.5)a	6.3(1.7)c	8.6(1.4)ac	8.5(2.5)bc
	Site	0.006	**					
	Treatment*Site	0.447						
pH(H <sub>2</sub> O)	Treatment	0.009	6.3(0.02)c	6.4(0.04)b	6.45(0.04)b	7.1(0.03)a	7.2(0.03)a	7.1(0.01)a
	Site	<0.001	**					
	Treatment*Site	0.098	*					
CEC (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	Treatment	0.002	7.6(1.1)bc	7.8(0.9)bc	4.2(1.5)d	6.3(2.2)cd	13.4(0.3)a	10.6(1.0)ab
	Site	0.003	**					
	Treatment*Site	<0.001	***					
EC (µS cm <sup>-1</sup> )	Treatment	<0.001	380.6(12.2)c	413.3(15.0)c	523.2(17.6)b	1029(28.4)a	998(1.2)a	1064(38.3)a
	Site	<0.001	***					
	Treatment*Site	0.038	*					
P <sub>av</sub> (µg g <sup>-1</sup> )	Treatment	0.650	5.6(0.4)a	6.3(0.3)a	6.5(0.4)a	2.6(0.7)b	2.0(0.4)b	2.2(0.2)b
	Site	<0.001	***					
	Treatment*Site	0.651						
Mg <sub>ex</sub> (µg g <sup>-1</sup> )	Treatment	0.723	192.8(11.6)b	232.1(19.9)a	207.3(8.1)ab	100.0(9.8)c	83.5(3.5)c	95.6(2.8)c
	Site	<0.001	***					
	Treatment*Site	0.02607	*					
K <sub>ex</sub> (µg g <sup>-1</sup> )	Treatment	0.3062	383.4(20.8)a	555.4(87.8)a	434.8(21.9)a	115.2(17.6)b	113.0(7.3)b	134.0(21.4)b
	Site	<0.001	***					
	Treatment*Site	0.3062						
Ca <sub>ex</sub> (µg g <sup>-1</sup> )	Treatment	0.31329	1340(77.0)c	1512(147.8)c	1473(69.2)c	4537(218.9)a	4581(58.1)a	4092(178.4)b
	Site	<0.001	***					
	Treatment*Site	0.08432						
Na <sub>ex</sub> (µg g <sup>-1</sup> )	Treatment	0.04783	225.2(11.9)a	272.1(21.8)a	223.0(17.4)a	69.1(13.5)b	43.0(3.3)bc	34.2(1.8)c
	Site	<0.001	***					
	Treatment*Site	0.01125	*					

TOC = carbonio organico totale, TN = azoto totale, Cext = C estraibile in K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Next = N estraibile in K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CEC = capacità di scambio cationico, EC = conducibilità elettrica, Pav = fosforo disponibile, Mg<sub>ex</sub> = Mg scambiabile, K<sub>ex</sub> = K scambiabile, Ca<sub>ex</sub> = Ca scambiabile, Na<sub>ex</sub> = Na scambiabile.

### 3.2. Indicatori biochimici

A Cornale l'attività enzimatica è risultata più elevata nelle parcelle BBF + CC rispetto agli altri trattamenti e al controllo in entrambe le stagioni (Fig. 2a). L'attività più elevata nelle parcelle BBF + CC è stata più evidente in inverno ed è stata principalmente dovuta agli enzimi legati al ciclo del C (β-glucosidasi, α-

glucosidasi,  $\beta$ -xilosidasi e  $\beta$ -cellobioidrolasi) ( $237.6 \text{ nmol MUF g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ), mentre in estate le differenze con gli appezzamenti di controllo sono state principalmente attribuibili agli enzimi legati al ciclo dell'N (N-acetil- $\beta$ -glucosaminidasi, leucina aminopeptidasi) ( $44,6 \text{ nmol MUF/AMF g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) e del P ( $110,1 \text{ nmol MUF g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) (fosfatasi acida) (Fig. 2a). A Poggio Tabor le parcelle che hanno registrato una maggiore attività sono state quelle trattate con la Farina di Basalto® e l'inoculo microbico in entrambe le stagioni, anche se in inverno non sono state osservate differenze significative tra i due trattamenti (Fig. 2b). L'attività della butirrato esterasi ha mostrato i valori più elevati nelle parcelle BBF + CC in entrambe le stagioni a Cornale ( $1150,5 \text{ nmol MUF g}^{-1} \text{ h}^{-1}$  in estate e  $1162,3 \text{ nmol MUF g}^{-1} \text{ h}^{-1}$  in inverno), e nelle due parcelle trattate in estate a Poggio Tabor (Fig. 3a). Per quanto riguarda il rapporto  $\beta$ -gluc/ (NAG + LAP), a Cornale non sono state riscontrate differenze significative tra i trattamenti, mentre a Poggio Tabor, in inverno, i valori sono stati superiori rispetto all'estate (Fig. 3b). La Fig. 3c mostra che il rapporto (NAG + LAP)/fosforo ha avuto lo stesso andamento nei due siti, con valori più bassi in inverno nelle parcelle BBF. La figura 4a mostra la respirazione microbica basale (BR) con un trend crescente a partire dal controllo fino alle parcelle BBF + CC in entrambe le stagioni a Cornale, mentre a Poggio Tabor ha raggiunto i valori più alti in entrambe le parcelle trattate in estate ( $0,35 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$  nelle parcelle BBF e  $0,39 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$  nelle parcelle BBF + CC). Per quanto riguarda i due indici microbici selezionati, il quoziente microbico ( $q_{mic}$ ) ha mostrato valori significativamente più elevati a Cornale in estate rispetto all'inverno, con un aumento nelle parcelle BBF + CC (+8,8%), mentre a Poggio Tabor, anche se con valori più bassi, è stato evidente un effetto significativo di entrambi i trattamenti sempre in estate (Fig. 4b). Infine, il quoziente metabolico ( $q_{CO2}$ ) ha mostrato il valore più alto nelle parcelle BBF + CC in inverno a Cornale, mentre non ha mostrato differenze significative tra i trattamenti e le stagioni a Poggio Tabor (Fig. 4c).



