

MARIO R. TREDICI*

Cibo ed energia dalle microalghe: realtà o illusione che si rinnova?

I. LE MICROALGHE: RUOLO AMBIENTALE

Le microalghe, includendo nella definizione anche i cianobatteri che con le microalghe condividono il metabolismo bioenergetico (la fotosintesi ossigenica), ma ne differiscono per la struttura cellulare (eucariotica nelle prime, procariotica nei secondi), sono direttamente responsabili di circa il 50% della fotosintesi sulla terra. Tuttavia, se si considera che secondo la teoria dell'endosimbiosi i cianobatteri sotto forma di cloroplasti sono presenti nelle microalghe, così come nei vegetali inferiori e superiori, in realtà tutta la fotosintesi ossigenica sulla terra, e quindi tutto l'ossigeno prodotto per via biologica, è opera di questi antichi microrganismi procariotici (fig. 1).

Le microalghe sono i produttori primari negli ambienti acquatici, cioè costituiscono il primo anello della catena trofica, garantendo non solo l'ossigeno per la respirazione aerobica, ma anche il flusso di materia organica e di energia per la crescita della maggior parte degli organismi superiori negli ecosistemi marini e nelle acque dolci. Purtroppo, questi preziosi microrganismi sono anche causa d'inquinamento quando, in presenza di elevate quantità di nutrienti (in particolare azoto e fosforo), danno origine ai *bloom*, ovvero proliferazioni abnormi di una o poche specie algali che alterano pesantemente la chimica delle acque, spesso anche con produzione di tossine. I *bloom* stanno assumendo dimensioni sempre più estese per effetto combinato dell'attività antropica e dei cambiamenti climatici, con pesanti ripercussioni di carattere ambientale, sanitario ed economico (fig. 2).

* Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente, Università di Firenze

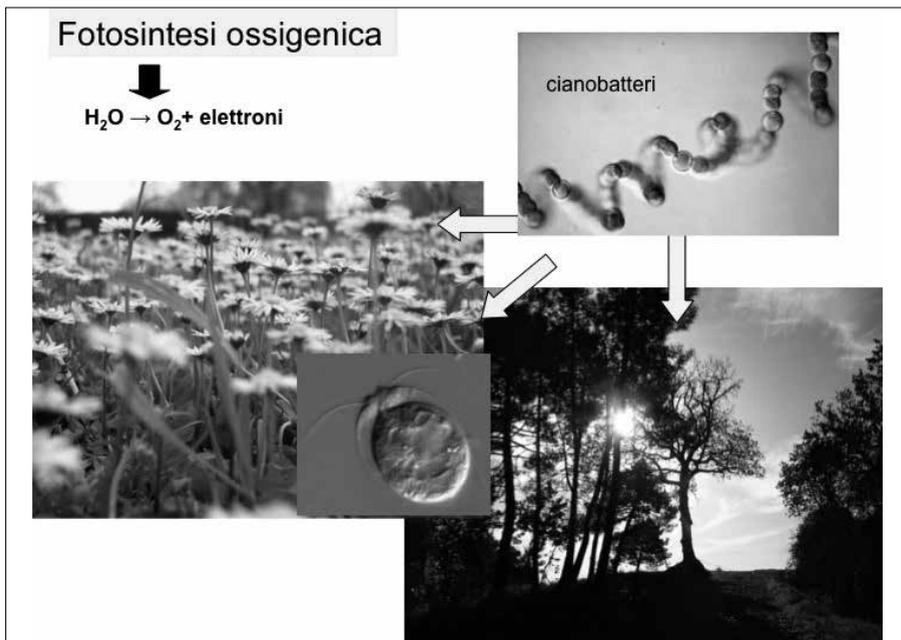


Fig. 1 *I cianobatteri: i primi organismi fotosintetici ossigenici*

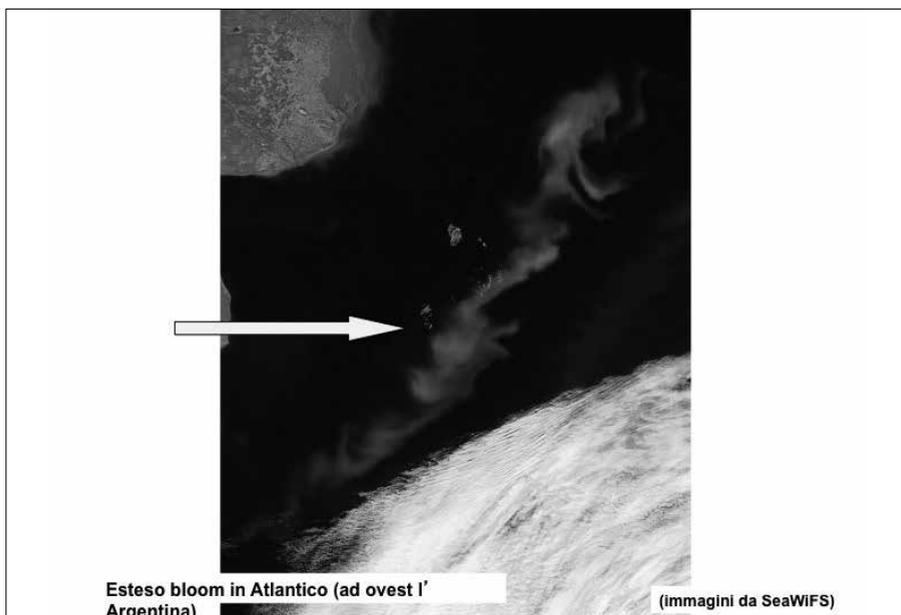


Fig. 2 *Bloom algale ripreso dallo spazio*

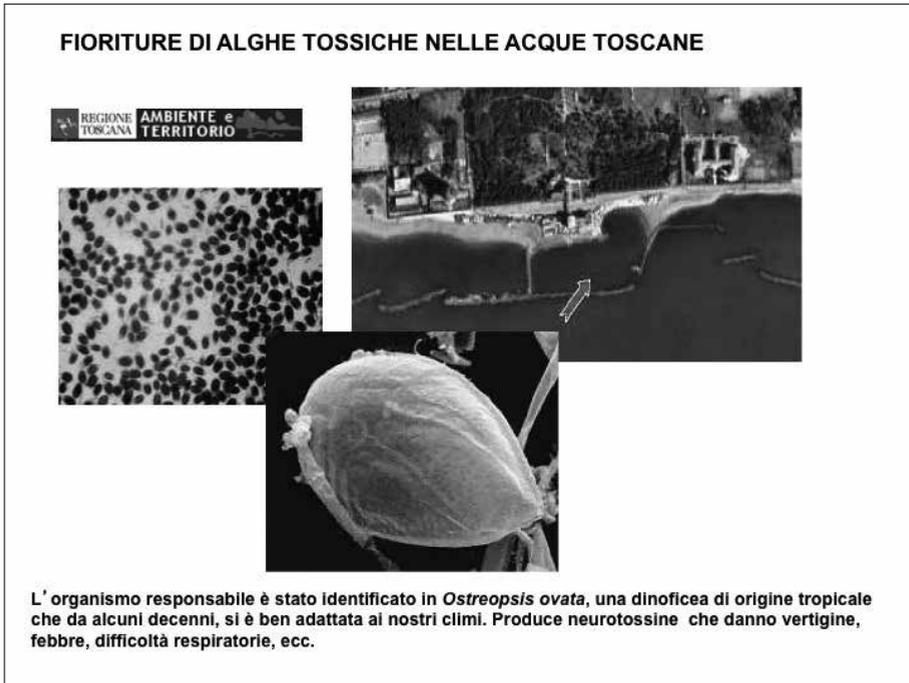


Fig. 3 «*Ostreopsis ovata*», dinoflagellato responsabile di bloom tossici nei mari di Toscana e Liguria

In Italia, il fenomeno colpisce spesso le coste toscane e liguri dove si verificano fioriture di *Ostreopsis ovata*, un'alga di origine tropicale che si è ben adattata al nostro clima e produce sostanze tossiche che veicolate dall'aerosol marino aggrediscono le vie respiratorie causando malori e vertigini (fig. 3).

