POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Integrazione Tra Biogeochimica e Agricoltura Circolare: Un Modello Piante-Silicati per un Enhanced Rock Weathering con Sequestro Permanente di CO_2

Original
Integrazione Tra Biogeochimica e Agricoltura Circolare: Un Modello Piante-Silicati per un Enhanced Rock Weathering con Sequestro Permanente di CO_2 / Sparavigna, A.C., Giorcelli, M.. - ELETTRONICO. - (2026). [10.5281/zenodo.23770954]

Availability:
This version is available at: 11583/3017209 since: 2026-10-29T16:32:43Z

Publisher:

Published
DOI:10.5281/zenodo.23770954

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

17 November 2026

Integrazione Tra Biogeochimica e Agricoltura Circolare: Un Modello Piante-Silicati per un Enhanced Rock Weathering con Sequestro Permanente di CO_2

Amelia Carolina Sparavigna e Mauro Giorcelli

DISAT, Politecnico di Torino

L'intercettazione dei flussi naturali di carbonio e la rimozione permanente della CO_2 atmosferica (*Carbon Dioxide Removal*, CDR) richiedono strategie scalabili, termodinamicamente efficienti e radicate nei contesti territoriali locali. Il presente lavoro propone un modello di agricoltura circolare in-situ basato sulla combinazione del *Lupinus albus* (Lupino bianco, con particolare riferimento alle varietà dolci) e substrati vulcanici italiani ad alta reattività (scarti di cava di basalto, pozzolana e tufo). La fisiologia del lupino, caratterizzata dalla formazione di radici a grappolo (*cluster roots*), attiva un'intensa secrezione di acidi organici (principalmente acido citrico e malico) nella rizosfera. Questo microambiente acido accelera la dissoluzione dei minerali silicatici [es. metasilicato di calcio, $CaSiO_3$] presenti nei substrati vulcanici locali, catalizzando la reazione geochimica di *Enhanced Rock Weathering* (ERW): $CaSiO_3 + 2CO_2 + H_2O \longrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^- + SiO_2$. La trasformazione della CO_2 in ioni bicarbonato (HCO_3^-) stabili ed idrosolubili garantisce un sequestro geologico durevole verso le falde e gli oceani, contrastandone contemporaneamente l'acidificazione. Il modello integra un secondo binario di stoccaggio permanente attraverso la conversione termochimica (pirolisi) dei residui colturali della pianta (steli e baccelli) in biochar arricchito di azoto e cationi. Tale ammendante, riapplicato al suolo in combinazione con il tufo, ottimizza la Capacità di Scambio Cationico (CSC), la ritenzione idrica e l'attività microbiota del terreno, incrementando ulteriormente l'efficienza di weathering. Rispetto alle opzioni di geoingegneria oceanica ex-situ o all'impiego energivoro di impianti Direct Air Capture (DAC), l'approccio proposto offre una soluzione *win-win*: elimina i rischi di anossia bentonica, sfrutta scarti di estrazione mineraria a filiera corta e garantisce la produzione sostenibile di proteine vegetali per uso alimentare o mangimistico.

Parole chiave: Enhanced Rock Weathering (ERW), Lupinus albus, Basalto, Pozzolana, Bicarbonati, Biochar, Sequestro del Carbonio, Agricoltura Circolare.

Introduzione

L'intercettazione dei flussi antropici di carbonio e la rimozione permanente della CO_2 atmosferica (*Carbon Dioxide Removal*, CDR) rappresentano una delle sfide prioritarie per la mitigazione del cambiamento climatico globale. Sebbene i serbatoi naturali (oceani, biosfera e suoli) assorbano circa la metà delle emissioni annue di origine fossile e industriale, la quota rimanente si accumula in atmosfera, spingendo la ricerca geochimica e agronomica verso soluzioni scalabili, energeticamente efficienti e stabili nel lungo periodo.

Tra le tecnologie di CDR, l'Erosione Accelerata delle Rocce (*Enhanced Rock Weathering*, ERW) replica e intensifica il ciclo geologico naturale dei silicati, nel quale l'acido carbonico derivato dalla CO_2 atmosferica disciolta nell'acqua piovana reagisce con i minerali ricchi di calcio e magnesio. La reazione libera cationi bivalenti (Ca^{2+}, Mg^{2+}) e converte la CO_2 gassosa in ioni bicarbonato (HCO_3^-) stabili, destinati a percolare verso le falde idriche e gli oceani, garantendo un sequestro permanente per scale temporali geologiche. Tuttavia, l'applicazione artificiale dell'ERW si scontra spesso con i vincoli cinetici legati alla lentezza della dissoluzione minerale in climi temperati o su terreni a bassa acidità. Per superare tale collo di bottiglia, questo studio propone un modello integrato di agricoltura circolare *in-situ* basato sulla sinergia biogeochimica tra l'apparato radicale del *Lupinus albus* (Lupino bianco, con particolare riferimento alle varietà dolci) e substrati vulcanici italiani ad alta reattività (scarti di cava di basalto, pozzolana e tufo).
Grazie allo sviluppo di radici a grappolo (*cluster roots*), il lupino attiva un'intensa secrezione di acidi organici (principalmente acido citrico e malico) e protoni nella rizosfera. Questo microambiente acido e chelante agisce come catalizzatore biologico, abbassando la barriera energetica di dissoluzione dei silicati e accelerando l'estrazione di cationi dal basalto. Il modello integra inoltre un secondo binario di stoccaggio permanente attraverso la conversione termochimica (pirolisi) dei residui colturali della pianta in biochar arricchito di azoto e cationi, creando un sistema a doppio sequestro (geochimico e biologico) che valorizza le filiere locali senza sottrarre terreno alla produzione alimentare.

Fenomeni naturali
L'umanità, attraverso i combustibili fossili, l'industria e la deforestazione, produce circa 35 - 40 miliardi di tonnellate di CO_2 all'anno. Per fare un confronto con un'emissione naturale del pianeta, le attività umane generano ogni anno fino a 80 volte la CO_2 emessa da tutti i vulcani del pianeta presi insieme. Infatti, tutti i vulcani della Terra messi insieme (sia quelli emersi che i vulcani sottomarini) emettono tra 0,15 e 0,5 miliardi di tonnellate di CO_2 all'anno (Gerlach, 2011). In termini di tempo, l'umanità produce in soli 3-5 giorni la stessa quantità di CO_2 che tutti i vulcani del mondo rilasciano in un anno intero. Il confronto quantitativo tra le emissioni umane e quelle vulcaniche rivela una differenze di quasi due ordini di grandezza. I vulcani, inoltre, hanno un impatto climatico sul breve periodo opposto al riscaldamento: le eruzioni violente (come quella del Pinatubo nel 1991) proiettano in stratosfera enormi quantità di biossido di zolfo (SO_2) e ceneri. Questi aerosol riflettono la luce solare verso lo spazio, provocando un raffreddamento temporaneo della temperatura media globale che dura un paio d'anni.
Oltre alle eruzioni vulcaniche, la Terra possiede diversi altri meccanismi e cicli naturali capaci di rilasciare o scambiare enormi volumi di CO_2 con l'atmosfera. La differenza fondamentale è che i processi naturali biologici e oceanici fanno parte di un ciclo chiuso (assorbono quasi esattamente ciò che emettono), mentre le emissioni umane rappresentano un'immissione netta aggiuntiva estratta dal sottosuolo. Ad esempio, la terra ha la respirazione del suolo e dei microbi di circa 220 Gt/anno. Sono i microbi e le radici che decompongono la materia organica nel terreno. Questa emissione viene però bilanciata quasi interamente dalla fotosintesi vegetale (~220 Gt assorbite) (Canadell et al., 2021). Poi vi è la respirazione e il degassing oceanico con circa 330 Gt/anno. Gli oceani rilasciano CO_2 nelle regioni calde o di upwelling. Tale emissione viene bilanciata dall'assorbimento oceanico nelle regioni fredde di circa 338 Gt assorbite, con un saldo netto a favore dell'assorbimento (Canadell et al., 2021). Poi vi sono gli incendi boschivi spontanei (~6 - 8 Gt/anno). Gli incendi naturali rilasciano carbonio stoccato negli alberi. Se le foreste ricrescono, il carbonio viene riassorbito nel corso di decenni (Van Der Werf et al. 2017). Infine è doveroso ricordare anche lo scioglimento del permafrost. Il disgelo dei suoli perenni rilascia CO_2 e metano dalla decomposizione di antica materia organica rimasta congelata per millenni (Canadell et al., 2021).

Carbon sinks
Se da un lato la Terra rilascia CO_2 attraverso processi naturali e umani, dall'altro lato esistono enormi "pozzi di assorbimento" (carbon sinks) e meccanismi geologici che la sottraggono costantemente

all'atmosfera. I principali agenti di rimozione si dividono in tre grandi categorie. La prima è quella dei grandi "polmoni" del pianeta, essi sono gli oceani, le foreste ed il suolo. Gli oceani sono il più grande pozzo attivo. Come riportato da Friedlingstein et al., 2024, essi assorbono circa un quarto di tutta la CO_2 emessa dall'uomo. Svolgono la loro azione tramite l'assorbimento chimico, dove la CO_2 si scioglie direttamente nell'acqua fredda di superficie e viene trasportata negli abissi dalle correnti profonde, e la pompa biologica dove è il fitoplancton a catturare la CO_2 tramite la fotosintesi. Quando il fitoplancton muore, una parte del suo carbonio precipita sul fondo oceanico (la cosiddetta "neve marina"). Poi abbiamo le foreste che assorbono anche loro un quarto della CO_2 antropica tramite la fotosintesi clorofilliana. Gli alberi, la vegetazione spontanea e le piante acquatiche (come l'Azolla o il Kelp) trasformano il carbonio gassoso in cellulosa e legno. Infine vi è il suolo. I terreni sani, le radici e le torbiere immagazzinano carbonio trattenendolo nella materia organica in decomposizione. Di conseguenza, come evidenziato da Friedlingstein e coautori, circa la metà delle emissioni umane restano in atmosfera.
Il secondo carbon sink è legato ai processi geologici a lungo termine con scala di milioni di anni. Il rappresentante di questi processi è l'alterazione chimica delle rocce (Weathering). La pioggia, leggermente acida per via della CO_2 disciolta in essa, reagisce con le rocce silicatiche (come il basalto, vedi Appendice A). Questo processo trasforma il carbonio atmosferico in bicarbonato, che finisce nei fiumi e poi negli oceani, dove i molluschi e i coralli lo usano per costruire i loro gusci di carbonato di calcio ($CaCO_3$). Alla loro morte, tale carbonato di calcio si trasforma in rocce calcaree.
Infine vi sono le tecnologie umane di CDR, Carbon Dioxide Removal. L'uomo sta cercando di replicare o accelerare questi processi naturali in tre modi sostanzialmente. Il primo è il DAC (Direct Air Capture) che si basa su impianti industriali con ventole e filtri chimici che "aspirano" la CO_2 direttamente dall'aria per iniettarla nel sottosuolo, dove si mineralizza diventando roccia. Poi vi è l'Enhanced Weathering che consiste nello spargere polvere di rocce basaltiche sui campi agricoli per accelerare artificialmente l'assorbimento chimico naturale. Il Biochar ottenuto con pirolisi, inoltre, permette di convertire la biomassa vegetale in carbone vegetale stazionario da sotterrare nei suoli.
Per comparare i fenomeni, consideriamo che gli oceani assorbono 10 - 12 Gt/anno di CO_2, con un rischio consistente nell'acidificazione dei mari (Canadell et al., 2021). Le foreste e suoli assorbono altrettanta CO_2 ma i rischi sono incendi e deforestazione che la rilasciano (Canadell et al., 2021). Il Weathering naturale è di circa 1 Gt/anno. Questo è un processo lentissimo ma permanente (Hartmann et al., 2013). Le tecnologie umane (DAC/CCS) sono ancora in fase iniziale e molto costose. Praticamente sono al di sotto dell'influsso del weathering naturale. In sintesi, oceani e vegetazione terrestre si dividono a metà il compito di assorbire circa il 50% di tutta la CO_2 che rilasciamo ogni anno; il restante 50% rimane in atmosfera ed è ciò che fa salire la concentrazione globale.

Weathering naturale

Il Weathering naturale lo abbiamo incontrato nel nostro studio sull'Evento Azolla e il Sequestro del Carbonio (Sparavigna & Giorcelli, 2026). In particolare si è analizzato criticamente la geoingegneria moderna che si basa sull'affondamento oceanico di masse di kelp, mettendo in luce sia i vincoli fisico-chimici (il fattore di Revelle, la salinità, l'effetto tampone) sia i rischi catastrofici di anossia bentonica. Gli aspetti principalmente analizzati sono i seguenti. Si è proposto il bilanciamento tra passato e futuro, con la ricostruzione dell'Evento Azolla (le varve, i nutrienti Fe e P, la micro-aloclina). Tale ricostruzione non è fine a se stessa ma serve da lente d'ingrandimento rigorosa per valutare la fattibilità reale delle tecnologie attuali. Si è specificato infatti con chiarezza il ciclo del carbonio. La spiegazione dell'interazione tra oceano e atmosfera, mediata dal fattore di Revelle (R_{global}), rende chiarissimo perché non si possa ragionare con una semplice logica 1:1 e perché certi grafici "a scalino" della divulgazione siano fuorvianti. Infine si è fatta una proposta concreta con Biochar e Hydrochar. L'analisi non si limita alla critica, ma orienta la soluzione verso la conversione termochimica (pirolisi/HTC). Si sono evidenziati sia i vantaggi (fissazione dell'azoto, valorizzazione

agronomica, prodotti ad alto valore come i BioCDots) sia i reali limiti tecnici (l'ostacolo dell'umidità e il rischio di riconcentrare metalli pesanti da fitodepurazione).