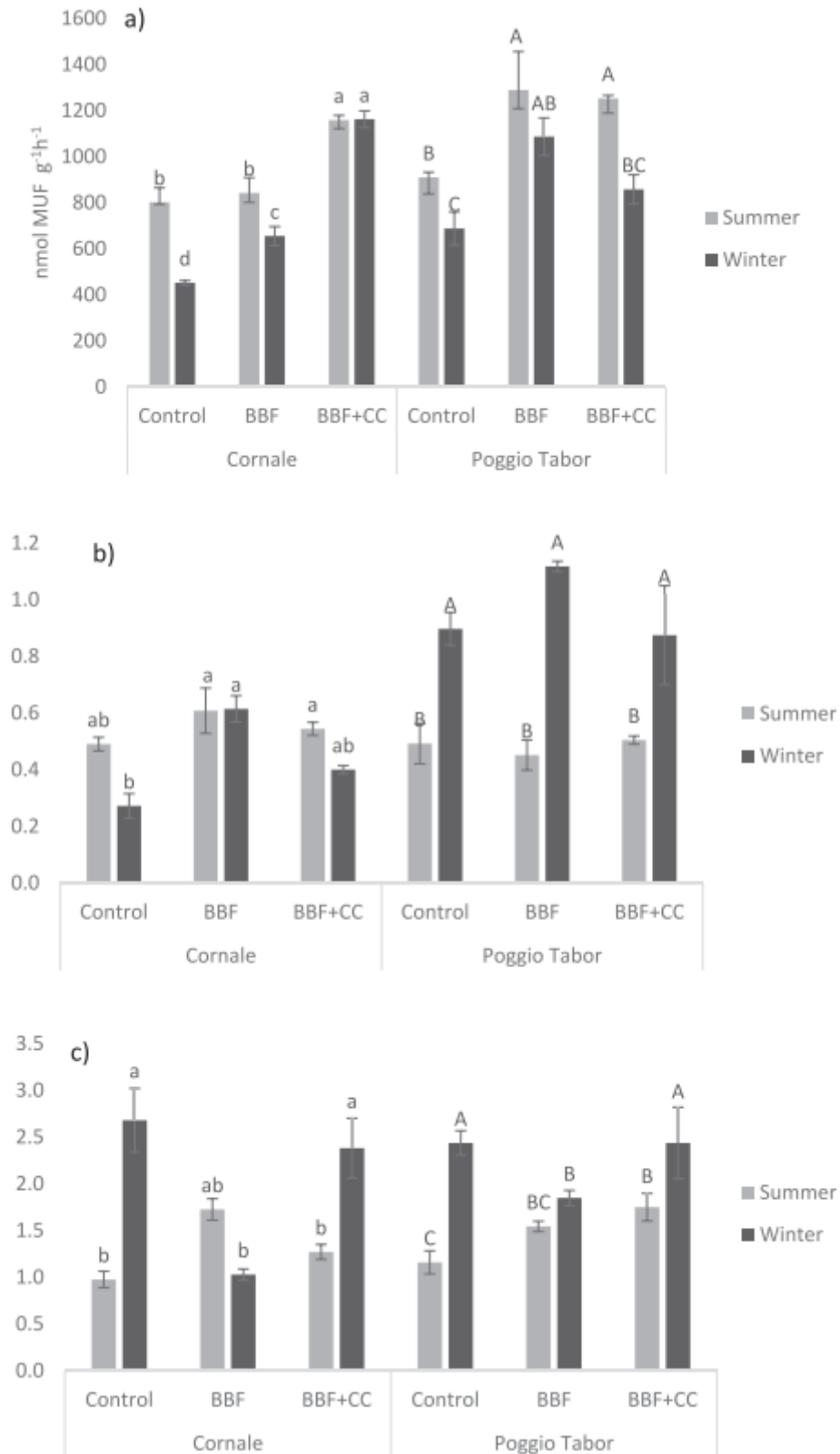


Figura 3. a) attività butirrato esterasi nel suolo, b) rapporti stechiometrici β-gluc/nag + LAP, e c) NAG + LAP/fosforo misurati in diversi siti (Cornale, Poggio Tabor), trattamenti (BBF e BBF+CC) e stagioni (Estate, Inverno). Le barre di errore sono gli errori standard (n = 3). All'interno del sito Cornale le diverse lettere minuscole indicano differenze significative con p < 0,05. All'interno del sito di Poggio Tabor,

diverse lettere maiuscole indicano differenze significative con  $p < 0,05$ .

