



UNIVERSITA POLITECNICA DELLE MARCHE

DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA VITA E DELL'AMBIENTE

Corso di laurea in scienze biologiche

Microalghe: il futuro della lotta all'inquinamento

Microalgae: the future of the fight against pollution

Laureando:
Filippo Montesanto

Relatore:
Fabio Rindi

Anno accademico 2023/2024

Introduzione

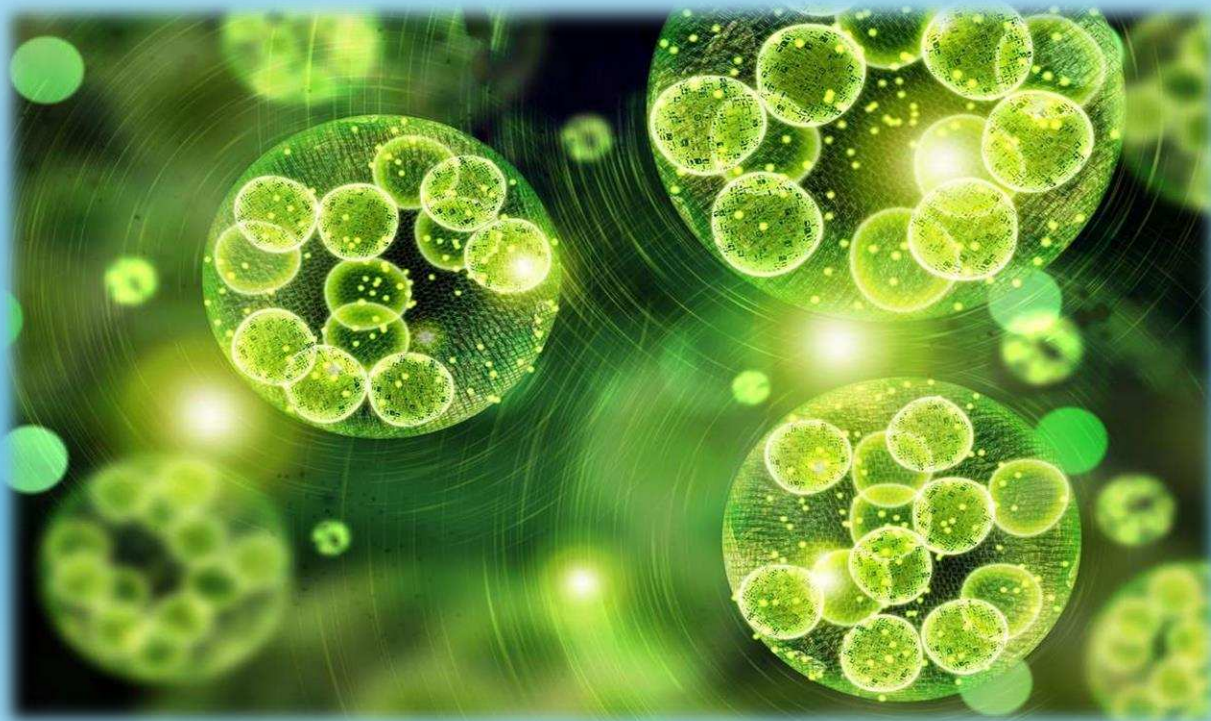
Problema?

L'esponenziale crescita demografica, unita all'abuso di risorse fossili, sta portando sempre di più il pianeta sull'orlo del collasso. L'eccessivo tasso di urbanizzazione, sta notevolmente alzando i livelli di inquinamento di acqua, aria e terra: in Cina, più di 20 milioni di acri utilizzati per l'agricoltura sono contaminati da cadmio e altre sostanze tossiche per l'uomo, e la World Health Organization (WHO) ha evidenziato come, il 9% della popolazione mondiale, viva in zone ove la qualità dell'aria è di molto inferiore ai limiti stabiliti.



Soluzione!

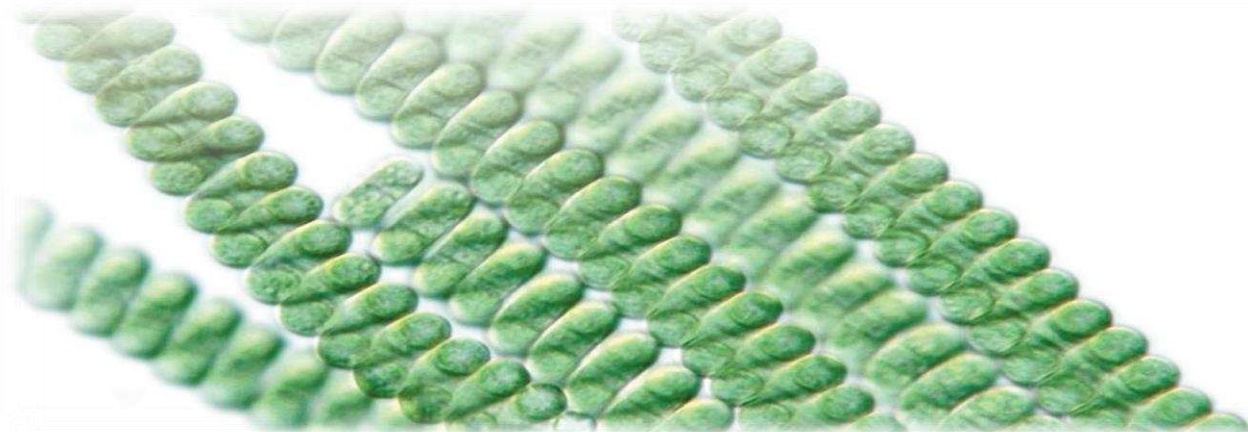
Le microalghe sono organismi autotrofi, di dimensioni microscopiche, sia procariotiche che eucariotiche; riescono a raddoppiare la loro biomassa in sole 24-48 h e hanno un tasso fotosintetico che è 10-50 volte più efficiente di quello delle piante terrestri. Questi esseri viventi hanno anche la capacità di assorbire agenti inquinanti, purificando l'aria e rendendo potabile acqua non potabile; possono anche essere utilizzate come biocarburanti, avendo un impatto nullo sull'ecosistema.



