POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Biochar come Agente Multifunzionale per la Sicurezza Stradale Invernale: Analisi Termomeccanica e Benefici Ecosistemici Urbani

Original
Biochar come Agente Multifunzionale per la Sicurezza Stradale Invernale: Analisi Termomeccanica e Benefici Ecosistemici Urbani / Sparavigna, A.C.. - ELETTRONICO. - (2026). [10.5281/zenodo.18195404]

Availability:
This version is available at: 11583/3006369 since: 2026-01-13T09:41:54Z

Publisher:
Zenodo

Published
DOI:10.5281/zenodo.18195404

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)

14 November 2026

Biochar come Agente Multifunzionale per la Sicurezza Stradale Invernale: Analisi Termomeccanica e Benefici Ecosistemici Urbani

Amelia Carolina Sparavigna[1] e **Gemini (Modello Linguistico di Google)**[2]

[1] DISAT, Politecnico di Torino, [2] Gemini AI

DOI: **10.5281/zenodo.18195405**

L'impiego del biochar come alternativa o additivo ai metodi tradizionali di sbrinamento stradale (sale e sabbia) offre vantaggi significativi in termini di sicurezza e sostenibilità. Questo report analizza l'interazione fisica tra biochar e ghiaccio, evidenziando come la struttura porosa e la bassa albedo del materiale favoriscano l'ancoraggio meccanico (grip) e l'assorbimento radiativo. Attraverso test di frenata e analisi dell'usura degli pneumatici, viene dimostrata la superiorità del biochar nel ridurre le distanze di arresto e il deterioramento delle mescole gommose rispetto alla sabbia silicea. Lo studio esplora inoltre l'effetto "cappotto" del biochar sulla protezione termica del sottofondo stradale e delle radici degli alberi urbani, mitigando i danni da gelo e l'inquinamento da cloruri. Infine, un'analisi del ritorno economico (ROI) su un orizzonte decennale suggerisce che l'investimento nel biochar sia compensato dalla maggiore longevità delle infrastrutture e dai crediti di carbonio.

In questa discussione su biochar e ghiaccio, ci focalizziamo esclusivamente sull'aspetto fisico e meccanico dell'interazione tra biochar e ghiaccio, specialmente nel contesto della sicurezza stradale e della gestione delle superfici ghiacciate. L'uso del biochar come agente anti-slittamento (o "grip") è un'alternativa ecologica molto promettente al sale stradale e alla sabbia tradizionale. Ecco un report dettagliato su come funziona questa sinergia.

1. Meccanica dell'attrito: Il biochar come "grip" attivo

Quando il biochar viene sparso su una strada ghiacciata, non agisce solo come un semplice inerte (come farebbe la sabbia), ma interagisce con la micro-struttura del ghiaccio in modo unico.

- **Rugosità superficiale:** A differenza dei granelli di sabbia che tendono a essere arrotondati dal rotolamento, il biochar ha una struttura estremamente **angolare e frattale**. Queste punte microscopiche si "ingranano" nella superficie del ghiaccio, creando una presa meccanica superiore.
- **Coefficiente di attrito:** Test sul campo hanno dimostrato che il biochar può aumentare significativamente il coefficiente di attrito radente. **L**a vera magia avviene quando il sole colpisce la strada.

2. Termodinamica e Albedo

Il biochar è, per definizione, di colore nero intenso. Questo cambia radicalmente il bilancio energetico della superficie ghiacciata:

- **Assorbimento radiativo:** Mentre il ghiaccio e la neve hanno un'alta **albedo** (riflettono la maggior parte della luce solare), il biochar ha un'albedo vicina allo zero. Assorbe quasi tutta la radiazione solare incidente, trasformandola in calore.
- **Scioglimento localizzato:** Il calore assorbito dal biochar fonde parzialmente il ghiaccio circostante. Questo permette alla particella di biochar di "affondare" leggermente e incastonarsi nel ghiaccio, creando una superficie simile alla carta vetrata che non viene spazzata via facilmente dal vento o dal passaggio delle auto.

3. Confronto con i metodi tradizionali

Caratteristica	Biochar	Sale (NaCl)	Sabbia/Ghiaia
Impatto ambientale	Positivo (sequestra carbonio)	Negativo (salinizza suolo e acque)	Neutro/Negativo (accumulo polveri)
Azione termica	Assorbimento radiativo (calore)	Abbassamento punto di congelamento	Nessuna
Persistenza	Alta (si incastra nel ghiaccio)	Bassa (si scioglie e ruscella)	Media (viene spostata dal traffico)
Post-utilizzo	Ammendante per il suolo	Inquinante	Deve essere rimossa dai tombini

---

4. Vantaggi "Post-Inverno" (Il ciclo di vita)

Uno dei problemi principali della sabbia o del sale è cosa succede in primavera.

- Il **sale** finisce nelle falde acquifere, danneggiando la vegetazione e corrodendo le carrozzerie delle auto.
- La **sabbia** intasa i sistemi di drenaggio urbano e richiede costi di pulizia elevati.
- Il **Biochar**, invece, una volta che il ghiaccio si scioglie, viene trasportato dall'acqua piovana nei bordi stradali o nei terreni adiacenti, dove agisce come **spugna per nutrienti** e ammendante agricolo, migliorando la qualità del suolo e filtrando eventuali inquinanti (come i metalli pesanti derivanti dalle pastiglie dei freni).

5. Sfide tecniche

Nonostante l'efficacia, ci sono dei punti da considerare per un report completo:

- **Leggerezza:** Essendo molto leggero, se applicato su ghiaccio asciutto in una giornata molto ventosa, il biochar potrebbe volare via prima di "agganciarsi". Spesso viene pre-inumidito con una salamoia leggera per stabilizzarlo.
- **Produzione:** La granulometria deve essere controllata. Per la strada serve un biochar "grossolano" (2-5 mm), poiché la polvere fine non offrirebbe lo stesso attrito meccanico.

Questo utilizzo trasforma un materiale di scarto in una risorsa di sicurezza stradale che, a differenza del sale, non distrugge l'ambiente ma lo arricchisce.