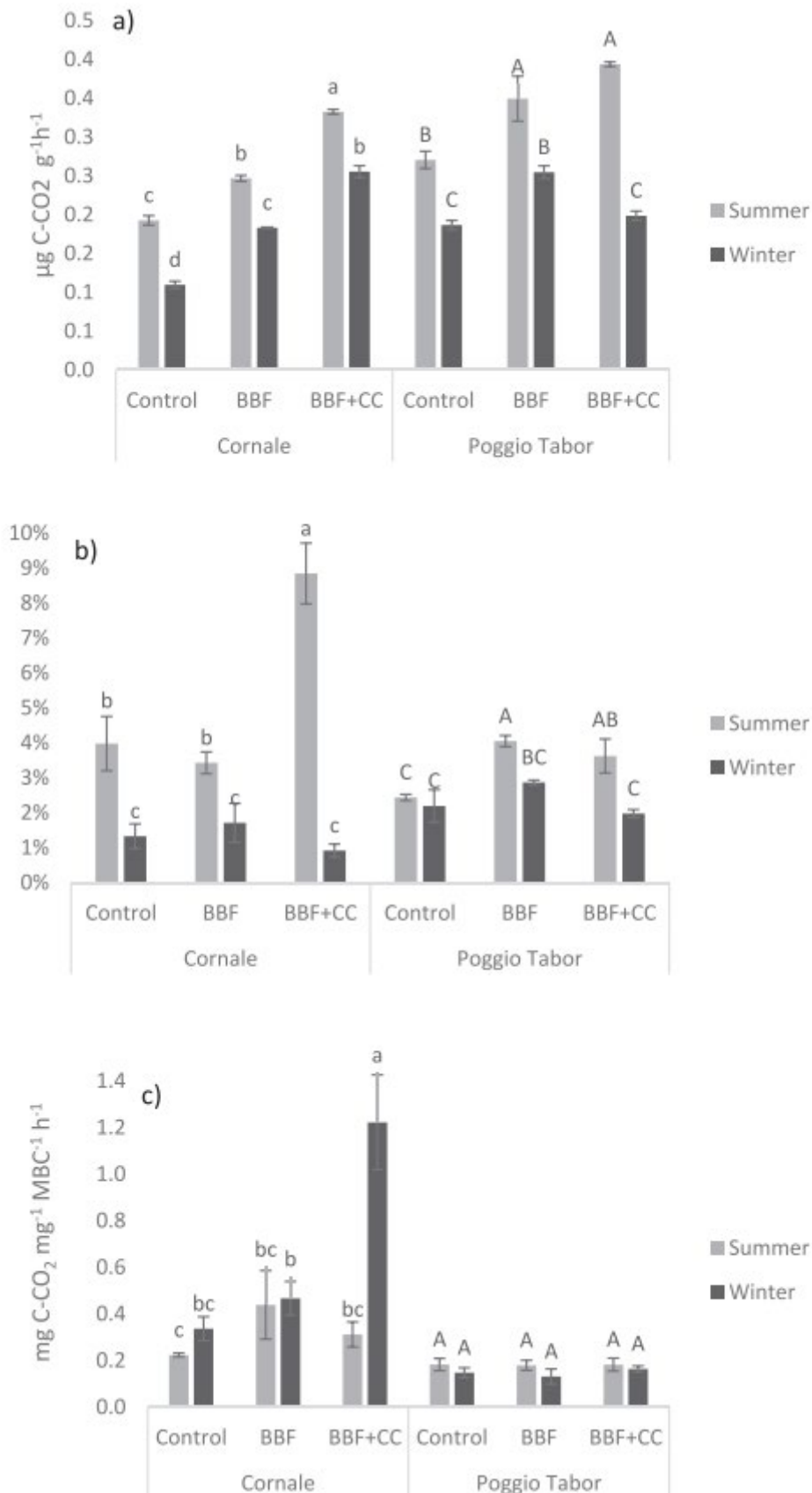


Figura 4. a) respirazione basale microbica del suolo (BR), b) quoziente microbico ( $q_{mic}$ ), e c) quoziente

metabolico ( $qCO_2$ ) in diversi siti (Cornale, Poggio Tabor), trattamenti (BBF e BBF + CC) e stagioni (Estate, Inverno). Le barre di errore sono gli errori standard ( $n = 3$ ). All'interno del sito Cornale le diverse lettere minuscole indicano differenze significative a  $p < 0,05$ . All'interno del sito di Poggio Tabor, diverse lettere maiuscole indicano differenze significative con  $p < 0,05$ .

## **4. Discussione**

### **4.4 Effetto sugli indicatori chimici**

Il contenuto molto basso di carbonio organico totale e di azoto totale del suolo riscontrato in entrambi i siti è stato riportato anche da Sheoran *et al.* (2010) in un sito minerario. I suoli dei siti di cava sono soggetti a una forte pressione antropica e sono caratterizzati da un basso contenuto di sostanza organica e di nutrienti, come riportato anche da Peco *et al.* (2021). Il carbonio organico totale e l'azoto totale sono indicatori chimici della qualità del suolo che mostrano cambiamenti significativi ai trattamenti in periodi di tempo piuttosto lunghi; sono infatti definiti indicatori statici, o moderatamente dinamici (Bünemann *et al.*, 2018). Il breve periodo di questo esperimento non ha quindi permesso di apprezzare cambiamenti significativi nel loro contenuto. Al contrario, per apprezzare i cambiamenti indotti dai trattamenti nei pool organici di C e N, è stata effettuata la determinazione delle frazioni di C e N estraibili, che rappresentano i pool di C e N labili. Solo a Cornale è stato osservato un aumento del  $C_{ext}$  dovuto alla crescita del CC e al sovescio. Questo aumento potrebbe essere attribuito principalmente all'essudazione di composti labili di C come carboidrati, aminoacidi, acidi organici alifatici o aromatici, fenoli e acidi grassi (Haynes, 2005) derivati dalle radici delle piante. Questo apporto di C dalla rizosfera rappresenta un investimento fatto dalla pianta per modificare le condizioni del suolo e stabilire un ambiente appropriato per il suo sviluppo (Massaccesi *et al.*, 2015).

A Poggio Tabor, non è stato possibile osservare un effetto dovuto all'aggiunta delle piante, in quanto le condizioni specifiche del sito ne hanno fortemente compromesso lo sviluppo (Toktara *et al.*, 2016). Solo nel sito di Cornale, dove il valore del pH di partenza era sub-alcalino, è stato osservato un aumento della reazione del suolo combinato con un aumento del contenuto di alcuni nutrienti dopo l'aggiunta di BBF. Questi aumenti potrebbero essere attribuiti alle proprietà chimiche della Farina di Basalto®, confermando un potenziale apporto di nutrienti al suolo. L'aumento del valore del pH in seguito all'aggiunta di farina di roccia è ampiamente riportato in letteratura (Hinsinger *et al.*, 1995; Gillman *et al.*, 2002; Panhwar *et al.*, 2014; Maliszewski, 2021; Wotchoko *et al.*, 2021; Swoboda *et al.*, 2022; Gindri Ramos *et al.*, 2022). Tuttavia, gli effetti più significativi e correttivi, in situazioni di fertilità gravemente compromessa, si evidenziano nei suoli acidi, gli Oxisols (Shamshuddin e Anda, 2012; Anda *et al.*, 2015). Un aumento della CEC è stato visibile solo nelle parcelle trattate di Poggio Tabor, probabilmente a causa dei valori di pH che