Neutralizzazione del carbonio

Fissazione CO₂

La capacità delle microalghe di trasformare CO₂, acqua e luce solare in carbonio organico è 10-50 volte maggiore di quella posseduta dalle piante terrestri: 1 tonnellata di biomassa è in grado di fissare 1.88 tonnellate di CO₂; inoltre è stato dimostrato che alcune tipologie di alghe riescono a crescere e svolgere fissazione del carbonio anche in ambienti ove la concentrazione di CO₂ è massima, come per la *Spirulina*.



La fissazione della CO₂ è però influenzata da fattori come:

- **Temperatura:** range favorevole che varia tra i 15 e i 30 C°;
- **pH:** valori ideali si aggirano intorno a 6-8.76;
- **Durata fotoperiodo:** un ciclo luce/buio di 12:12 o di 16:8 h è ottimale;
- **Intensità luminosa:** non deve superare il punto di saturazione, altrimenti si creano i ROS, che vanno a danneggiare la cellula;
- **Lunghezza d'onda:** le più indicate sono quelle nel rosso e blu.



Energie alternativa

Biodiesel

- Il biodiesel è una miscela di acidi grassi ottenuti dalla trans-esterificazione di oli vegetali, grassi animali, ecc... Nel nostro caso specifico, le microalghe possono essere considerate la terza e più sostenibile generazione di biodiesel, in quanto non richiedono terre arabili (a differenza di altre tipologie di piante terrestri atte a questo scopo), hanno un tasso di crescita estremamente elevato e con esso anche la quantità di biomassa e olio in essa contenuto (fino addirittura al 30%).

Combustibili alcoolici

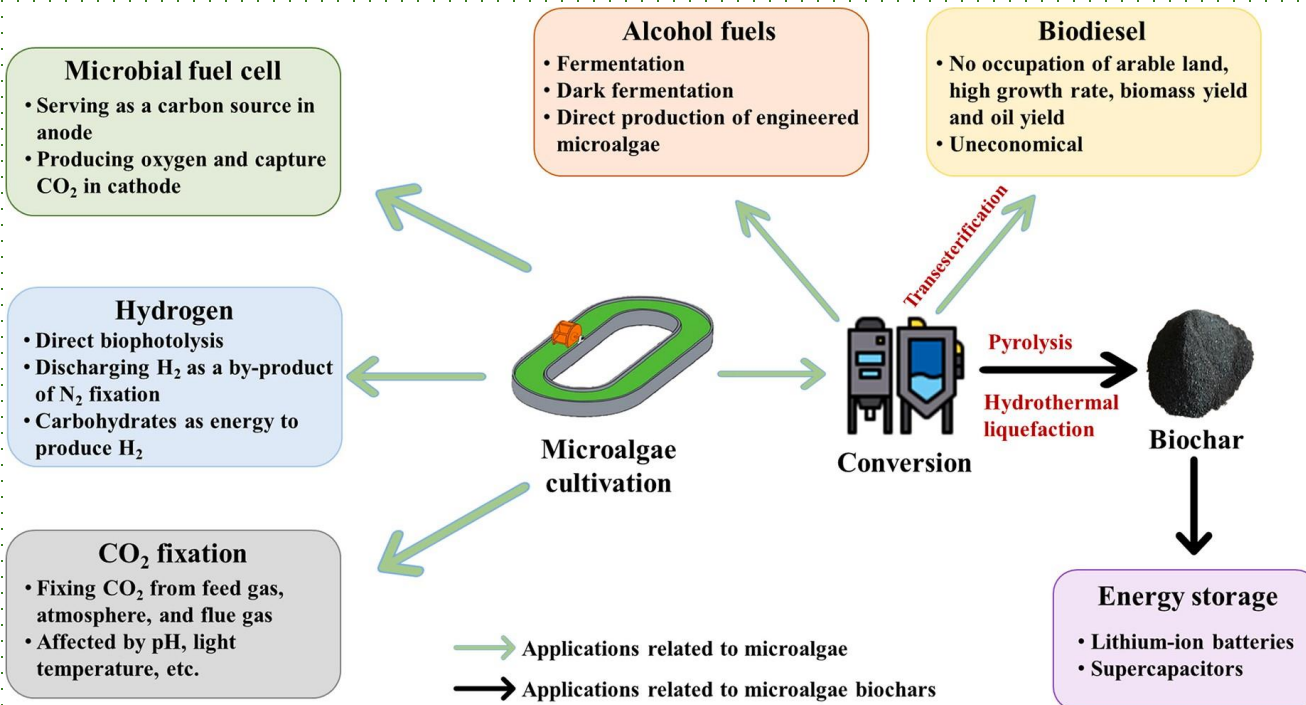
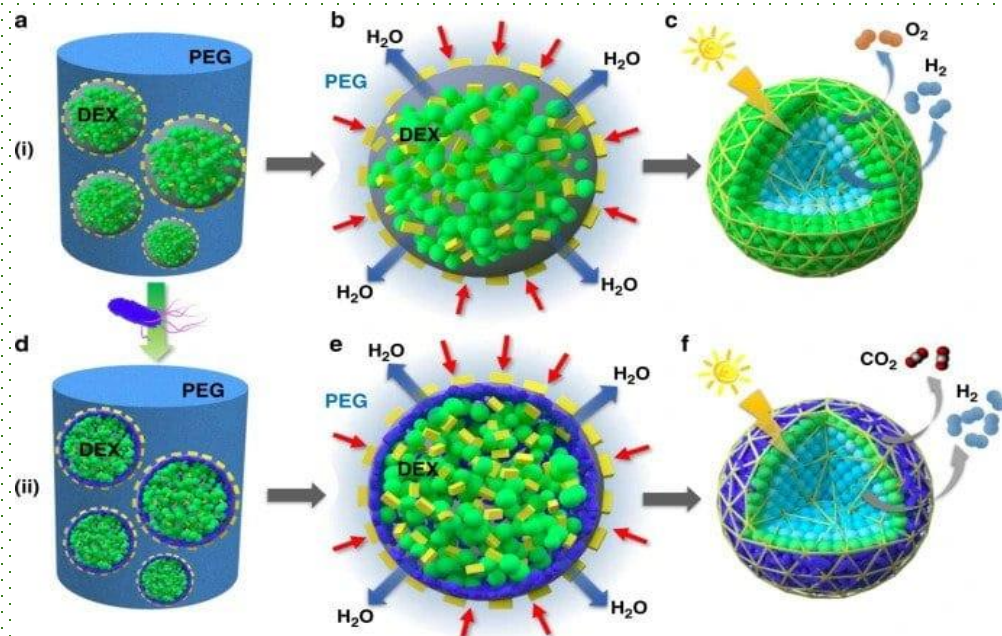
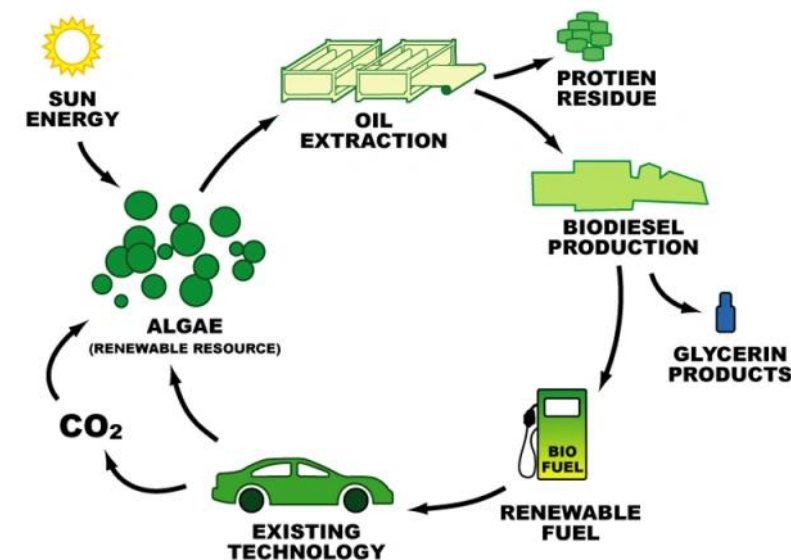
- Il bioetanolo microalgale appartiene alla terza generazione di bioetanoli (come nel caso del biodiesel). La parete cellulare delle microalghe, essendo priva di lignina, ha i legami idrogeno della sua cellulosa più deboli rispetto a quelli delle piante terrestri, conseguentemente è molto più semplice trasformare la sua biomassa in zuccheri semplici, che verranno poi fatti fermentare per produrre il combustibile (si predilige la scelta di alghe con alto contenuto di carboidrati, come *Chlorella*, *Dunaliella*, *Chlamydomonas* o *Spirulina*).



