

Celle a combustibile microbiche terrestri: uno strumento efficace nel recupero di suoli contaminati e nella produzione di energia

Terrestrial microbial fuel cells: an effective tool in the recovery of contaminated soils and in the production of energy

VALERIA ANCONA¹, DOMENICO BORELLO², FERRARA VINCENZO⁴, PAOLA GRENNI³, GABRIELE GAGLIARDI², GIORGIA AIMOLA¹, ANDREA PIETRELLI^{5,6}, ANNA BARRA CARACCILO^{3*}

¹ Water Research Institute (IRSA), National Research Council (CNR), Bari, Italy

² Dep. of Mechanical and Aerospace Engineering, Sapienza University of Rome, Italy

³ Water Research Institute (IRSA), National Research Council (CNR), Bari, Italy

⁴ Dep. of Information Engineering, Electronics and Telecommunications, Sapienza University of Rome, Italy

⁵ Univ Lyon, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, Ampère, Villeurbanne, France

⁶ ECP Lab., Université Lumière Lyon 2, 86 Rue Pasteur, 69007, Lyon, France

* Corresponding author: barracaracciolo@irsa.cnr.it

E-mail: ancona@irsa.cnr.it (V. Ancona), domenico.borello@uniroma1.it (D. Borello), grenni@irsa.cnr.it (P. Grenni), gabriele.gagliardi@uniroma1.it (G. Gagliardi), giorgia.aimola@ba.irsa.cnr.it (G. Aimola), vincenzo.ferrara@uniroma1.it (F. Vincenzo), andrea.pietrelli@univ-lyon2.fr (A. Pietrelli)

SOMMARIO

Una cella a combustibile microbica (MFC) è un sistema bio-elettrochimico che utilizza un microrganismo attivo come biocatalizzatore per la produzione di elettricità. Essa è costituita da due comparti, uno anodico ed uno catodico, separati da una membrana di scambio protonico. L'energia chimica di legame, disponibile grazie alla presenza di un substrato biodegradabile, viene trasformata direttamente in energia elettrica per azione microbica, che catalizza la rimozione degli elettroni dal substrato. I batteri presenti nella camera anodica, o comunque nel mezzo in cui è immerso l'anodo, sono in grado di convertire un'enorme varietà di substrati organici (acetato, glucosio, cellulosa, reflui di varia origine, contaminanti organici) in CO₂, acqua ed energia.

Tra le MFC, le Celle a Combustibile Microbiche Terrestri (*Terrestrial Microbial Fuel Cells* - TMFC), hanno come elettrolita il suolo. Esso è una matrice molto più complessa rispetto all'acqua, variando nella composizione granulometrica, nella capacità di ritenzione idrica, nella capacità di scambio cationico, nonché nella distribuzione dei contaminanti; pertanto le TMFC sono dei dispositivi di cui è ancora necessario esplorare tutte le potenzialità di applicazione per il recupero di suoli contaminati.

Parole chiave: celle microbiche terrestri, contaminazione del suolo, biorimediazione, biofilm, energia

ABSTRACT

A microbial fuel cell (MFC) is a Bio-electrochemical system (BES) relying on active microorganisms which act as biocatalysts for electricity production. An MFC consists of an anodic and cathodic compartment, divided from a

protonic exchange membrane. Microorganisms transform bond chemical energy, available thanks to a biodegradable compound, to electrical energy, catalysing electron removal from a substrate. Microorganisms associated to anode compartment, are electroactive bacteria, able to transform a wide variety of organic compounds (glucose, acetate, various organic waste, organic contaminants) in CO₂, water and energy. Among MFCs, Terrestrial Microbial Fuel Cells (TMFCs) have as an electrolyte soil. Soil is a very complex matrix; in fact, its characteristics can be significantly different in terms of texture, mineralogy, water holding capacity, organic carbon content, exchange cation capacity, pH, microbial activity, diversity, abundance and contaminant distribution. All these abiotic and abiotic factors can influence a TMFC functioning and effectiveness in contaminant removal.

On the other hand, TMFC configuration (e.g. electrode material, open/close circuit) has a key role in promoting a toxic compound degradation. Owing to soil complexity, TMFCs have been less studied than the aquatic MFCs so far; however, an increasing interest has raised thanks to encouraging results on polycyclic aromatic hydrocarbon, pesticide and polychlorinated biphenyl degradation and heavy metal detoxification.

Keywords: terrestrial microbial fuel cell, soil contamination, bioremediation, biofilm, energy

1. INTRODUZIONE

Le problematiche relative alle numerose aree interessate da contaminazione multipla e diffusa causata dalle numerose attività antropiche riguardano sia la salute dell'uomo, che quella degli ecosistemi. Il processo di industrializzazio-

ne ha portato all'introduzione di migliaia di molecole xenobiotiche e tossiche nell'ambiente, l'agricoltura intensiva ha immesso nei suoli numerosi prodotti di sintesi quali fitofarmaci e fertilizzanti chimici, e l'espansione della industria petrolchimica ha causato una contaminazione diffusa dei suoli, delle acque e dell'aria. La gamma dei contaminanti presenti è veramente molto ampia e comprende composti di diversa natura, organici e inorganici. Nonostante siano state realizzate numerose azioni di risanamento di siti fortemente contaminati, molte aree restano ancora da bonificare. Negli ultimi anni è cresciuto l'interesse per lo sviluppo di tecnologie di riqualificazione sempre più sostenibili e a basso costo, al fine di ridurre il livello di contaminazione globale il più possibile. Diverse sono le tecnologie proposte per il contenimento e la rimozione delle sostanze contaminanti, e tra queste il biorimedio ha destato un forte interesse. Il biorimedio si basa sulla conoscenza e sfruttamento delle comunità microbiche presenti naturalmente nella matrice ambientale contaminata, le quali possono essere in grado di trasformare e/o degradare i contaminanti presenti attraverso i loro normali processi metabolici e possono essere stimolate migliorando l'efficienza di rimozione dei contaminanti ambientali (Juwarkar et al., 2014; Adams et al., 2015; Abatenh et al., 2017).

Tra le tecnologie sviluppate di recente per decontaminare i suoli e le acque, vi sono i sistemi bioelettrochimici (BioElectrochemical Systems – BES) (Shroder et al., 2014; Pisciotta e Dolceamore, 2016). Diversi sono i tipi di BES che sono stati messi a punto: celle di elettrolisi microbica (MEC), celle di desalinizzazione microbica (MDC), celle a combustibile fotomicrobiche (fotoMFC), elettrosintesi microbica (MES), ma tra queste, negli ultimi vent'anni, le Celle a Combustibile Microbiche (Microbial Fuel Cell - MFC) hanno catturato l'attenzione della comunità scientifica come una promettente tecnologia di biorimedio in grado di sfruttare le interazioni tra cellule microbiche presenti nella matrice ambientale e gli elettrodi posti nel sistema cella (Kumar et al., 2017; Santoro et al., 2017; Slate et al., 2019). Le *Microbial Fuel Cells* sono sistemi in cui l'energia intrappolata nei legami chimici della materia organica viene convertita in energia elettrica. Ciò è reso possibile grazie alla presenza di due elettrodi collegati elettricamente tra loro (anodo e catodo), sui quali si va a formare un biofilm microbico. All'interno del biofilm, sono presenti dei microorganismi naturali, detti esoelettrogeni, i quali sono in grado di utilizzare gli elettrodi come catalizzatori per le proprie attività metaboliche (reazioni di ossido/riduzione), promuovendo in questo modo la degradazione di eventuali contaminanti presenti e creando così una corrente elettrica (Bajracharya et al., 2016; Santoro et al., 2017). Questi dispositivi, oltre al basso costo, presentano numerosi altri vantaggi nel loro utilizzo rispetto ad altre tecnologie, quali: 1) la possibilità di avere un accurato controllo delle variabili (pH, temperatura, ecc.) durante il processo/funzionamento; 2) la possibilità di monitorare la *performance* della cella attraverso la registrazione dell'elettricità prodotta; 3) la possibilità di trattare contaminanti di diversa natura (organici e inorganici), 4) un limitato ri-