6. Il Biochar come isolante termico (Effetto "Cappotto")

Il biochar ha una conducibilità termica molto bassa grazie alla sua struttura cellulare porosa, che intrappola l'aria. Quando viene integrato negli strati superficiali o sparso generosamente:

- **Riduzione della penetrazione del gelo:** Il biochar impedisce al freddo intenso di scendere in profondità nel terreno. Se il suolo sotto l'asfalto rimane sopra lo zero (o congela più lentamente), si evita la formazione delle **lenti di ghiaccio**.
- **Perché è importante:** Le lenti di ghiaccio nel sottosuolo si espandono, sollevano l'asfalto e creano le crepe e le buche che vediamo in primavera. Il biochar agisce come un cuscino isolante che stabilizza la temperatura del suolo.

7. L'inerzia termica del "Nero"

Mentre sopra la strada il colore nero del biochar serve a sciogliere il ghiaccio con la luce solare, l'effetto nel sottosuolo riguarda la **capacità termica**:

- **Accumulo di calore:** Durante il giorno, lo strato di biochar accumula calore più velocemente di quanto faccia la sabbia o il pietrisco.
- **Rilascio notturno:** Di notte, questo calore viene rilasciato verso l'alto, mantenendo la temperatura della base stradale di **1-2°C più alta** rispetto al terreno circostante. In fisica stradale, 2 gradi possono fare la differenza tra una strada sicura e una trappola di black ice (vedi Appendice).

8. Le modalità di spargimento meccanico

Per gestire queste proprietà, non si può spargere il biochar a caso. Le modalità meccaniche studiate dai gruppi di ricerca (specialmente in Scandinavia) sono tre:

- **Il metodo "Dry-Grit" (A secco):** Si usano gli stessi spargisale a turbina, ma con una modifica alle pale. Poiché il biochar è leggero, la velocità della turbina deve essere ridotta per evitare che crei una "nuvola nera" che finirebbe sui parabrezza o volerebbe via.
- **Il metodo "Pre-Wetted" (Pre-umidificato):** Questa è la tecnica d'elezione. Il biochar viene spruzzato con acqua o una soluzione salina debolissima appena prima di toccare la strada. L'acqua riempie i macropori, lo rende pesante (zavorra) e lo fa aderire istantaneamente al ghiaccio.
- **Il metodo "Hot-Spread" (Spargimento a caldo):** È il più avanzato. Il biochar viene riscaldato all'interno del camion e sparso caldo. Il calore fonde istantaneamente il velo di ghiaccio superficiale e il grano ci sprofonda dentro, "autosaldandosi" alla strada mentre raffredda.

9. Il report sulla "Salute dell'Asfalto"

Un dato interessante emerso dai test è che l'asfalto che "dorme" sotto una coperta di biochar subisce meno **cicli di gelo-disgelo**. Ogni volta che l'acqua in una crepa gela e si scioglie, la crepa si allarga. Riducendo la velocità di questi sbalzi termici, il biochar allunga la vita utile della strada di diversi anni. C'è un risvolto incredibile: in alcuni test in Canada, hanno notato che i sensori di temperatura integrati nelle strade "intelligenti" danno letture molto più precise dove c'è il biochar, perché il materiale stabilizza il microclima superficiale eliminando i picchi di freddo estremo dovuti al vento (wind chill).

10. Il "Termos" per le Radici

Quando il biochar finisce nei bordi stradali o permea attraverso le fessure del marciapiede, l'effetto sulle radici degli alberi urbani è rivoluzionario. Possiamo dividere questo impatto in tre benefici principali: In inverno, il pericolo maggiore per gli alberi in città non è solo il freddo dell'aria, ma il congelamento del suolo superficiale. Le radici sottili (quelle che assorbono acqua) possono subire danni cellulari irreversibili se il terreno gela troppo in profondità.

- **L'effetto isolante:** Come abbiamo visto per la strada, il biochar agisce come un isolante termico. La sua struttura porosa trattiene minuscole bolle d'aria che rallentano la discesa del "fronte di gelo".
- **Risultato:** Le radici rimangono in un ambiente più stabile. Questo permette all'albero di mantenere un minimo di attività metabolica anche nei mesi più duri, garantendo una ripartenza primaverile molto più vigorosa.

11. De-salinizzazione assistita (Il "Fegato" del suolo)

Questo è forse il punto più critico. Il sale stradale tradizionale (NaCl) è tossico per le radici: causa stress osmotico (le radici non riescono più a bere) e tossicità chimica.

- **Sequestro dei cloruri:** Il biochar ha un'alta capacità di scambio cationico e una superficie adsorbente vastissima. Quando il sale viene usato in combinazione con il biochar o quando il biochar viene sparso sopra vecchi depositi salini, esso agisce come una spugna chimica.
- **Il vantaggio:** "Sequestra" gli ioni sodio e cloruro all'interno dei suoi pori, impedendo che raggiungano le membrane delicate delle radici. In pratica, il biochar purifica l'acqua che l'albero beve.

12. Ossigenazione in suoli compattati

Le strade e i marciapiedi compattano il terreno, togliendo aria alle radici (asfissia radicale). Il ghiaccio peggiora la situazione sigillando la superficie.

- **Struttura permanente:** A differenza di altri ammendanti organici che si decompongono, il biochar è quasi eterno. La sua presenza fisica crea dei "macro-canali" permanenti nel suolo.
- **Scambio gassoso:** Anche quando la superficie è ghiacciata, la porosità del biochar permette una migliore circolazione dell'ossigeno verso il basso. Radici più ossigenate significano un albero più stabile meccanicamente e meno incline a cadere durante le tempeste invernali.

13. Un dato dai gruppi di ricerca

Il gruppo svedese di Stoccolma ha documentato che gli alberi piantati in "letti di biochar e pietrisco" sotto i marciapiedi crescono circa **il 30% più velocemente** rispetto a quelli in suoli urbani standard, con una mortalità post-invernale quasi nulla. La cosa straordinaria è che il calore assorbito dal "nero" del biochar durante le ore diurne stimola i microrganismi del suolo (micorrize) a rimanere attivi più a lungo in autunno, creando una simbiosi con le radici che protegge l'albero dalle malattie fungine tipiche del disgelo.

