

Bioremediation: una soluzione innovativa e circolare per la bonifica ambientale

Il degrado di suoli, sedimenti e acque rappresenta una delle sfide ambientali più urgenti a livello globale. L'inquinamento causato da attività industriali, agricole e urbane compromette la qualità degli ecosistemi, la salute umana e lo sviluppo sostenibile. In questo contesto, l'impiego di microrganismi per degradare o trasformare inquinanti offre una soluzione innovativa e circolare di bioremediation per la bonifica ambientale.

DOI 10.12910/EA12025-072

di Patrizia Paganin, Chiara Alisi, Tommaso Calandrelli, Flavia Tasso (Laboratorio Tecnologie per la Salvaguardia del Patrimonio Architettonico e Culturale - Divisione Impatti Antropici e del Cambiamento Climatico sul Territorio - Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali di ENEA), Sara Accardo, Laura Caiazzo, Giada Migliore, Massimo Pezza, Simona Schiavo (Laboratorio Impatti sul Territorio e nei Paesi in Via di Sviluppo - Divisione Impatti Antropici e del Cambiamento Climatico sul Territorio, Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali di ENEA), Sonia Manzo (Divisione Impatti Antropici e del Cambiamento Climatico sul Territorio - Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali di ENEA)

Bioremediation: la natura che risana la natura, un'alleata per l'Agenda 2030 e la rigenerazione dei siti contaminati.

Nel mondo esistono migliaia di siti contaminati da idrocarburi, metalli pesanti e inquinanti emergenti che, come altre sostanze tossiche, compromettono la salute degli ecosistemi e delle persone. Anche in Italia il problema è significativo: al 31 dicembre 2021 risultavano 3.568 siti contaminati sul territorio nazionale ^[1] e sono stati attualmente individuati 39 Siti di Interesse Nazionale (SIN) che richiedono interventi di bonifica per l'elevato impatto ambientale e sanitario.

Di fronte a questa sfida, la natura stessa offre soluzioni per rigenerarsi. La **bioremediation**, o biorisanamento, sfrutta la capacità di microrganismi, funghi e piante di degradare o trasformare gli inquinanti, restituendo vitalità a suoli e acque contaminati. Questa tecnologia rappresenta un

modello virtuoso in cui tutela ambientale, ricerca scientifica e sostenibilità economica convergono. Contribuisce infatti al raggiungimento di diversi **Obiettivi di Sviluppo Sostenibile** dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite: garantisce acque più pulite (Obiettivo 6), favorisce la rigenerazione dei suoli (Obiettivo 15), tutela la salute umana (Obiettivo 3) e promuove pratiche di produzione e consumo responsabili (Obiettivo 12).

L'approccio ENEA: bioaugmentation e processi microbici avanzati

La **bioaugmentation** è una strategia di biorisanamento che consiste nell'introduzione di microrganismi selezionati - batteri e funghi, da soli o in consorzio - in suoli o acque contaminate, per accelerare i processi di detossificazione e rigenerazione ambientale. È particolarmente utile quando la microflora autoctona non è sufficiente a metabolizzare i con-

taminanti o quando le condizioni ambientali ne limitano l'attività.

L'efficacia della bioaugmentation dipende da vari fattori: caratteristiche dei contaminanti, proprietà fisico-chimiche della matrice e interazioni ecologiche tra microrganismi. Per ottimizzare il processo degradativo è quindi fondamentale una caratterizzazione preliminare del sistema, che integri analisi bio-geo-chimiche con lo studio della composizione tassonomica e funzionale della comunità microbica presente. In questo ambito, i recenti progressi della chimica analitica, dell'ecotossicologia e della biologia molecolare, insieme a tecniche avanzate di metagenomica e fingerprinting metabolico, hanno dato nuovo impulso alla bioaugmentation, offrendo una comprensione più profonda del potenziale intrinseco di biorisanamento delle matrici ambientali da trattare.

Per valorizzare al massimo la capa-

cià autorigenerante dell'ambiente preservando le complesse reti metaboliche naturali, la progettazione dell'inoculo da impiegare nella bioaugmentation –dalla selezione dei ceppi che compongono il consorzio fino alla definizione della frequenza di applicazione– è un passaggio cruciale: l'approccio ENEA si basa sulla realizzazione di “formule batteriche” costituite da **consorzi microbici di ceppi autoctoni, adattati a contaminazioni croniche**, stabili e metabolicamente competenti [2].