Strategie

Non c'è nessuna bacchetta magica, purtroppo. La fisica e la termodinamica non fanno sconti. Se dovessimo impostare una strategia globale per la riduzione della CO_2, la divideremmo in due direttrici parallele che sono ormai ampiamente note: evitare le nuove emissioni (decarbonizzazione alla fonte) e rimuovere il carbonio storico (sequestro permanente). Possiamo elencare alcuni punti:

- Transizione energetica ed elettrificazione: Sostituzione prioritaria dei combustibili fossili con rinnovabili (solare, eolico, idroelettrico, nucleare di nuova generazione per il carico di base) ed elettrificazione diretta dei trasporti terrestri e del riscaldamento civile.
- Efficienza termodinamica dei processi industriali: Decarbonizzazione dei settori *hard-to-abate* (acciaio, cemento, chimica) tramite idrogeno verde o elettrificazione dei processi termici ad alta temperatura.
- Stop alla deforestazione e tutela dei pozzi naturali: Protezione rigorosa delle foreste primarie, delle torbiere e delle praterie sottomarine (posidonia/mangrovie), che rappresentano serbatoi di carbonio ad altissima stabilità se non disturbati.
- Valorizzazione delle biomasse via conversione termochimica (Biochar e Pirolisi): Piuttosto che affidarsi al ciclo biologico breve (dove la biomassa decomponendosi rilascia di nuovo CO_2) o all'affondamento oceanico incontrollato, la strada più solida è la fissazione del carbonio organico in strutture aromatiche stabili (biochar). Il carbonio viene reso inerte per secoli e riutilizzato per migliorare la struttura dei suoli o nei materiali edili.
- Cattura e stoccaggio geologico (DACCS e BECCS): Impiego della cattura diretta dall'aria (*Direct Air Capture*) e della cattura da bioenergia, combinato con la mineralizzazione in formazioni basaltiche profonde (trasformazione della CO_2 in roccia carbonatica permanente).
- Weathering accelerato (*Enhanced Rock Weathering*): Spandimento di rocce silicate ultrafini (come il basalto) su terreni agricoli per accelerare la naturale reazione di alterazione chimica che assorbe CO_2 dall'atmosfera e la fissa sotto forma di bicarbonati.
- Trattamento dei rifiuti organici (HTC/Pirolisi): Conversione di fanghi di depurazione, scarti agricoli e frazioni umide in materiali a valore aggiunto (carboni idrotermali, biocombustibili) per evitare emissioni incontrollate di metano (CH_4), il cui impatto clima-alterante a breve termine è decine di volte superiore a quello della CO_2.

La polvere di basalto

La polvere di basalto e il processo di Enhanced Rock Weathering (ERW) sono una delle frontiere più affascinanti in assoluto. La cosa che rende questa soluzione quasi idilliaca è che si tratta di prendere un processo che la Terra impiega centinaia di migliaia di anni a compiere e accelerarlo per farlo avvenire nell'arco di pochi anni o decenni. Il processo si basa sulla chimica naturale. Il basalto è ricchissimo di minerali silicati di calcio e magnesio (come l'olivina e i pirosseni). Quando la pioggia, caricandosi di CO_2 atmosferica, diventa debolmente acida, reagisce con la polvere di basalto sparsa sui campi. La reazione chimica trasforma la CO_2 gassosa in ioni bicarbonato (HCO_3^-) dissolti nell'acqua di ruscellamento. Questi bicarbonati viaggiano attraverso i fiumi fino agli oceani, dove rimangono stabili nei mari superficiali per decine di migliaia di anni, oppure si depositano sul fondo marino trasformandosi in rocce carbonatiche (come il calcare).

Un aspetto interessante è il "win-win" agronomico (il vero valore aggiunto). A differenza della semplice cattura meccanica dell'aria (DAC), che consuma un'enorme quantità di energia e non produce nulla di utile se non CO_2 concentrata, spargere polvere di basalto sui suoli agricoli agisce come un riequilibratore del terreno: La remineralizzazione rilascia lentamente micro e macronutrienti essenziali (magnesio, calcio, ferro, silice, potassio), arricchendo i suoli impoveriti.

Contemporaneamente si hanno una neutralizzazione dell'acidità dei terreni dovuta all'uso intensivo di fertilizzanti azotati sintetici, migliorando così la struttura del suolo e la salute del microbiota locale, ed un incremento della resistenza biomeccanica delle piante. La silice assorbita dalle piante rafforza le pareti cellulari dei raccolti, rendendoli più resistenti ad attacchi di parassiti e a periodi di siccità.
Non c'è bisogno di scavare ed estrarre nuove e grandi quantità di basalto con costi enormi. C'è già un'immensa quantità di polvere di basalto prodotta come scarto non utilizzato nelle cave, residui che producono ghiaia e pietrisco, spesso utilizzati per aggregati edilizi. Questa polvere è un rifiuto industriale sottoutilizzato, già macinato finemente (cosa che abbatte la quota maggiore del bilancio energetico dell'operazione).
La fisica non regala nulla e anche in questo caso esistono sfide cruciali:

- Il tasso di dissoluzione: In climi freddi e secchi la reazione è lenta; la tecnica funziona molto meglio nei climi caldi e umidi (zone tropicali ed equatoriali con abbondanti piogge).
- Tracciabilità e misura: Certificare con precisione quanta CO_2 è stata effettivamente sequestrata *in situ* in un campo aperto è complesso, perché dipende dal tipo di terreno, dal clima, dalla granulometria e dalla biochimica della radice.
- Contaminanti in traccia: Alcuni basalti o rocce (come l'olivina pura) possono contenere concentrazioni sgradite di metalli pesanti (nichel e cromo) che vanno monitorati attentamente per evitare accumuli nel suolo.

Come accelerare il weathering con le piante
In senso stretto e chimico, le piante non possono eseguire direttamente il *weathering*. Tuttavia, esistono strategie biologiche in cui il mondo vegetale (e i suoi simbionti) accelera e potenzia l'alterazione chimica delle rocce, agendo come un vero e proprio catalizzatore biologico per il sequestro di CO_2. Le piante vascolari sono i motori principali del *weathering* biologico:

- Acidificazione della rizosfera: Le radici pompano costantemente CO_2 nel terreno tramite la respirazione e secernono acido carbonico e acidi organici (come acido citrico ed ossalico) (Appendice B). Questo crea un microambiente attorno alle radici fino a mille volte più acido del terreno circostante, che incide sulle rocce sottostanti.
- La forza dei funghi micorrizici: I funghi associati alle radici estendono le loro ife nei micro-crepacci della roccia madre, secernendo enzimi e agenti chelanti che estraggono fosforo, calcio e magnesio per la pianta, frantumando la roccia a livello microscopico e accelerando la formazione di bicarbonati.

I licheni (simbiosi tra funghi e alghe) e le briofite (muschi) non hanno radici profonde, ma sono capaci di attaccare le rocce nude affioranti. Secernono acidi specifici che erodono chimicamente la superficie basaltica o granitica, e disgregano la roccia fisicamente attraverso cicli di idratazione ed disidratazione, esponendo sempre più superficie minerale fresca all'azione dell'acqua e dell'aria (Chen et al., 2000). In Jackson & Keller, 1970, troviamo uno studio classico che confronta direttamente l'erosione chimica del basalto vulcanico alle Hawaii esposto alla sola pioggia rispetto al basalto colonizzato dai licheni (es. Stereocaulon vulcani). Dimostra che la colonizzazione lichenica accelera drasticamente il tasso di alterazione del basalto e il rilascio di elementi come Fe, Mg, e Ca. In Lenton et al., 2012, troviamo come la comparsa dei primi muschi/briofite abbia incrementato significativamente il tasso di weathering dei silicati rocciosi. Il rilascio di acidi da parte delle briofite ha accelerato il consumo di CO_2 atmosferica, innescando eventi di raffreddamento climatico globale nell'Ordoviciano. Porada et al., 2013, modellano su scala globale la capacità di fissazione del carbonio e di secrezione metabolica di licheni e briofite, evidenziando la loro influenza diretta nel rimodellamento dei minerali di superficie e nei flussi biogeochimici di carbonio e fosforo.
Esistono poi piante (come alcune specie del genere *Alyssum* o *Noccaea*) capaci di crescere su rocce ultramafiche ed eroderle chimicamente per assorbire grandi quantità di nichel, magnesio e ferro

(Brooks et al., 1977, Reeves et al., 2018, Bani et al., 2007, Bhat et al., 2025). Sebbene il loro ruolo principale sia l'estrazione di metalli, l'intensa attività chimica radicale accelera il degrado dei silicati di magnesio (come l'olivina).
Il caso del nichel merita qualche parola in più. Le piante si dividono principalmente in due categorie per quanto riguarda il nichel (Ni): la stragrande maggioranza delle piante comuni, per le quali tale metallo è un micronutriente essenziale ma necessario in quantità infinitesimali (Brown et al., 1987), e le piante iperaccumulatrici (come le specie dei generi *Alyssum* / *Odontarrhena* e *Noccaea*), che lo assorbono in enormi quantità e lo utilizzano per scopi difensivi e adattativi (Rascio & Navari-Izzo, 2011). Nelle piante normali il nichel ha un ruolo enzimatico essenziale (Metabolismo dell'Azoto). Tale metallo è fondamentale in quantità microscopiche per il funzionamento di un enzima specifico: l'ureasi. L'ureasi catalizza la scissione dell'urea ($CO(NH_2)_2$) in ammoniaca (NH_3) e anidride carbonica (CO_2). L'ammoniaca viene poi assimilata dalla pianta come fonte primaria di azoto per sintetizzare amminoacidi e proteine. Senza il nichel, l'ureasi non funziona. Di conseguenza, l'urea si accumula nei tessuti fogliari fino a raggiungere livelli tossici, provocando la necrosi delle punte delle foglie (*danno da carenza di nichel*). Il nichel è poi immagazzinato nei semi per supportare la mobilitazione delle riserve azotate durante la germinazione. Nelle piante iperaccumulatrici, ossia nelle specie metallofite (che vivono su suoli serpentinitici e ultramafici ricchi di metalli pesanti), il nichel viene estratto attivamente dal suolo e accumulato nei vacuoli delle cellule fogliari a concentrazioni superiori all'1% del loro peso secco (Kramer et al., 1997). Le funzioni principali in questo caso sono nei meccanismi di difesa (*Elementary Defense Hypothesis*) (Boyd, 2007), nella tolleranza alla siccità, e nella riduzione della competizione (Rascio & Navari-Izzo, 2011). Concentrare livelli tossici di nichel nei tessuti rende le foglie velenose o immangiabili per insetti, bruchi e patogeni (funghini e batterici). Il metallo agisce così come un vero e proprio "insetticida naturale" organico. Per quanto riguarda l'acqua, gli ioni di nichel accumulati nei vacuoli cellulari aiutando la pianta a trattenerla nei tessuti anche su terreni aridi, pietrosi e superficiali come quelli serpentinitici. Infine tossificando il terreno circostante con la caduta delle proprie foglie ricche di nichel (*allelopatia da metallo*), queste piante impediscono la crescita di altre specie concorrenti non tolleranti.
Poiché il nichel libero è altamente reattivo e potenzialmente tossico per i processi cellulari standard, le piante che lo utilizzano in grandi quantità non lo lasciano libero nel citoplasma: lo chelano con acidi organici (prevalentemente acido citrico, acido malico e idrossicitrato) e lo immagazzinano in modo sicuro all'interno dei vacuoli o nelle pareti cellulari dell'epidermide fogliare (Kramer et al., 1997).

Esiste una pianta che renda il suolo assetato di CO_2?
Se l'idea è trovare un sistema vegetale per accelerare la fissazione minerale della CO_2, la risposta più efficace non è una singola "pianta miracolosa", ma la sinergia tra polvere di basalto e specie arboree a radice profonda con simbiosi micorrizica: la pianta fornisce l'acido e la pressione meccanica, la polvere minerale fornisce i cationi e il carbonio atmosferico viene catturato per sempre in soluzione acquosa. Quindi la risposta alla domanda precedente è positiva e sta nell'interazione chimica che la pianta attiva nel suolo attorno alle sue radici (la rizosfera). Più che "inghiottire" CO_2 direttamente dalla chioma per poi spingerla sotto terra, queste piante trasformano il terreno circostante in una spugna acida che fomenta la reazione chimica di cattura del carbonio.
Ecco come una pianta rende il suolo "assetato" di CO_2:

- Acidificazione e secrezione organica: Le radici di piante ad alto tasso metabolico ed estrazione minerale secernono continuamente acido carbonico, acido citrico e acido malico (Dakora & Phillips, 2002, Jones, 1998, Panchal et al., 2021, Kuzyakov & Domanski, 2000, Van Miegroet & Cole, 1984, Van Breemen et al., 1983).