lascio di sottoprodotti tossici; 5) una bassa manutenzione e 6) una soddisfacente riduzione dei tempi di bonifica. Si definiscono Celle a Combustibile Microbiche Terrestri (*Terrestrial Microbial Fuel Cells* - TMFC), le MFC nelle quali l'elettrolita è il suolo (Ancona et al., 2020). Il suolo è una matrice molto più complessa rispetto all'acqua, poiché è una matrice eterogenea e controllare le sue condizioni richiede una maggiore attenzione, motivo per il quale le TMFC sono dei dispositivi di cui è ancora necessario esplorarne le potenzialità (Abbas et al., 2021).

2. LE CELLE MICROBICHE ED IL LORO FUNZIONAMENTO

2.1 Principio di funzionamento di una MFC

Una cella a combustibile microbica (MFC) è un bioreattore in cui alcuni microorganismi anaerobi esplicano la loro azione metabolica, catalizzando la conversione dell'energia immagazzinata nei legami chimici di composti organici in essa alimentati. Il risultato che si ottiene è la produzione diretta di energia elettrica a partire da popolazioni microbiche, abbattendo al contempo il contenuto organico del substrato introdotto nella cella. Le celle a combustibile microbiche, quindi, differiscono dalle altre celle operanti a bassa temperatura in due principali aspetti: utilizzano come combustibile molti tipi di biomassa, al posto dell'idrogeno, ed impiegano biofilm batterici per la catalisi dell'ossidazione del combustibile sull'anodo e della riduzione dell'ossigeno al catodo, al posto di catalizzatori. Una cella a combustibile è essenzialmente formata da due elettrodi, anodo e catodo, da un elettrolita, che consente la migrazione di ioni, e da un circuito elettrico esterno. Nel caso delle TMFC, di cui è riportato in Fig. 1 uno schema generale, l'elettrolita è costituito dal suolo.

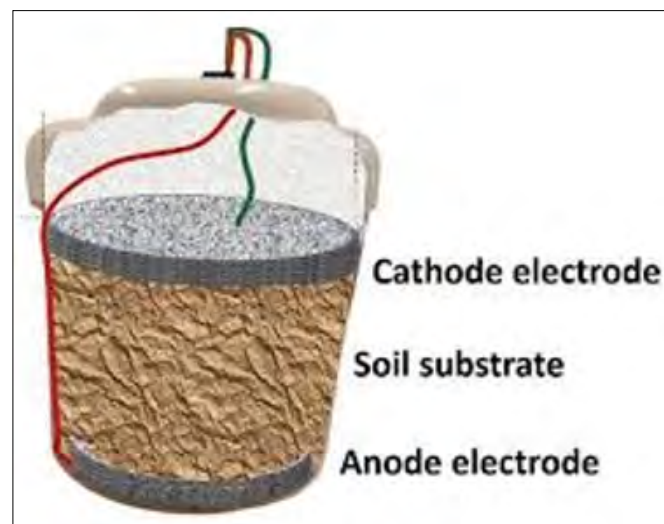
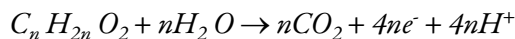


FIGURA 1. Schema di una cella a combustibile microbica terrestre (TMFC).

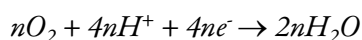
In una MFC, sostanze organiche biodegradabili vengono utilizzate come fonte energetica. In letteratura scientifica sono riportate diverse esperienze di produzione di corrente elettrica a partire da numerosi tipi di substrato organico: acetato, glucosio, cellulosa (Pant et al., 2010),

reflui zootecnici (Zheng et al., 2010), cisteina, scarti di lavorazione dei birrifici (Wen et al., 2009), rifiuti solidi urbani (Lee et al., 2011).

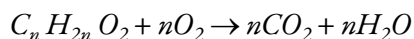
Nel comparto anodico biotico, i batteri attraverso il loro metabolismo sono in grado di ossidare il substrato producendo CO_2 , protoni ed elettroni. L'ossigeno inibisce la produzione di elettricità pertanto deve essere escluso dall'anodo. I batteri fungono da serbatoio di elettroni, prodotti intermedi della degradazione del substrato organico, inizialmente trattenuti dal microrganismo stesso e successivamente trasferiti all'anodo. L'ossidazione della sostanza organica contenuta nel substrato, donatore di elettroni, avviene all'anodo secondo una semi-reazione del tipo:



I protoni vengono condotti nel catodo attraverso l'elettrolita e gli elettroni vengono convogliati attraverso un circuito elettrico esterno. Una volta giunti sull'elettrodo, tramite un circuito elettrico esterno alla MFC, gli elettroni sono trasferiti al catodo per effetto della differenza di potenziale che si stabilisce tra i due elettrodi, mentre i protoni giungono al comparto catodico attraversando l'elettrolita. Nel comparto catodico, mantenuto in condizioni aerobiche, avviene la reazione di riduzione di un ossidante che, nel caso in cui si ricorra ad ossigeno (accettore di elettroni), porta alla produzione di acqua:



Sommando le due semi-reazioni che avvengono ai capi dei due elettrodi, si ottiene la reazione:



Questo tipo di reazione è quello che normalmente avviene in una cellula in cui, partendo dall'ossidazione di un substrato ridotto, si ottengono energia e coenzimi ridotti, i quali trasferiscono e^- alla catena di trasporto degli elettroni (dove presente) fino ad un accettore finale di elettroni.

2.2 MFC e applicazioni

Le celle a combustibile microbiche hanno molti utilizzi potenziali. Il primo è l'utilizzo dell'elettricità prodotta come sorgente energetica. Virtualmente si può usare qualsiasi materia organica per alimentare la pila. Il vantaggio è che questo tipo di pile rappresenta un metodo pulito ed efficiente per la produzione energetica, infatti, le loro emissioni di gas serra sono molto al di sotto dei valori fissati dalle leggi specifiche. Le pile microbiologiche usano l'energia molto efficientemente, in teoria una pila di questo tipo è in grado di avere un'efficienza energetica molto superiore al 50%.

