



Laura Pezzolesi^a, Chiara Samori^b

^aDipartimento di Biologia, Geologia e Scienze Ambientali “BiGEA”

Università di Bologna

laura.pezzolesi@unibo.it

^bDipartimento di Chimica “Giacomo Ciamician”

Università di Bologna

chiara.samori3@unibo.it

BIOCOMBUSTIBILI DA ALGHE: ALTERNATIVA SOSTENIBILE?

Grazie alla loro fisiologia e ai potenziali vantaggi socio-economici, le microalghe hanno ricevuto molta attenzione come materia prima per biocombustibili di terza generazione. Tuttavia, la sostenibilità economica-ambientale dell'intero ciclo di vita dei biocombustibili da alghe è largamente dibattuta e le tecnologie disponibili per la coltivazione e la trasformazione delle microalghe in vettori energetici non sono ancora commercialmente competitive.

Gli organismi fotosintetici includono piante superiori, alghe (distinte in microalghe e macroalghe) ed alcuni batteri fotosintetici (es. cianobatteri), accomunati dalla capacità di produrre biomassa (polisaccaridi, proteine, lipidi) tramite conversione di energia solare, acqua ed anidride carbonica in energia chimica. Tale capacità è definita come “efficienza fotosintetica” ed è il parametro più importante per valutare la produttività della biomassa in quanto espressa come l’energia immagazzinata come nuova biomassa per unità di energia luminosa incidente. Le microalghe, in particolare, sono organismi eucarioti con dimensioni da pochi a centinaia di micrometri, in grado di effettuare la fotosintesi più efficientemente delle piante terrestri (10-20% vs 1-2% [1]) grazie alla semplice struttura cellulare. Ciò consente una duplicazione cellulare fino a cento volte più rapida di quella delle piante terrestri, con tassi di crescita della biomassa anche inferiore ad un giorno [2].

Le microalghe e i cianobatteri sono sfruttati da secoli dall’uomo per scopi alimentari e nutrizionali; il caso più rilevante è quello di *Arthrospira platensis*, nota come Spirulina, già utilizzata come integratore alimentare sia dagli Aztechi, che la raccoglievano dal lago Texcoco in Messico [3], sia dalle popolazioni Kanembu del Lago Ciad [4]. Le prime coltivazioni commerciali di microalghe e cianobatteri risalgono al 1890 [5]. I phyla più coltivati, soprattutto in Paesi come USA, Israele, Cina, e Giappone sono Cyanobacteria, Rhodophyta, Euglenozoa,

Bacillariophyta e Chlorophyta, mentre i generi più noti soprattutto per le loro applicazioni in ambito alimentare, nutraceutico, mangimistico sono *Chlorella* (la prima microalga ad essere coltivata nel 1960 in Giappone), *Dunaliella*, *Haematococcus*, *Scenedesmus*, *Phaeodactylum*, *Nannochloropsis*, ed *Isochrysis*, in virtù delle loro caratteristiche nutrizionali e della loro capacità di produrre composti ad alto valore aggiunto (es. carotenoidi, ficopigmenti, proteine, e acidi grassi polinsaturi) [6].

Ad oggi la produzione di biomassa microalgale a livello mondiale è di circa 9.000 t/anno, con un valore economico di circa 1 miliardo dollari/anno [7]. La produzione di biomassa algale sta aumentando in tutto il mondo e ha raggiunto quasi 33 Mt in peso fresco (10 Mt in peso secco) nel 2016, di cui lo 0,6% prodotta in Europa (compresi Regno Unito, Islanda e Norvegia) (Fig. 1). Le aziende produttrici di alghe europee sono principalmente sviluppate

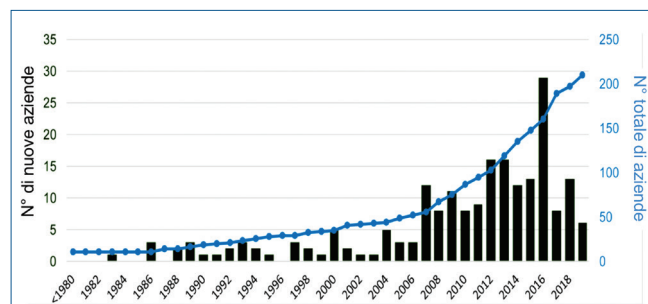


Fig. 1 - Trend di crescita del numero di aziende europee operanti nel settore delle micro e macroalghe dal 1926 a oggi (adattata da [8])