2. LE MICROALGHE: APPLICAZIONI COMMERCIALI

L'utilizzo delle microalghe per scopi alimentari non è recente. Anche se ridotti in numero ed entità rispetto a quelli dannosi, non mancano i casi di *bloom* algali sfruttati dall'uomo. Ad esempio, in Ciad le popolazioni Kanembu sfruttano da secoli le fioriture naturali di *Arthrospira platensis* (comunemente nota come spirulina) a scopo alimentare (fig. 4). In Oregon (USA) le fioriture di *Aphanizomenon flos-aquae*, che si formano spontaneamente nel lago Klamath, vengono raccolte e se ne ottengono integratori alimentari (le alghe AFA) di largo consumo negli USA e in Europa, sebbene siano motivo

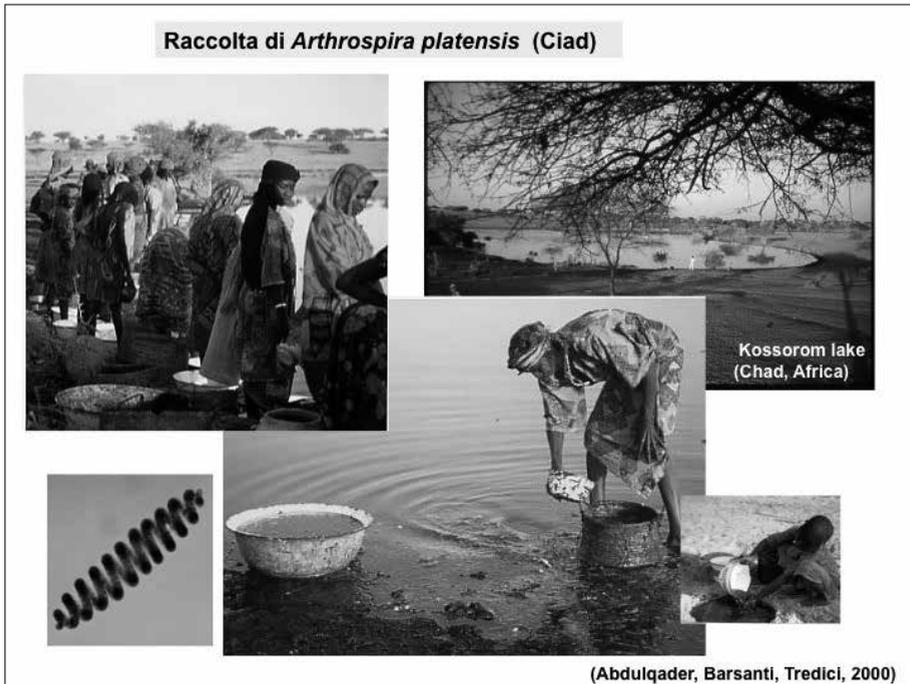


Fig. 4 Raccolta di «*Arthrospira platensis*» da un «bloom» naturale (Abdulqader et al., 2000)

di qualche preoccupazione a causa della loro potenziale tossicità (Biondi ed al., 2008).

Oggi assistiamo a un crescente interesse per le colture algali, principalmente volto a un loro sfruttamento a scopi energetici (soprattutto olio per biodiesel), anche se la produzione industriale è limitata ai soli mercati di nicchia come quello degli integratori alimentari e dei cosmetici. Gli impianti commerciali per la produzione di biomassa algale si basano soprattutto su sistemi aperti, di cui il tipo più diffuso sono le vasche “*raceway*”: bacini a corsie, profondi 15-20 cm, costruiti in cemento oppure scavati nel terreno e rivestiti con membrane plastiche, dove la sospensione algale scorre tenuta in movimento mediante pale rotanti o *paddle wheel* (fig. 5). Tra gli impianti maggiori vi è quello della Earthrise (California, USA) per la produzione commerciale di *Arthrospira* in vasche *raceway* di dimensioni comprese tra 1000 e 3000 m² (fig. 5).

Lagune naturali di decine di ettari vengono invece usate in Australia per la coltivazione estensiva di *Dunaliella salina*, alga verde alotollerante ricca in β -carotene. Le alghe del genere *Dunaliella* crescono in presenza di elevata salinità che le protegge dai contaminanti. Data la vasta dimensione dei bacini di coltura non si usano dispositivi di rimescolamento, essendo sufficienti l'azione

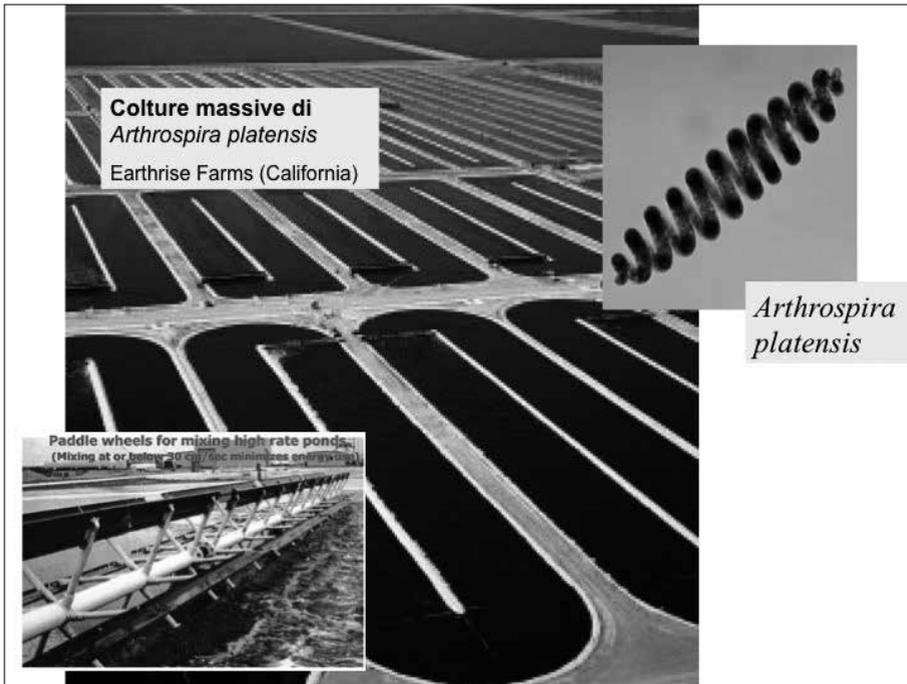


Fig. 5 Coltura massiva di «*Arthrospira platensis*» in vasche “raceway”

del vento e le correnti convettive all’interno del liquido (fig. 6). Le produttività di questi bacini naturali rimangono comunque di gran lunga inferiori a quelle ottenute nelle vasche *raceway*.