Un potenziale utilizzo della tecnologia delle MFC è la realizzazione di sensori per l'analisi delle sostanze inquinanti e nel monitoraggio e controllo dei processi *in situ* (Chang et al., 2005). Infatti, le normali batterie hanno una durata limitata e devono essere sostituite o ricaricate; al

contrario, essendo una riserva di energia auto-rinnovabile, le MFC sono adatte per alimentare sensori elettrochimici e sono piccoli sistemi di telemetria per trasmettere i segnali ottenuti ai ricevitori remoti. Per progettare questo tipo di sistema, disporre delle opportune reazioni catodiche e anodiche è il primo passaggio da effettuare. È possibile utilizzare le MFC come sensori di richiesta di ossigeno biologico (BOD), ed è stato dimostrato che questo tipo di sensore BOD ha un'eccellente sostenibilità operativa e riproducibilità e può essere mantenuto operativo per 5 anni. Sono stati sviluppati anche diversi tipi di sensori enzimatici di glucosio.

Le MFC sono impiegate maggiormente nel trattamento delle acque reflue, ma possono avere molti altri utilizzi. Una prima e pratica applicazione delle MFC ha previsto l'impiego di questo sistema per il recupero di energia in infrastrutture idriche sostenibili (Du et al., 2007). Anche un potenziale rimedio di sostanze tossiche, come fenoli e composti del petrolio, è un'altra applicazione per le MFC (Luo et al., 2009). Sono state anche proposte come possibile applicazione sulle astronavi in quanto potrebbero fornire elettricità degradando i rifiuti generati a bordo (Chan and Li, 2014).

3. BIORIMEDIO E CELLE A COMBUSTIBILE MICROBICHE TERRESTRI (TMFC)

Sebbene inizialmente le TMFC si siano affermate quali metodi alternativi per la produzione di energia (Du et al., 2007; Logan, 2008), grazie alla possibilità di utilizzare una grande varietà di substrati e materiali per la produzione di bioenergia, l'attenzione è stata rivolta anche alla possibilità di trattare matrici contaminate per rimuovere i composti inquinanti. Questa tecnologia si è rivelata alquanto utile, ma molte variabili vanno considerate e una TMFC deve essere progettata *ad hoc* a seconda del tipo di contaminante che si vuole trattare, sia esso organico o inorganico.

3.1 Contaminanti organici

Le TMFC si sono recentemente rivelate utili nel promuovere la degradazione di alcuni xenobiotici organici, come alcuni composti organici persistenti (POP), (Abbas et al. 2021). In esse, infatti, viene ricreata la condizione di anossia necessaria per favorire la degradazione di tali composti.

Nelle TMFC il catodo è a contatto con una fonte di ossigeno facilmente accessibile (sia esso acqua o aria) e funziona come un accettore di elettroni terminale (Gustave et al., 2019a), mentre l'anodo è posto in condizioni anossiche nel suolo ed è il sito nel quale avviene l'ossidazione dei composti organici da parte dei microrganismi (Xu et al., 2017).

Molte sono le ricerche che hanno testato questa interessante tecnologia con diversi tipi di molecole organiche tossiche. Xu et al., (2015) hanno verificato la degradazione dei policlorobifenili (PCB) in una TMFC, impiegando anche alcune tipologie di surfattanti (Tween80, sodio dodecilsolfato SDS) per stimolare ulteriormente l'attività metabolica delle comunità microbiche. I risultati hanno mostrato una degradazione maggiore dei PCB quando sono stati usati

sia gli elettrodi che i surfattanti, dimostrando così che il loro uso può realmente promuovere la degradazione del contaminante.

Il fenolo, contaminante del suolo e delle acque, che può interferire con la degradazione di altri composti organici, è un'altra delle molecole studiata. Per esempio, Huang et al., (2011) hanno riscontrato una rimozione del fenolo maggiore nella condizione con TMFC piuttosto che in quella senza. Inoltre, gli stessi autori hanno rilevato una percentuale di degradazione del 90,1% nella condizione a circuito chiuso (più elevata rispetto a quella a circuito aperto: 27,6%) e in linea con una maggiore attività microbica. Yu et al., (2017) hanno testato le TMFC in presenza di fenolo clorurato e hanno osservato una diminuzione della sua concentrazione, confermando che la degradazione di tale molecola avviene attraverso una dealogenazione in corrispondenza dell'anodo (Miran et al., 2017).

Anche gli Idrocarburi policiclici aromatici (IPA) sono stati testati con le MFC poiché sono composti organici recalcitranti, ubiquitari, idrofobi e tossici sia da un punto di vista ambientale che umano. Sherafatmand e Yong, (2015) hanno lavorato con alcune molecole di questa classe di composti, testando condizioni anaerobiche e aerobiche oltre a condizioni di controllo realizzate in assenza di MFC, e hanno trovato una percentuale di rimozione maggiore nei reattori anaerobici (76,9% di naftalene, 52,5% di acenafte-ne e 36,8% di fenantrene in MFC contro il 29,3%, 29% e 12,3% delle stesse molecole nella condizione in assenza di MFC). Le condizioni anaerobiche sono state più efficienti nella rimozione rispetto a quelli aerobiche, poiché gli IPA si degradano più facilmente in anaerobiosi soprattutto con aggiunta di solfati e nitrati, considerato che i batteri che li utilizzano nel loro metabolismo promuovono la degradazione degli IPA.

Pham et al., (2009) hanno lavorato con il dicloroetano (DCA), un prodotto chimico industriale pericoloso, largamente utilizzato in molti ambiti applicativi. Le condizioni sperimentali testate sono state quattro: due con comunità microbiche coltivate sull'anodo (in condizioni anerobiche o aerobiche), e due senza comunità microbica (sempre in condizione aerobica o anaerobica). Ogni condizione è stata sottoposta anche a una ulteriore prova di circuito aperto e chiuso.

L'aggiunta dei batteri coltivati sull'anodo prima dell'inizio dell'esperimento ha dimostrato un evidente miglioramento delle prestazioni sia nella degradazione del DCA, che nella produzione di energia (98% e 93% per circuito chiuso e aperto). Le condizioni in assenza di batteri coltivati hanno mostrato, invece, una rimozione del DCA impossibilitata proprio dall'assenza di comunità microbiche in caso di circuito aperto, mentre quando si è chiuso il circuito la rimozione è salita al 95%.

Recentemente è stato pubblicato un lavoro scientifico relativo a un caso di studio di utilizzo di TMFC per la rimozione di DDE (2,2-bis (diclorodifenil-dicloroetilene o p-clorofenil)-1,1-dicloroetilene), un metabolita persistente del pesticida DDT (diclorodifenil-tricloroetano), Fig. 2. I risultati ottenuti dopo 2 mesi dall'inizio dell'esperimento,



FIGURA 2. Allestimento TMFC per la rimozione del DDE.

hanno evidenziato che le MFC hanno promosso una degradazione significativa del contaminante (39%), rispetto alla condizione realizzata in assenza di TMFC. Inoltre, è stato riscontrato che l'aggiunta di carbonio organico (compost) ha stimolato l'attività delle comunità microbiche del suolo ed ha migliorato le prestazioni elettriche delle celle microbiche (Borello et al., 2021).

3.2 Metalli pesanti

Le TMFC si sono rivelate una tecnologia di bonifica interessante anche per quanto riguarda la contaminazione del suolo dovuta a metalli, i quali a differenza dei contaminanti organici non possono essere degradati, ma possono essere trasformati in composti meno pericolosi con meccanismi di rimozione di vario tipo (Mathuriya e Yakhmi, 2014).