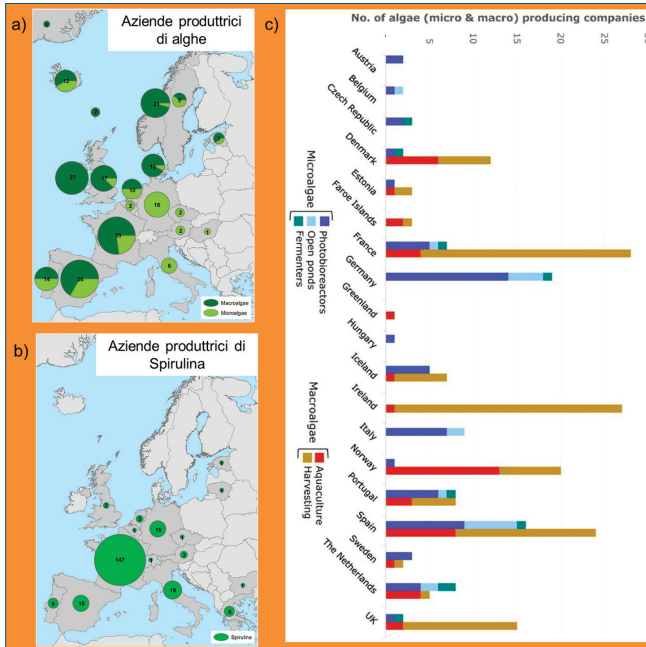
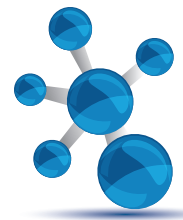


Fig. 2 - Aziende produttrici di a) macro e microalghe e b) spirulina in Europa e c) suddivisione per tecnologia di produzione (adattata da [8])

in Francia, Spagna, Germania, Danimarca, Irlanda, Norvegia e UK (Fig. 2) ed includono sia macroalghe (67%) che microalghe (33%) [8]. In Cina esistono più di 60 impianti di coltivazione su scala commerciale in fase completa, che coprono circa l'80% della produzione totale mondiale di biomassa secca.

Se l'utilizzo delle microalghe in ambito nutrizionale/alimentare è ormai una realtà consolidata, è solo in tempi relativamente recenti (a partire dal 1950) che la loro possibile applicazione in ambito energetico ha riscosso un notevole interesse, sia nel mondo accademico che in quello industriale. Tale interesse risiede nella possibilità di sviluppare biocombustibili di terza generazione (Fig. 3), come alternativa alla prima generazione di biocombustibili ottenibili da colture in competizione con l'uso alimentare della risorsa, come il biodiesel da piante oleaginose e il bioetanolo da piante amidacee o saccarifere, ed alla seconda generazione, rappresentata da biocombustibili ottenibili da biomasse di scarto o colture non destinate ad alimentazione umana. I benefici socio-economici ed ambientali potenziali relativi all'utilizzo di micro e macroalghe rispetto alle piante terrestri includono la non competizione

con l'uso alimentare della risorsa, la possibilità di utilizzare aree marginali non coltivabili, ad esempio le zone desertiche (le regioni climatiche più adatte alla coltivazione di microalghe sono tutte quelle con una temperatura media annuale maggiore di 15 °C) e la possibilità di integrare la produzione di biomassa algale e la sintesi di biocombustibili con altre attività generanti profitto, come la fitodepurazione delle acque reflue.

Nel 1978, il Dipartimento per l'Energia degli Stati Uniti (DOE) lanciò l'Aquatic Species Program (1978-1996) [9] in risposta alla crisi energetica della metà degli anni Settanta, orientato allo sfruttamento delle micro e macroalghe come fonti di energia, sia in termini di bio-idrogeno che di combustibili