variavano da neutri a sub-alcalini. Alcuni studi sostengono che il rilascio di cationi scambiabili Ca, Mg, K e Na dalla Farina di Basalto® aggiunta al suolo può aumentare la disponibilità di elementi scambiabili trattenuti dal suolo (Gillman *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2012). La significativa diminuzione della CEC nelle parcelle BBF + CC a Cornale può essere dovuta all'intenso fabbisogno di nutrienti della cover crop. I valori di conducibilità elettrica sono sempre stati più alti nel sito di Poggio Tabor rispetto a Cornale, probabilmente a causa di un'alta percentuale di ghiaia e di una tessitura sabbioso-argillosa che, favorendo una maggiore velocità di scorrimento dell'acqua, può promuovere l'erosione del calcare, come confermato anche dalla concentrazione di Ca scambiabile tre volte superiore. Al contrario, a Cornale è stato osservato un aumento della EC nelle parcelle BBF + CC; questo aumento potrebbe essere dovuto all'assorbimento da parte delle piante dell'acqua disponibile, con conseguente concentrazione di sali. Il contenuto di P disponibile è risultato molto basso in entrambi i siti, con valori inferiori a  $6,5 \text{ mg kg}^{-1}$  e nel sito di Poggio Tabor con valori inferiori a  $2,6 \text{ mg kg}^{-1}$  indipendentemente dai trattamenti. In quest'ultimo caso, i valori molto bassi di contenuto di P riscontrati possono essere attribuiti al pH più alcalino rispetto a Cornale, che ha ridotto la disponibilità di questo elemento, rendendolo insolubile, o a causa della sua rapida assimilazione da parte della biomassa microbica aggiunta e/o delle piante. Ramos *et al.* (2022) hanno riferito che il tasso di alterazione della polvere di roccia aggiunta può essere influenzato da ulteriori fattori ambientali. Pertanto, l'efficacia agronomica del processo di remineralizzazione mediante polvere di roccia/farina aggiunta al suolo è direttamente correlata alla sua mineralogia, alla composizione chimica, al tipo di suolo e alle condizioni ambientali che accelerano o meno i processi di alterazione (Gindri Ramos *et al.*, 2022).

Ad esempio, in contesti pedoclimatici tropicali caratterizzati da alte temperature e precipitazioni, insieme al contributo di piante e microrganismi, questi processi sono accelerati. Campbell (2009), ad esempio, non riporta effetti positivi sul contenuto di nutrienti del suolo in seguito all'aggiunta di polvere di roccia, né sul contenuto di nutrienti delle colture oggetto dello studio.

#### **4.2 Effetto sugli indicatori biochimici**

Come considerazione generale, in questo studio tutti i gruppi di enzimi del suolo, mediati sia tra i trattamenti che tra i siti e in relazione al controllo, sono stati attivati positivamente secondo la seguente classifica (dati non mostrati): enzimi ciclici  $N > C > P > S$ . Un aumento delle attività idrolitiche legate ai principali cicli biogeochimici è un indicatore dell'attività di acquisizione dei nutrienti svolta dai microbi del suolo (Sinsabaugh *et al.*, 2009). A Cornale, è stato osservato un aumento delle attività enzimatiche nelle

parcelle BBF in inverno e in quelle BBF + CC in entrambe le stagioni. I risultati sono in linea con un altro studio in cui la farina di roccia, come fonte di macronutrienti, è stata utilizzata in combinazione con composti organici per testarne gli effetti sull'attività metabolica dei microrganismi, con conseguente aumento dell'attività enzimatica (Li *et al.*, 2021). Gli enzimi del ciclo del C hanno mostrato il maggior incremento durante la stagione invernale. Quest'ultimo risultato potrebbe essere dovuto alle migliori condizioni di umidità del suolo che favoriscono le attività enzimatiche. Anche Sardans e Penuelas (2005) riportano che gli enzimi sono indicatori altamente dipendenti dalle condizioni delle precipitazioni. L'aumento dell'attività enzimatica di C-cycling in presenza di cover crop potrebbe essere dovuto a una maggiore disponibilità di substrato derivante dalla rizodeposizione stimolata dalla presenza della crescita di radici e germogli. A questo proposito, Sinsabaugh e Shah (2011) hanno riportato che nei suoli erbosi, la cellulosa rappresenta una porzione significativa della lettiera vegetale che raggiunge il suolo, e la produzione di  $\beta$ -glucosidasi è necessaria perché catalizza l'idrolisi del cellobiosio in glucosio. Inoltre, a Cornale, in estate, le attività enzimatiche coinvolte nei cicli di N, P e S sono state particolarmente stimolate dalla presenza della coltura di copertura, indicando un'elevata richiesta di questi nutrienti da parte della biomassa vegetale o del pool microbico. In condizioni oligotrofiche del suolo, le piante e/o i microbi rilasciano enzimi idrolitici in grado di liberare nutrienti inorganici (ad esempio N, P, S) dai composti organici. Questo risultato è in accordo con quanto riportato da Castellano Hinojosa e Strauss (2020), secondo cui l'uso della cover crop può influenzare positivamente il ciclo dell'azoto promuovendo una maggiore disponibilità di azoto nel suolo per essere utilizzato dai microrganismi e dalle piante. Al contrario, a Poggio Tabor, l'aumento dell'attività enzimatica coinvolta nei cicli biogeochimici dei nutrienti è stato evidente solo nelle parcelle BBF, e in particolare durante la stagione estiva. Questo risultato potrebbe essere dovuto, come già detto, alla quasi totale assenza di colture di copertura in quel sito e suggerisce che in condizioni particolarmente ostili e aride l'azione biotica è svolta da quelle forme viventi che possono resistere a condizioni avverse, come gruppi microbici selezionati. In questo sito, in estate, le parcelle BBF hanno mostrato le più alte attività di arilsulfatasi e chitinasi, che erano anche significativamente correlate tra loro ( $r = 0,88$ ,  $P < 0,001$ , dati non mostrati). Gli esteri solfati (substrati dell'arilsulfatasi) e la chitina (substrato della chitinasi) sono presenti solo nelle cellule fungine e sono i loro principali costituenti (Bandick e Dick, 1999). Questo risultato ha suggerito una limitazione della crescita della biomassa fungina (*Saccharomyces* spp) aggiunta all'inoculo. Le condizioni di siccità che hanno caratterizzato l'estate 2021 potrebbero aver limitato la crescita dell'inoculo microbico, in particolare della biomassa fungina che ha iniziato a decomporsi. Infine, l'attività dell'esterasi butirrico, che può essere