Energie alternative

Produzione fotobiologica di idrogeno

Alcune microalghe sono in grado di produrre direttamente o indirettamente, idrogeno, attraverso la biofotosi. Durante il processo diretto, le microalghe sfruttano l'energia solare per scindere le molecole d'acqua in protoni idrogeno e ossigeno; i protoni ottenuti vengono combinati con gli elettroni della ferrodossina e, tramite l'enzima ferrodossina idrogenasi, vengono trasformati in idrogeno puro. Nel processo indiretto invece, viene utilizzata l'energia ricavata dai carboidrati prodotti dalla fotosintesi per trasformare protoni idrogeno in idrogeno: nei cianobatteri non azoto-fissatori viene utilizzato l'enzima idrogenasi, mentre in quelli azoto-fissatori (che sfruttano l'azoto atmosferico) utilizzano l'enzima nitrogenasi, producendo idrogeno come sottoprodotto.



Conversione energetica ed immagazzinamento

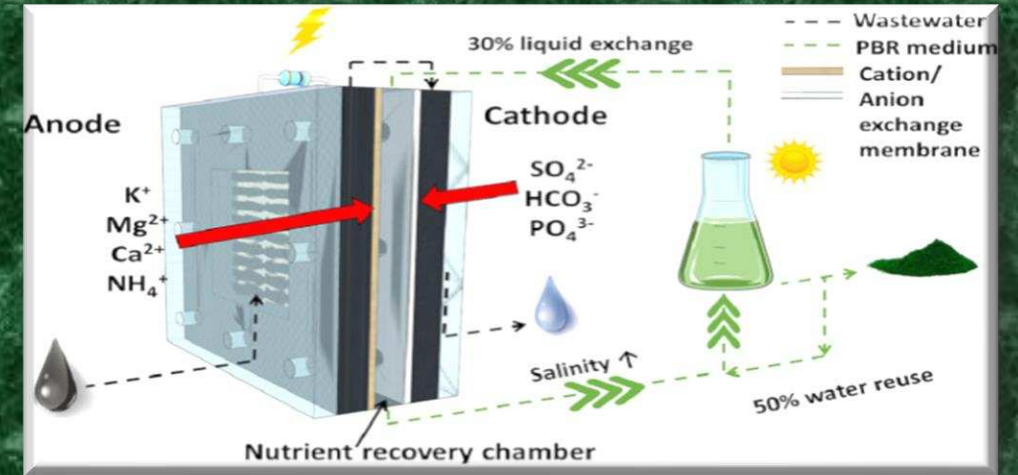
Conduttore microbico

- a) Le microalghe possono essere considerate un conduttore microbico grazie alla loro capacità di trasferire elettroni extracellulari; se introdotti in una “camera anodica”, sarebbero in grado di generare elettricità agendo da substrato; se invece venissero inseriti in una “camera catodica”, produrrebbero ossigeno attraverso la fotosintesi, accettando elettroni provenienti dall’anodo, diminuendo così il costo meccanico di areazione. Inoltre riescono ad eliminare agenti inquinanti dall’acqua.



Super-condensatori

- c) I super-condensatori invece, sono noti per: la loro grande stabilità, la loro alta densità di carica, il loro ampio range di temperatura nel quale agiscono, e infine per il loro essere ecologici. Utilizzando il carbonio come elettrodo, le microalghe possono contribuire alla capacità performante (ampliandola) e aumentando la densità di corrente.