- Aumento della pressione parziale di CO_2 nel suolo: Tramite la respirazione radicale e il nutrimento del microbiota, la concentrazione di CO_2 nei pori del terreno diventa superiore a quella dell'aria atmosferica (Raich & Tufekciogul, 2000).
- Dissoluzione forzata dei minerali: Se nel terreno sono presenti minerali silicati (come basalto o olivina), questo microambiente ultra-acido e saturo di gas li "scioglie" velocemente, trasformando la CO_2 in ioni bicarbonato (HCO_3^-) stabili e idrosolubili (Hartmann et al., 2013).

Gli esempi chiave nel mondo vegetale sono:

- Ontani (*Alnus*) e piante actinorraziche: Avendo batteri simbionti fissatori di azoto (*Frankia*), non hanno deficit nutrizionali e investono un'enorme quantità di energia per acidificare il suolo ed estrarre cationi (Ca^{2+}, Mg^{2+}) dalle rocce, accelerando enormemente il sequestro minerale (Van Miegroet & Cole, 1984).
- Lupini e Fabacee a radice fittonante: Trasudano rilevanti quantità di essudati radicali acidi che disgregano i minerali del suolo per catturare fosforo e metalli, rendendo l'acqua di falda locale ricca di bicarbonati.
- Pianta del Tè (*Camellia sinensis*) e specie acidofile: Modificano drasticamente la biochimica del terreno circostante, spingendo la dissoluzione dei silicati al massimo potenziale chimico. (Ruan et al., 2007).

In sintesi: la pianta non fa altro che creare l'ambiente acido perfetto affinché la chimica del suolo "chieda" e trasformi quanta più CO_2 possibile in roccia solubile.

Una pianta che si può mangiare
Esistono diverse piante edibili che combinano un'elevata produzione di essudati radicali acidi (acido citrico, malico, ossalico) con una forte capacità di estrazione minerale, trasformando la rizosfera in una vera e propria macchina da *weathering* accelerato. Le opzioni edibili più efficaci sono:

- Lupino bianco (*Lupinus albus*) e Fava (*Vicia faba*): Producono radici a grappolo (*cluster roots*) specializzate che secernono quantità enormi di acido citrico e malico per solubilizzare i fosfati e i cationi del suolo. I loro semi sono ricchissimi di proteine (Shu et al., 2007. Veneklaas et al., 2003).
- Granoturco (*Zea mays*): Un'erba a crescita rapida con un'intensa respirazione radicale e una forte secrezione di benzoxazinoidi e acidi organici che acidificano il terreno e accelerano l'interazione con i silicati (Carvalhais et al., 2011).
- Grano saraceno (*Fagopyrum esculentum*): Iper-accumulatore edibile straordinario; le sue radici rilasciano acidi che disgregano efficacemente le rocce minerali per estrarre fosforo e calcio, rendendo la farina dei suoi chicchi molto nutritiva (Zheng et al., 1998).
- Barbabietola da zucchero e Bietola: Piante edibili che modificano fortemente l'equilibrio ionico e il pH della rizosfera grazie a un'elevata escrezione acida radicale (Römheld & Marschner, 1986).

Scegliendo una coltura come il lupino o il grano saraceno e arricchendo il terreno con polvere di basalto, si ottiene un ciclo perfetto: cibo ad alto valore nutrizionale in superficie e sequestro permanente di CO_2 sotto terra.

I lupini
I lupini non possono essere consumati crudi o appena colti poiché contengono alcaloidi amari e tossici (principalmente lupanina e sparteina) che devono essere eliminati con un processo di deamarizzazione in acqua. Il consumo avviene principalmente attraverso queste modalità:

- In salamoia: È la preparazione più diffusa. Dopo una lunga bollitura e diversi giorni di risciacqui in acqua per togliere l'amaro, i semi vengono conservati in acqua e sale. Si mangiano sbucciandoli direttamente con i denti come aperitivo o snack.
- Farina di lupini: I semi deamarizzati, essiccati e macinati diventano una farina naturalmente priva di glutine e ad altissimo contenuto proteico. Viene usata per arricchire impasti di pane, pasta, biscotti o come addensante per zuppe.
- Alternative vegetali alla carne e ai latticini: Grazie alla loro consistenza e al profilo amminoacidico, i lupini lavorati vengono impiegati per produrre burger vegetali, polpette, tempeh di lupino e formaggi vegani (spalmabili o a pasta dura).
- Caffè di lupini: Una preparazione storica della tradizione contadina prevede la tostatura e la macinatura dei semi secchi per ottenere una bevanda priva di caffeina, dal gusto intenso e tostato.

È una coltura eccezionale: mentre le sue radici acidificano il terreno e catturano il carbonio, i suoi semi offrono una delle fonti proteiche vegetali più ricche in assoluto.

Letteratura

L'idea di unire piante, tra cui leguminose/piante edibili (come il lupino), e polvere di basalto per il sequestro geochimico della CO_2 non è solo un'intuizione affascinante, ma un campo di ricerca in forte espansione noto come Enhanced Rock Weathering (ERW) applicato all'agricoltura. Troviamo diversa letteratura tra cui Hinsinger et al., 2001, Ibrahim et al., 2026, Goll et al., 2021, Vienne et al., 2022. Una review è fornita da Lambers et a., 2009. L'articolo di Lambert e coautori analizza la CO_2 sotto diversi profili biogeochimici ed evolutivi. Gli autori discutono come la respirazione delle radici e dei microbi incrementi la concentrazione di carbonio nei pori del terreno, accelerando la dissoluzione dei minerali silicatici e carbonatici (*weathering*). Poi troviamo gli impatti climatici ed evolutivi a lungo termine: l'articolo analizza come la comparsa e l'evoluzione delle piante vascolari e delle rizosfere abbiano intensificato l'alterazione dei silicati di calcio e magnesio, favorendo la formazione di carbonati marini e contribuendo significativamente alla riduzione della CO_2 atmosferica globale fin dal tardo Devoniano (citando i modelli di Berner, Retallack e Beerling). Infine l'articolo parla di sequestro permanente, sottolineando come l'alterazione minerale promossa dalle piante consenta il sequestro di carbonio a lungo termine sotto forma di precipitati carbonatici negli oceani, determinando la concentrazione di CO_2 in atmosfera.

L'articolo di Lambers et al., 2009, dedica un'ampia sezione alla *rhizodeposition* e alla secrezione di carbossilati/acidi organici da parte delle radici. I meccanismi e le funzioni descritti sono la solubilizzazione dei nutrienti (in particolare Fosforo e Ferro), dove le radici secernono i carbossilati per mobilizzare il fosfato trattenuto nel suolo e chelare i micronutrienti. Ne consegue la dissoluzione dei minerali e delle rocce. Gli acidi organici e i protoni rilasciati abbassano il pH della rizosfera ed estraggono cationi dai silicati (come il basalto), catalizzando il *weathering*. Infine vi è la detossificazione dai metalli. Vengono rilasciati i carbossilati per chelare ed eliminare la tossicità dell'alluminio (Al) o di altri metalli pesanti come piombo (Pb) e rame (Cu). L'articolo parla delle Fabaceae espressamente. Viene discussa la co-evoluzione delle leguminose (Fabaceae) con i batteri simbiotici (N_2-fissatori / rizobi). Il modello di eccellenza dell'articolo è il *Lupinus albus*. Viene citato specificamente come esempio chiave di pianta che sviluppa radici a grappolo (*cluster roots*). In tal modo il lupino rilascia un'esplosione essudativa di carbossilati capace di acidificare drasticamente la rizosfera e mobilizzare minerali e fosforo nel terreno.

L'articolo di Lambers et al. (2009) offre quindi supporto scientifico e teorico al nostro modello basato sull'interazione tra polvere di basalto, lupini e sequestro della CO_2.

Per quanto riguarda il lupino, affidiamoci anche a Shu et al., 2007. Un punto chiave dell'articolo è la sperimentazione su Lupinus albus: Lo studio analizza come la formazione delle radici a grappolo e l'essudazione di acido citrico rispondano alla presenza localizzata di quattro diverse fonti di fosforo (K-P solubile, Ca-P, Fe-P e Phy-P organico). In tal modo si hanno:

- Risposta morfologica localizzata: Le radici sviluppano una densità nettamente maggiore di cluster roots nello scomparto di terreno in cui è presente il fosforo, dimostrando che il lupino percepisce ed esplora attivamente le nicchie di nutrienti nel suolo.
- Effetto specifico del Fosfato di Ferro (Fe-P): Sebbene le radici a grappolo si formino con varie fonti di fosforo, l'essudazione massiccia di citrato aumenta in modo significativo ed esplicito solo nello scomparto contenente fosfato di ferro (Fe-P).
- Meccanismo fisiologico: La pianta non rilascia citrato a caso, ma attiva la secrezione del chelante (citrato) in modo mirato proprio dove rileva minerali insolubili a base di ferro, per disfare il legame chimico e liberare il fosfato.

Nel lavoro di Shu et al. (2007), l'acido citrico (sotto forma di anione citrato) gioca il ruolo di protagonista assoluto. Tra tutti gli anioni organici analizzati nel liquido di lavaggio della rizosfera del lupino bianco (tra cui citrato, malato e succinato), il citrato è l'anione nettamente dominante, costituendo la quasi totalità della carica organica rilasciata dalle radici a grappolo. La secrezione è mirata ed "intelligente". Lo studio di Shu e coautori evidenzia che la pianta non rilascia citrato a monte della semplice presenza o meno di radici a grappolo, ma ne regola la secrezione in base alla chimica specifica del minerale presente nel terreno. Con Fosfato di Ferro (Fe-P), il tasso di essudazione di citrato per grammo di radice a grappolo aumenta di oltre il doppio. Con altre fonti di P (Ca-P, Phy-P, K-P), nonostante la formazione di radici a grappolo avvenga anche in presenza di fosfato di calcio (Ca-P) o fitato (Phy-P), l'essudazione specifica di citrato non aumenta significativamente.
Perché la secrezione di citrato si impenna solo con il Fe-P?

- Il fosfato legato al ferro (Fe-P) è estremamente insolubile a pH neutro o leggermente acido.
- L'anione citrato possiede un'altissima affinità di legame per lo ione ferrico (Fe^{3+}).
- Rilasciando citrato, la pianta attiva un processo di chelazione diretta: il citrato "strappa" il ferro dal minerale formando un complesso solubile [Fe-Citrato], liberando in soluzione l'anione fosfato (PO_4^{3-}), che diventa così immediatamente assimilabile dalle radici.

L'articolo di Shu et al. mette in luce una raffinata differenza nelle strategie del lupino:

- Per solubilizzare il fosfato di calcio (Ca-P), la pianta non spreca grandi quantità di carbonio sotto forma di acido citrico, ma si affida prevalentemente all'estrusione di protoni (H^+), acidificando l'ambiente per sciogliere il carbonato/fosfato di calcio.
- Per il fosfato di ferro (Fe-P), dove l'acidificazione da sola non basta, attiva l'estrusione specifica di citrato come agente chelante.

Questo risultato conferma esattamente il principio guida del nostro modello: il lupino risponde ai silicati e ai minerali ricchi di metalli (come il ferro e il magnesio del basalto) proprio attivando l'estrusione di citrato. Questo citrato, oltre a liberare nutrimento per la pianta, distrugge il reticolo silicato e permette la conversione della CO_2 in ioni bicarbonato stabili.

L'acido citrico
Per comprendere a fondo come l'acido citrico trasformi la CO_2 atmosferica in ioni bicarbonato stabili (HCO_3^-) e minerali carbonatici, occorre analizzare distintamente i suoi due ruoli chimici fondamentali nella rizosfera: quello di catalizzatore (promotore di reazione) e quello di agente chelante (complessante).

- L'acido citrico come Catalizzatore Geochimico (ovvero c*ome agente per abbassare l'energia di attivazione e accelerare la reazione).* In condizioni naturali, la pioggia carica di CO_2 genera

acido carbonico debole (H_2CO_3, pH $\approx$ 5,6). Questo acido reagisce spontaneamente con i silicati di calcio e magnesio presenti nelle rocce basaltiche, ma a una velocità estremamente lenta. $CaSiO_3 + 2CO_2 + H_2O \xrightarrow{\text{molto lenta}} Ca^{2+} + 2HCO_3^- + SiO_2$. Questa reazione rappresenta l'equazione classica fondamentale dell'Erosione Chimica dei Silicati (Silicate Weathering), (Catling & Kasting, 2017). Quando il lupino rilascia acido citrico ($C_6H_8O_7$) dalle sue radici a grappolo, agisce come un catalizzatore di dissoluzione, con un attacco protonico coordinato dove l'acido citrico si dissocia parzialmente liberando ioni idrogeno (H^+) nel microambiente radicale, abbassando localmente il pH anche al di sotto di 4,0. Inoltre si ha una polverizzazione del minerale. I protoni H^+ attaccano i legami silicio-ossigeno-metallo (Si-O-Ca o Si-O-Mg) del basalto, indebolendo la struttura cristallina del minerale in pochi minuti anziché in anni. Man mano che l'acido citrico dissolve il minerale, la pressione parziale di CO_2 nei pori del terreno (alimentata dalla respirazione delle radici) viene continuamente "spinta" a sciogliersi nell'acqua di suolo per reintegrare l'acidità consumata, funzionando da volano per la trasformazione del gas CO_2 in acido carbonico e poi in bicarbonato (Hinsinger, 2001, Lambers et al., 2006).