considerata un proxy dell'attività endocellulare (Wittmann *et al.*, 2004), è risultata molto attiva in BBF + CC a Cornale e in BBF a Poggio Tabor, in entrambe le stagioni, indicando che l'aggiunta di BBF ha innescato l'attività metabolica della biomassa microbica del suolo. In accordo con Kähkönen *et al.* (2007), questa ipotesi è stata confermata anche dalla correlazione significativamente positiva con i nostri dati sulla respirazione basale ( $r = 0,66$ ,  $P < 0,001$ , dati non mostrati). I microbi del suolo sono risultati limitati per quanto riguarda l'azoto nei suoli di entrambe le cave rispetto al fabbisogno di C e di P. Infatti, come dimostrano le attività di acquisizione coenzimatiche di C/N e N/P, per entrambi i siti e le stagioni i valori di questi rapporti erano oltre ogni soglia limite ( $C/N < 1,41$  e  $C/N < 0,44$ , Zeglin *et al.*, 2013; Sinsabaugh *et al.*, 2009). Sebbene questa limitazione non sia stata eliminata dai trattamenti, un miglioramento di entrambi i rapporti è stato evidente in inverno nelle parcelle BBF, significativo solo a Poggio Tabor. Per quanto riguarda il quoziente microbico, esso non mostra differenze stagionali significative a Poggio Tabor, mentre a Cornale è stato riscontrato un aumento significativo di questo quoziente in estate nelle parcelle BBF + CC, corrispondente alla massima attività fisiologica della copertura vegetale e quindi al rilascio di essudati radicali. Inoltre, nel mese di giugno la coltura di copertura è stata falciata, quindi l'ulteriore flusso di C-rizodepositi rilasciati dalle radici, causato dallo stress indotto dall'asportazione della porzione epigea, ha aumentato la disponibilità di forme di C labili. Ciò ha portato a un processo di immobilizzazione del C all'interno della biomassa microbica nativa e aggiunta, migliorando il qmic. Un aumento della biomassa microbica C in seguito allo sfalcio dei prati mediterranei è stato osservato anche da Gavrichkova *et al.* (2010). L'effetto positivo della cover crop è confermato da diversi studi in cui il suo utilizzo ha determinato un aumento del contenuto di biomassa microbica grazie alla maggiore quantità di sostanza organica apportata al suolo (Chavarría *et al.*, 2016; Frasier *et al.*, 2016). Al contrario, a Poggio Tabor, il quoziente microbico ha mostrato valori più elevati nelle parcelle trattate solo nel periodo estivo. In questo sito, i microrganismi aggiunti con l'inoculo non hanno potuto beneficiare di alcun substrato carbonioso derivato dalla cover crop, come già riportato, ma sono stati probabilmente supportati dalla quantità leggermente più elevata di carbonio organico totale presente in questo sito. Un aumento del tasso di respirazione del suolo è stato osservato in entrambe le stagioni e nei trattamenti a Cornale, con un tasso più elevato in BBF + CC. Maliszewski (2021) ha riportato che la Farina di Basalto influenza positivamente il tasso di respirazione del suolo e che questo effetto è correlato alla concentrazione della farina utilizzata, poiché un aumento della sua quantità corrisponde a un aumento del consumo di O<sub>2</sub> da parte dei microrganismi. I risultati ottenuti concordano con altri studi in cui l'uso di colture di copertura ha determinato un aumento dei flussi di CO<sub>2</sub> dovuti ai processi di decomposizione della sostanza organica da parte dei

microrganismi (Steenwerth e Belina, 2008). Infatti, come riportato da Alvarenga *et al.* (2014) nei suoli degradati esiste una relazione diretta tra l'aggiunta di sostanza organica e la stimolazione della crescita e dell'attività della comunità microbica, con conseguente aumento dell'attività di mineralizzazione. In questo studio, un aumento significativo del quoziente metabolico è stato osservato solo a Cornale nelle parcelle BBF + CC. Il rilascio di composti di C facilmente disponibili dalle radici delle piante ha agito come un effetto di innesco dell'attività di decomposizione microbica, aumentando così questo quoziente. Ricerche precedenti hanno dimostrato che l'aggiunta di apporti organici freschi può accelerare la decomposizione della SOM stabile (Kuzyakov, 2010; Zornoza *et al.*, 2017). L'uso di bioindicatori della qualità del suolo ci ha permesso di evidenziare i probabili meccanismi che si verificano nell'ambiente del suolo dopo il trattamento con BBF + CC, che possono coinvolgere il rilascio di nutrienti minerali dalla Farina di Basalto® seguito dall'assorbimento delle radici delle piante. Ciò innesca lo sviluppo delle piante e un aumento dell'attività di essudazione delle radici che alimenta la biomassa microbica in termini di disponibilità di composti labili di C. I microrganismi autoctoni e aggiunti beneficiano di queste fonti di C organico e dei nutrienti minerali della Farina di Basalto®, aumentando la loro biomassa e l'attività metabolica in termini di respirazione o attività enzimatica.