Batterie

- b) Le microalghe sono caratterizzate da una struttura ricca di pori e di eteroatomi, ed avendo anche un rapporto superficie/volume elevato, sono ideali per favorire l’accumulo degli ioni litio, come anche il loro successivo trasferimento; inoltre hanno anche una capacità ritentiva del 95% dopo oltre 500 cicli a 1 C, aumentando così la performance della batteria e donandole una durata maggiore, rendendo il tutto decisamente più sostenibile.



Rimedio all'inquinamento

ARIA

ACQUA

Gli inquinanti più comuni che possiamo trovare derivano per la maggior parte da NO_x e SO_x . Le microalghe assorbono CO_2 attraverso la fotosintesi e utilizzano azoto e zolfo per la loro crescita. Per il particolato invece, le microalghe sono in grado di catturare i suoi ioni attraverso la loro superficie carica negativamente, o attraverso la produzione di ioni negativi generati dalla fotosintesi (come O_2^-).

AZOTO

ZOLFO

Diffusione
semplice

Disciolto in
fase acquosa

Convertito in
 SO_4^{2-}

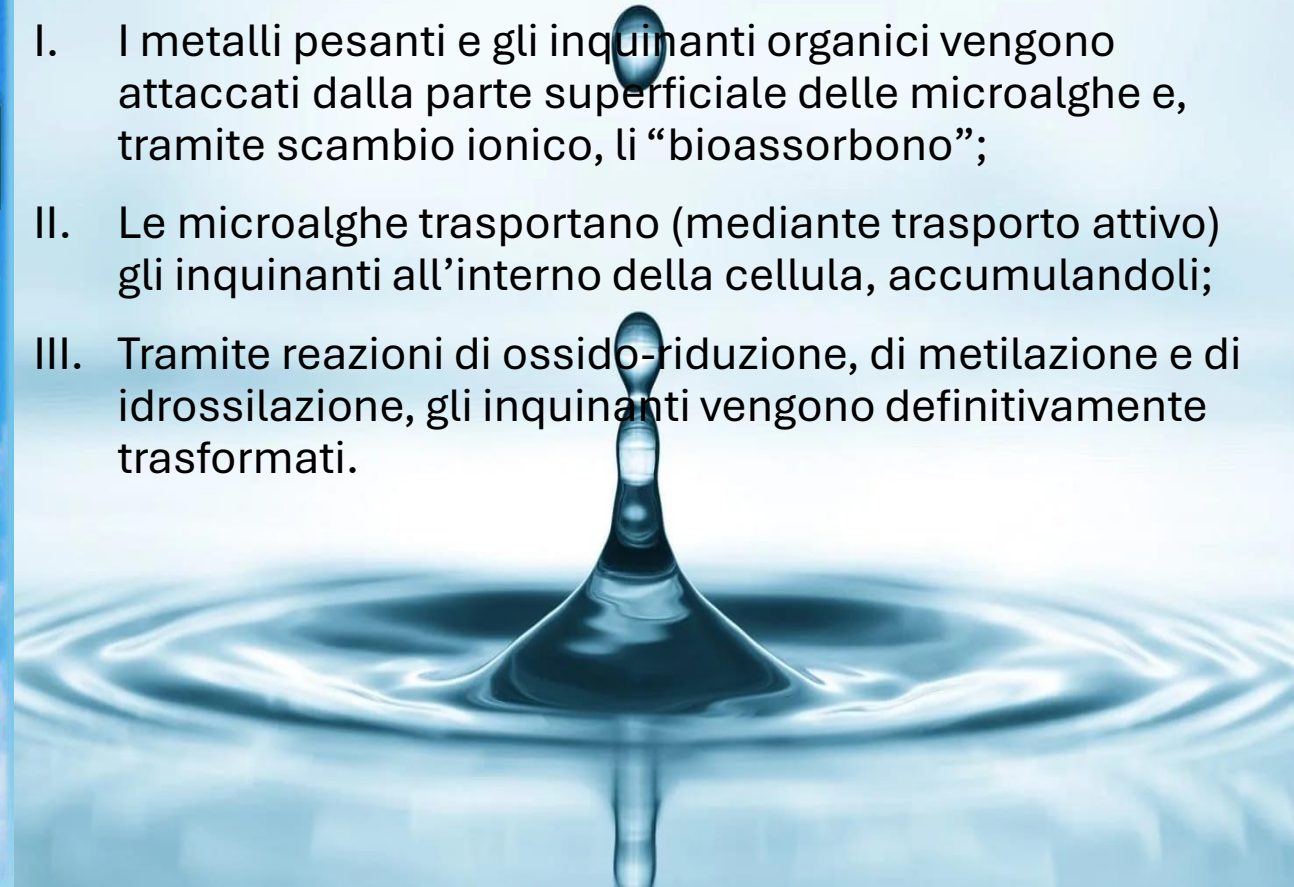
Assimilazione

Ossidazione e
integrazione

Assorbito
tramite
membrane

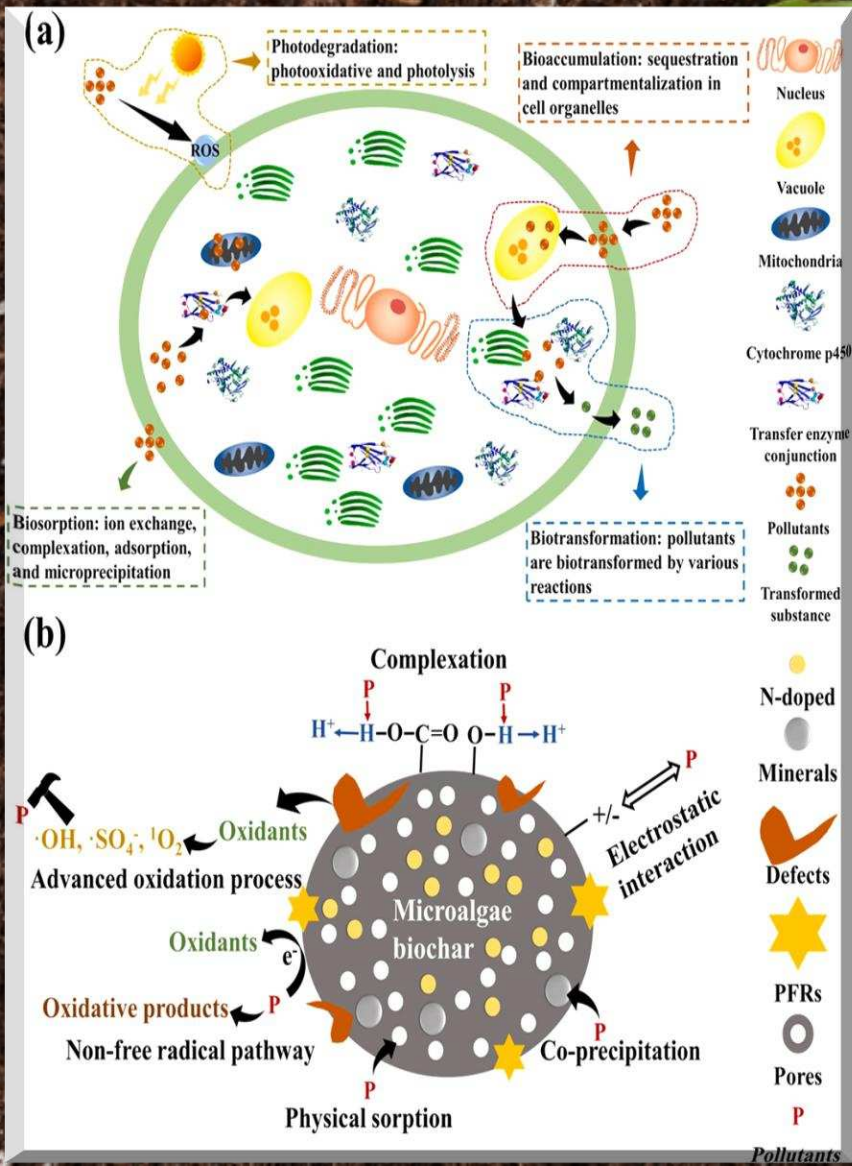