Sebbene siano state sviluppate numerose tipologie di fotobioreattori chiusi (FBR) per la coltivazione delle microalghe, pochissimi sono quelli a oggi impiegati nella produzione commerciale. In questi impianti si coltivano microalghe per ottenere prodotti ad alto valore che giustificano gli alti costi di capitale e operativi tipici dei sistemi di coltura chiusi. I principali impianti commerciali a FBR a oggi attivi sono:

Bioprodukte Prof. Steinberg GmbH (Klötze, Germania). Di proprietà della francese Roquette Freres è l’impianto chiuso di maggiori dimensioni (occupa una serra di 12.000 m²) finora costruito per la produzione di microalghe. Consiste di 20 moduli costruiti con tubi di vetro che sviluppano una lunghezza totale di 500 km e un volume complessivo di 700 m³ (fig. 7). L’impianto è usato per la produzione di *Chlorella* destinata al settore alimentare/nutraceutico.

Algatechnologies Ltd. (Israele) L’impianto è costituito da reattori tubolari



Fig. 6 Lagune naturali per la produzione di «D. salina» (Australia)

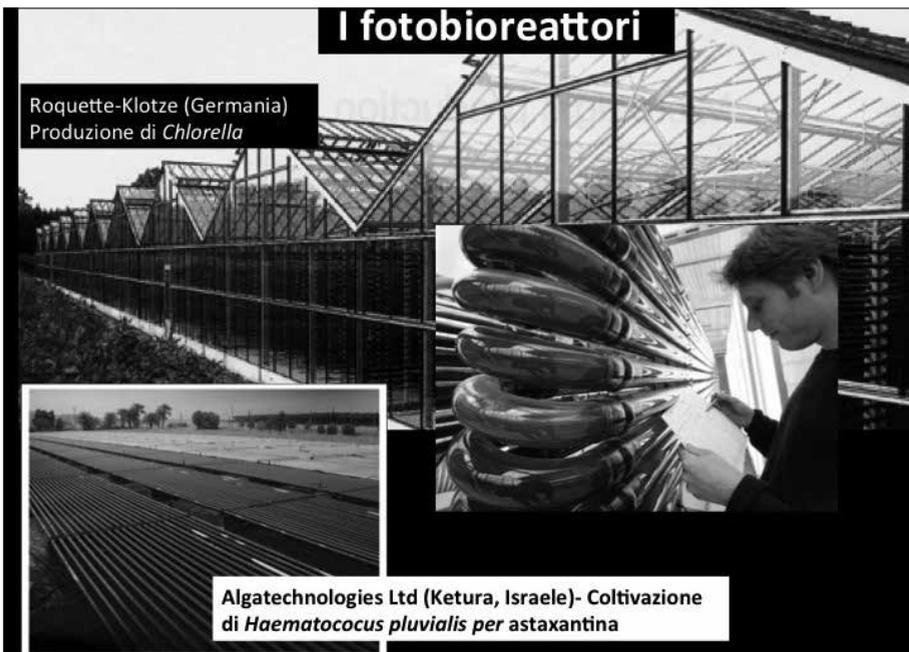


Fig. 7 Fotobioreattori commerciali



Fig. 8 Impianto della Microalga Camporosso S.r.l. (Imperia) con reattori GWP della Fotosintetica & Microbiologica S.r.l. (Firenze)

a *manifold*. La compagnia commercializza prodotti derivati dalle microalghe per il settore cosmetico e dei nutraceuticals, in particolare astaxantina da *Hae-matococcus pluvialis* (fig. 7).

In Italia la Microalga Camporosso S.r.l. produce biomasse di *Arthrospira*, *Nannochloropsis*, *Tetraselmis*, *Isochrysis* e *Phaeodactylum* per i mercati dell’acquacoltura e della cosmeceutica utilizzando reattori Green Wall Panel (GWP) della Fotosintetica & Microbiologica S.r.l. (fig. 8).

Nonostante le numerose applicazioni, la produzione mondiale di biomassa microalgale non supera le 20.000 tonnellate per anno ed è essenzialmente destinata a mercati di “nicchia” con impiego di non oltre una dozzina di specie algali (tab. 1).

3. LA COLTURA DELLE MICROALGHE: I LIMITI

I principali limiti allo sviluppo della tecnologia delle microalghe si trovano nel passaggio a scala commerciale. La coltura delle microalghe, che può essere

PRODOTTO/PROCESSO	SPECIE E QUANTITÀ PRODOTTA PER ANNO	STATUS E SISTEMA DI COLTURA
Integratori alimentari, mangimi	<i>Arthrospira</i> (3000 t); <i>Chlorella</i> (2000 t); <i>Dunaliella</i> (1200 t); <i>Aphanizomenon</i> (500 t); <i>Haematococcus</i> (300 t)	Commerciale (vasche "raceway", vasche circolari, lagune, fotobioreattori)
Pigmenti (carotenoidi, ficobiliproteine)	<i>Dunaliella</i> ; <i>Arthrospira</i> ; <i>Haematococcus</i>	Commerciale (come sopra)
Acidi grassi polinsaturi ω3 (DHA)	<i>Schizochytrium</i> (10 t olio); <i>Cryptocodinium</i> (240 t olio)	Commerciale (fermentatori da 10-100 m ³)
Diagnostica (fluorocromi)	<i>Arthrospira</i> ; <i>Anabaena</i> ; <i>Anacystis</i>	Commerciale (piccoli fotobioreattori)
Composti marcati (isotopi stabili)		
Enzimi di restrizione		
Acquacoltura	Varie spp. (1000 t)	Commerciale (cilindri, sacchi, serbatoi)
Polisaccaridi		Ricerca
Biofertilizzanti		Ricerca
Molecole bioattive (biopesticidi, probiotici, farmaci, biosensori, cosmetici)		Ricerca
Biorisanamento (sostanze chimiche, metalli pesanti)		Ricerca
Biofissazione della CO ₂		Ricerca
Energia (biodiesel, H ₂)		Ricerca

Tab. 1 *Applicazioni commerciali e potenziali delle microalghe*

semplice in piccoli sistemi di laboratorio, diventa estremamente complessa su larga scala in quanto non si avvale di sistemi axenici (ovvero costituiti da un unico organismo) come nel caso delle fermentazioni industriali condotte con lieviti e batteri, ma di consorzi di microalghe e batteri le cui interazioni sono regolate da numerosi fattori (fig. 9), alcuni dei quali (ad esempio luce e temperatura) variano nell'arco della giornata.

Un altro pesante limite alla tecnologia algale è la bassa produttività delle colture all'aperto conseguente la bassa efficienza della fotosintesi nel convertire l'energia dei fotoni (energia radiante) in energia chimica (biomassa).

Le limitazioni fondamentali al conseguimento di elevate efficienze all'aperto sono:

1 - la radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) – ovvero la frazione di radiazione solare utilizzabile (fig. 10);

2 - i meccanismi biochimici grazie ai quali l'apparato fotosintetico converte l'energia luminosa della PAR in energia chimica.