## **5. Conclusioni**

L'applicazione congiunta di BBF e piante selvatiche o colture di copertura potrebbe essere il passo iniziale verso la creazione di un sistema naturale per il ripristino dei suoli degradati. Come ipotizzato, i bioindicatori della qualità del suolo si sono dimostrati più efficaci degli indicatori chimici nel rispondere prontamente ai trattamenti. Queste fluttuazioni sono state influenzate dalle variazioni stagionali, dalle condizioni pedoclimatiche e dal diverso sviluppo delle colture di copertura in entrambi i siti sperimentali. Di conseguenza, l'uso di predittori precoci per i cambiamenti nei processi biogeochimici del suolo ha dimostrato che la BBF ha migliorato la qualità del suolo nel breve termine, potenziando il ciclo dei nutrienti e promuovendo la crescita e l'attività microbica. L'efficacia di questa strategia di bonifica dipende in larga misura dalle condizioni specifiche del sito, tra cui il substrato litologico, il clima, il pH e il contenuto di materia organica originaria dell'area. Un limite primario di questo studio è stato l'area ristretta in cui sono stati testati la Farina di Basalto® e l'inoculo microbico. La ricerca futura dovrebbe concentrarsi sull'implementazione della BBF su scala più ampia per scopi di restauro. Inoltre, per migliorare la qualità del suolo e il ciclo dei nutrienti in terreni gravemente degradati come le cave abbandonate, è indispensabile fornire una fonte esterna di carbonio organico e utilizzare un consorzio microbico per facilitare il ripristino dei processi vitali dell'ecosistema. In conclusione, l'uso della Farina di Basalto®

combinata con un inoculo microbico si rivela una strategia promettente per rivitalizzare i suoli degradati; questa pratica è ulteriormente vantaggiosa in termini di recupero dei rifiuti, poiché la farina deriva dalla micronizzazione degli scarti di lavorazione del basalto. Una futura attività di ricerca potrebbe andare nella direzione di testare la BBF su diversi tipi di suolo, condizioni climatiche e, soprattutto, in suoli agricoli per valutare il ripristino della fertilità a fini produttivi.

## **6. Ringraziamenti:**

Gli autori ringraziano l'azienda Basalti Orvieto S.r.l. per aver concesso l'utilizzo della stazione sperimentale.

## **7. Riferimenti**

- [1]. Alvarenga, P., De Varennes, A., Cunha-Queda, A.C., 2014. The effect of compost treatments and a plant cover with *Agrostistenuis* on the immobilization/ mobilization of trace elements in a mine-contaminated soil. *Int. J. Phytoremediat.* 16, 138–154. <https://doi.org/10.1080/15226514.2012.759533>.
- [2]. Anda, M., Shamshuddin, J., Fauziah, C.I., 2015. Improving chemical properties of a highly weathered soil using finely ground basalt rocks. *Catena* 124, 147–161. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.012>.
- [3]. Badalucco, L., Grego, S., Dell'Orco, S., Nannipieri, P., 1992. Effect of liming on some chemical, biochemical and micro-biological properties of acid soil under spruce (*Picea abies* L.). *Biol. Fert. Soils*. 14, 76–83. <https://doi.org/10.1007/BF00336254>.
- [4]. Bandick, A.K., Dick, R.P., 1999. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biol. Biochem.* 31, 1471–1479. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00051-6).
- [5]. Baskaran, S., Sathivelu, M., 2022. Bioaugmentation and biostimulation of dumpsites for plastic degradation. In: *Cost Effective Technologies for Solid Waste and Wastewater Treatment*. Elsevier, pp. 9–23.
- [6]. Beerling, D.J., Kantzas, E.P., Lomas, M.R., Wade, P., Eufrazio, R.M., Renforth, P., Banwart, S.A., 2020. Potential for large-scale CO<sub>2</sub> removal via enhanced rock weathering with crop lands. *Nature* 583, 242–248. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>.
- [7]. Bray, R.H., Kurtz, L.T., 1945. Determination of total organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Sci.* 59, 39–45. <https://doi.org/10.1097/00010694-194501000-00006>.
- [8]. Campbell, N.S., 2009. The use of rockdust and composted materials as soil fertility amendments. PhD thesis.
- [9]. Chavarría, D.N., Verdenelli, R.A., Serri, D.L., Restovich, S.B., Andriulo, A.E., Meriles, J. M., Vargas-Gil, S., 2016. Effect of cover crops on microbial community structure and related enzyme activities and macronutrient availability. *Europ. J. Soil Biol.* 76, 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2016.07.002>.