Il meccanismo principale per il recupero dei metalli è la riduzione a livello del catodo. A seconda del potenziale redox dello ione metallo, l'ossigeno o gli ioni metallici possono essere gli accettori finali di elettroni: ioni con basso potenziale redox tenderanno a usare l'ossigeno come accettore terminale di elettroni, mentre ioni con elevato potenziale redox che si trovano nella zona del catodo possono competere con l'ossigeno come accettori terminali di elettroni e riducendosi possono passare dalla forma ionica allo stato elementare per poi precipitare ed essere facilmente separati dal suolo (Wu et al., 2017a; Abbas et al., 2021; Mathuriya e Yakhmi, 2014).

Diversi gruppi di ricerca hanno lavorato testando metalli differenti. Ad esempio Habibul, (2016) ha presentato un lavoro sul cadmio e sul piombo (Cd e Pb) nel quale è stata riportata una migrazione dei due ioni dalla camera anodica a quella catodica generata dal debole campo elettrico dovuto alle MFC.

Questa migrazione è stata accompagnata da una diminuzione del pH e della conducibilità elettrica in zona anodo man mano che i metalli passavano verso il catodo, il quale ha invece registrato un aumento di pH e conducibilità elettrica. Nonostante il fenomeno della migrazione sia stato osservato per entrambi i metalli, l'efficienza di rimozione è risultata essere differente, probabilmente per la loro mobilità e i diversi tempi di trattamento. Le concentrazioni iniziali dei due metalli nel suolo sono così diminuite e la conclusione è che un campo elettrico di bassa intensità potrebbe portare alla rimozione anche di altri metalli pesanti.

4. PRINCIPALI FATTORI CHE INFLUENZANO L'EFFICIENZA DELLE TMFC NELLA DECONTAMINAZIONE

4.1 Composizione degli Elettrodi, configurazione dei sistemi BES, fattori abiotici

La tipologia dei materiali degli elettrodi può significativamente influenzare le prestazioni delle celle per le differenti proprietà di scambio di elettroni con il biofilm elettrochimico attivo. Esistono molti materiali per elettrodi con differenze di porosità, area superficiale e conducibilità che influiscono direttamente sull'adesione dei microbi. Per ottenere una migliore produzione di elettricità e favorire l'attacco del film microbico, il materiale dell'elettrodo deve avere alcune proprietà importanti come biocompatibilità, conduttività elettronica, stabilità chimica, elevata superficie volumetrica, elevata porosità superficiale e dovrebbe essere a basso costo.

Tutte queste caratteristiche influenzano significativamente l'efficienza complessiva del processo (Wang et al., 2016a). Gli elettrodi a base di carbonio come carta carbone, spazzola di carbone, feltro di carbonio, tessuto di carbonio, maglia di carbonio, asta di grafite, stuoia di grafite tessuta, sono ampiamente applicati negli MFC (Zhou et al., 2011). Il feltro di carbonio è un altro materiale per elettrodi usato comunemente e la sua consistenza offre più spazio per il biofilm.

Il pH sembra svolgere un ruolo chiave nello sviluppo e per la massima produzione di biofilm elettroattivi microbici anodici, regolando la via metabolica del biocatalizzatore. Svolge anche un ruolo cruciale per mantenere l'equilibrio nelle condizioni redox. Generalmente si è visto che gli enzimi microbici funzionano molto bene ed efficacemente a pH neutro, il che è ottimale per l'attività dei batteri. Da condizioni di pH neutro, qualsiasi suo eccessivo aumento o diminuzione (cioè estremo acido o basico) si traduce in una sostanziale riduzione delle prestazioni del biofilm. Numerosi studi effettuati con un pH compreso tra pH 6 e 9 hanno confermato che il processo microbico si svolge preferibilmente con un pH neutro di 7 ± 1 . Il pH iniziale, tuttavia, può essere tollerato dai batteri elettrogenici fino a un valore di 10. I risultati hanno suggerito l'importanza del valore del pH per la formazione del biofilm dato che un pH inferiore a 5 e superiore a 11 ne provoca il distacco e quindi un danno anodico irreversibile. Durante l'avvio delle celle microbiche è quindi desiderabile che il pH sia compreso tra 7 e 9 (Sajana et al., 2016).

È stato poi studiato l'effetto della temperatura e i limiti di temperatura nei quali operano solitamente i biofilm microbici anodici sulla corrente. Questi studi hanno riscontrato una riduzione del tempo necessario per stabilire il biofilm attivo da 40 giorni a 15°C a 3,5 giorni a 35°C. A temperature inferiori a 15°C il biofilm non si forma. Temperature superiori a 50°C invece provocano una disattivazione irreversibile del biofilm. Studi simili hanno confermato una fase di latenza più breve e riscontrato un aumento della densità di potenza a 30°C rispetto a 22°C (Barbato et al., 2017).

La quantità di acqua ha un impatto fondamentale sulle prestazioni di un MFC poiché regola la maggior parte dei processi chimici alla base di questa tecnologia. Il contenuto di acqua è definito come il rapporto tra il peso dell'acqua e il peso della parte solida; in una MFC questo contenuto deve sempre essere vicino alla soglia di saturazione del terreno (con una percentuale di acqua che dipende dalla tessitura del terreno) in modo che la cella possa funzionare a piena capacità e quindi garantire la produzione di energia (Cooke et al., 2010). La generazione di energia aumenta drasticamente all'aumentare del contenuto di acqua e questa tendenza continua fino a quando il suolo raggiunge o supera leggermente la sua capacità di saturazione. La concentrazione di ossigeno disciolto nel comparto catodico deve essere mantenuta il più bassa possibile, compatibilmente con lo sviluppo di reazioni aerobiche; infatti, per concentrazioni maggiori, potrebbe determinarsi una possibile diffusione di ossigeno dal comparto catodico a quello anodico attraverso la membrana di scambio protonico (o attraverso il flusso idrico in assenza di membrana).

4.2 Ruolo delle comunità microbiche elettroattive

La capacità dei microrganismi elettrogeni di formare un sottile biofilm intorno agli elettrodi è il meccanismo alla base del funzionamento e dell'efficacia di questi dispositivi. In modo particolare, la formazione del biofilm intorno all'anodo, posto nella zona anaerobica delle MFC, è di particolare importanza poiché è lì che può avvenire l'ossidazione della sostanza organica presente nel terreno (e la trasformazione di eventuali composti inquinanti), producendo di conseguenza l'elettricità.

La formazione del biofilm è un processo progressivo che comporta la formazione di microcolonie di batteri che si stabiliscono sull'elettrodo aderendo al substrato (Mohan et al., 2014). La capacità di generare corrente dalla propria attività metabolica è propria di alcuni gruppi specifici di batteri che, come menzionato in precedenza, sono in grado di scambiare elettroni con substrati solidi quali gli elettrodi, come per esempio *Geobacter sulfurreducens* e *G. metallireducens* (*Delta-Proteobacteria*), *Shewanella* sp. (*Gamma-Proteobacteria*), *Rhodospirillum rubrum* (*Beta-Proteobacteria*), (Borole et al., 2011; Pisciotta e Dolceamore, 2016). Questi microrganismi hanno sviluppato diversi meccanismi di trasferimento degli elettroni verso l'anodo, diretti o indiretti: con trasferimento indiretto usando biomolecole come "navette" per gli elettroni, con trasferimento aiutato da appendici microbiche conduttive, come nanofili, e con trasferimento diretto attraverso la stessa parete cellulare microbica (Logan e Rabaey, 2012; Shroder et al., 2007; Saratale et al., 2017).