Le microalghe sono in grado di trarre vantaggio dal carbonio (sia organico che inorganico), dall'azoto e dal fosforo presenti nell'acqua non potabile, inoltre hanno anche la capacità di rimuovere i metalli pesanti e gli inquinanti organici attraverso un meccanismo che si può suddividere in tre passaggi:

- I. I metalli pesanti e gli inquinanti organici vengono attaccati dalla parte superficiale delle microalghe e, tramite scambio ionico, li "bioassorbono";
- II. Le microalghe trasportano (mediante trasporto attivo) gli inquinanti all'interno della cellula, accumulandoli;
- III. Tramite reazioni di ossido-riduzione, di metilazione e di idrossilazione, gli inquinanti vengono definitivamente trasformati.

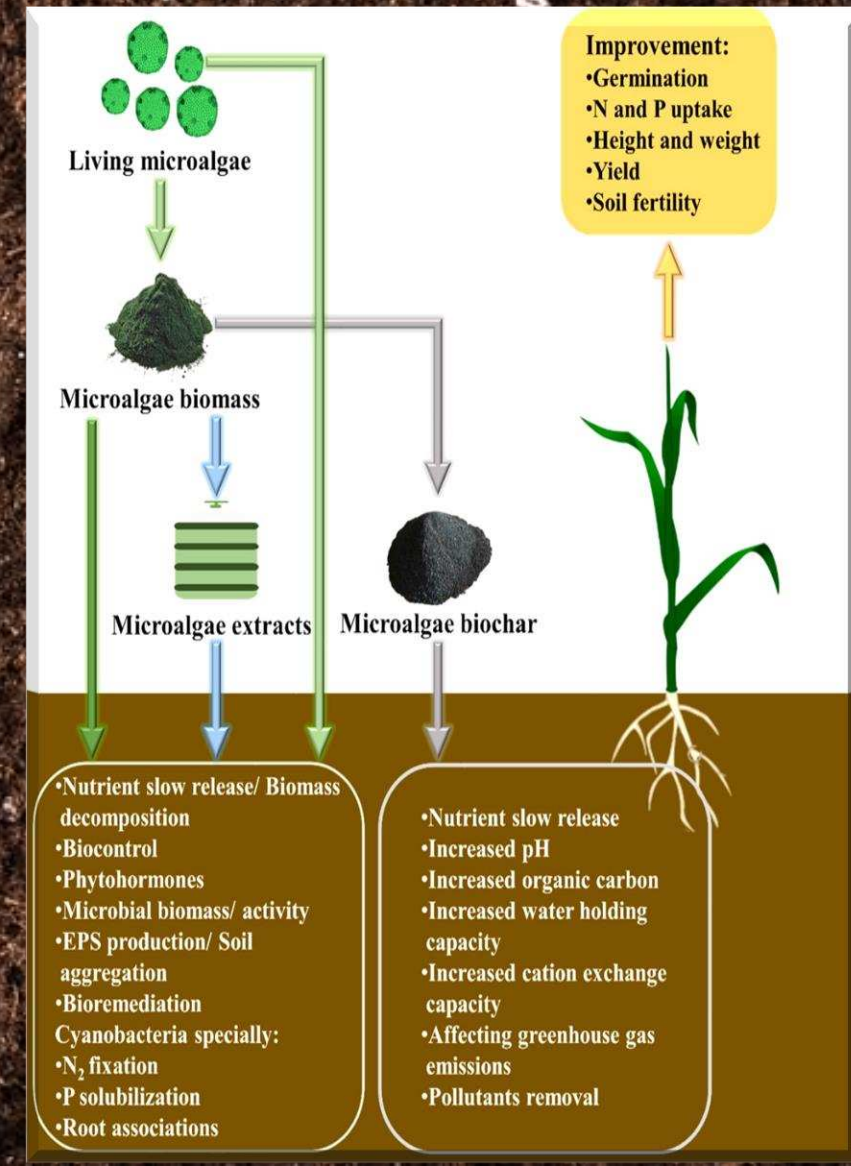


Rimediao all'inquinamento

Suolo



Le microalghe hanno la capacità di purificare il suolo dagli agenti inquinanti e fungere contemporaneamente da pesticidi e fertilizzanti naturali: attraverso un loro inserimento nel terreno, o tramite una polvere essiccata derivante da queste ultime, o ancora per mezzo di estratti. In aggiunta, alcune microalghe possono rilasciare esopolisaccaridi, i quali incrementano la quantità di carbonio nel suolo migliorandone la sua stabilità, oltre a emettere fitormoni, i quali fungono da deterrente naturale contro gli insetti; persino da morte sono utili, perché dalla loro decomposizione le piante terrestri acquisiscono i nutrienti da esse derivanti.