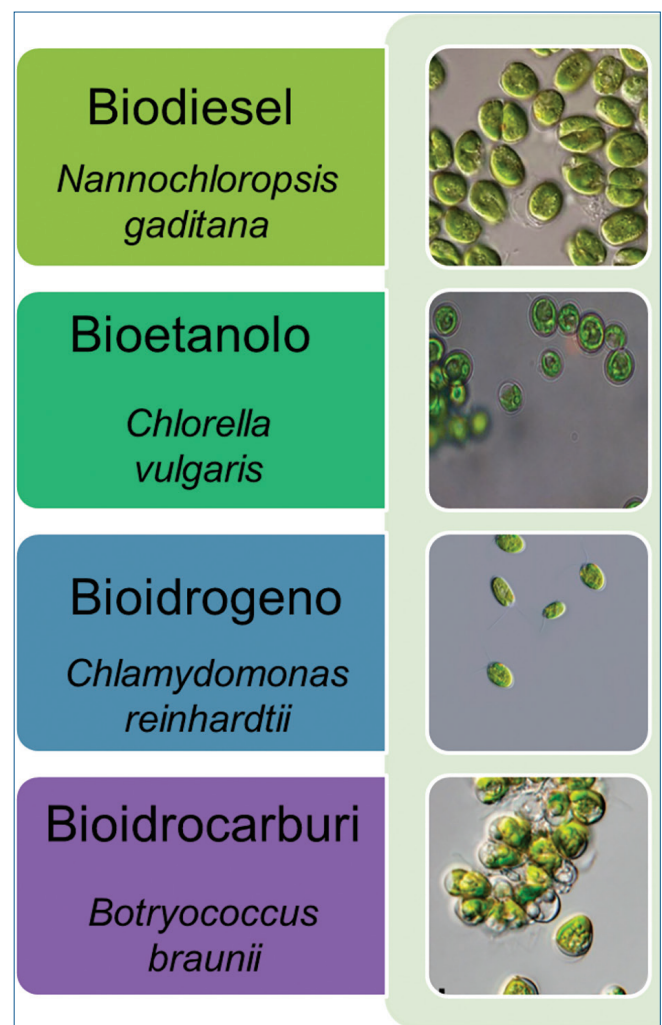


Fig. 3 - Biocombustibili di 3ª generazione ottenibili da microalghe

Biomassa	Contenuto di olio nei semi (wt%)	Resa in semi (t/ha)	Resa in olio (t/ha)
Soia	18-20	0,7-3,6	0,2-0,7
Colza	35-40	0,7-3,4	0,2-1,4
Girasole	40-48	0,5-2,5	0,2-1,3
Palma da olio	30-40	10-12	3,5-4,5
Microalghe (crescita non ottimizzata)	30 ^a	15-25 ^b	4,5-10,5
Microalghe (crescita ottimizzata)	70 ^a	15-25 ^b	7,5-17,5

^aContenuto lipidico su peso secco dell'alga; ^bresa in biomassa secca

Tab. 1 - Produttività di biomassa e di olio ottenibili da diverse colture oleaginose e microalghe [10]

liquidi per il trasporto, come il biodiesel. Tra il 1980 e la metà degli anni Novanta, la ricerca è stata in gran parte focalizzata sull'identificazione di ceppi ad alto contenuto lipidico, a cui è seguita l'applicazione dell'ingegneria genetica per migliorarne la produttività. Il grande interesse verso i lipidi microalgali è stato inizialmente supportato dalle produttività di olio stimate in confronto alle produttività delle principali piante oleaginose terrestri (Tab. 1), e dal fatto che tali produttività possano essere potenziate e modulate al variare delle condizioni di crescita. Tra i principali fattori ritenuti in grado di aumentare le produttività lipidiche si hanno:

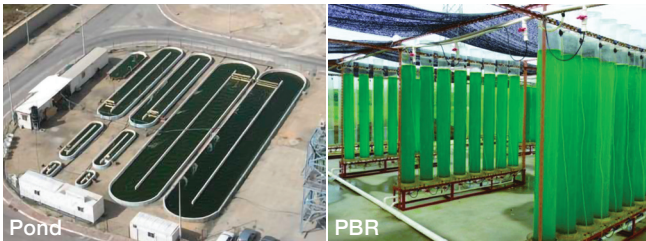
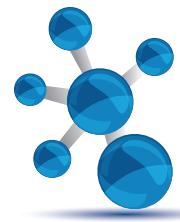
- la limitazione da nutrienti (azoto, o nel caso di diatomee anche silicati) che può portare ad un contenuto lipidico superiore al 40%;
- parametri abiotici come l'alto irraggiamento, efficace per promuovere l'accumulo di lipidi neutri, diretti precursori del biodiesel (al contrario il basso irraggiamento stimola l'accumulo di lipidi polari associati alle membrane cellulari, come i glicolipidi e i fosfolipidi).