- L'acido citrico come Agente Chelante (Complessante), ovvero c*ome agente che "strappa" i metalli dalla roccia e blocca il carbonio.* La chelazione è il meccanismo chiave con cui l'acido citrico supera il limite chimico della semplice acidificazione. L'anione citrato ($C_6H_5O_7^{3-}$) possiede tre gruppi carbossilici ($-COOH$) e un gruppo ossidrilico ($-OH$) disposti in una geometria tridimensionale perfetta per avvolgere e legare i cationi metallici. Questa è una "tenaglia" molecolare. Il citrato forma un complesso di coordinazione (chele) estremamente stabile con i cationi di calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) e ferro (Fe^{3+}) presenti sulla superficie del basalto. Bypassando la lentezza della sola idrolisi, l'acido citrico "strappa" fisicamente il calcio e il magnesio dal silicato, portandoli in soluzione sotto forma di organo-complessi solubili (es. citrato di calcio). Una volta che il Ca^{2+} e il Mg^{2+} sono stati estratti per chelazione, la matrice silicea rimanente si sfalda rapidamente. Gli ioni metallici liberati bilanciano le cariche negative degli ioni bicarbonato (HCO_3^-) che si sono formati dall'acido carbonico. Come riferimento ai predetti processi si veda Drever & Vance, 1994.

In sintesi, la CO_2 entra nell'acqua del suolo. La respirazione della pianta e dei microbi arricchisce il terreno di CO_2 . L'acido citrico aziona la tenaglia (chelante): "afferra" il calcio e il magnesio dal basalto, distruggendo il silicato. L'accelerazione della reazione (catalizzatore) abbassa l'energia di attivazione per la dissoluzione minerale, incrementando notevolmente il tasso di reazione rispetto ai controlli senza radici. Infine si ha la fissazione permanente. La CO_2 gassosa si converte definitivamente nello ione idrogenocarbonato (HCO_3^-), una forma solubile, stabile ed ecorispettosa che percola verso le falde idriche e gli oceani senza rischiare di tornare in atmosfera.

Il ciclo di Krebs

Tutte le piante producono acido citrico. Questa molecola è un composto organico fondamentale per la loro vita, generato naturalmente all'interno delle cellule vegetali durante il ciclo di Krebs (chiamato anche ciclo dell'acido citrico), il processo biochimico essenziale per la respirazione cellulare e la produzione di energia. Sebbene sia presente in ogni organismo vegetale, la sua concentrazione varia enormemente a seconda della specie e del tessuto della pianta.

Guardiamo il quadro d'insieme di questo ciclo, collegandolo direttamente al lupino e al basalto, e pensandolo come una macchina per produrre energia dentro le cellule della radice del lupino. Ecco cosa succede, passo dopo passo:

1. Il carburante: La pianta fa la fotosintesi e produce zuccheri. Li manda alle radici come "benzina".

2. La centrale (il ciclo di Krebs): Dentro la radice c'è questo motore circolare che brucia gli zuccheri per dare energia alla pianta.
3. Il primo ingranaggio (il citrato): Appena entra il carburante nel motore, il primissimo pezzo che viene assemblato è proprio il citrato (l'anione dell'acido citrico). È il punto di partenza del ciclo.
4. Il "trabocco" (il ruolo del basalto): Di solito il ciclo fa girare questo acido citrico per bruciarlo e ricavare energia. Ma quando il lupino cresce su un terreno povero e incontra i frammenti di basalto, la pianta accelera il motore o ne produce in eccesso. Risultato? L'acido citrico trabocca.

La radice prende questo acido in eccesso e lo *secerne* nel terreno. Ed è lì che l'acido citrico fa da tenaglia chimica, aggredisce i minerali del basalto, strappa via calcio e magnesio e permette alla pianta di nutrirsi mentre blocca la CO_2. In sintesi estrema: il ciclo di Krebs è la fabbrica interna alla radice che produce l'acido citrico; il lupino prende quel "prodotto di scarto" o in eccesso e lo usa come un'arma chimica per dissolvere la roccia.
Notiamo una cosa ancora riguardante il ciclo di Krebs. La scoperta storica del 1937 di Krebs e Johnson è avvenuta studiando la biochimica animale (nello specifico, il tessuto muscolare pettorale di piccione). Il ciclo dell'acido citrico è quindi universale: è conservato in quasi tutte le forme di vita aerobiche del pianeta, dagli animali ai batteri fino, naturalmente, alle piante. Nelle piante, tuttavia, c'è un'importante differenza di contesto operativo e di funzione:

1. La doppia sede metabolica: Mentre negli animali il ciclo di Krebs serve quasi esclusivamente a produrre energia (ATP) bruciando il glucosio, nelle piante si intreccia con la fotosintesi. Le piante non solo usano il ciclo per la respirazione mitocondriale, ma usano gli intermedi del ciclo (come il citrato e il malato) per costruire altre molecole o per interagire direttamente con l'ambiente esterno.
2. Dalla respirazione all'arma chimica radicale: Nelle radici del lupino (*Lupinus albus*), il ciclo dell'acido citrico non si limita a funzionare a bassi regimi per mantenere in vita la cellula. Quando la pianta avverte la presenza di silicati come il basalto o la carenza di fosforo, la via metabolica viene letteralmente "dirottata". Enzimi chiave vengono sovraespressi. Anziché completare l'ossidazione del citrato all'interno dei mitocondri della radice, la cellula ne produce un forte surplus e lo pompa all'esterno nella rizosfera. È proprio qui che si salda il legame tra la scoperta del 1937 e la nostra discussione: la via biochimica scoperta da Krebs e Johnson nei tessuti animali è l'esatta "fabbrica molecolare" che il lupino riadatta per produrre l'acido citrico con cui aggredisce e scioglie la roccia basaltica.

Il modello del "Carbon Farming" integrato
L'idea di combinare un'erba/leguminosa edibile ad alta efficienza radicale con la farina di basalto definisce un sistema a triplo beneficio. Innanzi tutto abbiamo un sequestro minerale di CO_2 con i bicarbonati che finiscono in falda e negli oceani. Poi abbiamo un cibo ad alto valore proteico, con la produzione di lupini, fave o cereali per il consumo umano o animale. Infine si ha una rigenerazione del suolo con una riduzione della necessità di fertilizzanti sintetici grazie al rilascio di potassio, magnesio, calcio e silice dal basalto. Insomma, il modello proposto si inserisce perfettamente nel solco delle tecnologie di *Carbon Dioxide Removal* biologico-minerali più promettenti. Ma non basta: noi possiamo prendere gli scarti di questi vegetali e trasformarli in biochar. In Heredia Salgado et al., 2022, troviamo la conversione di quinoa e lupino in biochar ad uso ammendante del suolo.
Se abbiniamo gli scarti di colture come il lupino (o di altre piante a forte secrezione acida) alla polvere di basalto e trasformiamo poi i loro residui in biochar, ottieniamo quello che in biogeochimica viene definito un sistema a doppio sequestro parallelo (biologico e geochimico).
Ecco come funziona questa sinergia a livello chimico e ambientale:

- Cattura e fissazione a doppio binario. In fase di crescita (Via Geochimica), le radici del lupino secernono acidi organici che sciolgono il basalto, trasformando la CO_2 disciolta nell'acqua del suolo in ioni bicarbonato stabili che migrano verso le falde e gli oceani. Dopo il raccolto (Via Biologica / Pirolisi), invece di far decomporre gli scarti vegetali (steli, foglie, baccelli vuoti) liberando di nuovo CO_2 e metano, li si converte tramite pirolisi in biochar. Il carbonio organico catturato dalla fotosintesi viene fissato in strutture aromatiche stabili per secoli.
- Il "Biochar Arricchito" (Enriched/Mineral Biochar). Pirofissare gli scarti di leguminose arricchiti dai micro e macro-nutrienti assorbiti dal basalto (calcio, magnesio, silice, potassio, ferro) genera un biochar dalle proprietà agronomiche straordinarie. Genera la fissazione dell'azoto e crea porosità. Gli scarti delle leguminose sono naturalmente ricchi di azoto. La pirolisi di questi residui crea un biochar ad altissimo valore fertilizzante rispetto a quello derivato da semplice legno. Il biochar ottenuto ha un effetto spugna nella rizosfera. Reiniettato nello stesso terreno, il biochar trattiene l'umidità e serve da "casa" per la flora microbica e le micorrize, le quali a loro volta intensificheranno ulteriormente la secrezione acida per sciogliere nuova polvere di basalto.
- In sostanza si ha un bilancio di carbonio nettamente favorevole. Questo approccio risolve il dilemma principale della geoingegneria: non c'è consumo di suolo dedicato esclusivamente alla cattura. Si produce cibo ad alto valore proteico per l'alimentazione umana o animale, e contemporaneamente si impiegano gli scarti per bloccare la CO_2 sia sotto forma minerale solubile, sia sotto forma di matrice carboniosa solida nel terreno.

La pianta edibile migliore in questo scenario

Se dobbiamo eleggere la pianta edibile "regina" per questo scenario combinato (acidificazione della rizosfera, solubilizzazione del basalto, produzione di cibo ad alto valore nutrizionale ed eccellente biochar dagli scarti), il primo posto va senza dubbio al lupino bianco (*Lupinus albus*). Subito dietro, per motivi complementari, troviamo il Grano saraceno e la Fava.

Il lupino presenta elevato valore alimentare. I suoi semi contengono fino al 40% di proteine e zero glutine, rappresentando quindi un pilastro per la sovranità alimentare e la produzione di alternative vegetali. Si tenga però presente che è necessario il processo di deamarizzazione. Il lupino ha una biomassa che fornisce biochar, A differenza delle erbe sottili, il lupino produce residui colturali (steli e baccelli) ricchi di azoto organico e con un'ottima struttura ligno-cellulosica. Trasformare questi scarti in biochar restituisce al terreno una matrice porosa arricchita di azoto, idonea a trattenere umidità e nutrienti.

Dobbiamo però dire che abbiamo anche un canditato con una crescita veloce, ed è il grano saraceno (*Fagopyrum esculentum*). Ha un ciclo brevissimo e una iper-acidificazione. Matura in soli 100 giorni e possiede un'efficienza straordinaria nell'estrarre fosforo e cationi dalle rocce tramite essudati radicali. Permette di fare più cicli nella stessa stagione, aumentando i volumi di CO_2 minerale sequestrata e la biomassa prodotta. Vi è però un limite sul biochar: la sua biomassa residua è meno densa rispetto a quella del lupino, generando una resa in biochar solido inferiore.

Il campione per i climi freddi/temperati è invece la fava (*Vicia faba*). Ha un apparato radicale profondo che conferisce un'ottima tolleranza ai climi umidi e freddi (dove la pioggia favorisce il dilavamento dei bicarbonati). Ha una produzione elevata di biomasse da scarto e fissazione simbiotica dell'azoto.

Il lupino e il sequestro di CO_2 atmosferica

Ribadiamo quindi i dati fondamentali. Il lupino sequestra CO_2 atmosferica attraverso due meccanismi complementari: la via biologica diretta (fotosintesi ed essudati) e la via geochimica indiretta (quando combinato con minerali come il basalto). Nella via diretta abbiamo:

- Assorbimento fotosintetico: Come ogni pianta, il lupino cattura la CO_2 dall'aria e la trasforma in zuccheri e biomassa organica.
- Iniezione nel suolo (Essudati radicali): Una quota consistente del carbonio fissato non resta nella pianta, ma viene "pompata" dalle radici nel terreno sotto forma di acidi organici (citrico, malico) e zuccheri per nutrire il microbiota del suolo.
- Fissazione dell'azoto e accumulo di sostanza organica: La simbiosi con i batteri *Bradyrhizobium* permette al lupino di arricchire il terreno di azoto senza fertilizzanti di sintesi (la cui produzione emette molta CO_2). Questo favorisce la formazione di humus stabile nel terreno, bloccando il carbonio nel suolo.

Nel sequestro geochimico indiretto (Cattura minerale via *Cluster Roots*), quando il lupino cresce su terreni addizionati con polvere di basalto o rocce silicate, si attiva il meccanismo di cattura minerale vera e propria:

- Acidificazione spinta: Le radici a grappolo (*cluster roots*) del lupino secernono enormi quantità di acido citrico per estrarre fosforo e cationi metallici.
- Reazione con i silicati: L'acido reagisce con i minerali di calcio e magnesio presenti nel basalto ($CaSiO_3$ / Mg_2SiO_4), mentre la respirazione radicale rilascia CO_2 ad alta pressione nei pori del terreno.
- Formazione di bicarbonati: La reazione chimica discioglie la CO_2 atmosferica/radicale trasformandola in ioni bicarbonato (HCO_3^-):

$$\text{Roccia silicata} + CO_2 + H_2O \longrightarrow \text{Cationi}(Ca^{2+}, Mg^{2+}) + 2HCO_3^-$$

- Stoccaggio permanente: I bicarbonati, essendo altamente stabili in acqua, vengono dilavati dalle piogge verso le falde acquifere e infine negli oceani, dove il carbonio rimane sequestrato per decine di migliaia di anni.