Operativamente, dopo la selezione e la coltura dei ceppi, la formula batterica viene assemblata e applicata alla matrice da trattare. Il processo è poi monitorato tramite analisi chimiche ed ecotossicologiche per verificare l'efficacia dell'intervento e l'assenza di metaboliti intermedi più tossici dei composti originari.

PNRR – RETURN: Risanamento microbico di suoli contaminati da idrocarburi

L'approccio ENEA al biorisanamento ha trovato recente applicazione nel progetto **PNRR – RETURN** (PE3 2022-2025) [3] nel cui ambito sono state condotte prove sperimentali di bioaugmentation su di un suolo contaminato da idrocarburi (Total Petroleum Hydrocarbons-TPH: 30 mg/g di suolo), impiegando una formula microbica costituita da otto ceppi autoctoni.

I batteri isolati dal suolo contaminato sono stati scelti in base alla loro capacità di degradare gli idrocarburi e di produrre biosurfattanti, e successivamente utilizzati in prove preliminari in batch, al fine di definire i parametri sperimentali ottimali per la degradazione dei contaminanti.

Le analisi chimiche condotte a tempi successivi (fino a 120 giorni) hanno mostrato che, sebbene la comunità microbica autoctona naturalmen-

te presente nel suolo sia in grado di degradare parzialmente i TPH, la bioaugmentation con la formula microbica selezionata induce un miglioramento significativo del processo degradativo. Sulla base di questi risultati è stata avviata, ed è ancora in corso, una nuova sperimentazione volta a ottimizzare ulteriormente la degradazione degli idrocarburi mediante l'aggiunta di un biosurfattante, ovvero di un tensioattivo prodotto dai batteri, capace di aumentare la solubilità, la biodisponibilità e, conseguentemente, la biodegradazione

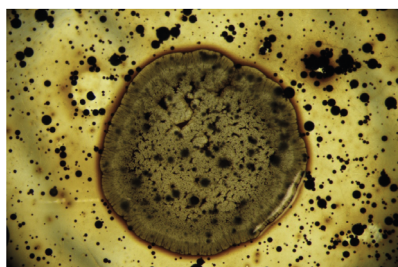


Figura 1 - Immagine allo stereomicroscopio di una colonia di *Rhodococcus qingshengii* OSS19b cresciuta su terreno agarizzato contenente petrolio greggio come unica fonte nutritiva. La presenza di un “alone” bruno attorno alla colonia può indicare adattamenti metabolici, come la produzione di biosurfattanti (per rendere più accessibili gli idrocarburi) o la formazione di sottoprodotti ossidativi.

degli inquinanti organici. Allo scopo, si è utilizzato un ceppo di *Rhodococcus qingshengii* OSS19b, selezionato dalla collezione microbica **ENEA MICROBIAL CULTURE COLLECTION (EMCC)** [4], come il più efficiente nella produzione di tensioattivi con elevate proprietà emulsificanti nei confronti degli idrocarburi (Figura 1).

Bioleaching e bioprecipitazione: dalla bonifica al recupero di risorse

Accanto alla biodegradazione, la biolisciviazione (**bioleaching**) e la bioprecipitazione (**bioprecipitation**) rappresentano processi microbici complementari impiegati sia nel

biorisanamento sia nel **recupero di materie prime** da scarti industriali o ambientali.

Nel risanamento ambientale, tali processi modulano l'attività microbica per **mobilizzare o immobilizzare i contaminanti metallici**, migliorando l'efficienza e la sostenibilità degli interventi, soprattutto se integrati con tecniche di bioaugmentation. In un'ottica di valorizzazione degli scarti, il bioleaching favorisce la **solubilizzazione dei metalli** rendendoli estraibili, mentre la bioprecipitazione ne promuove la **concentrazione in composti minerali stabili**.

ENEA, in collaborazione con l'Università di Cagliari, conduce attività di ricerca basate sui processi di biolisciviazione e bioprecipitazione, con l'obiettivo di **bonificare l'ex sito minerario di Ingurtosu**, nel sud-ovest della Sardegna.