Assumendo dei valori di produzione di biomassa microalgale pari a 15-25 t/ha/anno, e 30-70% di contenuto lipidico nelle cellule (rispettivamente, senza ottimizzare le condizioni di accumulo di lipidi oppure ottimizzandole), la produzione lipidica ottenibile sarebbe di 4,5-17,5 t/ha/anno, 2-3 ordini di grandezza superiore rispetto a quella di piante oleaginose quali soia, colza e girasole, e in linea con la produttività della palma da olio. Tali produttività si tradurrebbero in consumi di suolo nettamente

inferiori nel caso in cui le microalghe fossero utilizzate per produrre combustibili liquidi per il trasporto come il biodiesel: considerando che l'attuale produzione di biodiesel a livello globale è circa 35 Mt/anno [11], utilizzando olio di soia come materia prima sarebbero necessari 50-175 Mha di suolo, contro 3-8 Mha nel caso fossero utilizzate microalghe con crescita non ottimizzata o 2-5 Mha nel caso fossero utilizzate microalghe con produzione lipidica ottimizzata (per confronto la superficie agricola in Italia è di circa 12 Mha) [12]. Tuttavia, sebbene alcuni aspetti della

produzione di biodiesel da microalghe siano sembrati promettenti e favorevoli rispetto all'uso di oli vegetali, i costi previsti per la produzione di questi "biocombustibili di terza generazione" sembrano nettamente superiori ai prezzi del petrolio, anche con le ipotesi più ottimistiche. E nonostante le microalghe siano potenzialmente fonte anche di altri biocombustibili liquidi come il bioetanolo, poiché ricche di polisaccaridi (fino al 70% come amido nei cloroplasti e cellulosa nella parete cellulare di molte specie) non associati a lignina (uno dei maggiori ostacoli alla fermentazione di biomasse lignocellulosiche), ad oggi la ricerca è ancora prevalentemente focalizzata sulla trasformazione dei lipidi microalgali in biodiesel. L'Aquatic Species Program si concluse nel 1996 indicando che [9]:

- 1) gli unici sistemi di coltivazione in grado di essere economicamente competitivi per la produzione di prodotti a basso costo e largo volume (low value high volume, LVHV) come i combustibili sono gli *open ponds*; i fotobioreattori (sistemi chiusi, PBR) sembrano essere sistemi idonei per la produzione di composti chimici ad alto valore (high value low volume, HVLV) con applicazioni nell'ambito cosmetico o nutraceutico (Tab. 2). I costi di produzione, di mantenimento, di pulizia e di costruzione dei PBR sono circa un ordine di grandezza superiore rispetto a quello degli *open ponds* (circa 100 dollari/m²) [13];
- 2) mantenere colture monospecifiche di alghe produttrici di lipidi in *open ponds* sembra irrealistico, considerando che tali sistemi sono proni alle contaminazioni e in genere le specie accumulatrici non



Parametri	Confronto
Rischio di contaminazione	Pond > PBR
Produttività	PBR > Pond
Perdite di H ₂ O	PBR ~ Pond
Perdite di CO ₂	Pond > PBR
Inibizione da O ₂	PBR > Pond
CAPEX e OPEX	PBR > Pond
Controllo di processo	PBR > Pond

Tab. 2 - Vantaggi e svantaggi dei due principali approcci di coltivazione microalgale, gli *open ponds* e i fotobioreattori (PBR)

sono robuste/resistenti e in grado di crescere con produttività elevata al variare delle condizioni ambientali e climatiche (Tab. 2); tali sistemi risultano idonei solo per la coltivazione di un numero limitato di specie che riescono a crescere in condizioni ambientali selettive (es. *Spirulina*, *Chlorella* e *Dunaliella*), in quanto influenzati fortemente dalle caratteristiche climatiche del luogo. Nei sistemi chiusi come i fotobioreattori, invece, può essere coltivata una singola specie algale, sia in ambienti esterni che interni, garantendo un basso rischio di contaminazione, ed offrendo un migliore controllo della fisiologia cellulare e conseguente maggiore crescita (34-61 t/ha/anno vs 15-25 t/ha/anno per gli *open ponds*), condizioni di coltivazione riproducibili, e basse perdite di CO₂ [13]; 3) l'aumento del contenuto di trigliceridi nelle microalgaie grazie a crescite effettuate in condizioni tali da promuovere la via metabolica dei lipidi (es. carenza di nutrienti) non corrisponderebbe ad un aumento della produttività lipidica poiché le cellule in condizioni di stress raggiungono produttività in biomassa limitate. Va sottolineato, invece, che l'aumento del contenuto di polisaccaridi

nelle microalgaie (che possono raggiungere il 70% del peso dell'alga) in genere non avviene a scapito della produttività di biomassa.