Se poi gli scarti della pianta (steli e baccelli) vengono convertiti in biochar tramite pirolisi anziché lasciati decomporre, il carbonio organico catturato dalla fotosintesi viene pietrificato in una matrice solida inerte, completando il ciclo a bilancio fortemente negativo.

Le due varietà di lupino

Si noti che esistono due varietà di lupino: il Lupino bianco (*Lupinus albus*) e il Lupino dolce. Rappresentano la stessa pianta coltivata in due "versioni" genetiche distinte:

- Il Lupino bianco "tradizionale" (o amaro): È la specie botanica originale *Lupinus albus*. Produce un'abbondante quantità di alcaloidi chinolizidinici (come la lupanina) a scopo difensivo. È la pianta dalle radici che acidificano il suolo e sciolgono il basalto, ma i suoi semi sono amari e tossici se non vengono deamarizzati con lunghi lavaggi in acqua salata.
- Il Lupino bianco "dolce": È il risultato di una selezione genetica naturale e moderna applicata alla medesima specie (*Lupinus albus* "dulcis"). I genetisti sono riusciti a ridurre drastimaente la sintesi degli alcaloidi amari.

Cosa cambia e cosa resta uguale nello scenario di sequestro:

- Le radici e il weathering restano identici: Il lupino bianco dolce mantiene intatta tutta la sua architettura radicale e la capacità di secernere acidi organici (acido citrico e malico). Controlla il pH del suolo e scioglie la polvere di basalto esattamente allo stesso modo della variante amara.
- La biomassa per il biochar resta identica: steli, foglie e baccelli vuoti mantengono la stessa resa in biomassa da convertire in biochar arricchito di azoto.

- L'uso alimentare cambia radicalmente: Con la varietà dolce, i semi possono essere elaborati con trattamenti meno energivori di quelli necessari per il lupino originale.

Scegliendo la varietà di lupino bianco dolce, si ottiene esattamente lo stesso potenziale geochimico di sequestro della CO_2, ma si riduce il tempo dei trattamenti per il consumo. Si noti però che resta sempre necessaria la deamarizzazione. Non vanno mai consumati crudi o senza il necessario trattamento di deamarizzazione.

Lupino e polvere di basalto
La review recente di Ibrahim et al., 2026, è focalizzata sull'uso della polvere di basalto per la mineralizzazione del suolo e il sequestro del carbonio atmosferico. I punti fondamentali e i dati emersi dal testo sono:

1. Il ruolo del Lupino (*Lupin*) nella review:
   - Impatto sui raccolti: Il lupino figura esplicitamente nella Tabella 2 dell'articolo tra le colture (insieme a mais, canna da zucchero, riso, colza e banana) le cui rese e l'assorbimento minerale beneficiano in modo significativo dall'aggiunta di polvere di basalto al terreno.
   - Accelerazione del Weathering: Viene citato lo studio sperimentale di Hinsinger et al., 2001, in cui la presenza di piante — tra cui il lupino — ha incrementato il rilascio di elementi come silicio, sodio, magnesio e calcio dal basalto da 1 a 5 volte rispetto al trattamento senza piante, con un aumento del rilascio di ferro da 100 a 500 volte. Questo conferma sperimentalmente l'ipotesi che l'attività radicale del lupino acceleri la dissoluzione della roccia.

2. Potenziali di Sequestro e Benefici Agronomici del Basalto
   - Cattura di CO_2: La polvere di basalto ben macinata ha un potenziale massimo di cattura pari a 0.3 t CO_2 per tonnellata di basalto impiegata.
   - Nutrienti e Rilascio Lento: Fornisce macro e micronutrienti essenziali (K, P, Ca, Mg, Fe, Si, Cu, Zn) con un rilascio lento e costante.
   - Benefici sul Suolo: Corregge l'acidità del terreno (aumentando il pH e la capacità di scambio cationico) senza bisogno di chimica, e i suoi effetti fertilizzanti durano fino a 5 anni con un'unica applicazione.
   - Economia aziendale: L'impiego del basalto permette di ridurre fino al 50% i costi di produzione legati all'acquisto di fertilizzanti inorganici.

Il testo di Ibrahim et al., 2026, conferma in modo rigoroso la validità dell'interazione tra la fisiologia del lupino e la polvere di basalto per la fertilizzazione e il sequestro minerale della CO_2.

Oltre le coltivazioni
Esistono impianti e concetti ingegneristici progettati esattamente attorno allo stesso principio. Vengono chiamati sistemi di Enhanced Rock Weathering (ERW) ex-situ o reattori a percolazione minerale. Anziché attendere le piogge naturali sui campi agricoli, questi sistemi controllati accelerano ulteriormente la dissoluzione del basalto:

- Sistemi a pioggia percolante (Trickle-bed Reactors): Si realizzano vasche o silos riempiti di polvere di basalto macinato e dotati di ugelli che "spruzzano" continuamente acqua arricchita artificialmente di CO_2 (ad esempio captata direttamente dai fumi industriali). L'acqua percola attraverso la roccia minerale, assorbe il carbonio e rilascia in uscita una soluzione satura di bicarbonati stabili.
- Accoppiamento con il drenaggio acido o acque reflue: Alcuni impianti utilizzano acque di scarto leggermente acide o arricchite di acidi organici per bagnare la polvere di basalto

macinata, massimizzando la velocità di reazione chimica senza dipendere dai tempi delle precipitazioni atmosferiche.
- Impianti ex-situ a ricircolo: L'acqua viene fatta circolare in modo continuo sul letto di basalto per estrarre la massima quantità possibile di cationi (Ca^{2+}, Mg^{2+}) prima di essere scaricata nei corsi d'acqua o nei bacini di stoccaggio sotto forma di bicarbonati.

Il vantaggio principale di questi reattori risiede nel controllo totale dei parametri (temperatura, pH dell'acqua, granulometria e flusso di lavaggio), il che consente di raggiungere tassi di dissoluzione molto più rapidi rispetto al solo spargimento sui terreni. Il limite principale rimane tuttavia il costo energetico dell'infrastruttura e del pompaggio dell'acqua, motivo per cui l'applicazione diretta nei campi coltivati (*in-situ*) resta al momento la soluzione più economica e diffusa su larga scala.
Il caso di impianto più celebre al mondo per emissioni industriali è il modello Carbfix. Sviluppato in Islanda presso la centrale geotermica/industriale di Hellisheiði:

- Come funziona: La CO_2 catturata dai fumi dell'impianto viene disciolta in un "getto d'acqua" a pressione (praticamente acqua gassata) e iniettata a circa 500–1000 metri di profondità direttamente all'interno delle formazioni rocciose di basalto profondo.
- Risultato: L'acqua acida reagisce con il basalto del sottosuolo e mineralizza la CO_2 in calcite/carbonati solidi nell'arco di appena due anni.

I catalizzatori
L'idea di velocizzare l'alterazione dei minerali nei reattori industriali (i cosiddetti reattori di *ex-situ weathering* o *lisciviazione percolante*) tramite l'uso di catalizzatori è un campo di ricerca molto attivo. Poiché gli acidi organici come l'acido citrico costano molto da produrre e si degradano con la carica batterica, l'ingegneria chimica e la biogeochimica hanno esplorato diverse classi di catalizzatori e agenti acceleranti alternativi:

- Catalizzatori Enzimatici: L'Anidrasi Carbonica (*Carbonic Anhydrase*) (Power et al., 2016). È l'enzima chiave impiegato per abbattere la barriera cinetica più lenta in fase liquida: la conversione della CO_2 disciolta in acido carbonico. L'anidrasi carbonica idrata la CO_2 ad altissima velocità ($CO_2 + H_2O \rightleftharpoons HCO_3^- + H^+$), incrementando istantaneamente la concentrazione di protoni (H^+) nel fluido di pioggia/percolazione. In tal modo si aumenta l'attacco acido iniziale sulla superficie del basalto e si accelera la trappola del carbonio in forma di bicarbonato. Nell'applicazione viene spesso immobilizzata su supporti solidi o sfere all'interno della colonna di pioggia.
- Chelatanti Inorganici e Acidi Minerali Rigenerabili (Oelkers, 2001). Invece di usare acidi organici/biodegradabili, si utilizzano agenti complessi o acidi rigenerabili a basso costo come i Solfati e Acido Solforico diluito (H_2SO_4 / bisolfati): Utilizzati nei processi di estrazione mineraria. Attaccano aggressivamente i silicati liberi liberando Ca^{2+} e Mg^{2+}. Vi sono poi i Polifosfati e Silicati Solubili: Possono agire da deboli agenti di complessazione per i cationi metallici senza subire la biodegradazione batterica che affligge il citrato.
- Ligandi Organici Sintetici e Polimeri (EDTA e NTA) (Stumm, 1997). EDTA (Acido etilendiamminotetraacetico): È fondamentale nella chelazione industriale. Forma complessi di coordinazione stabili con calcio, magnesio e ferro, "scostandoli" dalla matrice minerale a velocità altissime. Come per il citrato, ha un costo elevato e ha il problema del recupero del chelante a fine ciclo per non contaminare i prodotti o l'ambiente.
- Liquidi Ionici e Sali fusi (ad alta pressione/temperatura) (Gerdemann et al., 2007). Nelle varianti industriali più estreme (reattori ad alta pressione), si usano liquidi ionici o soluzioni saline concentrate che modificano la forza ionica del mezzo, accelerando la lisciviazione del magnesio dall'olivina o dai pirosseni presenti nel basalto.

Nei processi industriali di alterazione accelerata del basalto, la strategia operativa si articola concretamente in due fasi sequenziali, La prima fase è la fase estrattiva (Lisciviazione chimica): Si fa percolare sul letto di roccia una soluzione acida o chelante — spesso recuperata e gestita in un circuito chiuso per contenere i costi — con l'unico scopo di "aggredire" il basalto e strappare rapidamente i metalli (calcio e magnesio) dalla matrice silicea. La seconda fase è la fase di cattura (Carbonatazione enzimatica): La soluzione ricca di metalli viene immessa in una sezione di contatto con la CO_2, dove l'aggiunta di anidrasi carbonica forza una conversione rapida della CO_2 gassosa in ioni bicarbonato, inducendo la precipitazione e il blocco permanente del carbonio sotto forma di minerali stabili.

Basalto in Italia
In Italia il basalto (e le rocce vulcaniche affini ad alto contenuto di silicati di calcio e magnesio) è ampiamente presente in diverse regioni, principalmente legate ai distretti vulcanici storici e attivi.
Ecco le aree principali in cui si concentrano le formazioni e i giacimenti di basalto:

- Veneto (Lessinia e Colli Euganei/Berici): È una delle zone più note nell'Italia settentrionale. Le colate basaltiche dell'Alpone-Chiampo e della Val Leogra (provincie di Verona e Vicenza) offrono basalto di ottima qualità, storicamente estratto anche per la pavimentazione stradale.
- Sardegna: L'isola possiede i più estesi altopiani basaltici d'Italia. Le aree di Bosa, Orosei, Logudoro e il Gesturi presentano imponenti coperture basaltiche di origine cenozoica e pleistocenica.
- Sicilia (Etna e Iblei): L'area etnea e i Monti Iblei (Ragusa e Siracusa) costituiscono uno dei complessi basaltici più importanti del Mediterraneo, con abbondante disponibilità di basalto sia effusivo attivo che antico.
- Lazio e Toscana (Distretti Vulcanici Vulcanino, Sabatino e Vulsino): Sebbene prevalgano spesso tufo, peperino e basaniti/tefriti, la zona attorno al Lago di Bolsena, Viterbo e l'area vulcanica laziale sono ricche di rocce laviche silicate idonee all'uso agronomico.

Per l'applicazione sui campi non serve estrarre nuova roccia: il metodo più sostenibile ed economico consiste nel recuperare i polverini di scarto delle cave di pietra lavica/basalto già attive nei distretti sopra citati. Esistono inoltre diversi distributori di fertilizzanti biologici e ammendanti che commercializzano la "farina di basalto" o "polvere di roccia lavica" già pronta e macinata alla granulometria ideale per il terreno.

Pozzolana
Vi è poi la pozzolana. La pozzolana è un'altra risorsa straordinaria del nostro patrimonio vulcanico. In chimica dei materiali e in biogeochimica condivide diverse proprietà con il basalto, ma ha alcune peculiarità che la rendono un'ottima candidata per il suolo. A differenza del basalto (che è una roccia effusiva compatta), la pozzolana si forma per il rapido raffreddamento delle ceneri e dei lapilli vulcanici. Questo le conferisce una struttura altamente porosa e una matrice prevalentemente vetrosa. È ricchissima di silice reattiva (SiO_2) e allumina (Al_2O_3), oltre a contenere potassio, calcio, magnesio e ferro. La sua porosità naturale agisce meccanicamente quasi come un ammendante fisico: aumenta la ritenzione idrica nei terreni sabbiosi e migliora la struttura e l'aerazione nei terreni argillosi.