Nell'ambito del progetto **RETURN** [3], è in corso la valutazione della capaci-



Figura 2 - Produzione di siderofori, riconoscibile dalla fluorescenza emessa, da parte di colture di *Pseudomonas protegens* FellC1. Le cellule batteriche producono queste molecole per chelare (legare) il ferro, rendendolo disponibile per il proprio metabolismo.

tà del ceppo di *Pseudomonas protegens* FellC1, isolato lungo il corso del fiume Rio Irvi (Sud-Ovest Sardegna), di bio-lisciviare metalli e metalloidi da sterili di miniera, in particolare dai fanghi rossi (goethite). Tale potenziale è legato alla capacità del batterio di produrre **siderofori**, macromolecole chelanti in grado di legare il ferro e, in misura minore, altri elementi metalli-

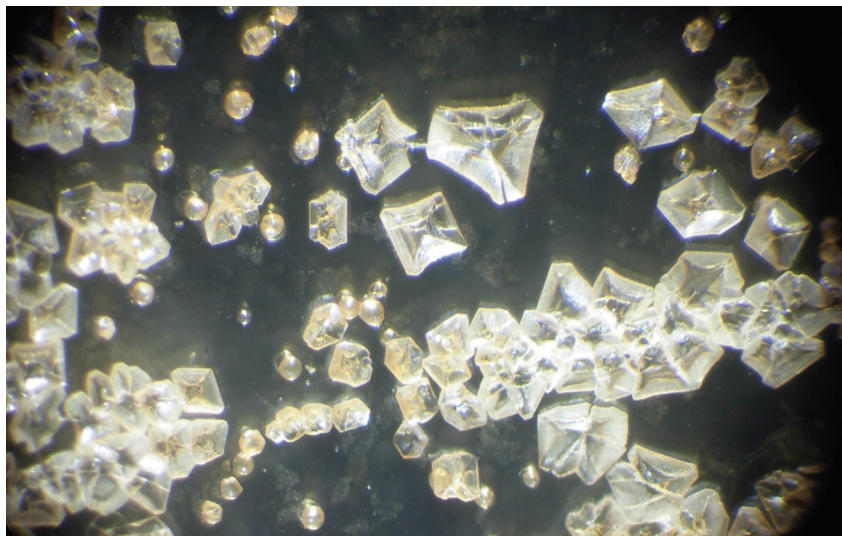


Figura 3 - Immagine allo stereomicroscopio di cristalli di calcite prodotti da *Sphingobacterium faecium* ceppo 012.

ci (Figura 2).

Da tempo, ENEA collabora con il Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche dell'Università di Cagliari (progetto **CESA** 2018-2021, **PRIN 2022-C02 LOVERS**), anche nello stu-

dio della bioprecipitazione carbonatica batterica (Figura 3), applicata alla riduzione della tossicità dello zinco e di altri metalli pesanti nei siti contaminati delle miniere dismesse. In presenza di zinco, tale processo può

portare alla formazione di minerali secondari che stabilizzano il metallo nel suolo e nei sedimenti, riducendone la mobilità, la biodisponibilità e la tossicità ^[5].

Conclusione

ENEA nel campo della bioremediation ha prodotto proof of concept per il risanamento di aree inquinate e isolato numerosi ceppi batterici *wild type*, non patogeni, conservati nella collezione EMCC. Questi microrganismi possono essere impiegati per ottimizzare i processi di biodegradazione, bioleaching e bioprecipitation, integrando approcci di bonifica ambientale e recupero di risorse. Tali strategie rappresentano un passo concreto verso la riduzione dell'impatto ambientale e la transizione a un modello produttivo pienamente circolare.

per info: patrizia.paganin@enea.it

Bibliografia

1. Araneo F. et al. (2025); Lo stato delle bonifiche dei siti contaminati in Italia: terzo rapporto sui dati regionali. ISPRA, Rapporti 409/25.
2. Sprocati A.R., Alisi C., Tasso F., Marconi P., Sciallo A., Pinto V., Chiavarini S., Ubaldi C., Cremisini C. (2012). Effectiveness of a microbial formula, as a bioaugmentation agent, tailored for bioremediation of diesel oil and heavy metal co-contaminated soil. *Process Biochemistry* 47, Issue 11: 1649-1655.
3. RETURN - Multi-risk science for resilient communities under a changing climate
4. <https://www.collezionebica.enea.it/>
5. Rajasekar A., Zhao C., Wu S. et al. Removal of high concentrations of zinc, cadmium, and nickel heavy metals by *Bacillus* and *Comamonas* through microbially induced carbonate precipitation. *Biodegradation* 36, 40 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10532-025-10131-7>