In parallelo allo studio degli aspetti "tecnologici", negli ultimi anni sono emersi vari studi di Life Cycle Assessment (LCA) orientati ad identificare la sostenibilità ambientale ed economica della fattiva produzione di biodiesel da microalgaie per il settore energetico; in particolare questi studi hanno identificato tra le fasi di produzione di biocombustibili da algaie tre principali "hotspots" particolarmente "energivori" e critici in termini di sostenibilità: 1) l'utilizzo di nutrienti per la crescita algale; 2) la raccolta e l'essiccazione della biomassa algale; 3) l'estrazione dei lipidi e la loro trasformazione in biodiesel.

1) Nutrienti

La coltivazione di microalgaie richiede notevoli quantità di nutrienti, tipicamente azoto (sotto forma di nitrato o ammonio) e fosforo (sotto forma di ortofosfato), che consentono, come per le piante terrestri, di incrementare i tassi di produttività di biomassa. È stato tuttavia stimato come il consumo di fertilizzanti sia nettamente superiore nel caso delle microalgaie (Tab. 3), con conseguente aumento delle emissioni di gas serra (GHG) e dei consumi energetici associati alla produzione di fertilizzanti chimici (si assume che 1,2 kg di CO₂ siano emessi per ogni kg di NH₃ prodotta) [14]. Per questo motivo, sono state individuate due opzioni per mitigare l'impatto ambientale ed economico associato all'utilizzo dei nutrienti per la crescita algale:

- il riciclaggio/riutilizzo dei nutrienti in eccesso nel mezzo di coltura;

Biomassa	Consumo di N (kg _N /kg _{olio})	Assunzioni
Colza	0,14	68 kg _N /t _{semi} ; 50% contenuto lipidico
Girasole	0,12	57 kg _N /t _{semi} ; 50% contenuto lipidico
Palma da olio	0,048	7,8 kg _N /t _{frutto fresco} ; 0,16 t _{olio} /t _{frutto fresco}
Microalgaie	0,3 ^a	0,15 kg _N /kg _{biomassa secca} ; 50% contenuto lipidico
^a 0,7 kg _N /kg _{olio} ; 22% contenuto lipidico		

Tab. 3 - Consumo di nutrienti espressi come N in funzione della quantità di olio che si può ottenere da varie colture oleaginose e microalgaie [14]

- l'utilizzo di nutrienti a basso costo come quelli presenti nelle acque reflue ricche di nitrati e fosfati, con il duplice vantaggio di "depurare" tali reflui e allo stesso tempo coltivare biomassa microalgale a costi inferiori, in un'ottica di economia circolare.

È importante sottolineare, però, che se dal punto di vista ambientale ed economico questa possa essere definitiva una strategia vincente, il reale potenziale dell'utilizzo delle acque reflue per la coltivazione di microalghe è limitato dalla presenza di virus e batteri o di composti organici o metalli che possono contaminare la coltura o impedirne la crescita. A questo si aggiunge un problema di concentrazione dei nutrienti, in particolare ammonio, che possono risultare tossici ad elevate quantità o problemi di penetrazione della luce nel caso di particolari acque reflue molto scure.

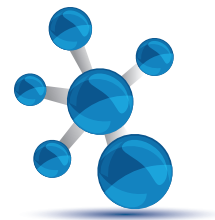
2) Raccolta e disidratazione della biomassa algale

Le microalghe sono caratterizzate da cellule di piccole dimensioni (2-50 μm) con carica netta superficiale negativa (per la presenza di gruppi funzionali silanoli o polioli), disperse in mezzi di coltura in cui raggiungono densità estremamente basse (circa 1-2 g/L negli *open ponds* e 2-3 g/L nei fotobioreattori industriali). Tutti questi fattori contribuiscono ad incrementare i costi di raccolta e il dispendio energetico associato (20-50% del costo totale della produzione di biomassa algale), ostacolandone di fatto la commercializzazione orientata a prodotti "low value high volume" come i combustibili. Negli ultimi decenni sono state sviluppate varie tecniche di raccolta, suddivisibili in metodi per separare le microalghe dalla coltura, tra cui la flocculazione, e metodi per concentrare la sospensione di microalghe (inspessimento) dopo averle separate dalla coltura, come la centrifugazione e la filtrazione. Studi LCA [15] hanno dimostrato che effettuare l'inspessimento senza prima aver operato una raccolta della biomassa mediante, ad esempio, flocculazione, comporta un dispendio energetico importante nell'intero bilancio energetico della produzione di biocombustibili da alghe (circa il 90%, indipendentemente dal metodo di inspessimento). E sebbene i metodi di separazione della biomassa algale dal medium di coltura possano contribuire significativamente alla riduzione del