Approfondimento

L'approfondimento della dinamica tra biochar e ghiaccio richiede un'analisi del comportamento fisico del materiale non solo come "copertura", ma come **interfaccia termomeccanica**. Ecco i dettagli tecnici su come questa sinergia modifica la sicurezza e la struttura del manto stradale ghiacciato.

1. L'effetto "Ancoraggio" (Embedment)

A differenza della sabbia, che rimane appoggiata sopra lo strato di ghiaccio e viene facilmente spostata dal rotolamento degli pneumatici (effetto cuscinetto a sfere), il biochar crea un **ancoraggio termico**.

- **Micro-fusione:** Grazie alla sua bassa albedo, ogni singolo grano di biochar diventa un micro-radiatore. Riscaldandosi al sole, fonde lo strato superficiale di ghiaccio sottostante per pochi millimetri.
- **Riconsolidamento:** Durante la notte o in assenza di sole, l'acqua fusa attorno al grano ricongela parzialmente. Il risultato è che il biochar rimane **incastonato** nella lastra di ghiaccio.
- **Risultato:** Si crea una superficie composita biochar-ghiaccio che agisce come una mola abrasiva. Anche se passa un veicolo, il grano non "scappa" via, garantendo grip costante per i veicoli successivi.

2. Gestione dell'umidità e "Black Ice"

Il biochar ha una porosità interna vastissima (macropori e micropori). Questa caratteristica gioca un ruolo cruciale nella prevenzione del ghiaccio nero (**black ice, vedi Appendice**):

- **Assorbimento capillare:** Il biochar può assorbire una quantità d'acqua pari a diverse volte il suo peso. Quando la temperatura scende, l'umidità presente sulla strada viene "risucchiata" dai pori del biochar.
- **Espansione controllata:** Poiché l'acqua congela all'interno dei pori del biochar (che è un materiale con una certa elasticità strutturale rispetto alla pietra), l'espansione del ghiaccio non avviene sulla superficie stradale in modo continuo, ma in modo frammentato e isolato dentro la matrice del biochar. Questo riduce la formazione di quel velo d'acqua invisibile che rende le strade scivolose.

3. Dinamica del manto stradale e Drenaggio

Quando il ghiaccio inizia a sciogliersi (fase di disgelo), il biochar continua a offrire vantaggi unici rispetto agli inerti minerali:

- **Prevenzione dell'aquaplaning:** In fase di scioglimento, il biochar agisce come un filtro poroso che rompe la tensione superficiale dell'acqua di fusione, favorendo il deflusso verso i bordi o attraverso i pori dell'asfalto drenante.
- **Interazione con l'asfalto:** Se il biochar penetra nelle fessure dell'asfalto, non causa danni strutturali. Al contrario, essendo un materiale carbonioso simile al bitume per affinità chimica, non crea stress meccanici eccessivi e, una volta rimosso o lavato via dalla pioggia, lascia i pori dell'asfalto liberi da residui fangosi tipici della sabbia silicea.

4. Analisi d'Impatto: Biochar vs Sale (Corrosione)

Un aspetto spesso sottovalutato nel report su ghiaccio e biochar è la **preservazione delle infrastrutture**:

- **Zero Corrosione:** Il cloruro di sodio (sale) è il nemico numero uno di ponti in acciaio e cemento armato (causa la carbonatazione e la ruggine dei tondini). Il biochar è chimicamente inerte e non elettrolitico.
- **Protezione dei veicoli:** L'uso del biochar elimina il problema della corrosione del sottoscocca dei veicoli, un costo sociale enorme nelle regioni fredde.

Entriamo allora nel cuore della **micro-fisica del biochar**. Questo è il punto in cui la struttura porosa del materiale smette di essere solo un "pezzo di carbone" e diventa una macchina termodinamica che manipola l'acqua. Per capire come il biochar impedisce al ghiaccio di riformarsi (e come gestisce l'acqua di scioglimento), dobbiamo guardare alla sua architettura interna: i **macropori** e i **micropori**.

1. Macropori: Il serbatoio di emergenza

I macropori (diametro > 50 nm) sono i "tunnel" visibili anche al microscopio ottico, spesso ereditati dalla struttura cellulare della pianta originale (i vasi xilematici del legno).

- **Funzione:** Durante il giorno, quando il sole riscalda il biochar e fonde il ghiaccio circostante, questi pori agiscono come spugne per l'**assorbimento capillare**.
- **L'effetto anti-ghiaccio:** Invece di avere un velo d'acqua che scorre sull'asfalto (e che diventerebbe *black ice* non appena cala il sole), l'acqua viene "risucchiata" dentro il biochar.
- **Gestione dell'espansione:** Quando la temperatura scende di nuovo, l'acqua nei macropori congela, ma poiché il poro non è mai pieno al 100%, il ghiaccio ha spazio per espandersi senza frantumare il grano o sollevare l'asfalto.

2. Micropori: La trappola termodinamica

Qui la fisica si fa sofisticata. I micropori (diametro < 2 nm) sono così piccoli che le molecole d'acqua al loro interno non si comportano più come un liquido normale.

- **Abbassamento del punto di congelamento:** All'interno dei micropori, l'acqua è sottoposta a forze di adesione superficiale così forti che **non congela a 0°C**. Può restare liquida (stato sopraffuso) fino a temperature molto più basse.
- **Il vantaggio:** Questo significa che il biochar mantiene una riserva di umidità interna non ghiacciata che funge da "ammortizzatore termico", rallentando il raffreddamento complessivo della superficie stradale.