Effetti tossici degli inquinanti sulle microalghe

Problematiche

Le microalghe sono degli esseri viventi, e quindi l'esposizione prolungata ad alte concentrazioni di agenti inquinanti le può danneggiare irreparabilmente. Nel caso dei metalli pesanti gli effetti sono:

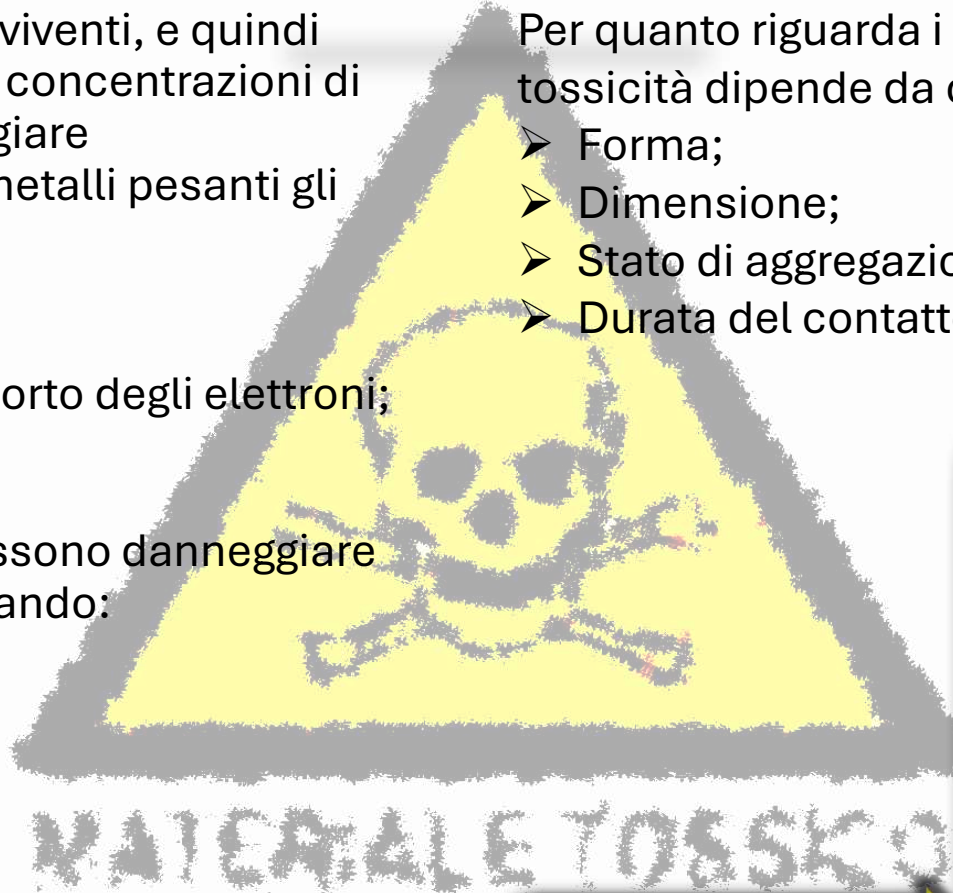
- ❖ Inibire la fotosintesi;
- ❖ Distruggere il sistema di trasporto degli elettroni;
- ❖ Ridurre la sintesi di pigmenti.

Anche gli inquinanti organici possono danneggiare gravemente le cellule, determinando:

- Danni di tipo ossidativo;
- Arresto del ciclo cellulare;
- Apoptosi.

Per quanto riguarda i nanomateriali invece, la loro tossicità dipende da caratteristiche come:

- Forma;
- Dimensione;
- Stato di aggregazione;
- Durata del contatto con le microalghe.



Questi microrganismi hanno però sviluppato, lungo la loro storia evolutiva, dei meccanismi per far fronte alla tossicità degli inquinanti e allo stress ossidativo: enzimi antiossidanti come la superossido dismutasi, la catalasi e la perossidasi, che hanno il compito di ridurre la tossicità; va fatta menzione anche degli antiossidanti non enzimatici, come il glutathione, la vitamina C e i carotenoidi, utili a mitigare i danni provocati dai ROS.