consumo energetico, ad oggi né la centrifugazione né la filtrazione risultano metodi fattibili per una coltivazione di microalghe su scala commerciale a fini energetici. A differenza dei metodi di inspessimento, la flocculazione ha un impatto energetico inferiore; avendo le microalghe una carica superficiale netta negativa, l'aggiunta di un flocculante caricato positivamente al mezzo di coltura è in grado di neutralizzare tale carica e favorire l'agglomerazione creando ponti tra le singole cellule e quindi flocculi più densi e tendenti a depositarsi per gravità. Sali di ferro ed alluminio (es. FeCl_3 o $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) sono tra i flocculanti inorganici più studiati per raccogliere la biomassa algale: se da un lato non rappresentano alternative compatibili con l'utilizzo della biomassa per fini nutraceutici, alimentari o cosmetici (per l'elevata concentrazione di elementi tossici che si ritrova nella biomassa flocculata stessa), l'applicazione in ambito energetico vedrebbe la produzione di combustibili esenti da tali problematiche ma residui post-estrazione con le stesse elevate concentrazioni di elementi tossici. Per questo motivo, per le alte dosi necessarie per ottenere risultati soddisfacenti e per una forte dipendenza del processo di flocculazione dal pH, l'attenzione è stata spinta verso i flocculanti organici, sintetici o naturali (es. chitosano) ed i bioflocculanti (polimeri escreti da microorganismi come gli esopolisaccaridi), biodegradabili e meno tossici degli equivalenti inorganici. È importante sottolineare tuttavia come questi flocculanti più sostenibili siano relativamente specie-specifici, ad esempio inefficaci con microalghe marine a causa dell'elevata forza ionica dell'acqua di mare.

3) Estrazione e trasformazione dei lipidi

A differenza delle colture energetiche terrestri (es. palma da olio), dopo la raccolta e l'inspessimento la biomassa microalgale presenta ancora un notevole tenore di acqua (60-80% circa) che deve essere rimosso prima della fase di estrazione dei lipidi, in quanto l'acqua crea di fatto una "barriera" all'accesso dei solventi apolari affini alla matrice lipidica neutra riducendone l'efficacia. Alla fase di raccolta ed inspessimento segue, quindi, una fase di essiccamento che porta la quota di energia richiesta per il processo complessivo di disidratazione a coprire l'85% del consumo energetico totale [16]. La successiva fase



di estrazione dei lipidi è un processo altrettanto energivoro a causa della combinazione di vari fattori, tra cui la fisiologia algale stessa (le microalghe hanno una parete cellulare spessa e rigida, composta da proteine e polisaccaridi con elevata resistenza meccanica e chimica), i parametri di processo (temperatura e pressione), e il recupero del solvente post-estrazione per separare i lipidi estratti. In particolare, la rigidità cellulare di molti ceppi algali richiede di essere gestita tramite l'applicazione di pretrattamenti meccanici (es. con microonde, ultrasuoni, omogeneizzazione ad alta pressione, ed elettroporazione), chimici (es. mediante shock osmotico, o con acidi, basi e tensioattivi) e biologici (es. mediante enzimi per degradare i polisaccaridi e/o le proteine) [17].