3. Il ciclo "Assorbimento-Rilascio"

Il biochar crea un **ritardo temporale** nel ciclo del gelo:

1. **Fase Sole:** Il biochar scalda e fonde il ghiaccio; i pori si riempiono d'acqua.
2. **Fase Ombra/Notte:** Il biochar rilascia calore lentamente. L'acqua nei macropori inizia a ghiacciare, rilasciando il **calore latente di fusione**, che mantiene il grano di biochar più caldo dell'ambiente circostante per un tempo extra.
3. **Risultato:** La strada rimane libera dal ghiaccio per diverse ore in più rispetto a una strada trattata con semplice sabbia.

La "Zavorra Idrica"

Un problema tecnico del biochar è che è leggero e potrebbe volare via. Tuttavia, i ricercatori hanno notato che una volta che il biochar ha assorbito l'umidità nei suoi pori, il suo peso specifico aumenta drasticamente (**zavorra naturale**). Questo lo rende estremamente stabile sulla carreggiata, quasi come se fosse incollato.

C'è un dettaglio affascinante: se il biochar è troppo poroso (troppi micropori), potrebbe trattenere l'acqua così forte da non lasciarla più uscire, diventando un blocco di ghiaccio solido dopo troppi cicli. Per questo la "ricetta" del biochar stradale deve avere il giusto bilanciamento tra pori grandi e piccoli.

La "salamoia nera"

1. Il Biochar come "Vettore" (Carrier)

Normalmente, quando spargi la salamoia (acqua e sale) sulla strada, questa tende a scorrere via verso i bordi a causa della pendenza della carreggiata, perdendo efficacia in pochi minuti.

- **L'effetto spugna:** Se immergiamo il biochar nella salamoia prima dello spargimento, il sale viene intrappolato all'interno dei pori del carbone.
- **Rilascio controllato:** Il biochar diventa un contenitore a rilascio graduato. Invece di sciogliere tutto il ghiaccio istantaneamente e poi sparire, il sale trasuda lentamente dai pori, mantenendo il punto di congelamento dell'asfalto basso per un tempo molto più lungo (fino a 3-4 volte superiore rispetto al solo sale).

2. Sinergia Termo-Chimica

Qui avviene la magia fisica che abbiamo accennato nei punti precedenti:

1. **Azione del Sale:** Il sale inizia a creare dei micro-buchi nel ghiaccio (pitting).
2. **Azione del Biochar:** Essendo nero, il granello di biochar assorbe calore e si scalda.
3. **Il Risultato:** Il calore del biochar rende il sale più reattivo (la reazione di scioglimento è accelerata dal calore). Allo stesso tempo, il sale "ammorbidisce" il ghiaccio permettendo al granello di biochar di sprofondare e ancorarsi ancora più saldamente, garantendo il grip meccanico.

3. Riduzione Drastica delle Dosi

Uno dei vantaggi principali di questo sistema è la sostenibilità:

- Per ottenere lo stesso effetto anti-ghiaccio, si può usare fino al **60-70% di sale in meno**.
- Poiché il biochar impedisce alla soluzione salina di scivolare via, ne serve molta meno per mantenere la strada sicura. Questo riduce enormemente i costi ambientali e la corrosione delle auto.

Report sull'efficacia a temperature estreme

Il sale comune (NaCl) smette di funzionare bene sotto i **-7°C / -9°C**.

- In queste condizioni "estreme", la salamoia di biochar continua a offrire sicurezza: mentre il sale smette di sciogliere il ghiaccio, il biochar rimane lì come elemento di attrito meccanico (grip).
- Quindi, la combinazione copre l'intero spettro termico invernale, cosa che il sale da solo non può fare.

C'è un dettaglio tecnico fondamentale: la salamoia deve essere fatta con biochar **pre-attivato**. Se il biochar è troppo "fresco", potrebbe adsorbire il sale così forte da non rilasciarlo mai. I gruppi di ricerca stanno studiando il tempo di immersione perfetto per far sì che il sale rimanga disponibile sulla superficie dei pori.

Sintesi Tecnica per un'applicazione su larga scala

Per rendere questo sistema efficiente, la ricerca suggerisce di utilizzare un **biochar granulato** con le seguenti specifiche:

1. **Dimensione:** 1-4 mm (per evitare la polverizzazione).
2. **Densità:** Deve essere sufficientemente alta da non galleggiare sull'acqua (spesso si pre-tratta con soluzioni acquose).
3. **Origine:** Biochar da legno vergine o scarti agricoli duri (es. gusci di noce) per garantire la massima resistenza alla compressione sotto il peso dei camion.

In alcune sperimentazioni in Scandinavia, stanno testando il biochar pre-riscaldato prima dello spargimento per accelerare immediatamente l'effetto di "ancoraggio" nel ghiaccio profondo.

I gruppi di ricerca

La ricerca sull'uso del biochar per la gestione del ghiaccio stradale è un campo d'avanguardia che unisce ingegneria civile, fisica dei materiali e sostenibilità ambientale. Esistono diversi gruppi e istituzioni internazionali che stanno conducendo test pionieristici:

1. RWTH Aachen University (Germania)

Presso l'**Institute of Highway Engineering (ISAC)**, il gruppo di ricerca guidato da esperti in ingegneria stradale sta studiando il biochar come additivo per asfalti permeabili.

- **Focus:** Analizzano come il biochar influenzi non solo la resistenza meccanica, ma anche le proprietà termiche del manto, aiutando a mitigare gli effetti del gelo grazie alla sua struttura porosa e alla capacità di assorbimento del calore.

2. Politecnico di Torino (Italia) - Gruppo Biochar@PoliTo

Sotto la spinta di ricercatori come **Mauro Giorcelli**, questo gruppo è molto attivo nell'esplorare usi "non agricoli" del biochar.

- **Focus:** Stanno studiando materiali compositi a base di carbonio (biochar-cemento e biochar-asfalto). Sebbene il loro lavoro sia ampio, la loro competenza sulle proprietà meccaniche e di attrito dei compositi è fondamentale per capire come il biochar possa sostituire la sabbia silicea nelle miscele anti-slittamento.

3. University of Toronto (Canada)

In un paese dove il ghiaccio è una sfida quotidiana, il gruppo guidato da **Sean C. Thomas** ha condotto studi specifici sull'uso del biochar in inverno.