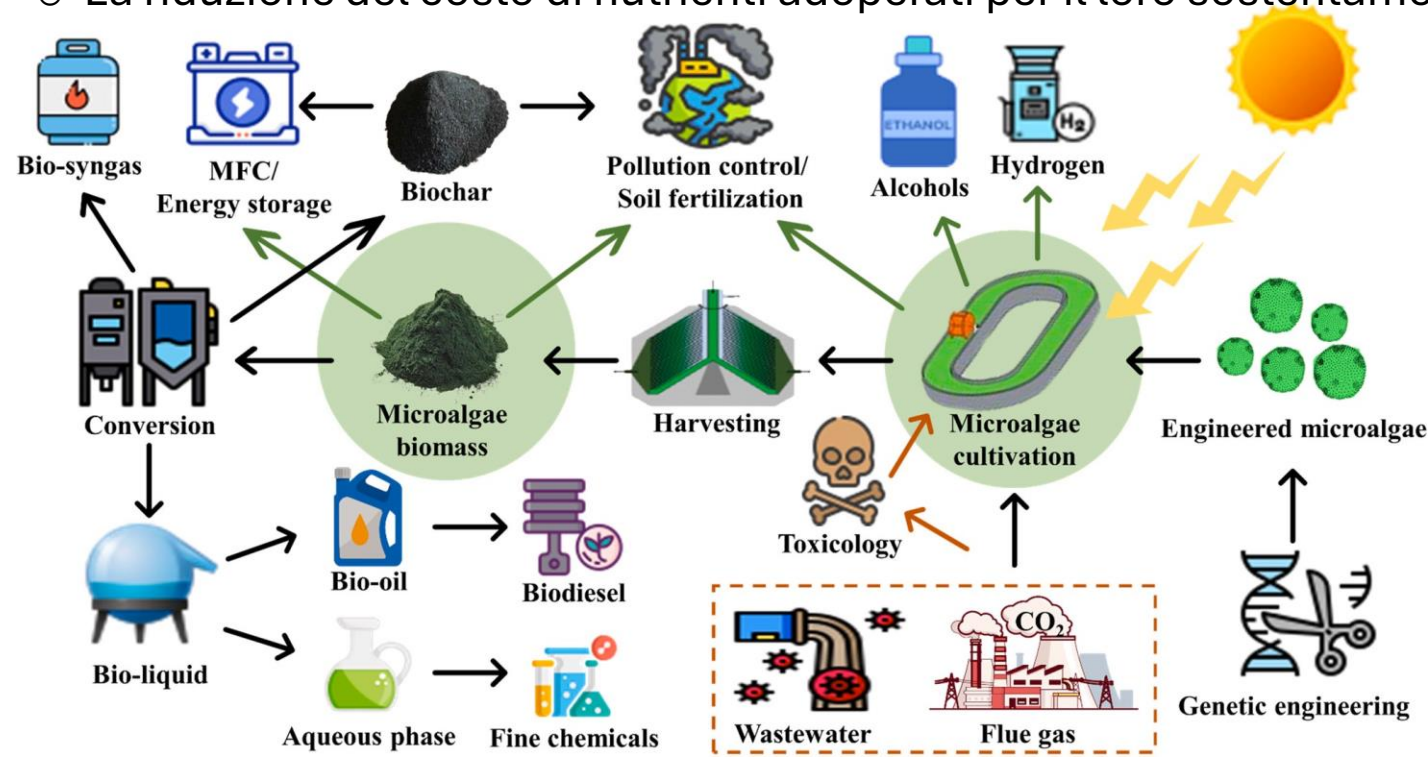
Risoluzioni

Valutazione del ciclo vitale e analisi economiche

Dopo attente analisi tecniche ed economiche e valutazioni sul loro ciclo vitale, è emerso che l'utilizzo delle microalghe non solo porterebbe benefici economici, ma ridurrebbe anche l'impatto ambientale dell'industria dei biocarburanti.

I vantaggi derivanti sono:

- L'utilizzo di acqua inquinata per la loro crescita;
- Il risparmio sulla purificazione dell'acqua impiegata;
- L'assenza di spreco di acqua potabile;
- La riduzione del costo di nutrienti adoperati per il loro sostentamento.



Gli svantaggi derivanti invece, consistono in:

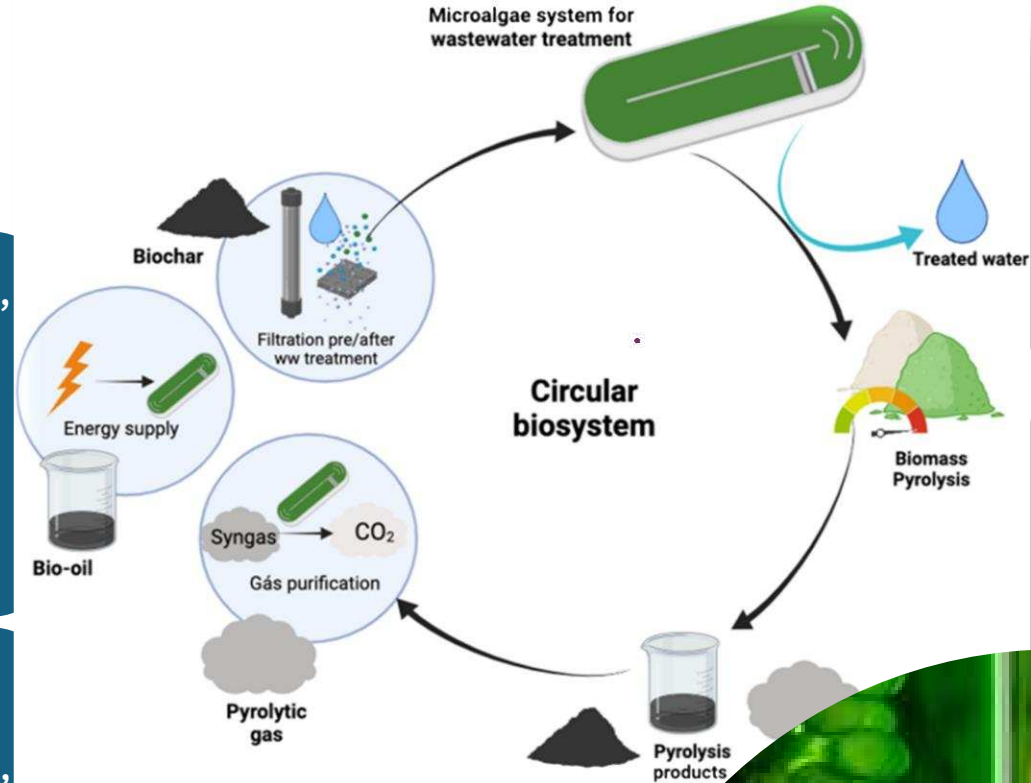
- Un certo grado di pretrattamento fatto per gli inquinanti presenti nei gas derivati dalla combustione;
- Un certo grado di pretrattamento fatto per gli inquinanti presenti nell'acqua non potabile;
- Il monitoraggio, atto ad impedire un eccessivo accumulo di tossicità all'interno della cellula algale.

Sfide e direzioni future

L'attenzione posta alle microalghe è sempre maggiore, anche se ci sono ancora sfide che vanno affrontate prima di implementarle a livello globale: come gli effettivi costi economici che le tecnologie di pretrattamento avrebbero per abbassare il livello di tossicità degli inquinanti.

L'uso combinato di alghe e batteri, come anche l'impiego di microalghe ingegnerizzate geneticamente, sembra stia dando ottimi risultati per quanto riguarda il rendimento di questi microrganismi e neutralizzare un loro eventuale tasso di patogenicità.

Promettente sembra anche essere l'utilizzo di derivati algali, come i biochar: composti ottenuti tramite pirolisi della biomassa algale in grado di assorbire o degradare (attraverso la formazione di specie radicali reattive con l'ossigeno) direttamente gli agenti inquinanti.