Una delle maggiori sfide nel campo di questi processi "downstream" è lo sviluppo di protocolli di estrazione/trasformazione direttamente dalla biomassa "umida" o dalla coltura, utilizzando solventi organici in grado di interagire con le cellule microalgali nonostante queste tendano a rimanere nella fase acquosa a causa delle loro cariche superficiali. Tuttavia, il processo di estrazione dei lipidi tramite processi su biomassa "umida" consuma circa 3 volte più energia rispetto al processo di estrazione da biomassa secca, arrivando a compensare l'energia spesa per disidratare la biomassa stessa [18]. Processi come la liquefazione idrotermale (HTL, a pressioni di 5-20 MPa e temperature di 250-450 °C), che gestiscono l'intera biomassa algale umida in tutte le sue componenti e non solo la frazione lipidica, sono al momento un'alternativa molto interessante per la produzione di combustibili liquidi (bio-oli). In particolare, i trattamenti idrotermali possono essere applicati utilizzando meno del 5% dei costi energetici necessari per l'essiccazione completa della biomassa e fornire, allo stesso tempo, sia una fase acquosa arricchita in nutrienti che possono essere riutilizzati nel processo di coltivazione, sia un vettore energetico (costituito da idrocarburi e composti azotati), migliorando il bilancio energetico complessivo del ciclo di vita dei biocarburanti [19]. Nel 2012, il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti (DOE) ha introdotto la liquefazione idrotermale come una delle cinque tecnologie di conversione della biomassa più promettenti a fini energetici, soprattutto nel caso in cui tale biomassa abbia un elevato contenuto di umidità [20].

Verso un concetto di bioraffineria algale

Nonostante i cospicui investimenti e i notevoli sforzi di ricerca compiuti principalmente dal 2007, un uso sostenibile e diffuso dei biocarburanti microalgali è ad oggi utopistico. Gli elevati costi di produzione della biomassa algale (~30 dollari/kg) rappresentano il collo di bottiglia più rilevante per la commercializzazione odierna e futura. La microalga "energetica" ideale dovrebbe avere un'elevata produttività primaria, un alto contenuto lipidico, una buona resistenza in coltivazioni outdoor e un'ottima tolleranza a fluttuazioni di temperatura e salinità. Sebbene un'ampissima varietà di specie siano state valutate in questi anni, nessuna di queste si è rivelata idonea allo scopo; la limitazione più significativa risiede nel fatto che le condizioni ambientali che favoriscono un'elevata produttività primaria e una crescita veloce di biomassa (mezzi di coltura ricchi di nutrienti), sono in realtà sfavorevoli all'accumulo di lipidi, che in genere avviene quando l'alga è in carenza di nutrienti essenziali. Inoltre vari fattori ambientali influenzano la fotosintesi riducendone l'efficienza a livelli ampiamente inferiori di quelli massimi teorici (ad esempio in condizioni di piena luce, l'efficienza fotosintetica, e quindi la produttività primaria, è ridotta a circa 1/3 del massimo teorico). Va tuttavia sottolineato che, anche nella più ottimistica delle ipotesi di avere organismi altamente produttivi, con una efficienza fotosintetica prossima ai massimi teorici in grado di convertire completamente la luce solare in biomassa, le analisi socio-economiche dimostrano comunque che il costo del biodiesel ottenibile da alghe sarebbe doppio di quello del diesel da petrolio. Per questo motivo, la co-produzione di biocombustibili e sottoprodotti ad alto valore aggiunto sembra essere la soluzione *win-win* per massimizzare i benefici, sia economici che sociali. Questo concetto si traduce nella realizzazione di una bioraffineria, come processo industriale volto a convertire la biomassa algale in diversi composti chimici, materiali e vettori energetici mediante un approccio a cascata orientato alla valorizzazione di tutte le componenti [21]. In quest'ottica, analogamente alle bioraffinerie basate su biomasse terrestri, l'estrazione di composti chimici ad alto valore dovrebbe essere seguita da processi fermentativi/termici per la produzione