Molti studi hanno osservato una grande differenza nella struttura di comunità delle popolazioni microbiche poste ai due elettrodi anodo e catodo, dovuta probabilmente a una maggiore accessibilità dei substrati biodegradabili e alla maggiore presenza di acqua a livello dell'anodo (Deng et al., 2015, Meng et al., 2017, Seo et al., 2018). L'efficienza dei biofilm elettroattivi nelle MFC generalmente risente

di molte variabili le quali possono essere raggruppate in tre grandi parametri: i parametri di progettazione del sistema, i parametri operativi e i parametri biologici. Parliamo dunque di fattori quali il materiale del substrato degli elettrodi (Zhou et al., 2011) le condizioni operative come pH, umidità, temperatura, ossigeno, tipologia di suolo e sue caratteristiche chimico-fisiche, presenza di ulteriori fonti di carbonio, presenza di contaminanti tossici (Cooke et al., 2010; Sajana et al., 2016; Barbato et al., 2017). Inoltre, il design della camera delle MFC, la spaziatura dei catodi e degli anodi, ed eventualmente il tipo di membrana, influenzano il trasporto di ioni e la formazione dello stesso biofilm (Zhang et al., 2011).

È così dunque molto importante monitorare la comunità microbica e fare in modo che questa si trovi nelle condizioni migliori possibili per affrontare la presenza di un contaminante, al fine di non farsi inibire da questo e di inserirlo nelle proprie attività metaboliche per poterlo poi trasformare e degradare. In modo particolare, l'abbondanza e l'attività microbica dei gruppi elettrogeni sono due parametri fondamentali da osservare. La capacità di produrre corrente sembra influenzare la crescita stessa dell'abbondanza di questi gruppi funzionali, come osservato da Wang et al. (2016b), i quali accrescono la propria popolazione rispetto l'inizio delle sperimentazioni (Wu et al., 2017b, Gustave et al., 2019b). Inoltre, va valutata la tipologia di contaminante presente nel suolo che si vuole trattare per poter valutare anche la possibilità di aiutare le comunità microbiche con fonti di carbonio aggiuntive. Ad esempio, nel caso di contaminanti organici aromatici clorurati, le fonti di carbonio sono consigliate (glucosio, Sodio dodecil solfato SDS, Tween 80) al fine di sostenere l'attività microbica delle popolazioni di elettrogeni presenti della comunità, rallentata a causa dell'elevata tossicità di questi composti e perché la trasformazione di queste molecole avviene per dechlorurazione riduttiva, (Rodrigo et al., 2014; Xu et al., 2015; Li et al., 2016; Barra Caracciolo et al., 2020).

5. PROGETTO COST ACTION PHOENIX CA19123

5.1 Obiettivi e Risultati attesi

Il Progetto Phoenix CA19123 "Protection, Resilience, Rehabilitation of damaged environment" è un *COST Action* (European Cooperation in Science and Technology) finanziato dall'Unione Europea e mira a dimostrare l'efficacia dei sistemi bioelettrochimici (BES). I BES sono sistemi a basso impatto ambientale che sfruttano l'attività biologica di organismi vivi per la riduzione degli inquinanti, il riciclaggio di elementi utili, la sintesi di nuovi prodotti e la produzione di energia elettrica nel caso delle celle a combustibile microbiologiche (MFC). I recenti progressi nel campo dell'elettronica a bassa potenza consentono lo sfruttamento di queste tecnologie sostenibili e rispettose dell'ambiente. Le attività di PHOENIX sono legate alla caratterizzazione delle tecnologie BES e alla loro implementazione come biosensori e bioreattori connessi ad

aspetti di bonifica, di pianificazione urbana sostenibile, educativi e socio-economici.

L'integrazione delle biotecnologie verdi, a nullo o basso impatto, nel contesto urbano è una priorità fondamentale per un recupero di aree e spazi degradati. I sistemi bioelettrochimici utilizzano le capacità naturali dei microorganismi ambientali di resilienza verso i contaminanti ambientali, favorendo le popolazioni microbiche elettrogene. Da millenni i microorganismi modellano gli ecosistemi della Terra e, con il giusto approccio, possono aiutare a reintrodurre l'equilibrio ambientale.

5.1.1 Descrizione della partnership

In Aprile 2020, la proposta di progetto COST nata da un consorzio di 10 nazioni a partire da Italia (Sapienza e CNR), Francia e Regno Unito è risultata vincente dando vita al progetto COST PHOENIX CA19123.

A settembre 2020 si è riunito il primo consiglio di amministrazione composto dai rappresentanti di 36 Nazioni, in cui sono stati eletti all'unanimità i rappresentanti del consiglio di gestione.

Nel 2021 la rete è arrivata a comprendere 42 nazioni nel mondo dalla Nuova Zelanda alla Cina e l'Argentina, tra cui sono presenti tutte le nazioni europee. Inoltre, rappresentanti scientifici della Russia, del Libano e della Giordania (considerate NNC "Near Neighbour Countries") sono presenti nel consiglio di amministrazione con il ruolo di osservatori.

Ulteriori informazioni: www.cost.eu/actions/CA19123/

5.2 Attività in corso

All'interno del programma di finanziamento europeo alla ricerca Horizon2020-Horizon Europe, il COST "European Cooperation in Science and Technology" ha permesso di instaurare solidi consorzi internazionali di ricerca per una durata di 4 anni.

Il progetto proseguirà fino al 2024 permettendo l'organizzazione di eventi scientifici, *Training School*, Conferenze, riunioni dei Gruppi di lavoro, del Consiglio di amministrazione e del Consiglio di gestione, oltre che numerose missioni di interscambio tra le varie nazioni partner. Le prime missioni di interscambio tra laboratori di diverse sono già in corso. Il totale del finanziamento europeo per il progetto PHOENIX è di circa 500K euro in totale.

Il progetto è diviso in 5 *Working Group* e 12 *Tasks* per l'organizzazione delle diverse attività e collaborazioni scientifiche tra le scienze sociali le scienze naturali e l'ingegneria.

6. CONCLUSIONI

Le celle a combustibile microbiche terrestri sono considerate sostenibili dal punto di vista ambientale e convenienti per il biorisanamento del suolo inquinato e la produzione di energia. Attualmente non è disponibile un modello di TMFC ottimale sia per la generazione di energia che per la bonifica del suolo. La produzione di energia non è la priorità chiave per il biorisanamento del suolo.

Per questo obiettivo, l'adeguata tensione esterna può essere impiegata per indurre il biorisanamento del suolo *in situ*. Ad oggi, un numero limitato di studi è stato focalizzato sul biorisanamento di suoli contaminati da inquinanti complessi basati su ricerche scientifiche condotte solo a scala di laboratorio. Pertanto, in futuro, la priorità sarà il biorisanamento di contaminanti organici persistenti del suolo e la messa punto di metodologie per lo scale up dei sistemi BES per applicazioni a scala di campo. A tal fine un approccio multi-disciplinare basato sulla combinazione di differenti discipline (scienza dei materiali, ecologia microbica, biotecnologia, fisica, informatica e bioelettrochimica) sarà fondamentale per affrontare le sfide applicative dovute ai limiti della attuale tecnologia.