Solo il 43-45% della radiazione solare totale, quella con lunghezza d'onda tra 400 e 700 nm, è utilizzabile per la fotosintesi ossigenica (fig. 10). Di

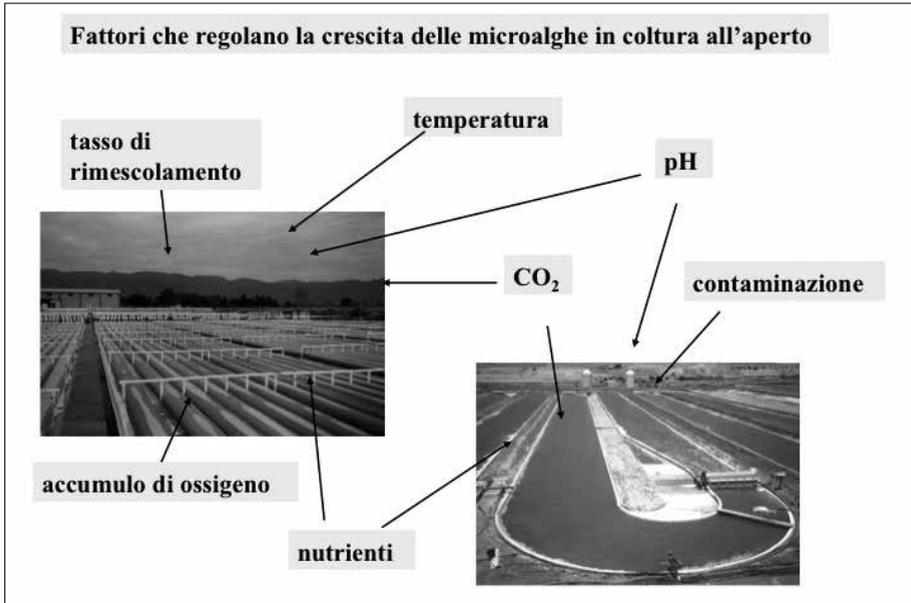


Fig. 9 Principali fattori che regolano la crescita delle microalghie all'aperto

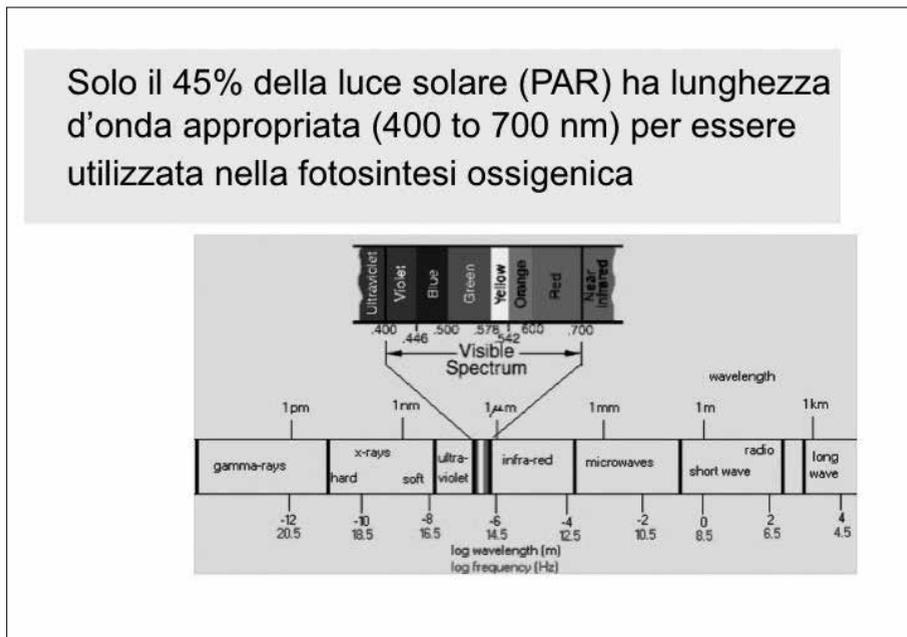


Fig. 10 Spettro della radiazione solare visibile che coincide con quella fotosinteticamente utilizzabile (detto PAR da Photosynthetically Active Radiation)

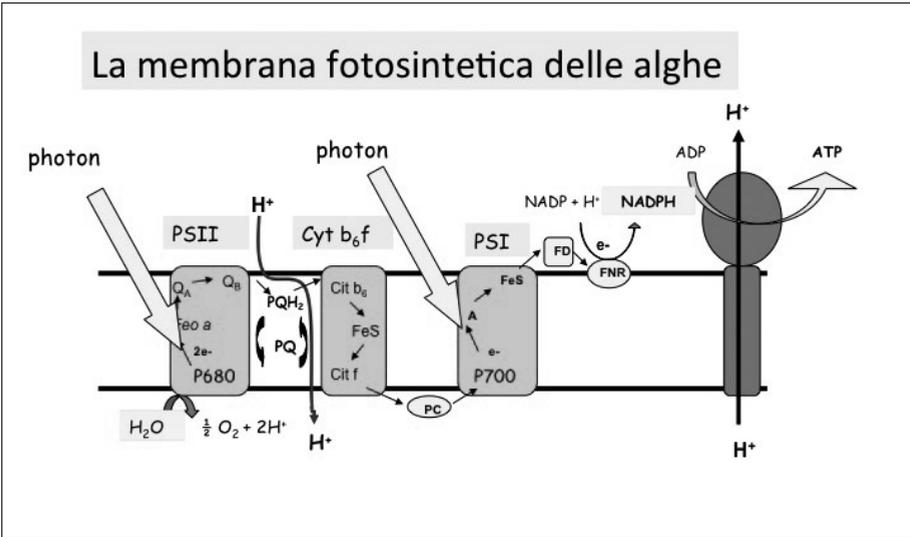
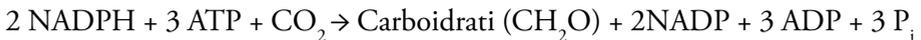


Fig. 11 Membrana fotosintetica degli organismi fototrofi ossigenici

conseguenza oltre la metà della radiazione solare disponibile viene sprecata perché non ha la lunghezza d'onda giusta per essere assorbita dai pigmenti fotosintetici.

L'altro limite è di carattere biochimico. Le microalghe fissano l'anidride carbonica con il "Ciclo di Calvin", lo stesso utilizzato dalle piante superiori.

Per fissare una molecola di CO_2 nel ciclo di Calvin



Nel Ciclo di Calvin, per fissare una molecola di CO_2 sono necessarie due molecole di NADPH e tre molecole di ATP. Per ottenere due NADPH (a partire dalla forma ossidata NADP) servono 4 elettroni con adeguato potenziale di ossidoriduzione. Visto che nella fotosintesi ossigenica si richiedono due fotoni per strappare un elettrone (dall'acqua), dotarlo di un adeguato potenziale riducente e trasferirlo al NADP, in totale sono necessari non meno di 8 fotoni per fissare una molecola di CO_2 . La figura 11 schematizza la membrana fotosintetica con i due fotosistemi e la catena di trasporto degli elettroni dall' H_2O al NADP.

Per un corretto calcolo dell'efficienza della fotosintesi, bisogna ricordare che:

- sono necessari 8 fotoni per ridurre una molecola di CO_2 ;
- i fotoni del PAR hanno un contenuto energetico medio di 217 kJ per mole;
- l'energia di una mole di CO_2 fissata sotto forma di carboidrato è pari a 475 kJ (1/6 di quella del glucosio).