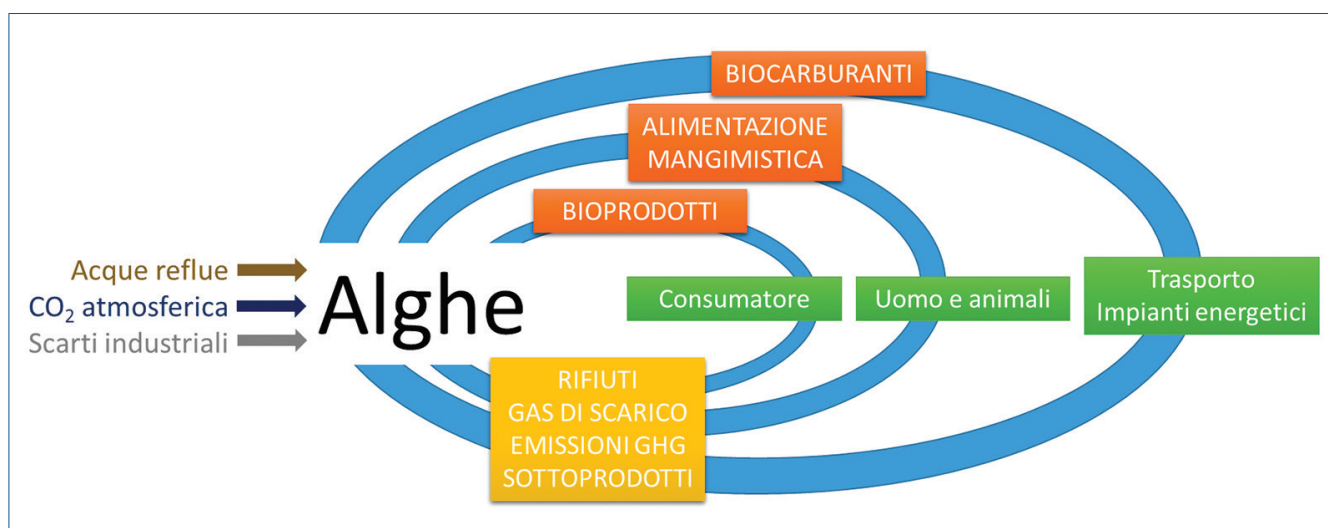


Fig. 4 - Concetto di bioraffineria algale (adattata da [22])

di energia o per applicazioni a minor valore, come la mangimistica, al fine di ottimizzare l'utilizzo delle risorse, massimizzare la redditività e ridurre al minimo la produzione di scarti (Fig. 4). L'integrazione in questo approccio di fonti di CO₂ e nutrienti di scarto (es. CO₂ in uscita da digestori anaerobici e nutrienti contenuti in acque reflue) contribuirebbe a ridurre ulteriormente i costi di produzione e aumentare la sostenibilità dei prodotti microalgali.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M.E. Huntley, D.G. Redalje, *Mitig. Adapt. Strat. Gl.*, 2007, **12**, 573.
- [2] A. Demirbas, M.F. Demirbas, *Energ. Convers. Manage.*, 2011, **52**, 163.
- [3] O. Ciferri, *Microbiol. Rev.*, 1983, **47**, 551.
- [4] G. Abdulqader, L. Barsanti *et al.*, *J. Appl. Phycol.*, 2000, **12**, 493.
- [5] I. Barkia, N. Saari *et al.*, *Mar. Drugs*, 2019, **17**(5), 304.
- [6] H. Chen, T. Li *et al.*, *Planta*, 2019, **249**, 195.
- [7] https://knowledge4policy.ec.europa.eu/dataset/beo-emodnethumanmicroalgae_en
- [8] R. Araújo, F. Vázquez Calderón *et al.*, *Front. Mar. Sci.*, 2021, **7**, 626389.
- [9] <https://www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24190.pdf>
- [10] L. Rodolfi, G.C. Zittelli, *Biotechnol. Bioeng.*, 2009, **102**, 100.
- [11] <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-biofuel-production-in-2019-and-forecast-to-2025>
- [12] <https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.AGRI.K2>
- [13] J. Ruiz, G. Olivieri *et al.*, *Energ. Environ. Sci.*, 2016, **9**(10), 3036.
- [14] S. Kim, B.E. Dale, *Biomass Bioenerg.*, 2005, **28**, 475.
- [15] K. Sander, G.S. Murthy, *Int. J. Life Cycle Assess.*, 2010, **15**, 704.
- [16] L. Lardon, A. Helias *et al.*, *Environ. Sci. Technol.*, 2009, **43**, 6475.
- [17] J. Kim, G. Yoo *et al.*, *Biotechnol. Adv.*, 2013, **31**, 862.
- [18] L. Xu, D. Brilman *et al.*, *Bioresource technol.*, 2011, **102**, 5113
- [19] L. Garcia Alba, C. Torri *et al.*, *Energy Fuels*, 2012, **26**(1), 642.
- [20] C. Yang, R. Li *et al.*, *Green Chem.*, 2016, **18**, 3684.
- [21] L. Zhu, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2015, **41**, 1376.
- [22] Y.K. Leong, K.W. Chew *et al.*, *Trends Plant. Sci.*, 2021, **26**, 729.

Biofuels from Algae: a Sustainable Alternative?

Microalgae have received a lot of attention as a feedstock for third-generation biofuels, thanks to their peculiar physiology and potential socio-economic benefits. However, the economic and environmental sustainability of the entire life cycle of algal biofuels is largely debated, and the technologies available for the cultivation and transformation of microalgae into energy carriers are not yet commercially competitive.