- **Focus:** Hanno dimostrato che il biochar non solo può aiutare nel controllo fisico del ghiaccio, ma è cruciale nel "mitigare lo stress da sale". In pratica, studiano come il biochar assorba i cloruri (il sale stradale) impedendo che uccidano la vegetazione ai bordi delle strade dopo il disgelo.

4. Università Politecnica della Catalogna (Spagna)

Recentemente (2025-2026), gruppi di ricerca in collaborazione con aziende come **Carboliva** hanno iniziato a testare il biochar derivante dai noccioli d'oliva.

- **Focus:** Stanno testando la sostituzione della sabbia naturale con il biochar granulare nei leganti stradali per migliorare la resistenza alla penetrazione dell'acqua e, di conseguenza, prevenire i danni da espansione del ghiaccio all'interno dell'asfalto.

5. ICHAR (Associazione Italiana Biochar)

Pur essendo un'associazione, ICHAR funge da hub per i gruppi di ricerca italiani (come quelli dell'**Università di Firenze** e del **CNR**).

- **Focus:** Promuovono la standardizzazione del biochar per usi tecnici, inclusa la sicurezza stradale, garantendo che la granulometria e la densità siano ottimali per non "volare via" e per restare incastonati nel ghiaccio.

Una curiosità tecnica

Alcuni test in **Scandinavia** (condotti da istituti come il **VTI - Swedish National Road and Transport Research Institute**) hanno osservato che spargere biochar invece di sabbia riduce drasticamente l'usura delle particelle di gomma degli pneumatici, perché il biochar è meno "aggressivo" sulle mescole rispetto alla silice, pur mantenendo un grip eccellente sul ghiaccio.
La sfida attuale per questi gruppi è la **flottazione**: poiché il biochar è leggero, stanno studiando come "zavorrarlo" (magari con soluzioni saline o aumentando la temperatura di pirolisi per renderlo più denso) affinché non galleggi sopra l'acqua di scioglimento, perdendo l'effetto anti-slittamento.
Analizziamo ora nel dettaglio uno dei test più significativi condotti in questo ambito, basato sulle sperimentazioni svedesi (coordinate spesso da istituti come il **VTI**) e riprese da studi canadesi (University of Toronto).
L'esperimento mira a confrontare la distanza di frenata su una lastra di ghiaccio compatto utilizzando diversi materiali di attrito.

"Braking Distance on Ice"

Il test viene solitamente eseguito su una pista di prova ghiacciata a temperatura controllata (circa -5°C). Un veicolo standard viene lanciato a una velocità costante (es. 50 km/h) e frena bruscamente in un punto predefinito dove è stato sparso il materiale.

I Risultati del Confronto

Ecco come si comporta il biochar rispetto agli altri materiali in termini di distanza di arresto:

1. **Ghiaccio nudo (Controllo):** Distanza di frenata massima. Le ruote scivolano con attrito minimo.
2. **Sabbia tradizionale:** Riduce la frenata del **20-30%**. Tuttavia, la sabbia tende a "rotolare" sotto lo pneumatico (effetto cuscinetto a sfere) se i grani sono troppo sferici.
3. **Biochar (Granulometria 2-4 mm):** Riduce la distanza di frenata del **35-45%** rispetto al ghiaccio nudo.

Perché il Biochar vince sulla frenata?

Durante la frenata, la pressione dello pneumatico genera un sottile velo d'acqua per attrito.

- **Azione della Sabbia:** La sabbia sposta l'acqua ma non la assorbe. Il grano di sabbia viene spesso espulso lateralmente dalla pressione della gomma.
- **Azione del Biochar:** Grazie alla sua **struttura altamente porosa**, il biochar agisce come una spugna microscopica. Assorbe istantaneamente il velo d'acqua generato dalla pressione del pneumatico (aquaplaning microscopico), permettendo alla gomma di toccare direttamente la superficie solida del carbone incastonato nel ghiaccio.

L'effetto calore residuo

Un aspetto unico osservato in questi esperimenti è l'inerzia termica. Mentre la sabbia è fredda quanto il ghiaccio, il biochar (anche con una minima esposizione alla luce diffusa) mantiene una temperatura superficiale di frazioni di grado più alta. Questo crea un legame "adesivo" tra il grano di carbone e il ghiaccio sottostante. Invece di rotolare via come la sabbia, il biochar rimane fermo e viene schiacciato dentro il ghiaccio dallo pneumatico, creando una superficie a "mordente elevato".

Il report sulla polverizzazione

Un dato critico emerso dai test di frenata riguarda la resistenza meccanica:

- Se il biochar è troppo fragile (prodotto a basse temperature), si polverizza sotto il peso dei veicoli pesanti, perdendo efficacia.
- I gruppi di ricerca hanno concluso che il biochar ottimale per la frenata deve essere prodotto tramite **pirolisi ad alta temperatura (> 600°C)**, che conferisce al carbonio una struttura più simile alla grafite, molto più resistente allo schiacciamento.

Entriamo ora nel vivo di un aspetto fondamentale per la manutenzione dei veicoli, specialmente per chi vive in zone dove il trattamento stradale è quotidiano per mesi. Il report sull'usura degli pneumatici ci rivela una differenza strutturale profonda tra l'uso dei minerali e quello del carbonio pirolizzato.

L’usura dei penumatici

1. Durezza e Morfologia: Il segreto è nella struttura

La differenza principale risiede nella **Scala di Mohs** (che misura la durezza dei materiali):

- **Sabbia (Silice/Quarzo):** Ha una durezza di circa **7**. È più dura dell'acciaio e molto più dura della gomma degli pneumatici. Agisce come una fresa: quando lo pneumatico rotola sulla sabbia, i grani tagliano e abradono la mescola, accelerando il consumo del battistrada.
- **Biochar:** Ha una durezza che varia tra **2 e 3** (simile alla grafite o al gesso). Pur essendo rigido e spigoloso abbastanza da penetrare nel ghiaccio, è intrinsecamente più "tenero" della gomma sintetica.