Di conseguenza, il massimo teorico di efficienza di conversione della luce solare in carboidrati è $475 \text{ kJ} / (217 \text{ kJ} \times 8) = 27\%$. Poiché il PAR rappresenta soltanto il 45% della radiazione totale, il valore massimo di conversione dell'energia luminosa si riduce a circa il 12% (cioè il 27% di 45%). Considerate le altre inevitabili perdite di energia durante il processo di fotosintesi, è ragionevole ritenere che il massimo teorico di efficienza della fotosintesi per la luce solare non superi il 10%. Nella realtà, un'efficienza fotosintetica del 10% può essere ottenuta soltanto in condizioni di laboratorio o con basse intensità luminose. All'aperto, le microalghe ricevono una quantità di luce troppo elevata che non solo viene sprecata (fotosaturazione), ma è causa di fotoinibizione e conseguente danno cellulare. A causa del necessario rimescolamento della coltura, le microalghe passano continuamente da una situazione di forte illuminazione (negli strati superficiali) a una di buio sostanziale (negli strati profondi), sono cioè esposte a una continua alternanza luce-buio che ne modifica la tipica curva di risposta fotosintetica alla luce diminuendo l'efficienza di utilizzo dell'energia luminosa. Le cellule algali nelle colture massive sono molto pigmentate (cioè fotoacclimatate a bassa luce) perché crescono in una coltura densa e quindi in condizioni medie di scarsa illuminazione. Queste cellule, quando arrivano in superficie, catturano fotoni in largo eccesso rispetto alla velocità con la quale possono utilizzarli nelle reazioni di fissazione della CO_2 . L'eccesso di energia assorbita viene dissipato in varie forme (tra cui fluorescenza e calore), ma non senza causare danni (fotoinibizione). Il danno è soprattutto a carico dei sistemi di trasporto elettronico e va a diminuire ulteriormente l'efficienza del processo fotosintetico.

In tabella 2 viene raffrontata l'efficienza fotosintetica delle piante C3 e C4 con quella delle microalghe. Nei tre gruppi, partendo dal totale della luce solare incidente (100%) e considerando le perdite minime dovute a 1) radiazione non utile perché fuori dal PAR (55%), 2) degradazione dei fotoni PAR assorbiti all'energia di eccitazione a 700 nm (21%) e 3) alla conversione di quest'ultimi nell'energia chimica del glucosio (65% nelle C3 e nelle alghe; 77% nelle C4), si arriva a un valore massimo teorico di efficienza fotosintetica pari al 12,4% nelle C3 e nelle microalghe e del 8,2% nelle C4. Dopo un'ulteriore perdita minima comune del 10% per fenomeni di riflessione, in ogni gruppo si perde efficienza per fattori

PERDITE ENERGETICHE MINIME	ENERGIA RESIDUA		
	PIANTE C3	PIANTE C4	MICROALGHE
Radiazione solare incidente	100%	100%	100%
Radiazione fuori dal PAR (55%)	45%	45%	45%
Degradazione dei fotoni PAR assorbiti all'energia di eccitazione a 700 nm (21%)	35,6%	35,6%	35,6%
Conversione dell'energia di eccitazione a 700 nm in energia chimica del glucosio (65% nelle piante C3 e nelle microalghe; 77% nelle piante C4)	12,4%	8,2%	12,4%
Riflessione (10%)	11,2%	7,4%	11,2%
Fotorespirazione (40% nelle piante C3, nessuna nelle piante C4 e nelle microalghe)	6,7%	7,4%	11,2%
Respirazione (20%)	5,4%	5,9%	9,0%
Fotosaturazione e fotoinibizione (20% nelle piante C3, 10% nelle C4; 40% nelle microalghe)	4,3%	5,3%	5,4%

Tab. 2 *Perdite dell'energia della radiazione totale incidente nelle piante e nelle microalghe (Tredici, 2010)*

diversi (ad es. fotorespirazione) o in diversa entità (ad es. fotosaturazione e fotoinibizione). Come mostrato in tabella, l'unico gruppo che mantiene un valore di conversione piuttosto alto (~ 9%) anche dopo le perdite per respirazione sono le microalghe. Tuttavia, quando si considerano i fenomeni di fotosaturazione e fotoinibizione tipici delle colture algali all'aperto, anche nelle microalghe l'efficienza di conversione si riduce a circa il 5%, valore simile a quello delle piante C4. Sulla base di questo dato è possibile calcolare, attraverso una mappa di distribuzione della radiazione solare a terra (fig. 12), quanta biomassa microalgale sia possibile produrre, in condizioni non limitate da altri fattori (ad esempio temperature non ottimali o carenze nutrizionali) nelle varie zone climatiche della terra (fig. 13).

Esistono zone privilegiate, come il deserto del Sahara, dove con il 5% di efficienza fotosintetica è possibile produrre 240 tonnellate di biomassa secca per ettaro e per anno (considerando un contenuto energetico medio della biomassa algale di 20 MJ/kg). Altre zone sono molto meno favorite. Non necessariamente le zone equatoriali e tropicali sono quelle a maggiore produttività in quanto la copertura nuvolosa può in queste aree diminuire drasticamente la radiazione a terra.

La miglior produttività areale ottenuta in Toscana (Firenze e Livorno) dal nostro gruppo è stata di poco meno di 40 g/m² al giorno con un'efficienza fotosintetica pari al 4,5%. Su base annua e su larga scala è tuttavia difficile raggiungere nelle regioni mediterranee una produttività media giornaliera supe-

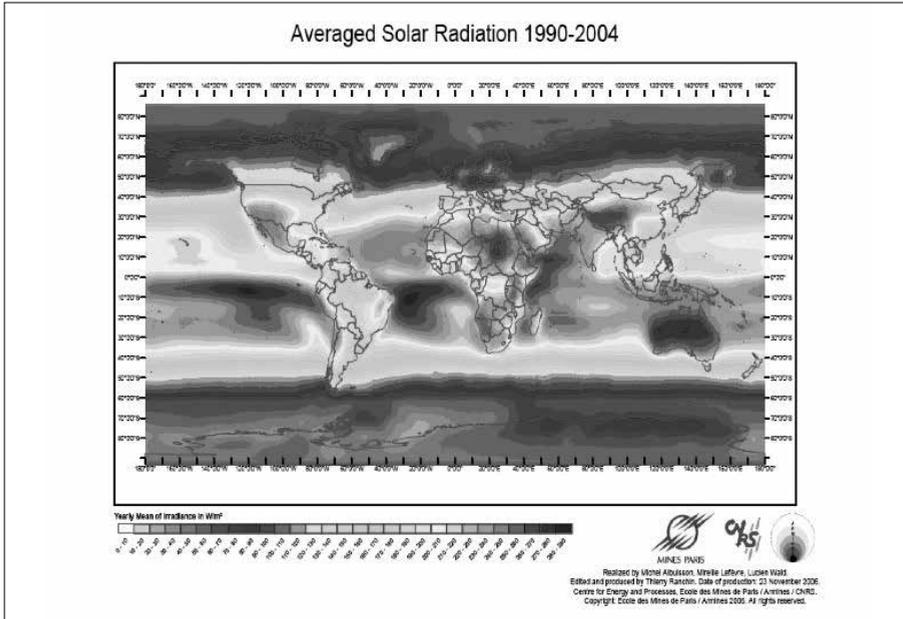


Fig. 12 *Mappa della radiazione solare disponibile sulla terra (media degli anni 1990-2004)*