BIBLIOGRAFIA

- ABATENH E., GIZAW B., TSEGAYE Z., WASSIE M. (2017). *The Role of Microorganisms in Bioremediation-A Review*. Open Journal of Environmental Biology, 2 (1): 038-046.
- ABBAS S.Z., RAFATULLAH M. (2021). *Recent advances in soil microbial fuel cells for soil contaminants remediation*. Chemosphere, 272: 129691.
- ADAMS G.O., FUFEYIN P.T., OKORO S.E., Ehinomen Y. (2015). *Bioremediation, Biostimulation and Bioaugmentation: A Review*. International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation, 3, (1): 28-39.
- ANCONA V., BARRA CARACCILO A., BORELLO D., FERRARA V., GRENNI P., PIETRELLI A. (2020). *Microbial fuel cell: an energy harvesting technique for environmental remediation*. International Journal of Environmental Impacts, 3 (2): 168–179.
- BAJRACHARYA S., SHARMA M., MOHANAKRISHNA G., BENNETON X.D., STRIK D., SARMA P.M., PANT D. (2016). *An overview on emerging bioelectrochemical systems (BESs): Technology for sustainable electricity, waste remediation, resource recovery, chemical production and beyond*. Renewable Energy, 98: 153 – 170.
- BARBATO R.A., FOLEYA K.L., TORO-ZAPATA J.A., JONESA R.M., REYNOLDS C.M. (2017). *The power of soil microbes: Sustained power production in terrestrial microbial fuel cells under various temperature regimes*. Applied Soil Ecology, 109: 14-22.
- BARRA CARACCILO A., GRENNI P., GARBINI G.L., ROLANDO L., CAMPANALE C., AIMOLA G., FERNANDEZ-LOPEZ M., FERNANDEZ-GONZALEZ A.J., VILLADAS P.J. AND ANCONA V. (2020). *Characterization of the Belowground Microbial Community in a Poplar-Phytoremediation Strategy of a Multi-Contaminated Soil*. Frontiers in Microbiology 11:2073. doi: 10.3389/fmicb.2020.02073
- BOROLE A.P., REGUERA G., RINGEISEN B., WANG Z.-W., FENG Y., HONG KIM B. (2011). *Electroactive biofilms: Current status and future research needs*. Energy & Environmental Science, (4): 4813-4834.
- BORELLO D., GAGLIARDI G., AIMOLA G., ANCONA V., GRENNI P., BAGNUOLO G., GARBINI G.L., ROLANDO L., BARRA CARACCILO A. (2021). *Use of microbial fuel cells for soil remediation: A preliminary study on DDE*. International Journal of Hydrogen Energy, 46: 10131-10142.
- CHAN Y., LI C. Y. V. (2014). *Electrochemically Enabled Sustainability: Devices, Materials and Mechanisms for Energy Conversion*. CRC Press, 109.
- CHANG I. S., MOON H., JANG J. K., KIM B. H. (2005). *Improvement of a microbial fuel cell performance as a BOD sensor using respiratory inhibitors*. Biosensors and Bioelectronics, 20: 1856–1859.
- COOKE K.G., GAY M.O., RADACHOWSKY S.E., GUZMAN J.J., CHIU M.A. (2010). *BackyardNet™: Distributed Sensor Network Powered by Terrestrial Microbial Fuel Cell Technology*. SPIE Defense, Security, and Sensing.
- DENG H., JIANG Y., ZHOU Y., SHEN K., ZHONG W. (2015). *Using electrical signals of microbial fuel cells to detect copper stress on soil microorganisms*. European Journal of Soil Science, 66: 369-377.
- DU Z., LI H., GU T. (2007). *A state of the art review on microbial fuel cells: a promising technology for wastewater treatment and bioenergy*. Biotechnology Advances, 25: 464-482.
- GUSTAVE W., YUAN Z.-F., SEKAR R., REN Y.-X., LIU J.-Y., ZHANG J., CHEN, Z. (2019a). *Soil organic matter amount determines the behavior of iron and arsenic in paddy soil with microbial fuel cells*. Chemosphere 237: 124459.
- GUSTAVE W., YUAN Z.-F., SEKAR R., REN Y.-X., CHANG H.-C., LIU J.-Y., CHEN Z. (2019b). *The change in biotic and abiotic soil components influenced by paddy soil microbial fuel cells loaded with various resistances*. Journal of Soils and Sediments, 19: 106-115.
- HUANG D.Y., ZHOU S.G., CHEN Q., ZHAO B., YUAN Y., ZHUANG L. (2011). *Enhanced anaerobic degradation of organic pollutants in a soil microbial fuel cell*. Chemical Engineering Journal, 172: 647– 653.
- HABIBUL N.Y. H.-P. (2016). *Microbial fuel cell driving electrokinetic remediation of toxic metal contaminated soils*. Journal of Hazardous Materials, 318: 9-14.
- JUWARKAR A.A., MISRA R.R., SHARMA J.K. (2014). *Recent trends in bioremediation*. In *Geomicrobiology and Biogeochemistry*. Springer Berlin Heidelberg: 81-100.
- KUMAR R., SINGH L., ZULARISAM A.W., HAI F.I. (2018). *Microbial fuel cell is emerging as a versatile technology: a review on its possible applications, challenges and strategies to improve the performances*. International Journal of Energy Research, 42: 369–394.
- LEE Y., NIRMALAKHANDAN N. (2011). *Electricity production in membrane-less microbial fuel cell fed with livestock organic solid waste*. Bioresource Technology, 102: 5831-5835.
- LI X., WANG X., WAN L., ZHANG Y., LI N., LI D., ZHOU Q. (2016). *Enhanced biodegradation of aged petroleum hydrocarbons in soils by glucose addition in microbial fuel cells*. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 91: 267-275.
- LOGAN B.E., RABAAY K. (2012). *Conversion of Wastes*