- [10]. Edwards, D.P., Lim, F., James, R.H., Pearce, C.R., Scholes, J., Freckleton, R.P., Beerling, D.J., 2017. Climate change mitigation: potential benefits and pitfalls of enhanced rock weathering in tropical agriculture. *Biol. Lett.* 13 [https://doi.org/ 10.1098/rsbl.2016.0715](https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0715).
- [11]. FAO and ITPS, 2015. Status of the World's Soil Resources - Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.
- [12]. FAO, 2019. Recarbonization of Global Soils: A Dynamic Response to Offset Global Emissions. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/i7235en/i7235EN.pdf>.
- [13]. Ferreira, C.S.S., Seifollahi-Aghmiuni, S., Destouni, G., Ghajarnia, N., Kalantari, Z., 2022. Soil degradation in the European Mediterranean region: Processes, status and consequences. *Sci. Tot. Environ.* 805, 150106 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150106>.
- [14]. Frasier, I., Quiroga, A., Noellemeyer, E., 2016. Effect of different cover crops on C and N cycling in sorghum NT systems. *Sci. Total Environ.* 562, 628–639. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.058>.
- [15]. Fu, B.J., Liu, Y., Lv, J.H., He, C.S., Zeng, Y., Wu, B.F., 2011. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecol. Complex.* 8, 284. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2011.07.003>.
- [16]. Gavrichkova, O., Moscatelli, M.C., Kuzyakov, Y., Grego, S., Valentini, R., 2010. Influence of defoliation on CO<sub>2</sub> efflux from soil and microbial activity in a Mediterranean grassland. *Agr. Ecosyst. Environ.* 136, 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.11.015>.
- [17]. Gillman, G.P., Burkett, D.C., Coventry, R.J., 2002. Amending highly weathered soils with finely ground basalt rock. *Appl. Geochem.* 17, 987–1001. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00078-1).
- [18]. Gindri Ramos, C., Hower, J.C., Blanco, E., Oliveira, M.L.S., Theodoro, S.H., 2022. Possibilities of using silicate rock powder: An overview. *Geosci. Front.* 13, 1011850. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101185>.
- [19]. Hartmann, J., West, A.J., Renforth, P., Kohler, P., De La Rocha, C.L., Wolf-Gladrow, H.H., Dürr, H.H., Scheffran, J., 2013. Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification. *Rev. Geophys.* 51, 113–149. <https://doi.org/10.1002/rog.20004>.
- [20]. Haynes R.J., 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*. vol. 85. 221–268.
- [21]. Hinsinger, P., Bolland, M.D.A., Gilkes, R.J., 1995. Silicate rock powder: effect on selected chemical properties of a range of soils from Western Australia and on plant growth as assessed in a glass house experiment. *Fert. Res.* 45, 69–79. <https://doi.org/10.1007/BF00749883>.
- [22]. IPBES assessment report on land degradation and restoration. In: Montanarella, L., Scholes, R., Brainich, A. (Eds.), *Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn, Germany.
- [23]. IUSS WRB Working Group, 2022. World reference base for soil resources. *International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps*, 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.

- [24]. Kahkonen, M.A., Tuomela, M., Hatakka, A., 2007. Microbial activities in soils of a former sawmill area. *Chemosphere*. 67 (3), 521–526. <https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2013.13.7.2801>.
- [25]. Kuz'yakov, Y., 2010. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter. *Soil Biol. Biochem.* 42, 1363–1371. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.04.003>.
- [26]. Li, J., Mavrodi, D.V., Dong, Y., 2021. Effect of rock dust-amended compost on the soil properties, soil microbial activity, and fruit production in an apple orchard from the Jiangsu province of China. *Arch. Agron. Soil Sci.* 67, 1313–1326. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1795136>.
- [27]. Ma, K., Zhang, Y., Ruan, M., Guo, J., Chai, T., 2019. Land Subsidence in a Coal Mining Area Reduced Soil Fertility and Led to Soil Degradation in Arid and Semi-Arid Regions. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 16, 3929. <https://doi.org/10.3390/ijerph16203929>.
- [28]. Maliszewski, M., 2021. Preliminary studies of the physico-chemical properties of basalt rock flour from the Męcinka mine in Lower Silesia. *Min. Sci.* 28 <https://doi.org/10.37190/msc212813>.
- [29]. Manning, D.A.C., Renforth, P., 2013. Passive sequestration of atmospheric CO<sub>2</sub> through coupled plant-mineral reactions in urban soils. *Environ. Sci. Technol.* 47, 135–141. <https://doi.org/10.1021/es301250j>.
- [30]. Marinari, S., Bonifacio, E., Moscatelli, M.C., Falsone, G., Antisari, L.V., Vianello, G., 2013. Soil development and microbial functional diversity: proposal for a methodological approach. *Geoderma* 192, 437–445. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.023>.
- [31]. Marx, M.C., Wood, M., Jarvis, S.C., 2001. A microplate fluorimetric assay for the study of enzyme diversity in soils. *Soil Biol. Biochem.* 33, 1633–1640. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00079-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00079-7).
- [32]. Massaccesi, L., Benucci, G.M.N., Gigliotti, G., Cocco, S., Corti, G., Agnelli, A., 2015. Rhizosphere effect of three plant species of environment under periglacial conditions (Majella Massif, central Italy). *Soil Biol. Biochem.* 89, 184–195. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.07.010>.
- [33]. Melo, V.F., Uchoa, S.C.P., Dias, F.D., Barbosa, G.F., 2012. Levels of finely ground basalt rock in the chemical properties of a yellow latosol of the savannah of Roraima. *Acta Amazonica*. 42, 471–476.
- [34]. Moscatelli, M.C., Bonifacio, E., Chiti, T., Cudlin, P., Dinca, L., Gomoryova, E., Grego, S., La Porta, N., Karlinski, L., Pellis, G., Rudawska, M., Squartini, A., Zhiyanski, M., Broll, G., 2017. Soil properties as indicators of treeline dynamics in view of anthropogenic pressure and climate change, 73, 1–2. *Clim. Res.* <https://doi.org/10.3354/cr01478>.
- [35]. Moscatelli, M.C., Marinari, S., Papp, R., 2015. “Impact of management practices on soil quality: ecological implications”. In *Soil management technological systems, practices and ecological implications* (M. Esteban Lucas-Borja editor), Nova Publishers New York, ISBN: 978-1-63483-274-8, pp.1-17.
- [36]. Moscatelli, M.C., Marabottini, R., Massaccesi, L., Marinari, S., 2022. Soil properties changes after seven years of ground mounted photovoltaic panels in Central Italy coastal area. *Geoderma Reg.* 29, e00500.
- [37]. Okur, N., 2018. A review: bio-fertilizers-power of beneficial microorganisms in soils. *Biomed. J Sci. Tech. Res.* 4 (4), 4028–4029.
- [38]. Panhwar, Q.A., Naher, U.A., Radzia, O., Shamsuddin, J., MohdRazi, I., 2014. Biofertilizer, ground magnesium limestone and basalt applications may improve chemical properties of malaysian acid