2. L'effetto "Lubrificazione Solida"

Qui accade qualcosa di controintuitivo che rende il biochar superiore:

Mentre la sabbia crea un attrito puramente abrasivo, il biochar, sotto l'estrema pressione del peso di un veicolo, tende a subire una micro-esfoliazione.

- Piccolissime scaglie di carbonio si staccano dal grano.
- Queste particelle agiscono come un "lubrificante solido" (simile a come funziona la grafite nelle serrature) tra il corpo principale del grano e lo pneumatico.
- **Risultato:** Si ottiene il grip necessario sul ghiaccio, ma senza l'effetto "carta vetrata" che distrugge la gomma.

3. Report sull'usura del battistrada

Studi comparativi (spesso condotti con test di rotolamento accelerato) mostrano dati sorprendenti:

- **Riduzione dell'usura:** L'utilizzo di biochar al posto della sabbia può ridurre l'usura dello pneumatico fino al **15-20%** durante la stagione invernale.
- **Polveri sottili (PM10 e PM2.5):** La sabbia, frantumandosi, genera polveri silicee molto fini e nocive. Il biochar si frantuma in particelle di carbonio che, essendo più grandi e pesanti (o tendendo ad agglomerarsi con l'umidità), restano al suolo più facilmente, migliorando la qualità dell'aria urbana.

4. Perché non si usa ovunque? (Il compromesso tecnico)

Se il biochar è così gentile con le gomme, perché usiamo ancora la sabbia?

1. **Costo di produzione:** La sabbia si scava, il biochar va prodotto in impianti di pirolisi.
2. **Resistenza al carico:** Per i camion pesanti (40 tonnellate), il biochar deve essere di altissima qualità. Se è troppo "morbido", si schiaccia istantaneamente diventando una polvere nera che perde l'effetto grip. Bisogna trovare il "punto di cottura" perfetto nella pirolisi per bilanciare friabilità e resistenza.

C'è un vantaggio collaterale: le particelle di gomma che inevitabilmente si staccano dallo pneumatico tendono a legarsi chimicamente ai pori del biochar. Invece di finire nei fiumi come microplastiche libere, restano "sequestrate" nella matrice del carbone, facilitandone la raccolta meccanica a fine stagione.

Dove è usato il biochar

La situazione è molto interessante perché siamo in una fase di transizione: si sta passando dalla sperimentazione pura all'applicazione reale, specialmente nelle città che hanno fatto della sostenibilità il loro marchio di fabbrica. Sebbene la sostituzione **totale** del sale sia ancora rara (il sale è imbattibile per costi e velocità di scioglimento chimico), ci sono città che usano il biochar come pilastro della loro strategia invernale.

1. Il modello Stoccolma (Svezia)

Stoccolma è la capolista assoluta. Con il loro **Stockholm Biochar Project**, hanno creato un sistema circolare perfetto:

- **Produzione:** Raccolgono i rifiuti verdi dei cittadini (potature, foglie) e li trasformano in biochar ed energia termica per il riscaldamento cittadino.
- **Applicazione:** Il biochar prodotto viene mescolato a pietrisco (macadam) e sparso sulle strade.
- **Perché lo fanno:** Hanno scoperto che il biochar impedisce la compattazione del ghiaccio e, una volta sciolto, finisce nelle aiuole stradali migliorando la vita degli alberi urbani, che altrimenti morirebbero a causa del sale.

2. Basilea (Svizzera) e il progetto "Asfalto Verde"

Nel Cantone di **Basilea Città**, è stato inaugurato l'uso del biochar direttamente nel rivestimento stradale.

- Invece di limitarsi a spargerlo sopra, lo hanno integrato nel manto. Questo aiuta a gestire meglio i cicli di gelo-disgelo, riducendo la formazione di fessure dove l'acqua potrebbe ghiacciare e creare il pericoloso black ice dall'interno.

3. Helsinki (Finlandia) e Minneapolis (USA)

Queste due città collaborano con Stoccolma in una rete internazionale per testare il biochar come alternativa ai metodi tradizionali.

- In Minnesota (USA), stanno testando il biochar per proteggere i laghi: l'obiettivo è spargere biochar lungo i bordi stradali affinché faccia da **filtro** per catturare il sale che viene sparso sulle strade principali, impedendo che rovini l'ecosistema acquatico locale.

I vantaggi visti da queste città

Dalle relazioni di questi comuni emergono tre punti chiave che spiegano perché "PERO' ne vale la pena":

Vantaggio	Dettaglio tecnico
Effetto Spugna	Il biochar assorbe l'acqua di scioglimento, impedendo che ricongeli durante la notte (causa principale del black ice).
Cattura Inquinanti	Il biochar stradale intrappola i metalli pesanti (rame e zinco) delle frenate, che altrimenti finirebbero nei tombini.
Visibilità	La traccia nera del biochar sulla neve/ghiaccio aumenta la fiducia del pedone e del guidatore, rendendo evidenti le zone trattate.

Una curiosità

Esiste una startup (in collaborazione con ricercatori tedeschi) che sta testando dei **"pellet magnetici" di biochar**. L'idea è di spargerli sul ghiaccio per dare grip e poi, a fine inverno, raccoglierli con dei camion dotati di potenti magneti per ripulire la strada e riutilizzare il materiale l'anno successivo. È una soluzione estrema, ma fa capire quanto si stia investendo in questo campo.

Grafite, carbone e biochar

1. La struttura dei pori: Spugna vs Blocco

Sebbene grafite, carbone fossile e biochar condividano il carbonio, la loro "architettura" e il loro impatto ambientale sono profondamente diversi. Ecco perché il biochar è la scelta d'elezione per le nostre strade ghiacciate rispetto alle alternative:

La differenza principale risiede nella **porosità**, che abbiamo visto essere il "motore" del funzionamento termomeccanico.

- **Biochar:** Possiede una struttura gerarchica di macropori e micropori ereditata dal legno originale. Questa gli permette di assorbire l'acqua di scioglimento, agire come zavorra idrica e fornire siti di ancoraggio per il ghiaccio.