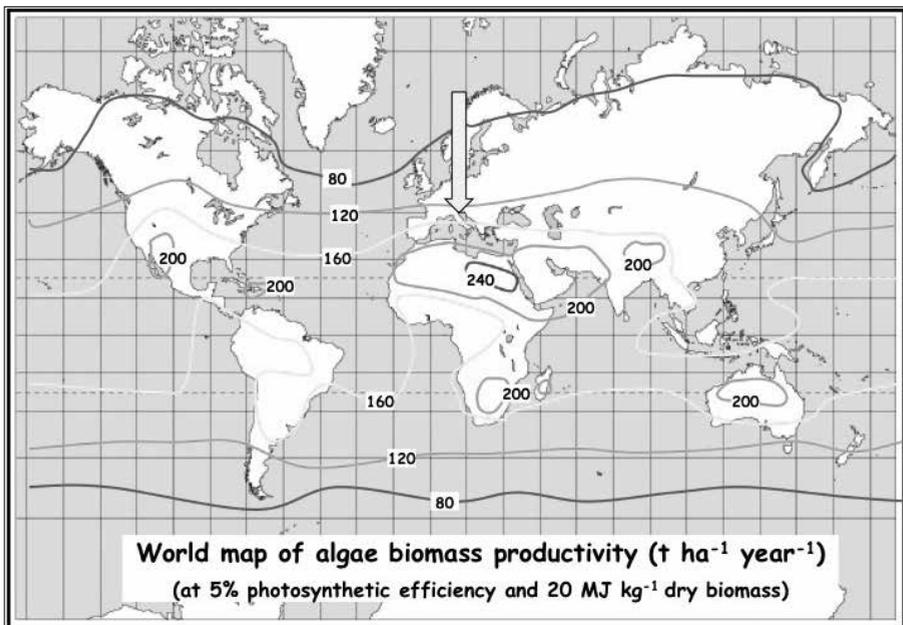


Fig. 13 *Mappa della produttività algale ottenibile nelle diverse aree del globo con una efficienza fotosintetica del 5% sulla radiazione solare disponibile a terra (Tredici, 2010)*

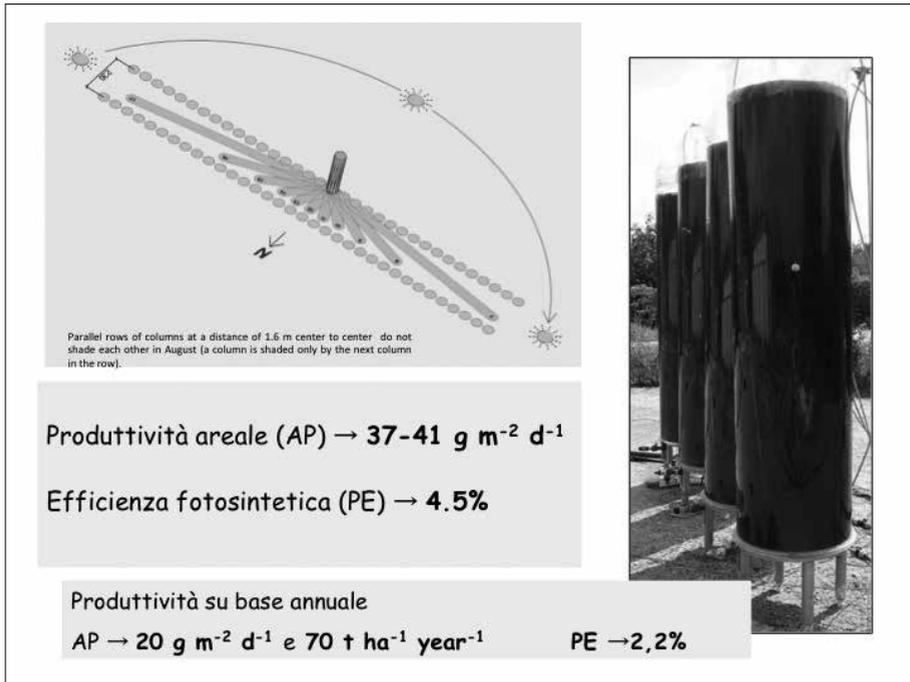


Fig. 14 *Produttività areale ed efficienza fotosintetica (PE) di colture algali nelle condizioni climatiche dell'Italia centrale (Chini Zittelli ed al., 2006)*

riore ai 20 g/m², pari a circa 70 tonnellate per ettaro per anno e una efficienza fotosintetica del 2,2% (fig. 14).

Facendo un confronto con dati di massima produttività potenziale di altre colture, si può notare come la resa su base annua delle microalghe sia tra le migliori, seppure non la più alta in assoluto. Alcune piante C₄ come il sorgo e la canna da zucchero possono toccare, e talvolta superare, le 90 tonnellate per ettaro per anno (tab. 3).

Un altro pesante limite allo sfruttamento energetico delle biotecnologie basate sulla coltura massiva di microalghe è quello del bilancio energetico netto (NER o EROI). Il nostro gruppo ha sperimentato la coltura all'aperto della microalga marina *Tetraselmis* in tre diversi dispositivi (vasche aperte, reattori tubolari e reattori a pannello del tipo Green Wall Panel - GWP). Come mostrato in tabella 4, la produttività è aumentata da 50 (in vasca aperta nei primi anni '80) a 70 (nei GWP) tonnellate di biomassa secca per ettaro e per anno, portando l'output energetico da 1.150 a 1.600 GJ per ettaro per anno (considerando per l'alga un valore energetico medio di 23 MJ/Kg).

TIPO DI BIOMASSA	LUOGO	PRODUZIONE	EFFICIENZA
		(T P.S. HA ⁻¹ ANNO ⁻¹)	FOTOSINTETICA (%)
Pioppo (<i>Populus spp.</i>) (C3)	Minnesota	8 - 11	0,3 - 0,4
Giacinto d'acqua (<i>Eichornia crassipes</i>)	Missisipi	11 - 33 (>150)	0,3 - 0,9
Switchgrass (<i>Panicum virgatum</i>) (C4)	Texas	8 - 20	0,2 - 0,6
Sorgo dolce (<i>Sorghum bicolor</i>) (C4)	Texas-California	22 - 47	0,6 - 1,0
Foresta di conifere	Inghilterra	34	1,8
Granoturco (<i>Zea mays</i>) (C4)	Israele	34	0,8
Piantagione arborea mista	Congo	36	1,0
Foresta tropicale	India occidentale	60	1,6
Alghe	Diversi luoghi	70	2 - 2,5
Canna da zucchero (<i>Saccharum officinarum</i>)	Hawaii-Java	64 - 87	1,8 - 2,6
<i>Pennisetum purpureum</i>	Hawaii, Porto Rico	85 - 106	2,2 - 2,8

Tab. 3 Produttività massima ed efficienza fotosintetica di differenti colture e delle microalghe

	VASCHE APERTE (CALABRIA, 1983)	REATTORI TUBOLARI (TOSCANA E LAZIO, 1998-2005)	REATTORI GWP (TOSCANA, 2006)
			
Produttività (ton ha ⁻¹ anno ⁻¹)	~50	57- 60	~ 70
Output energetico (GJ ha ⁻¹ anno ⁻¹)	1150	1350	1600 (- 40% > rispetto alle vasche)

Tab. 4 Produttività e output energetico (con *Tetraselmis*) in diverse tipologie di sistemi colturali

Tuttavia è da notare come l'input energetico richiesto per il rimescolamento della coltura nelle vasche sia relativamente contenuto (circa 30 GJ per ettaro per anno, ovvero il 2,6% dell'energia immagazzinata nella biomassa), mentre nel reattore GWP, a seconda dell'alga coltivata e del flusso d'aria prescelto, sono necessari da 470-670 GJ per ettaro per anno, cioè tra il 30 e il 42% dell'energia fissata nella biomassa.