Applicazioni innovative attuali

Le microalghe sono state oggetto di numerosi studi e ricerche, portando anche a risultati concreti: a Belgrado nasce il primo “albero liquido”, ossia un compatto bioreattore contenete microalghe, che va a sostituire il lavoro svolto da una normale pianta, con un’efficienza che può essere anche 50 volte superiore; in Arabia Saudita popola l’Air Bubble, una struttura gonfiabile nelle cui pareti sono presenti microalghe, atte a purificare l’aria e creare un ambiente immersivo nel quale le persone possano vedere come agiscono questi microorganismi; stessa tecnologia ripresa a Varsavia, ove è stato creato un parco giochi all’interno di una serra urbana: un’architettura cilindrica in legno rivestita con una membrana in ETFE posta a protezione di 52 reattori di vetro contenenti 520 litri di colture vive di microalghe *Chlorella*, in grado di filtrare un flusso di aria inquinata di 200 L/min.



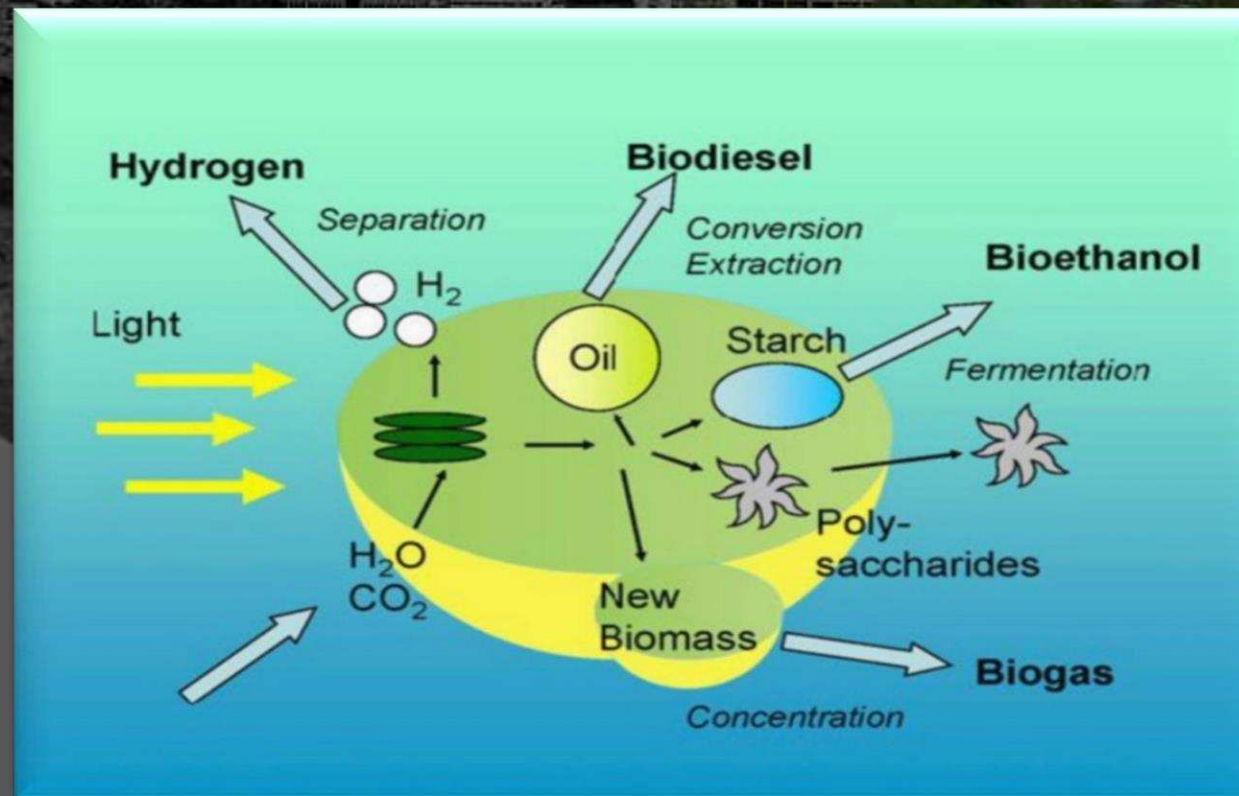


Applicazioni innovative attuali (Italia)

Anche in Italia stanno nascendo sempre più progetti legati alle microalghe: all'Expo di Dubai, all'interno del padiglione italiano erano presenti 5 grandi vasche contenenti *Spirulina*, *Dunaliella* e *Haematococcus*, tre specie di microalghe che avrebbero purificato l'aria dalla CO₂ emessa dai visitatori; persino nella settimana del design di Milano un'azienda ha presentato purificatore d'aria per ambienti: alto 1 m, composto di materiali sostenibili, contenente un'ampolla della capienza di 10 L nella quale è posta una miscela di microalghe, tenuta in movimento per favorire la loro crescita.

Conclusioni

Le microalghe e i biochar da esse derivanti, possono effettivamente portare un grande vantaggio nella lotta all'inquinamento: la loro capacità di fissare la CO_2 dall'atmosfera, dai gas di scarico e da quelli di combustione (con un range che va da 0.016 a $1.2 \text{ g CO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$), risulta essere un'arma potente; inoltre, la coltivazione basata sull'utilizzo di acque inquinate rende l'impiego e il mantenimento di questi microorganismi estremamente sostenibile. Oltretutto, i biochar sono considerati un'ottima fonte di accumulo e di conversione di energia rinnovabile, che ben si integrerebbero con l'industria dei biocarburanti moderna. Certamente ci sono ancora molte sfide da affrontare e superare, che necessiteranno altri studi e ricerche approfondite, ma è anche innegabile ammettere che, finalmente, la strada per risanare definitivamente il nostro pianeta non è più una semplice utopia.



Articoli

- Hou C., Zhao J., Huang B., Zhou X., Zhang Y. 2024. Microalgae-based technologies for carbon neutralization and pollutant remediation: a comprehensive and systematic review. *Resources, Conservation and Recycling* 202, March 2024, 107323.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107323>