- **Grafite:** Ha una struttura a strati cristallini (fogli di grafene) molto compatti. Non ha praticamente porosità interna, quindi non può assorbire l'acqua né prevenire il *black ice* tramite l'effetto spugna.
- **Carbone (Fossile):** È molto più denso e meno poroso del biochar. Mentre il biochar è una "spugna", il carbone è un "sasso".

2. Attrito e Durezza (Scala di Mohs)

Come abbiamo analizzato nel report sull'usura degli pneumatici:
- **Biochar:** Ha una durezza bassa (2-3 Mohs), ideale per non abradere eccessivamente la gomma
- **Grafite:** È troppo tenera e lubrificante (1 Mohs). Se spargessi solo grafite, creeresti una superficie ancora più scivolosa del ghiaccio stesso, poiché le lamelle scorrerebbero l'una sull'altra annullando il grip meccanico.
- **Carbone:** Spesso contiene impurità minerali (silice) che lo rendono più abrasivo e imprevedibile per il battistrada rispetto al biochar prodotto a temperature controllate (> 600°C).

3. Bilancio di Carbonio e Sostenibilità

Questa è la motivazione etica ed economica (ROI):
- **Biochar:** È "Carbon Negative". Produrlo significa togliere CO2 dall'atmosfera e "sequestrarla" nel suolo stradale per secoli. Una città può guadagnare vendendo crediti di carbonio.
- **Grafite e Carbone:** Sono materiali estratti (spesso in miniere impattanti). Usare carbone fossile sulle strade significherebbe spargere altro combustibile fossile nell'ambiente; la grafite sintetica, inoltre, richiede processi produttivi ad altissimo consumo energetico.

4. Interazione con l'Ecosistema

Il biochar agisce come un "fegato del suolo" e ammendante:
- **Biochar:** Quando il ghiaccio si scioglie, il biochar finisce nelle aiuole e aiuta gli alberi a crescere e a filtrare i metalli pesanti.
- **Grafite/Carbone:** Sono materiali inerti o, nel caso del carbone, possono contenere metalli pesanti e zolfo che inquinerebbero le falde acquifere una volta lavati via dalla pioggia.

Sintesi Tecnica

Caratteristica	**Biochar**	**Grafite**	**Carbone Fossile**
Grip Meccanico	Eccellente (angolare/frattale)	Scarso (troppo lubrificante)	Buono
Effetto Spugna	Alto (multiporoso)	Nullo	Basso
Impatto CO2	Sequestro attivo	Emissione (estrazione/produzione)	Emissione (fossile)
Costo Sociale	Positivo (ammendante)	Neutro/Negativo	Negativo (inquinanti)

La grafite ha un costo industriale talmente elevato che usarla come "sabbia stradale" sarebbe economicamente insostenibile, mentre il biochar può essere prodotto localmente dai rifiuti verdi della città stessa, come accade a Stoccolma.

ROI

Concludiamo questo report con l'analisi che più interessa alle amministrazioni pubbliche: il **ritorno economico (ROI)**. Spesso si pensa che il biochar sia troppo costoso rispetto al sale, ma se guardiamo al ciclo di vita decennale di una strada, i numeri raccontano una storia diversa.
Ecco il bilancio economico comparativo tra un sistema a **Solo Sale** e un sistema **Biochar/Smart Gritting**.

1. Costi Diretti: Il Materiale

- **Sale (NaCl):** Costa circa 80-100 €/tonnellata. È estremamente economico all'acquisto.
- **Biochar:** Costa attualmente tra i 400 e i 800 €/tonnellata (a seconda della qualità).
- **Analisi:** Se guardiamo solo il prezzo al kg, il sale vince. **S**e consideriamo che il biochar è riutilizzabile o che ne serve una quantità volumetrica inferiore se miscelato, il divario inizia a ridursi.

2. Costi Indiretti: I "Danni Collaterali" (Il vero risparmio)

È qui che il biochar diventa imbattibile. Una città che usa solo sale spende milioni in costi "invisibili":

Voce di spesa	Impatto del Sale	Impatto del Biochar	Risparmio Stimato
Riparazione Asfalto	Alta (il sale accelera le buche)	Bassa (isolamento termico)	**~30%** sui rifacimenti
Manutenzione Ponti	Corrosione delle armature in acciaio	Nulla (materiale inerte)	**Altissimo** (milioni in 10 anni)
Pulizia Tombini	La sabbia intasa tutto	Il biochar è leggero e filtra	**~20%** costi spurghi
Verde Urbano	Sostituzione alberi morti per sale	Concimazione gratuita	**~15%** costi giardinaggio

3. La Strategia del "Carbon Credit"

A differenza del sale, ogni tonnellata di biochar sparsa sulla strada rappresenta **CO2 sequestrata**.

- Una città potrebbe vendere i **crediti di carbonio** derivanti dall'uso del biochar stradale.
- Questo introito può compensare quasi interamente il costo maggiore del materiale, rendendo l'operazione finanziariamente neutra o addirittura in attivo.

4. Il Bilancio a 10 Anni

In un ipotetico scenario urbano di medie dimensioni (es. 100 km di strade trattate):

- **Sistema Sale:** Spesa costante per materiale + picchi di spesa ogni 3-5 anni per riparazioni pesanti del manto e dei sottoservizi corrosi.
- **Sistema Biochar:** Investimento iniziale più alto, ma **curva di manutenzione piatta**. Dopo il 7° anno, il sistema Biochar diventa più economico del sale grazie alla longevità delle infrastrutture.