Poniamo quindi alcuni punti che meriterebbero di essere investigati riguardanti la pozzolana:

- Velocità di dissoluzione: Essendo una cenere vetrosa anziché una roccia cristallina densa, la pozzolana ha una superficie specifica elevata. Questo la rende un buon candidato ad essere molto reattiva agli acidi organici secreti dalle radici del lupino, facilitando il rilascio di minerali.

- Sequestro di CO_2: Essendo ricca di silicati, può partecipare al processo di *weathering* formando bicarbonati stabili quando reagisce con l'acido carbonico e gli essudati radicali, anche se la quota di calcio e magnesio può variare a seconda del bacino di estrazione rispetto a un basalto propriamente detto (più mafico).
- Disponibilità in Italia: È abbondantissima in Italia centrale e meridionale (famosissima quella del distretto laziale e campano, usata fin dall'epoca romana per le malte idrauliche).

In sintesi, utilizzare i polverini di scarto delle cave di pozzolana per la remineralizzazione dei suoli agricoli potrebbe essere un'ottima alternativa (o integrazione) alla farina di basalto, sfruttando un materiale già presente su vasta scala nel nostro territorio.

Tufo

Il tufo rappresenta un'altra straordinaria risorsa vulcanica del centro e sud Italia (Lazio, Campania o Maremma), ma con caratteristiche distinte rispetto al basalto e alla pozzolana. Il tufo è una roccia piroclastica consolidata: Si origina dalla cementazione di ceneri, lapilli e pomici durante eruzioni esplosive. Ha componente vetrosa e zeolitica: a differenza del basalto (che è una roccia magmatica effusiva densa), il tufo presenta una struttura altamente porosa e spesso contiene zeoliti (come la clinoptilolite e la chabazite), nate dall'alterazione del vetro vulcanico ad opera di acque idrotermali o sotterranee.

Reattività nel terreno e Weathering del tufo

Anche nel caso del tufo possiamo segnalare alcune possibilità da investigare:

- Capacità di Scambio Cationico (CSC): Grazie alle zeoliti, il tufo macinato agisce come una "spugna molecolare" per i nutrienti. Trattiene l'ammonio (NH_4^+) e il potassio (K^+), rilasciandoli gradualmente alle piante ed evitando il dilavamento dei fertilizzanti.
- Solubilizzazione dagli acidi radicali: Gli acidi organici secreti dalle *cluster roots* del lupino possono aggredire facilmente la matrice porosa del tufo, liberando silicio, potassio, calcio e magnesio.
- Sequestro di CO_2: Può partecipare alle reazioni di *weathering* convertendo l'acido carbonico in bicarbonati stabili. Tuttavia, la sua capacità teorica di sequestro per tonnellata appare mediamente inferiore a quella di un basalto ultra-mafico (ricco di olivina e pirosseni), perché il tufo contiene una percentuale maggiore di silice ed allumina rispetto ai cationi bivalenti (Ca^{2+}, Mg^{2+}).

Il tufo (roccia piroclastica ricca di zeoliti, silicati, Ca, Mg e K) è studiato come fonte minerale e fertilizzante a lento rilascio in rizosfera (Barak et al., 1983). Il riferimento analizza l'alterazione del tufo ad opera degli acidi della rizosfera e il rilascio di cationi utili e metalli per la nutrizione vegetale. Se la polvere di basalto è il "campione di carica minerale" per catturare CO_2 e la pozzolana appare essere un ammendante fisico, il tufo macinato (specialmente quello zeolitizzato) appare interessante come regolatore idrico e di nutrienti. Miscelare lo scarto di cava di tufo con il biochar e la polvere di basalto crea un substrato rigenerativo perfetto per la rizosfera del lupino.

Letteratura

L'articolo di Peter Van Straaten (2006) è focalizzato specificamente sulla presenza e sull'uso di materiali vulcanici e tufacei come ammendanti e fertilizzanti naturali. Sebbene l'articolo non tratti in modo estensivo la pozzolana italiana classica in senso stretto, analizza in profondità i materiali vulcanici piroclastici affini (tufi, ceneri vulcaniche e rocce vulcaniche ultrapotassiche/mafiche) che condividono la stessa natura mineralogica e vetrosa reattiva. Ecco i passaggi chiave in cui vengono menzionati:

1. Classificazione come "Multi-Nutrient Silicate Rock Fertilizers" (Fertilizzanti a base di rocce silicatiche multinutriente). L'autore inserisce le rocce vulcaniche fini, le ceneri e i tufi tra i principali concimi minerali naturali a lento rilascio. Viene evidenziato che le aree vulcaniche giovani, caratterizzate da lave e ceneri/tufi alterati, hanno storicamente generato i terreni agricoli più fertili del pianeta. Le rocce vulcaniche vetrose o a sottosaturazione di silice (come alcune lave e tufi) presentano tassi di alterazione (*weathering*) e rilascio di macro e micronutrienti (Calcio, Magnesio, Ferro e potassio) significativamente più rapidi rispetto alle rocce ricche di silice come i graniti.
2. Il caso specifico dei Tufi vulcanici in Brasile (Formazione *Mata da Corda*). L'articolo cita esplicitamente studi condotti in America Latina sull'uso agricolo di lave e tufi ultrapotassici ricchi di calcio, magnesio, fosforo e micronutrienti estratti dalla Formazione *Mata da Corda* (uno strato di circa 250 km × 50 km nello Stato di Minas Gerais, in Brasile). Questi tufi e lave vulcaniche finemente macinati hanno dimostrato un altissimo livello di risposta agronomica su terreni lateritici acidi e impoveriti, migliorando la nutrizione delle colture grazie alla rapida cessione di elementi nutritivi e al potere correttivo del pH (effetto ammendante/liming).
3. L'uso di Tufi e Scorie Vulcaniche per correggere la clorosi (il ferro). Viene citato lo studio di Barak et al. (1983) che ha testato l'applicazione di rocce basaltiche macinate e tufs (lapilli tuffs) — derivati da cave locali — su terreni calcarei. L'applicazione di questi materiali piroclastici ha risolto efficacemente i problemi di carenza di ferro (clorosi ferrica) nelle arachidi, migliorando la produzione di clorofilla e la crescita complessiva della pianta grazie alla liberazione di ferro biologicamente utile.
4. Ruolo strutturale e di scambio cationico (Cation Exchange Capacity). L'autore evidenzia che alcune ceneri vulcaniche e materiali piroclastici ricchi di minerali argillosi o di fasi vetrose (come le ceneri ricche di smectiti) aumentano notevolmente la capacità di scambio cationico (CEC) dei suoli poveri o sabbiosi, agendo come spugne per trattenere i nutrienti ed evitarne il dilavamento.

Nel contesto della nostra discussione, questo articolo di Van Straaten (2006) chiarisce l'uso di rocce vulcaniche mafiche e materiali piroclastici (simili a pozzolane e tufi vulcanici) come ammendanti minerali naturali. Dimostra che la disgregazione di questi materiali vulcanici reattivi rilascia cationi essenziali (Ca^{2+}, Mg^{2+}), agisce come correttore naturale dell'acidità del suolo (*liming effect*), e fornisce una matrice ideale che, se combinata con l'azione biologica delle radici (come gli essudati acidi del lupino), accelera drasticamente la dissoluzione minerale e il sequestro del carbonio.
L'articolo di Hortensia Rădulescu e pubblicato nel 2013 propone una ricerca che valuta l'efficacia dell'impiego di tufi vulcanici zeolitici (ricchi in clinoptilolite, al 60-70%, provenienti dai depositi rumeni di Mirșid e Bârsana) come ammendanti e fertilizzanti naturali per migliorare la fertilità dei suoli a bassa fertilità e riabilitare i terreni acidi. La metodologia è sperimentale:

- Terreno e coltura: I test sono stati condotti su appezzamenti di terreno di tipo chernozem (terra nera) seminati a avena (*oat*).
- Trattamenti testati: Sono state confrontate diverse dosi di tufo vulcanico da solo (20, 40 e 60 t/ha, indicate rispettivamente come A_1, A_2, A_3) e in combinazione con un'aggiunta fissa di azoto (100 kg/ha sotto forma di nitrato d'ammonio, indicati come A_4, A_5, A_6), confrontandoli con un terreno di controllo non trattato (C).

Principali Risultati evidenziati:

- Effetto sul pH (Azione tampone): L'applicazione del tufo vulcanico ha generato un incremento del pH in tutti i campioni trattati, confermando le spiccate proprietà tampone del materiale utile per correggere e neutralizzare l'acidità del suolo.
- Ritenzione Idrica (Umidità del suolo): Grazie alla struttura porosa della zeolite, l'umidità del suolo è aumentata notevolmente nei terreni trattati, passando dal 21,1% del controllo a valori compresi tra il 25% e il 29%, agendo di fatto come una riserva d'acqua disponibile per le piante.

- L'analisi degli elementi estraibili ha confermato che il tufo rilascia cationi essenziali in base alla sua composizione chimica e alla selettività di scambio ionico della clinoptilolite (che mostra preferenza secondo la serie $Ca < Mg < Na < K$).
- Si è registrato un incremento significativo del calcio, del magnesio e soprattutto del potassio disponibile nel terreno all'aumentare della dose di tufo.
- Incremento delle Rese Agricole (Biomassa e Granella):Tutti i trattamenti con tufo vulcanico hanno mostrato un incremento della produzione di biomassa vegetale rispetto al controllo, con aumenti dal 12,9% (A_1) fino al 29,4% (A_3).
- Anche la produzione di granella ha registrato crescite sensibili, comprese tra il 19,3% e il 33,5% nei campioni misti con nitrato d'ammonio (A_6).

Il tufo vulcanico zeolitico si dimostra pertanto una risorsa naturale economica ed ecologica altamente efficace per la rigenerazione dei terreni poveri o acidi. Usato da solo o in sinergia con fertilizzanti azotati (come il nitrato d'ammonio), migliora il pH, incrementa la ritenzione idrica, arricchisce il suolo di nutrienti essenziali e stimola in modo tangibile la crescita delle colture e le rese produttive.

Conclusioni

Il modello "Lupino-Basalto" presentato dimostra come l'integrazione tra la fisiologia vegetale specializzata e i remineralizzanti vulcanici locali possa trasformare le superfici agricole in sistemi attivi di cattura permanente della CO_2. L'azione coordinata degli acidi secreti dalle *cluster roots* del *Lupinus albus* supera i limiti cinetici dell'ERW tradizionale, convertendo la CO_2 atmosferica in ioni bicarbonato (HCO_3^-) con tassi di dissoluzione minerale superiori rispetto ai controlli privi di vegetazione specializzata.

La validità dell'approccio risiede nella sua duplice efficienza biogeochimica ed economica:

1. **Via Geochimica (Solubile e Permanente):** La cattura della CO_2 e la sua stabilizzazione in forma minerale idrosolubile impediscono il rilascio del gas in atmosfera, contribuendo contemporaneamente al contrasto dell'acidificazione degli oceani e al riequilibrio del pH dei terreni agricoli.
2. **Via Biologica (Solida e Rigenerativa):** La conversione dei residui della coltura in biochar fissa il carbonio fotosintetico in matrici aromatiche stabili per secoli, arricchendo il suolo di porosità, capacità di scambio cationico (CSC) e riserve azotate.

L'impiego della varietà di *Lupinus albus* dolce riduce i trattamenti per la deamarizzazione, fornendo proteine vegetali ad alto valore nutrizionale a filiera corta. Inoltre, il riutilizzo degli scarti di cava di basalto, pozzolana e tufo già macinati azzera i costi energetici e ambientali legati all'estrazione di nuova roccia. In conclusione, questo approccio sistemico offre un modello di *Carbon Farming* a bilancio di carbonio negativo, integrabile nelle pratiche agronomiche mediterranee e capace di coniugare la sicurezza alimentare con la rispondenza ai principi di permanenza e scalabilità richiesti dalle tecnologie di *Carbon Dioxide Removal*.

Appendice A

Il basalto è una roccia magmatica effusiva (vulcanica) di composizione basica, a grano fine e di colore scuro (dal grigio scuro al nero), che si forma per il rapido raffreddamento della lava sulla superficie terrestre o sul fondo oceanico. È la roccia più abbondante della crosta oceanica.

Composizione Elementare Primaria: Dal punto di vista chimico ed elementare, il basalto è composto prevalentemente da:

- Silicio (Si) e Ossigeno (O): Presenti sotto forma di matrice silicatica (SiO_2, generalmente tra il 45% e il 52% in peso).

- Alluminio (Al): Presente sotto forma di alluminosilicati (plagioclasi).
- Calcio (Ca) e Magnesio (Mg): Cationi alcalino-terrosi abbondanti, fondamentali per le reazioni di sequestro della CO_2 e formazione di bicarbonati/carbonati.
- Ferro (Fe): Presente sia come Fe^{2+} che Fe^{3+}, responsabile del colore scuro della roccia e dell'alta reattività con gli essudati radicali (come il citrato).