- into Bioelectricity and Chemicals by Using Microbial Electrochemical Technologies. *Science*, 337: 686-690.
- LUO H., LIU G., ZHANG R., JIN S. (2009). *Phenol degradation in microbial fuel cells*. *Chemical Engineering Journal*, 147: 259-264.
- MATHURIYA A.S. & YAKHMI J.V. (2014). *Microbial fuel cells to recover heavy metals*. *Environmental Chemistry Letters*, 12 (4): 483-494.
- MENG F., ZHANG S., OH Y., ZHOU Z., SHIN H.-S., CHAE S.-R. (2017). *Fouling in membrane bioreactors: an updated review*. *Water Research*, 114: 151-180.
- MIRAN W., NAWAZ M., JANG J., LEE D.S. (2017). *Chlorinated phenol treatment and in situ hydrogen peroxide production in a sulfate-reducing bacteria enriched bio-electrochemical system*. *Water Research*, 117: 198-206.
- MOHAN S.V., VELVIZHI G., MODESTRA J.A., SRIKANTH S. (2014). *Microbial fuel cell: Critical factors regulating bio-catalyzed electrochemical process and recent advancements*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40: 779-797.
- PANT D., VAN BOGAERT G., DIELS L., VANBROEKHOVEN K. (2010). *A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production*. *Bioresource Technology*, 101: 1533-1543.
- PHAM H., BOON N., MARZORATI M., VERSTRAETE W. (2009). *Enhanced removal of 1,2-dichloroethane by anodophilic microbial consortia*. *Water Research*, 43 (11): 2936-46.
- PISCIOTTA J.M., DOLCEAMORE J.J. JR (2016). *Bioelectrochemical and conventional Bioremediation of environmental Pollutants*. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, 8 (4).
- RODRIGO M.A., OTURAN N., OTURAN M.A. (2014). *Electrochemically assisted remediation of pesticides in soils and water: a review*. *Chemical Reviews*, 114: 8720-8745.
- SAJANA T.K., GHANGREKAR M.M., MITRA A. (2016). *In Situ Bioremediation Using Sediment Microbial Fuel Cell*. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 21.
- SANTORO C., ARBIZZANI C., ERABLE B., IEROPOULOS I. (2017). *Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review*. *Journal of Power Sources*, 356: 225-244.
- SARATALE G.D., SARATALE R.G., SHAHID M.K., ZHEN G., KUMAR G., SHIN H.S., CHOI Y.G., KIM S.H. (2017). *A comprehensive overview on electro-active biofilms, role of exoelectrogens and their microbial niches in microbial fuel cells (MFCs)*. *Chemosphere*, 178: 534-547.
- SEO Y., KANG H., CHANG S., LEE Y.-Y., CHO K.-S. (2018). *Effects of nitrate and sulfate on the performance and bacterial community structure of membrane-less single-chamber air-cathode microbial fuel cells*. *Journal of Environmental Science and Health*, 53: 13-24.
- SCHRÖDER U. (2007) *Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency*. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 9: 2619-2629.
- SCHRÖDER U., HARNISCHB F., ANGENENT L.T. (2015). *Microbial electrochemistry and technology: terminology and classification*. *Energy & Environmental Science*, 8: 513-519.
- SHERAFATMAND M., NG H.Y. (2015). *Using sediment microbial fuel cells (SMFCs) for bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)*. *Bioresource Technology*, 195: 122-130.
- SLATE A.J., WHITEHEAD H.A., BROWNSON D.A.C., BANKS C.E. (2019). *Microbial fuel cells: An overview of current technology*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101: 60-81.
- WANG J., SONG X., WANG Y., ABAYNEH B., DING Y., YAN D., BAI J. (2016a). *Microbial community structure of different electrode materials in constructed wetland incorporating microbial fuel cell*. *Bioresource Technology*, 221: 697-702.
- WANG C., DENG H., ZHAO F. (2016b). *The remediation of chromium (VI)-contaminated soils using microbial fuel cells*. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 25: 1-12.
- WEN Q., WUA Y., CAO D., ZHAO L., SUN Q. (2009). *Electricity generation and modelling of microbial fuel cell from continuous beer brewery wastewater*. *Bioresource Technology*, 100: 4171-4175.
- WU M., XU X., ZHAO Q., WANG Z. (2017a). *Simultaneous removal of heavy metals and biodegradation of organic matter with sediment microbial fuel cells*. *The Royal society of Chemistry*, (7): 53433-53438.
- WU M., YE X., CHEN K., LI W., YUAN J., JIANG X. (2017b). *Bacterial community shift and hydrocarbon transformation during bioremediation of short-term petroleum-contaminated soil*. *Environmental Pollution*, 223: 657-664.
- XU X., ZHAO Q.L., WU M.S. (2015). *Improved biodegradation of total organic carbon and polychlorinated biphenyls for electricity generation by sediment microbial fuel cell and surfactant addition*. *The Royal society of Chemistry*, (5): 62534.
- XU X., ZHAO Q., WU M., DING J., ZHANG W. (2017). *Biodegradation of organic matter and anodic microbial communities analysis in sediment microbial fuel cells with/without Fe (III) oxide addition*. *Bioresource Technology*, 225: 402-408.
- YU B., TIAN J., FENG L. (2017). *Remediation of PAH polluted soils using a soil microbial fuel cell: influence of electrode interval and role of microbial community*. *Journal of Hazardous Materials*, 336: 110-118.
- ZHANG X., CHENG S., LIANG P., HUAN X., LOGAN B. E. (2011). *Scalable air cathode microbial fuel cells using glass fiber separators, plastic mesh supporters, and graphite fiber brush anodes*. *Bioresource Technology*, 102: 372-375.
- ZHENG X., NIRMALAKHANDAN N. (2010). *Cattle wastes as substrates for bioelectricity production via microbial fuel cells*. *Biotechnology*, 32: 1809-1814.
- ZHOU M., CHI M., LUO J., HE H., JIN T. (2011). *An overview of electrode materials in microbial fuel cells*. *Journal of Power Sources*, 196: 4427-4435.