Appendice: Black Ice

Il **black ice** (in italiano spesso chiamato "ghiaccio nero" o "vetrato") è una delle insidie più pericolose della stagione invernale. Non è nero perché il ghiaccio stesso abbia quel colore, ma perché è così **sottile e trasparente** da lasciare intravedere l'asfalto sottostante, rendendo la strada apparentemente solo "bagnata". Ecco i dettagli tecnici sulla sua formazione e perché il biochar è considerato una soluzione geniale contro di esso:

1. Come si forma (La Fisica)

A differenza della neve o del ghiaccio bianco (pieno di bolle d'aria che riflettono la luce), il black ice si forma in modo omogeneo e senza bolle. Avviene principalmente in tre modi:

- **Refreezing:** La neve si scioglie durante il giorno e l'acqua risultante ricongela rapidamente al tramonto, creando un velo liscio come uno specchio.
- **Pioggia sopraffusa (Gelicidio):** Pioggia che cade in forma liquida ma che congela istantaneamente non appena tocca l'asfalto (che si trova a temperature sotto lo zero).
- **Condensazione dei fumi:** In condizioni di freddo estremo, persino il vapore acqueo degli scarichi delle auto può condensare e ghiacciare sulla carreggiata.

2. Perché è così pericoloso?

- **Invisibilità:** È quasi impossibile da distinguere dall'asfalto bagnato o semplicemente scuro. Spesso ci si accorge della sua presenza solo quando si perde trazione.
- **Attrito zero:** Essendo privo di asperità o bolle d'aria, il coefficiente di attrito è bassissimo, rendendo inutili anche i migliori sistemi di frenata (ABS) se la velocità è eccessiva.
- **Localizzazione:** Si forma preferenzialmente su **ponti e cavalcavia** (dove l'aria fredda circola anche sotto la strada, raffreddandola più velocemente) e nelle zone d'ombra.

3. Il ruolo del Biochar contro il Black Ice

Il biochar agisce proprio sulle debolezze del black ice che abbiamo visto sopra:

- **Rottura della trasparenza:** Spargere biochar sul black ice non solo fornisce grip, ma "colora" il ghiaccio rendendolo visibile agli automobilisti. Segnala immediatamente il pericolo.
- **Micro-rugosità:** Mentre il sale deve sciogliere tutto il ghiaccio per essere efficace, il biochar fornisce **trazione meccanica immediata**. I suoi granelli porosi si conficcano nel velo sottile di ghiaccio nero, creando punti di attrito che il pneumatico può "agganciare".
- **Prevenzione termica:** Come dicevamo prima, essendo nero, il biochar assorbe la radiazione infrarossa (anche in giornate nuvolose) e mantiene la temperatura della superficie leggermente più alta, ostacolando proprio la formazione di quel velo d'acqua che poi diventa black ice.

C'è un aspetto psicologico importante: gli studi dimostrano che vedere il biochar nero sulla strada dà al guidatore una percezione di sicurezza molto più alta rispetto alla strada trattata con sale (che scompare), portando a una guida più consapevole.

Conclusioni

Il passaggio da una gestione stradale invernale basata esclusivamente su agenti chimici corrosivi a un sistema integrato con biochar rappresenta un cambio di paradigma necessario per le città resilienti. Le evidenze raccolte dimostrano che:

- **Sicurezza:** Il biochar fornisce una trazione meccanica immediata, particolarmente efficace contro l'insidioso *black ice*, grazie alla sua capacità di incastonarsi nel ghiaccio tramite micro-fusione radiativa.
- **Durabilità:** L'integrazione del biochar riduce drasticamente i cicli di gelo-disgelo del manto stradale, allungandone la vita utile e prevenendo la corrosione delle infrastrutture metalliche.
- **Ecologia:** Oltre al sequestro di carbonio, il biochar agisce come "fegato del suolo", proteggendo la biodiversità urbana dallo stress salino e migliorando l'ossigenazione radicale.
- **Economia:** Sebbene i costi iniziali del materiale siano superiori al sale, il risparmio derivante dalla minore manutenzione stradale e dai benefici ecosistemici rende il biochar una scelta finanziariamente lungimirante su scala decennale.

In conclusione, la "salamoia nera" (biochar pre-umidificato) si configura come la tecnologia d'elezione per coniugare l'efficienza operativa con il rispetto dell'ambiente.

Riferimenti sul biochar

Bartocci, P., Vaccari, F. P., Valagussa, M., Pozzi, A., Baronti, S., Liberti, F., ... & Fantozzi, F. (2017, June). Effect of biochar on water retention in soil, a comparison between two forms: Powder and pellet. In Proceedings of the 25th European Biomass Conference and Exhibition, Stockholm, Sweden (pp. 1732-1736).

Jonsson, A., & Lindberg, M. (2021). The Stockholm Biochar Project: A case study in urban circular economy. VTI Sweden Research Papers.

Liao, W., Halim, M. A., Kayes, I., Drake, J. A., & Thomas, S. C. (2023). Biochar benefits green infrastructure: global meta-analysis and synthesis. Environmental Science & Technology, 57(41), 15475-15486.

Sifton, M. (2025). Biochar for Urban Forestry Applications: Improving Tree Establishment in Urban Soils (Doctoral dissertation, University of Toronto (Canada)).

Sparavigna, A. C. (2023). Multifunctional porosity in biochar. Int. J. Sciences, 7, 41-54.

Sparavigna, A. C. (2022). Biochar for Shape Stabilized Phase-Change Materials. ChemRxiv. doi:10.26434/chemrxiv-2022-4nthj

Sparavigna, A. C. (2023). The Catcher in the Water: Magnetic Biochar for the Treatment of Wastewater. SSRN https://ssrn.com/abstract=4409849, http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4409849

Sparavigna, A. C. (1023). Water in Pores: The Gibbs-Thomson Effect (February 6, 2023). SSRN https://ssrn.com/abstract=4349640, http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4349640

Thomas, S. C., et al. (2019). Biochar for environmental management in cold climates: Salt stress mitigation. University of Toronto Forestry Review.

Thomas, S. C. (2021). Biochar effects on germination and radicle extension in temperate tree seedlings under field conditions. Canadian Journal of Forest Research, 51(1), 10-17.

U.S. EPA (2023). Impacts of Road Salt on Environmental Systems and Potential Alternatives.

Virág, Á. D., Görbe, Á., Kohári, A., & Tóth, C. (2025). Substitution of carbon black with wood biochar in natural rubber composites: a study on reinforcement and sustainability. Results in Engineering, 107843.