Ci sono numerose altre spese energetiche che spesso non vengono considerate, basti pensare all'energia dei materiali (*embodied energy*) necessari a costruire la vasca o il reattore o all'energia necessaria per il raffreddamento della coltura nel fotobioreattore e che portano a un bilancio energetico (NER) inferiore a uno, cioè l'energia fossile impiegata nella coltivazione supera l'energia chimica immagazzinata nella biomassa nonostante l'apporto (non considerato nel calcolo del NER) dell'energia solare. Per le vasche il costo energetico dei

materiali è di circa 120 GJ per ettaro per anno (~10% del valore energetico della biomassa), mentre nel reattore GWP si sale a oltre 600 GJ per ettaro per anno (quasi il 40% del contenuto energetico della biomassa prodotta). Non trascurabile è poi il costo di raccolta, che in questo caso penalizza le vasche a causa della minore concentrazione della coltura alla raccolta rispetto ai fotobioreattori.

Attualmente il costo di produzione in vasche della biomassa algale oscilla tra 3 e 30 €/kg (peso secco). Il valore più basso è relativo a impianti realizzati in Cina e India che si avvantaggiano di bassi costi della manodopera e delle materie prime. Nei fotobioreattori invece si superano in genere di gran lunga i 30 €/Kg. Gli elevati costi della biomassa algale rendono attualmente non economico l'utilizzo di questi microrganismi come fonte di biocombustibili e molto rimane da fare per colmare il divario tra il costo attuale e il costo di produzione necessario per rendere un biocombustibile da alghe competitivo (< 0.3 €/kg di biomassa secca).

Negli ultimi anni sono stati fatti ingenti investimenti in questo settore, specie negli Stati Uniti. Anche in Europa il settore è in rapida espansione grazie a finanziamenti comunitari e contributi nazionali, sia pubblici che privati. Si vedano ad esempio i progetti MAMBO, finanziato da alcune aziende italiane produttrici di biodiesel e i progetti del 7° programma quadro della UE AQUAFUELS, BIOFAT e GIAVAP ai quali il gruppo fiorentino partecipa.

Il recente interesse per i combustibili da alghe deriva dal fatto che si ritengono ottenibili con le colture algali 150-250 tonnellate di olio per ettaro e per anno. In realtà, come si è visto, tali rese non sono possibili. I motivi per cui si sovrastima il potenziale delle colture algali sono molteplici e non sempre facili da individuare. Tra questi vi è la pratica comune, e concettualmente errata, di estrapolare le potenzialità produttive delle colture massive all'aperto da dati ottenuti in laboratorio a bassa intensità luminosa. Come si è detto, all'aperto, le efficienze fotosintetiche tipiche del laboratorio non sono ottenibili perché le colture algali sprecano gran parte della radiazione solare disponibile.

Inoltre, spesso si confonde il tasso di crescita con la produttività della coltura. È vero che le microalghe possono crescere "velocemente" e in certe condizioni raddoppiare di numero e massa in meno di un giorno. Tuttavia la velocità di crescita nelle colture algali massive, a differenza di quelle microbiche non fotosintetiche, non è direttamente correlata con la produttività. Per avere colture di alghe a rapida crescita, queste devono essere "fotosaturate" o vicine alla fotosaturazione e quindi molto diluite, condizioni nelle quali una grossa frazione della radiazione luminosa incidente attraversa la coltura e non viene



Fig. 15 *Il progetto della ENALG e dell'Autorità Portuale a Venezia (da il Messaggero, 31.03.2009)*

assorbita. L'obiettivo primo di una coltura algale è invece massimizzare l'intercettazione e l'uso della radiazione solare che la raggiunge. Per assorbire tutti i fotoni che le colpiscono, le colture devono essere adeguatamente dense e in tali condizioni le cellule si ombreggiano reciprocamente tanto che la singola cellula risulta fotolimitata e, per definizione, non può ottenere elevati tassi di crescita.

Un caso che ben illustra di quanto si possa sovrastimare il potenziale delle microalghe è il progetto della ENALG S.r.l. che intende dotare la città di Venezia di un impianto da 50-60 megawatt mediante conversione con torcia al plasma di 100.000 tonnellate/anno di biomassa algale. La produzione dell'alga avverrebbe su un'area di 10-12 ettari in una zona costiera della laguna veneta, utilizzando i fotobioreattori verticali della Biofuel System SL. Si prevedevano, nel marzo 2009, tempi di realizzazione dell'impianto di 18-24 mesi (fig. 15). Visto che la radiazione solare media disponibile nella zona è di circa 1300 kWh/m² per anno, equivalenti a 47 milioni di MJ/ettaro, considerando una efficienza teorica di conversione delle energia in biomassa del 10% e un potere calorico della biomassa algale pari a 20 MJ/kg, la produzione massima ottenibile nella zona è di 235 t/ha per anno. Il

progetto con 10.000 ton/ettaro anno si pone quindi come obiettivo una produzione pari a 40 volte il massimo teorico e una efficienza di conversione dell'energia solare in energia chimica di oltre il 300% (vedi "La Bolla delle Alghe" su Nova del 9 aprile 2009).

4. VANTAGGI E POTENZIALE DELLE COLTURE ALGALI

Se vogliamo seriamente promuovere la biotecnologia algale è necessario partire dalla ovvia considerazione che anche le microalghe, in quanto sistemi biologici di trasformazione di energia, soffrono di limiti invalicabili e, soprattutto, per convertire la luce (energia radiante) in biomassa (energia chimica) devono fare i conti con le reazioni chimiche, poco efficienti in realtà, proprie della fotosintesi ossigenica. Merita citare a questo proposito le enormi aspettative suscitate nel maggio 2010 dall'annuncio che la Synthetic Genomics aveva ottenuto la prima cellula microbica di sintesi. Le scoperte nel campo dei "genomi artificiali" del gruppo guidato da Craig Venter e dal premio Nobel Hamilton Smith, se applicate alle microalghe, potrebbero avere un impatto enorme sulla tecnologia, perché si potranno combinare nello stesso organismo proprietà utili (come ad esempio elevata produttività, robustezza, alto tenore di olio, filtrabilità, ecc.) che oggi troviamo disperse in specie differenti. Tuttavia, i tempi per tali applicazioni saranno inevitabilmente lunghi e abbiamo elementi per ritenere che anche per la nuova "*super microalga sintetica*" varranno sempre i limiti tecnici e metabolici che oggi penalizzano la coltura massiva all'aperto.

Nonostante le poco incoraggiati premesse non possiamo negare che questi microrganismi abbiano comunque una forte attrattiva e un enorme potenziale. In particolare risulta molto promettente la coltura di specie marine, i principali vantaggi delle quali sono:

- non necessitano di terreni fertili;
- non richiedono acqua dolce;
- la loro coltura può essere abbinata al trattamento delle acque reflue;
- possono usare CO₂ da fumi di combustione o fermentazione come fonte di carbonio;
- la loro coltura non richiede pesticidi o erbicidi;
- la loro coltura può usare i fertilizzanti con un'efficienza vicino al 100%;
- non producono sostanze tossiche (con ceppi adeguatamente selezionati);
- la coltura può (e deve) essere abbinata alla produzione di alimenti;
- nei nostri climi possono produrre 10-20 volte più olio delle colture di oleaginose tradizionali.