Elementi in Traccia e Microelementi**:** Contiene inoltre quantitativi minori o in traccia di:

- Sodio (Na) e Potassio (K)
- Titanio (Ti) e Manganese (Mn)
- Nichel (Ni), Cromo (Cr) e Cobalto (Co)

Minerali Principali: Questi elementi si organizzano strutturalmente nei seguenti minerali silicei:

1. Plagioclasi ricchi di calcio (es. anortite/labradorite)
2. Pirosseni (es. augite)
3. Olivina (silicato di magnesio e ferro, altamente reattivo all'alterazione chimica)

Di seguito una tabella di contronto tra basalto, pozzolana, e tufo.

Tabella Comparativa: Basalto vs Pozzolana vs Tufo

Parametro	**Basalto**	**Pozzolana**	**Tufo**
Origine e Struttura	Roccia magmatica effusiva (vulcanica) compatta, a grana fine, formatasi per raffreddamento rapido della lava in superficie.	Roccia piroclastica sciolta o incoerente, formata da ceneri e lapilli vetrosi ad alta porosità.	Roccia piroclastica consolidata (cementazione di ceneri, lapilli e pomici) altamente porosa.
Composizione Chimica	**Silica (SiO_2):** 45–52% **Cationi bivalenti:** Altissimi (Ca, Mg, Fe) **Allumina (Al_2O_3):** Moderata.	**Silica reattiva (SiO_2):** Molto alta **Allumina (Al_2O_3):** Alta Presenti anche K, Ca, Mg, Fe.	**Silica e Allumina:** Prevalenti Presenza di silicati idrati e matrice vetrosa alterata.
Minerali Principali	- Plagioclasi calcici (anortite, labradorite) - Pirosseni (augite) - Olivina (silicato di Mg e Fe altamente reattivo).	- Matrice vetrosa amorfa (cenere reattiva) - Frammenti minerali leggeri e ferromagnesiani dispersi.	- **Zeoliti** (clinoptilolite e chabazite nate dall'alterazione del vetro vulcanico).
Reattività Chimica (Weathering)	Media-alta; l'olivina e i pirosseni cedono facilmente Ca e Mg all'attacco acido delle radici.	Molto alta; la struttura vetrosa e la superficie specifica elevata accelerano la dissoluzione acida.	Moderata; gli acidi organici dissolvono la matrice porosa liberando cationi e silicio.
Capacità di Scambio Cationico (CSC)	Bassa o moderata (affidata principalmente alla frazione argillosa e minerale fine).	Moderata (legata all'effetto pozzolanico e alla superficie specifica).	**Altissima**; grazie alla presenza di zeoliti agisce come una "spugna molecolare" per i nutrienti (K^+, NH_4^+).

Parametro	Basalto	Pozzolana	Tufo
Ruolo Chiave nel Modello	**Campione di carica minerale:** Massimizza il sequestro di CO_2 tramite rilascio di Ca e Mg (formazione di bicarbonati).	**Ammendante fisico-reattivo:** Migliora la tessitura del suolo e offre una rapida cessione di silice reattiva.	**Regolatore idrico e di nutrienti:** Trattiene l'acqua e impedisce il dilavamento dei fertilizzanti nella rizosfera.

Nota tecnica su sinergia multifase (Basalto–Pozzolana–Rizosfera): Sebbene il basalto e la pozzolana presentino profili mineralogici differenti, la loro co-applicazione nel modello agronomico innesca una complementarità funzionale. La pozzolana, grazie alla sua natura vetrosa e all'elevata superficie specifica, offre una reattività immediata all'attacco acido delle *cluster roots* del lupino, garantendo un rilascio rapido di silice reattiva e un miglioramento immediato della ritenzione idrica del suolo. Contestualmente, il basalto (più ricco di minerali ferromagnesiani come olivina e pirosseni) agisce come riserva minerale a medio-lungo termine, fornendo il flusso costante di cationi bivalenti (Ca^{2+}, Mg^{2+}) indispensabile per massimizzare il sequestro permanente della CO_2 sotto forma di bicarbonati. L'azione combinata di questi due substrati vulcanici con gli essudati organici radicali realizza così un sistema di alterazione accelerata a doppia velocità (reattività immediata + riserva geochimica duratura).

Nota tecnica su calcestruzzo e mattoni

Potremmo chiederci se le piante non possano fare qualcosa coi materiali di demolizione di calcestruzzo e mattoni. Questa domanda apre un capitolo molto attuale della ricerca sulla cattura della CO_2 e sul riciclo industriale. La risposta breve è: sì, il calcestruzzo frantumato ha una forte reattività chimica con la CO_2, ma usarlo direttamente nei campi con le piante presenta grossi ostacoli, a differenza dei polverini di cava naturali (basalto o tufo). Ecco nel dettaglio cosa succede separando i due materiali edili principali:

1. Il Calcestruzzo (Cemento Frantumato) e la Carbonatazione: Il calcestruzzo non è una roccia naturale, ma un conglomerato artificiale. La sua parte "attiva" è la pasta di cemento indurita, che contiene grandi quantità di idrossido di calcio ($Ca(OH)_2$, noto come portlandite) e silicati di calcio idrati.

- La trappola per la CO_2: Quando il calcestruzzo viene demolito e ridotto in polvere o granuli, si trova esposto all'aria e all'acqua. A contatto con la CO_2 (specialmente quella del suolo prodotta dalla respirazione delle radici e dei microrganismi), innesca spontaneamente un processo chiamato carbonatazione minerale:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O$$

  Il calcio libero del cemento cattura la molecola di anidride carbonica trasformandola in carbonato di calcio solido (calcite).
- Il ruolo della ricerca: Esistono studi avanzati che utilizzano il calcestruzzo riciclato macinato come materiale per la cattura ex-situ della CO_2 industriale (Pan et al., 2012). Il riferimento segnala la carbonatazione accelerata (adsorbimento chimico) come un metodo alternativo fattibile e interessante per la mitigazione delle emissioni di CO_2 nei prossimi decenni, poiché comporta il suo stoccaggio sotto forma di precipitazione di carbonati, il che è ecologicamente sicuro.

2. I Mattoni (Laterizi): I mattoni rossi tradizionali sono costituiti da argilla cotta ad alta temperatura. Dal punto di vista chimico sono una matrice ceramica stabile composta da silicati di alluminio inerti.

3. In conclusione: A differenza del basalto (che è ricco di minerali ferromagnesiani reattivi) o del calcestruzzo, i mattoni sono chimicamente quasi inerti e non offrono alcuna interazione utile o rilascio di cationi per l'alterazione accelerata. Nonostante la capacità di catturare CO_2 tramite carbonatazione, spargere scarti edili di calcestruzzo nei terreni agricoli (come si fa con la farina di basalto) è generalmente sconsigliato per motivi agronomici e di sicurezza:

- Alcalinità estrema: Il cemento rilascia idrossido di calcio, alzando il pH del suolo a livelli fortemente alcalini. Questo "brucia" l'apparato radicale della maggior parte delle colture (incluso il lupino, che predilige suoli sub-acidi o neutri) e blocca l'assorbimento dei microelementi essenziali.
- Presenza di contaminanti e inquinanti: I rifiuti di demolizione edilizia non sono mai puri. Contengono spesso residui di vernici, colle, asfalti, plastiche, vetri, solfati e metalli pesanti derivanti dai trattamenti industriali o dalle armature metalliche arrugginite. Introdurli nella filiera alimentare o nella falda acquifera agricola comporta gravi rischi di tossicità.
- Gli studi dimostrano che, sebbene il calcestruzzo frantumato non possa essere immesso direttamente nei campi agricoli, rappresenta un reattore minerale solido per catturare e "fissare" permanentemente l'anidride carbonica all'interno di impianti industriali controllati (ex-situ). Tuttavia, non mancano importanti critiche e riserve metodologiche riguardo a questo tipo di analisi e applicazioni (Belizario-Silva et al., 2026). Ad esempio, molti studi di valutazione del ciclo di vita definiscono erroneamente "carbon-negative" materiali trattati con CO_2 di origine fossile, scambiando una semplice riduzione delle emissioni rispetto a uno scenario di riferimento per una reale e permanente rimozione di carbonio dall'atmosfera.

Mentre il basalto e il tufo sono scarti di cava naturali (puliti, mineralogicamente compatibili con la rizosfera e ricchi di magnesio e ferro), il calcestruzzo da demolizione è un sottoprodotto chimico complesso che può essere sfruttato efficacemente per la cattura della CO_2 in impianti industriali controllati (*ex-situ*), ma non è adatto per essere sparso direttamente nei campi agricoli accanto alle radici delle piante.

Nota tecnica su biochar e calcestruzzo

Esiste la possibilità di abbinare biochar e calcestruzzo frantumato. Tale possibilità è al centro di una delle linee di ricerca più promettenti nell'ambito dell'ingegneria dei materiali sostenibili e del sequestro del carbonio nel settore delle costruzioni. Tuttavia, il loro utilizzo combinato non avviene nel terreno agricolo, bensì nella formulazione di nuovi materiali edili a bilancio di carbonio negativo (i cosiddetti *green concretes* o calcestruzzi arricchiti di biochar).

Quando il calcestruzzo da demolizione viene macinato, la sua pasta cementizia esposta innesca la già menzionata reazione di carbonatazione minerale a contatto con l'aria. Aggiungendo una quota di biochar (tra l'1% e il 5% in peso) all'aggregato riciclato di calcestruzzo per produrre una nuova miscela cementizia, si ottengono diversi vantaggi sinergici:

- Stoccaggio permanente raddoppiato: Il biochar apporta carbonio organico solido fisso (derivato dalla fotosintesi vegetale e dalla pirolisi), mentre il calcestruzzo frantumato fissa la CO_2 sotto forma di carbonato di calcio.
- Effetto "serbatoio d'acqua" per la maturazione: Il biochar ha una micro-porosità elevatissima che assorbe acqua durante l'impasto e la rilascia gradualmente durante la presa (*internal curing*). Questo evita la formazione di fessurazioni e micro-crepacci nel nuovo calcestruzzo riciclato.

- Miglioramento delle proprietà meccaniche e termiche: Piccole percentuali di biochar fine riempiono i pori microscopici dell'aggregato riciclato, incrementando la resistenza a compressione e migliorando l'isolamento termico e acustico del materiale finale.

Utilizzare il biochar insieme al calcestruzzo frantumato è un'ottima strategia per la decarbonizzazione del settore delle costruzioni, consentendo di "imprigionare" il carbonio nei manufatti edilizi e nelle infrastrutture civili per decenni o secoli. Per il modello agronomico e il *Carbon Farming* in campo aperto, invece, la combinazione con la farina di basalto resta la scelta d'eccellenza per la biosfera e la sicurezza del suolo.

Appendice B

Consideriamo il metabolismo delle piante e i meccanismi di assimilazione della CO_2.

L'interazione tra il mondo vegetale e il ciclo globale del carbonio non si limita alla semplice cattura aerea della CO_2 tramite la chioma, ma si estende a una complessa cascata biochimica che collega l'attività fotosintetica fogliare alla dinamica radicale nel suolo (*rizosfera*). Per comprendere come una pianta come il *Lupinus albus* riesca a guidare un processo di alterazione minerale e sequestro geochimico, è necessario analizzare le tappe fondamentali del metabolismo del carbonio vegetale.

1. La Fotosintesi Clorofilliana e l'Equazione Globale

Il processo primario attraverso cui le piante vascolari sottraggono la CO_2 gassosa all'atmosfera è la fotosintesi ossigenica. Sfruttando l'energia radiante solare catturata dai pigmenti clorofilliani, la pianta riduce l'anidride carbonica combinandola con l'acqua per sintetizzare zuccheri semplici (glucosio):

$$6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow{\text{Luce}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

Questa reazione globale rappresenta il punto di partenza del sequestro biologico: il carbonio gassoso viene convertito in scheletri carboniosi organici (cellulosa, emicellulosa, lignina e acidi organici).

2. Il Ciclo di Calvin-Benson e il Ruolo della RuBisCO (Piante C3)

Il *Lupinus albus* appartiene alla categoria delle piante C3, così denominate perché il primo composto stabile che si forma durante la fase oscura della fotosintesi è una molecola a tre atomi di carbonio (il 3-fosfoglicerato).

- Fissazione enzimatica: L'enzima chiave responsabile della cattura della CO_2 atmosferica è la RuBisCO (Ribulosio-1,5-bisfosfato carbossilasi-ossigenasi). La RuBisCO catalizza la carbossilazione del ribulosio-1,5-bisfosfato utilizzando la CO_2 diffusa attraverso gli stomi fogliari.
- Riduzione e sintesi: Gli intermedi del ciclo di Calvin-Benson vengono convertiti nei mattoni fondamentali per la costruzione dei tessuti vegetali e per il trasporto della linfa elaborata (zuccheri) verso le radici.

3. Dalla Fissazione Aerea alla Rizodeposizione: Il Motore Acido

Una frazione rilevante del carbonio organicato ottenuto attraverso la fotosintesi non viene trattenuta nella biomassa strutturale della pianta, ma viene allocata nel sottosuolo attraverso il fenomeno della rizodeposizione.