- sulfate soils and rice growth. *Pedosphere* 24 (6)827–835. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(14\)60070-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(14)60070-9).
- [39]. Peco, J.D., Higuera, P., Campos, J.A., Esbrí, J.M., Moreno, M.M., Battaglia-Brunet, F., Sandalio, L.M., 2021. Abandoned mine lands reclamation by plant remediation technologies. *Sustain.* 13 (12), 6555.
- [40]. R Core Team, 2020. R: a language and environment for statistical computing. URL. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- [41]. Ramos, C.G., Hower, J.C., Blanco, E., Oliveira, M.L.S., Theodoro, S.H., 2022. Possibilities of using silicate rock powder: An overview. *Geosci. Front.* 13 (1), 101185.
- [42]. Rashid, M.I., Mujawar, L.H., Shahzad, T., Almeelbi, T., Ismail, I.M., Oves, M., 2016. Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils. *Microbiol. Res.* 183, 26–41. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.007>.
- [43]. Ribeiro, I.D.A., Volpiano, C.G., Vargas, L.K., Granada, C.E., Lisboa, B.B., Passaglia, L.M. P., 2020. Use of mineral weathering bacteria to enhance nutrient availability in crops: a review. *Front. Plant. Sci.* 11, 590774 <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.590774>.
- [44]. Sardans, J., Penuelas, J., 2005. Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean *Quercus ilex* L. forest. *Soil Biol. Biochem.* 37 (3), 455–461. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.08.004>.
- [45]. Shamshuddin, J., Anda, M., 2012. Enhancing the productivity of Ultisols and Oxisols in Malaysia using basalt and/or compost. *Pedologist* 55 (3), 382–391.
- [46]. Sheoran, V., Sheoran, A.S., Poonia, P., 2010. Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: a review. *Int. J. Soil, Sed. Water.* 3, 13.
- [47]. Silva, D.R.G., Marchi, G., Spehar, C.R., Guilherme, L.R.G., Rein, T.A., Soares, D.A., Avila, F.W., 2012. Characterization and nutrient release from silicate rocks and influence on chemical changes in soil. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo.* 36, 951–962.
- [48]. Sinsabaugh, R.L., Hill, B.H., Shah, J.J.F., 2009. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment. *Nature* 462, 795–798. <https://doi.org/10.1038/nature08632>.
- [49]. Sinsabaugh, R.L., Shah, J.J.F., 2011. Ecoenzymatic stoichiometry of recalcitrant organic matter decomposition: the growth rate hypothesis in reverse. *Biogeochem.* 102, 31–43. <http://www.jstor.org/stable/41490413>.
- [50]. Soil Survey Staff, 2014. Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42 Version 5.0. R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). U.S. Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service.
- [51]. Soria, R., González-Pérez, J.A., de la Rosa, J.M., San Emeterio, L.M., Domene, M.A., Ortega, R., Miralles, I., 2022. Effects of technosols based on organic amendments addition for the recovery of the functionality of degraded quarry soils under semiarid Mediterranean climate: A field study. *Sci. Tot. Environ.* 816, 151572 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151572>.
- [52]. Steenwerth, K., Belina, K.M., 2008. Cover crops enhance soil organic matter, carbon dynamics and microbiological function in a vineyard agroecosystem. *Appl. Soil Ecol.* 40, 359–369. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.06.006>.

- [53]. Suhag, M., 2016. Potential of biofertilizers to replace chemical fertilizers. *Int. Adv. Res. J. Sci. Eng. Technol.* 3, 163–167.
- [54]. Swoboda, P., Doring, T., Hamer, M., 2022. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. *Sci. Tot. Environ.* vol 807 (150976), part 3. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976>.
- [55]. Toktara, M., Lo Papa, G., Kozybayeva, F.E., Dazzi, C., 2016. Ecological restoration in contaminated soils of Kokdzhon phosphate mining area (Zhambyl region. Kazakhstan. *Ecol. Eng.* 86, 1–4.
- [56]. van Reeuwijk, L., 2002. *Procedures for Soil Analysis*, 6th ed. ISRIC, FAO, Wageningen.
- [57]. van Straaten, P., 2006. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities *Earth Sciences, An. Acad. Bras. Ciênc.* 78 (4), doi.org/10.1590/S0001-37652006000400009.
- [58]. Vance E.D., Brookes P.C., Jenkinson D.S., 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.* 19, 703–707. Venables, W.N., Ripley, B.D., 2002. *Modern Applied Statistics with S*, Fourth edition.
- [59]. Wotchoko, P., Tamfuh, P.A., Tita, M.A., Magha, A., Wonyi, G.A., Tabi, F.O., Bitom, D., 2021. Remineralization of a Dystric Ferrasol Using Basalt and Tephra Dusts, Effective Microorganisms Manure and NPK 20–10–10 for Radish (*Raphanussativus*) Production in Bamougoum (Cameroon Western Highlands). *J Environ. Earth Sci.* 3 (01).
- [60]. Zeglin, L.H., Bottomley, P.J., Jumpponen, A., Rice, C.W., Arango, M., Lindsley, A., McGowan, A., Mfombep, P., Myrold, D.D., 2013. Altered precipitation regime affects the function and composition of soil microbial communities on multiple time scales. *Ecol.* 94 <https://doi.org/10.1890/12-2018.1>.
- [61]. Zornoza R., Gomez-Garrido M., Martínez-Martínez S., Gomez-Lopez M.D., Faz A. 2017. Bioaugmentation in Technosols created in.

M. Cristina Moscatelli *et al.* “L'uso benefico della Farina di Basalto combinata con un consorzio microbico per migliorare la qualità del suolo in cave dismesse di basalto e di carbonato”  
Pubblicato su *Catena* 237 (2024) 107820; 0341-8162/© 2024 Elsevier B.V. All rights reserved.