INDICE DEGLI AUTORI

- A**
 Agostoni Emanuele 168
 Aimola Giorgia 133, 144
 Albanese Stefano 15
 Alberti Luca 74
 Alesi Eduard Johann 192, 223
 Ancona Valeria 43, 83, 133, 144, 201
 Andrisani Maria Gabriella 309
 Angelini Paolo 152, 168
 Ariotti Chiara 26
 Arrighi Simone 95
- B**
 Baldi Daniele 12, 267
 Baldini Enrico 95
 Baric Massimiliano 74
 Bartsch Ernst 192, 223
 Basile Annamaria 43
 Bellaria Laura 51
 Beretta Maurizio 213
 Bitetto Claudia 213
 Bonifazi Giuseppe 366
 Borello Domenico 144
 Brogioli Federica 163
 Buratto Stefano 26
- C**
 Campanale Claudia 201
 Campanaro Vincenzo 63
 Cancellieri Francesco 331
 Canepa Paola 51
 Capasso Gennaro 294
 Caputo Maria Clementina 63
 Caracciolo Anna Barra 144
 Carboni Marcello 223
 Carpani Giovanna 74
 Casati Enrico 152
 Cassiani Giorgio 63
 Castro Rachele 331
 Cerutti Gabriele 152, 168
 Checchi Lella 359
 Cherchi Gianpiero 273
 Ciampi Paolo 192, 223
 Cibella Fabio 331
 Citterio Sandra 152
 Comparelli Roberto 133
 Confalonieri Massimiliano 51
 Conte Andrea 181
 Corbelli Vera 294
 Curri Maria Lucia 133
- D**
 Dal Bianco Antonio 217
 D'Antonio Amedeo 15
 De Carlo Lorenzo 63
 De Gaetano Andrea 331
 De Giosa Francesco 294
 Deidda Gian Piero 63
 De Paola Domenico 201
 De Petrini Giacomo 26
 Di Maggio Rosa Maria 340
- F**
 Farina Marcello 253
 Ferraro Angelo 15
- Fiore Antonello 11
 Fiore Carmen 244, 267
 Fiori Chiara 233, 273
 Franceschini Fabrizio 95
 Francioli Alberto 152, 168
 Franzetti Andrea 152
 Frisari Elisabetta Maria 345
- G**
 Gagliardi Gabriele 144
 Galeone Ciro 43, 83
 Garlato Adriano 104
 Gatto Angela 43, 133
 Ghezzi Lisa 95
 Ghirlandi Serena 217
 Giandon Paolo 104
 Giangrasso Marco 378
 Gorla Paola 223
 Grenni Paola 144
 Gresia Davide 244
 Grifoni Martina 168
 Guarino Annalise 15
 Guerra Maurizio 233, 309
- I**
 Iacobini Alessio 267
 Iorio Rita 15
- L**
 Lacarbonara Mina 63
 Lagani Francesco 331
 Ledda Laura 223
 Leone Antonio P. 43, 83
 Leone Natalia 43, 83
 Lisco Stefania 294
 Locaputo Vito 133
 Losacco Daniela 201
 Lucchini Marco 51
- M**
 Majone Mauro 192
 Malinconico Sergio 366
 Mallen Luca 26
 Mancini Marcello 152, 168
 Mangolin Roberto 267
 Mangone Marcello 273
 Manzo Carlo 26
 Marangio Luigi 273
 Marchesi Massimo 74
 Mariani Elisa 309
 Massaro Crescenzo 366
 Mastronuzzi Giuseppe 294
 Maturro Bruna 192
 Mazzitelli Roberto 253
 Mazzola Massimo 233
 Mignelli Claudia 26
 Modugno Simone 331
 Montanino Luigi 287
 Moretti Massimo 294
 Morra Lorenzo 244
 Mulas Gianfranco 309
- N**
 Niccoli Tommaso 26
 Nicodemo Federico 15
- Nicolò Gabriele 26
 Nielsen Christian 223
- P**
 Paglietti Federica 366
 Paparella Silvia 387
 Papini Marco Petrangeli 192, 223
 Pasquale Cinzia 387
 Passatore Laura 181
 Petrini Riccardo 95
 Petruzzelli Gianniantonio 168
 Pezzarossa Beatrice 168
 Pianu Marcello 152, 168
 Piccione Vincenzo 331
 Pietrelli Andrea 144
 Pietrini Ilaria 74
 Pirani Gianluca 116, 378
 Pizzolante Antonio 15
 Poppa Lucia 74
 Porta Gabriella 26
 Preziosi Elisabetta 233
 Puricelli Sara 51
- R**
 Ragazzi Francesca 104
 Ragone Gianluca 15, 287
 Rascio Ida 133
 Rizzo Angela 294
 Robertella Stacul Edoardo 244, 267
 Romano Emanuele 233
 Rosellini Irene 168
 Rossetti Simona 192
- S**
 Sala Orietta 359
 Sammartino Calabrese Valentina 287
 Scannicchio Giovanni 43
 Scardino Giovanni 294
 Scicchitano Giovanni 294
 Sconocchia Andrea 237
 Sconocchia Paolo 237
 Serranti Silvia 366
 Stella Tatiana 152
- T**
 Tarantino Nino 237, 350
 Tenuta Mariano 217
 Tumolo Marina 201
 Turturro Antonietta Celeste 63
- U**
 Uricchio Vito Felice 10, 43, 83, 133, 201, 387
- V**
 Vadalà Giuseppe 387
 Valenzano Eliana 294
 Vecchio Antonella 309
 Velardo Raffaele 294
 Vincenzo Ferrara 144
 Vinci Stefano 267
 Volpe Angela 201
- Z**
 Zaninetta Luciano Massimo 74

Il primo e significativo progetto per festeggiare i 30 anni del sodalizio della Società Italiana di Geologia Ambientale (SIGEA) - APS, è la novità editoriale delle “Monografie di Geologia Ambientale”, che vede la sua prima uscita in questo volume dedicato alla bonifica dei siti inquinati. Questo nuovo progetto editoriale si pone l’obiettivo di trattare argomenti monotematici, aprendo o incrementando la collaborazione con altri enti e istituzioni tecnico-scientifici.

Negli ultimi due anni abbiamo rafforzato la convinzione della centralità della scienza per affrontare sfide complesse e minacce composite: il tema delle bonifiche ambientali che il presente volume affronta, delinea e ci fa comprendere gli elementi di complessità e la necessità di ricorrere a conoscenze multidisciplinari, ai più evoluti progressi della scienza, alle migliori esperienze maturate sui territori, per realizzare le più vincenti convergenze che coniughino vantaggi ambientali, economici e sanitari con l’efficienza degli approcci. Sono proprio le complessità che si manifestano sui territori e in contesti reali che stimolano risposte efficaci, qualità inespresse e che determinano impulsi e accelerazioni di processi innovativi.

La crisi pandemica e le opportunità derivanti dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, consentono di fornire risposte nuove a problemi spesso trascurati e che hanno assunto caratteristiche inedite e, nel settore delle bonifiche, la scienza potrà continuare ad esprimere il meglio di se, anche attraverso un percorso di transizione che punti all’efficienza, alla centralità della persona e alla qualità ambientale.

Tra le righe del volume si riconoscono tracce della nostra identità italiana, i nostri valori, la nostra inventiva e ingegnosità che compongono una grande tradizione anche di intellettualità scientifica, di capacità di ricerca e d’innovazione: elementi che consentono di competere nell’arduo confronto competitivo che ogni giorno si consuma sia sul piano scientifico che con il mondo produttivo di grandi aree economiche extraeuropee. Sul piano nazionale, le politiche particolarmente attente alle questioni dei siti contaminati, sia all’interno di aree industriali, che in ambiti urbani e oggi anche in aree agricole, offrono interessanti opportunità per una crescita sostenuta e qualificata delle imprese che puntino sull’innovazione e sull’ulteriore sviluppo e affinamento di tecnologie, utilizzando investimenti privati e ben mirati investimenti pubblici. In questa direzione, la competitività delle imprese si gioca sulla qualità delle innovazioni e sulla qualità dei prodotti e servizi che ne conseguono, che traggono fattori di successo non tanto dal valore di bilancio delle attività materiali, quanto dal *know-how* e dalle competenze distintive. Ed è con questo spirito costruttivo e collaborativo che acquista sempre più autorevolezza dalla conoscenza scientifica, alimentando la fiducia nella ripresa.

DANIELE BALDI. Nato a Roma, laureato con lode in Scienze Geologiche, vanta una lunga esperienza nella progettazione ed esecuzione di caratterizzazioni e bonifiche ambientali per il comparto suolo e acque sotterranee. È socio fondatore dello Studio Associato Earthwork. Fa parte del comitato scientifico della Rivista “Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater” ed è responsabile per la Società Italiana di Geologia Ambientale - APS dell’area tematica “Caratterizzazione e Bonifica Siti Inquinati”. Oltre la presente pubblicazione ha curato le monografie allegate alla rivista “Geologia dell’Ambiente” *Rischio amianto in Italia: da minerale pregiato a minaccia per la salute e per l’ambiente* e *Bonifica dei Siti Inquinati*.

VITO FELICE URICCHIO. Nato a Bitonto (BA), già Direttore f.f. dell’Istituto di Ricerca sulle Acque del Consiglio Nazionale delle Ricerche che, con le sue sedi di Roma, Bari e Milano, offre supporto tecnico-scientifico all’Unione Europea, al Parlamento, al Governo e alle Regioni. È autore di numerose pubblicazioni e svolge attività scientifiche che affrontano i temi della gestione integrata delle informazioni ambientali, con l’applicazione delle tecnologie della logica Fuzzy e del Data mining. Svolge attività di collaborazione scientifica con contesti accademici e industriali che hanno portato allo sviluppo di sensoristica avanzata. Ha ottenuto importanti riconoscimenti tra cui 2 medaglie del Presidente della Repubblica.