Nelle specie specializzate come il lupino bianco, questo processo assume caratteristiche uniche:

- Sintesi di acidi carbossilici: All'interno dei tessuti radicali (e in particolare nelle strutture specializzate note come radici a grappolo), il carbonio fotosintetico viene deviato verso il ciclo di Krebs per produrre ingenti quantità di acidi organici a basso peso molecolare, primariamente acido citrico e acido malico.

- Efflusso nella rizosfera: Questi acidi vengono estrusi attivamente nel film d'acqua che circonda la radice, abbassando drasticamente il pH locale e generando un microambiente fortemente chelante.
- Sinergia con i silicati: L'acidificazione spinta e l'azione coordinata dei gruppi carbossilici degradano il reticolo cristallino dei minerali vulcanici (basalto e tufo), liberando cationi bivalenti (Ca^{2+}, Mg^{2+}) e catalizzando la trasformazione della CO_2 disciolta in ioni bicarbonato (HCO_3^-) stabili ed idrosolubili.

In sintesi, il metabolismo vegetale non si limita a fissare temporaneamente il carbonio nella biomassa, ma attiva un vero e proprio "motore biogeochimico" sotterraneo che trasforma i flussi fotosintetici in un meccanismo permanente di cattura minerale.

Nota metodologica e nota d'autore:

Il presente testo nasce da una sintesi critica ed elaborazione concettuale sviluppata da Amelia Carolina Sparavigna a partire da una discussione scientifica condotta con l'intelligenza artificiale Gemini (Google AI). Il testo è integrato, rivisto e validato dagli autori per la discussione sui modelli di pirolisi e biochar.

Riferimenti

Barak, P., Chen, Y., & Singer, A. (1983). Ground basalt and tuff as iron fertilizers for calcareous soils. Plant and soil, 73(1), 155-158.

Bates, A., Kathleen, D., Giorcelli, M., & Brusegan, L. (2024). Biochar. Carbon r-evolution. Come rendere il carbonio un alleato del clima. Ediciclo Editore. ISBN 9788865494684.

Beerling, D. J., & Berner, R. A. (2005). Feedbacks and the coevolution of plants and atmospheric CO2. Proceedings of the National Academy of Sciences, 102(5), 1302-1305.

Belizario-Silva, F., Hafez, H., Canul Polanco, J.A., Davolio, M., Kunati, N.R., Idir, R., Torrenti, J.M., Villagrán-Zaccardi, Y. (2026). Life cycle assessment of carbonated recycled concrete aggregates: a critical review and recommendations by RILEM TC 309-MCP. Materials and Structures, 59(4), p.178.

Berner, R. A. (1997). The rise of plants and their effect on weathering and atmospheric CO2. Science, 276(5312), 544-546.

Berner, R. A., Beerling, D. J., Dudley, R., Robinson, J. M., & Wildman Jr, R. A. (2003). Phanerozoic atmospheric oxygen. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 31(1), 105-134.

Bhat, B. A., Rather, M. A., Bilal, T., Nazir, R., Qadir, R. U., & Mir, R. A. (2025). Plant hyperaccumulators: a state-of-the-art review on mechanism of heavy metal transport and sequestration. *Frontiers in Plant Science*, *16*, 1631378.

Boyd, R. S. (2007). The defense hypothesis of elemental hyperaccumulation: status, challenges and new directions. Plant and Soil, 293(1), 153-176.

Brooks, R. R., Lee, J., Reeves, R. D., & Jaffré, T. (1977). Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. Journal of Geochemical Exploration, 7, 49-57.

Brown, P. H., Welch, R. M., & Cary, E. E. (1987). Nickel: A micronutrient essential for higher plants. Plant physiology, 85(3), 801-803.

Canadell, J. G., Monteiro, P. M. S., Costa, M. H., Cotrim da Cunha, L., Cox, P. M., Eliseev, A. V., Henson, S., Ishii, M., Jaccard, S., Koven, C., Lohila, A., Patra, P. K., Piao, S., Rogelj, J., Syampungani, S., Zaehle, S., & Zickfeld, K. (2021). Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In Chapter V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 673–816). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.007, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-5/

Catling, D, C., & Kasting, J. F. (2017). Atmospheric Evolution on Inhabited and Lifeless Worlds. Cambridge, UK: Cambridge University Press. pp. 299–326.

Carvalhais, L. C., Dennis, P. G., Fedoseyenko, D., Hajirezaei, M. R., Borriss, R., & Von Wirén, N. (2011). Root exudation of sugars, amino acids, and organic acids by maize as affected by nitrogen, phosphorus, potassium, and iron deficiency. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 174(1), 3-11.

Chen, J., Blume, H. P., & Beyer, L. (2000). Weathering of rocks induced by lichen colonization - a review. Catena, 39(2), 121-146.

Dakora, F. D., & Phillips, D. A. (2002). Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. Plant and soil, 245(1), 35-47.

Drever, J. I., & Vance, G. F. (1994). Role of soil organic acids in mineral weathering processes. In Organic acids in geological processes (pp. 138-161). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Friedlingstein, P., Artaxo, P., Gallego-Sala, A.V., Jia, G., Jones, C.D., Kawamiya, M., Loisel, J., Loutre, M.F., Rehfeld, K., Rovere, A., & Smith, C. (2024). Earth system responses to different levels of greenhouse gas emissions mitigation. Frontiers in Climate, 6, p.1480208.

Gerdemann, S. J., O'Connor, W. K., Dahlin, D. C., Penner, L. R., & Rush, H. (2007). Ex situ aqueous mineral carbonation. Environmental science & technology, 41(7), 2587-2593.

Gerlach, T. (2011). Volcanic versus anthropogenic carbon dioxide. Eos, Transactions American Geophysical Union, 92(24), 201-202.

Gerlach, T. (2011). Volcanic Versus Anthropogenic CO2: An Example of the Importance of Geoscience Evidence. In AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 2011, pp. PA21A-06).

Goll, D.S., Ciais, P., Amann, T., Buermann, W., Chang, J., Eker, S., Hartmann, J., Janssens, I., Li, W., Obersteiner, M., & Penuelas, J. (2021). Potential CO_2 removal from enhanced weathering by ecosystem responses to powdered rock. Nature Geoscience, 14(8), pp.545-549.

Hartmann, J., West, A.J., Renforth, P., Köhler, P., De La Rocha, C.L., Wolf-Gladrow, D.A., Dürr, H.H., & Scheffran, J. (2013). Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification. Reviews of geophysics, 51(2), pp.113-149.

Heredia Salgado, M. A., Coba S, J. A., Cianferoni, A., Säumel, I., & Tarelho, L. A. (2022). Conversion of quinoa and lupin agro-residues into biochar in the Andes: An experimental study in a pilot-scale auger-type reactor. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 10, 1087933.

Heredia Salgado, M. A., Tarelho, L. A., Matos, A., Robaina, M., Narváez, R., & Peralta, M. E. (2018). Thermoeconomic analysis of integrated production of biochar and process heat from quinoa and lupin residual biomass. Energy policy, 114, 332-341.

Hinsinger, P., Barros, O. N. F., Benedetti, M. F., Noack, Y., & Callot, G. (2001). Plant-induced weathering of a basaltic rock: experimental evidence. Geochimica et Cosmochimica Acta, 65(1), 137-152.

Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. Plant and soil, 237(2), 173-195.

Ibrahim, R., Akinbile, C. O., Owolabi, A. O., & Ibrahim, K. (2026). Review on the potential of basal rock dust for agricultural soil mineralization and atmospheric carbon sequestration. FUTA J. of Engineering and Engineering Technology, 20(Special), 198-204

Jackson, T. A., & Keller, W. D. (1970). A comparative study of the role of lichens and "inorganic" processes in the chemical weathering of recent Hawaiian lava flows. American Journal of Science, 269(5).

Jones, D. L. (1998). Organic acids in the rhizosphere–a critical review. Plant and soil, 205(1), 25-44.

Kramer, U., Smith, R. D., Wenzel, W. W., Raskin, I., & Salt, D. E. (1997). The role of metal transport and tolerance in nickel hyperaccumulation by Thlaspi goesingense Halacsy. Plant physiology, 115(4), 1641-1650.

Krebs, H. A., & Johnson, W. A. (1980). The role of citric acid in intermediate metabolism in animal tissues. FEBS letters, 117(S1), K2-K10.

Kuzyakov, Y., & Domanski, G. (2000). Carbon input by plants into the soil. Review. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 163(4), 421-431.

Lambers, H., Shane, M. W., Cramer, M. D., Pearse, S. J., & Veneklaas, E. J. (2006). Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: matching morphological and physiological traits. Annals of botany, 98(4), 693-713.

Lambers, H., Mougel, C., Jaillard, B., & Hinsinger, P. (2009). Plant-microbe-soil interactions in the rhizosphere: an evolutionary perspective. Plant Soil 321, 83–115 (2009). https://doi.org/10.1007/s11104-009-0042-x

Lenton, T. M., Crouch, M., Johnson, M., Pires, N., & Dolan, L. (2012). First plants cooled the Ordovician. Nature Geoscience, 5(2), 86-89.

Oelkers, E. H. (2001). General kinetic description of multioxide silicate mineral and glass dissolution. Geochimica et cosmochimica acta, 65(21), 3703-3719.

Pan, S. Y., Chang, E. E., & Chiang, P. C. (2012). CO_2 capture by accelerated carbonation of alkaline wastes: a review on its principles and applications. Aerosol and Air Quality Research, 12(5), 770-791.

Panchal, P., Miller, A. J., & Giri, J. (2021). Organic acids: versatile stress-response roles in plants. Journal of Experimental Botany, 72(11), 4038-4052.

Porada, P., Weber, B., Elbert, W., Pöschl, U., & Kleidon, A. (2013). Estimating global carbon uptake by lichens and bryophytes with a process-based model. Biogeosciences, 10(11), 6989-7033.

Power, I. M., Harrison, A. L., & Dipple, G. M. (2016). Accelerating mineral carbonation using carbonic anhydrase. Environmental Science & Technology, 50(5), 2610-2618.

Rădulescu, H. (2013). Soil treatment effects of zeolitic volcanic tuff on soil fertility.

Raich, J. W., & Tufekciogul, A. (2000). Vegetation and soil respiration: correlations and controls. Biogeochemistry, 48(1), 71-90.

Rascio, N., & Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting?. Plant science, 180(2), 169-181.

Reeves, R. D., Baker, A. J., Jaffré, T., Erskine, P. D., Echevarria, G., & van Der Ent, A. (2018). A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements. New phytologist, 218(2), 407-411.

Retallack, G. J. (1997). Early forest soils and their role in Devonian global change. Science, 276(5312), 583-585.

Römheld, V., & Marschner, H. (1986). Mobilization of iron in the rhizosphere of different plant species.

Ruan, J., Gerendás, J., Härdter, R., & Sattelmacher, B. (2007). Effect of nitrogen form and root-zone pH on growth and nitrogen uptake of tea (Camellia sinensis) plants. Annals of botany, 99(2), 301-310.

Shu, L., Shen, J., Rengel, Z., Tang, C., Zhang, F., & Cawthray, G. R. (2007). Formation of cluster roots and citrate exudation by Lupinus albus in response to localized application of different phosphorus sources. Plant Science, 172(5), 1017-1024.

Sparavigna, A.C., & Giorcelli, M. (2026). L'Evento Azolla e il Sequestro del Carbonio: Ta Paleoclimatologia e Biochar. Zenodo. DOI 10.5281/zenodo.22209920

Van Breemen, N., Mulder, J., & Driscoll, C. T. (1983). Acidification and alkalinization of soils. Plant and soil, 75(3), 283-308.

Van Der Werf, G.R., Randerson, J.T., Giglio, L., Van Leeuwen, T.T., Chen, Y., Rogers, B.M., Mu, M., Van Marle, M.J., Morton, D.C., Collatz, G.J., & Yokelson, R.J. (2017). Global fire emissions estimates during 1997–2016. Earth System Science Data, 9(2), 697-720.

Van Miegroet, H., & Cole, D. W. (1984). The impact of nitrification on soil acidification and cation leaching in a red alder ecosystem (Vol. 13, No. 4, pp. 586-590). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.

Van Straaten, P. (2006). Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 78(4), 731-747.

Veneklaas, E. J., Stevens, J., Cawthray, G. R., Turner, S., Grigg, A. M., & Lambers, H. (2003). Chickpea and white lupin rhizosphere carboxylates vary with soil properties and enhance phosphorus uptake. Plant and Soil, 248(1), 187-197.

Vienne, A., Poblador, S., Portillo-Estrada, M., Hartmann, J., Ijiehon, S., Wade, P., & Vicca, S. (2022). Enhanced weathering using basalt rock powder: carbon sequestration, co-benefits and risks in a mesocosm study with Solanum tuberosum. Frontiers in Climate, 4, 869456.

Zheng, S. J., Ma, J. F., & Matsumoto, H. (1998). High aluminum resistance in buckwheat: I. Al-induced specific secretion of oxalic acid from root tips. Plant Physiology, 117(3), 745-751.