MICROALGHE	PRODUTTIVITÀ IN BIOMASSA (g l ⁻¹ day ⁻¹)	CONTENUTO DI LIPIDI (% BIOMASS)	PRODUTTIVITÀ IN LIPIDI (mg l ⁻¹ day ⁻¹)
<i>Porphyridium cruentum</i>	0.37	9.5	34.8
<i>Tetraselmis suecica</i> F&M-M33 (OR)	0.32	8.5	27.0
<i>Tetraselmis</i> sp. F&M-M34	0.30	14.7	43.4
<i>Tetraselmis suecica</i> F&M-M35	0.28	12.9	36.4
<i>Chlorococcum</i> sp. UMACC 112	0.28	19.3	53.7
<i>Scenedesmus</i> sp. DM	0.26	21.1	53.9
<i>Phaeodactylum tricorutum</i> F&M-M40	0.24	18.7	44.8
<i>Chlorella sorokiniana</i> IAM-212	0.23	19.3	44.7
<i>Chlorella</i> sp. F&M-M48	0.23	18.7	42.1
<i>Scenedesmus</i> sp. F&M-M19	0.21	19.6	40.8
<i>Nannochloropsis</i> sp. F&M-M26	0.21	29.6	61.0
<i>Chlorella vulgaris</i> F&M-M49	0.20	18.4	36.9
<i>Nannochloropsis</i> sp. F&M-M27	0.20	24.4	48.2
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	0.19	18.4	35.1
<i>Monodus subterraneus</i> UTEX 151	0.19	16.1	30.4
<i>Nannochloropsis</i> sp. F&M-M24	0.18	30.9	54.8
<i>Nannochloropsis</i> sp. F&M-M28	0.17	35.7	60.9
<i>Nannochloropsis</i> CS 246	0.17	29.2	49.7
<i>Ellipsoidion</i> sp. F&M-M31	0.17	27.4	47.3
<i>Isochrysis</i> sp. (T-ISO) CS 177	0.17	22.4	37.7
<i>Nannochloropsis</i> sp. F&M-M29	0.17	21.6	37.6
<i>Chlorella vulgaris</i> CCAP 211/11b	0.17	19.2	32.6
<i>Pavlova salina</i> CS 49	0.16	30.9	49.4
<i>Pavlova lutheri</i> CS 182	0.14	35.5	50.2
<i>Isochrysis</i> sp. F&M-M37	0.14	27.4	37.8
<i>Skeletonema</i> sp. CS 252	0.09	31.8	27.3
<i>Thalassiosira pseudonana</i> CS 173	0.08	20.6	17.4
<i>Skeletonema costatum</i> CS 181	0.08	21.1	17.4
<i>Chaetoceros muelleri</i> F&M-M43	0.07	33.6	21.8
<i>Chaetoceros calcitrans</i> CS 178	0.04	39.8	17.6

Tab. 5 Produttività in lipidi e biomassa di 30 ceppi di microalghe (Da Rodolfi et al., 2009)

Un vantaggio che fa emergere nettamente le colture algali rispetto alle colture agrarie è la produttività in olio. Il nostro gruppo ha condotto uno screening su 30 ceppi di microalghe per valutarne la produttività e il tenore in olio. Iniziando dai dati di laboratorio (tab. 5), appare subito evidente come, purtroppo, i ceppi più produttivi in termini di biomassa (ad esempio *Porphyridium cruentum* e *Tetraselmis suecica*) siano quelli a minor contenuto in lipidi, mentre altri con un ottimo contenuto lipidico di base (ad esempio *Chaetoceros calcitrans*) non siano buoni in termini di crescita e produttività. Parte della ragione di ciò sta nel costo energetico elevato della sintesi lipidica

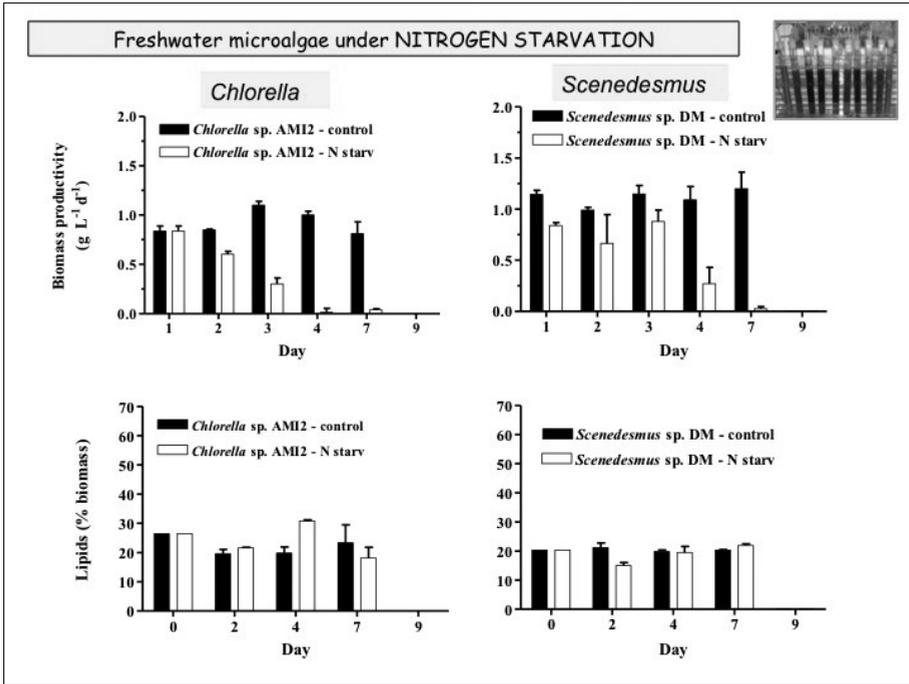


Fig. 16 Crescita e accumulo di lipidi in due microalge di acqua dolce («*Chlorella*» sp. F&M-M48 e «*Scenedesmus*» sp. DM) in carenza di azoto

rispetto alle altre frazioni costituenti la biomassa. Tuttavia vari ceppi interessanti sono stati individuati (evidenziati in tab. 7) e alcuni di essi sono stati testati in carenza di azoto (*nitrogen starvation*) che, come noto, in alcune microalge stimola la biosintesi di lipidi (di olio in particolare) (Rodolfi et al., 2009).

In figura 16 sono riportati la produttività in biomassa e l'accumulo di lipidi in seguito a *nitrogen starvation* in due microalge d'acqua dolce: *Chlorella* sp. F&M-M48 (qui indicata come *Chlorella* AMI 2) e *Scenedesmus* sp. DM. Gli istogrammi neri rappresentano la produttività o il contenuto in lipidi in condizioni nutritive normali (coltura di controllo), mentre quelli bianchi si riferiscono alle colture tenute in azoto-carenza. Come si può vedere in entrambe le microalge, in assenza di azoto si ha un crollo della produttività che si azzera in poco più di quattro giorni, mentre il tenore lipidico si modifica di poco.

Diverso è il comportamento della microalga marina del genere *Tetraselmis* (fig. 17). Anche in questo caso, la produttività crolla in seguito a *nitrogen starvation*, ma di fronte a un aumento del tenore in lipidi. Purtroppo il grosso

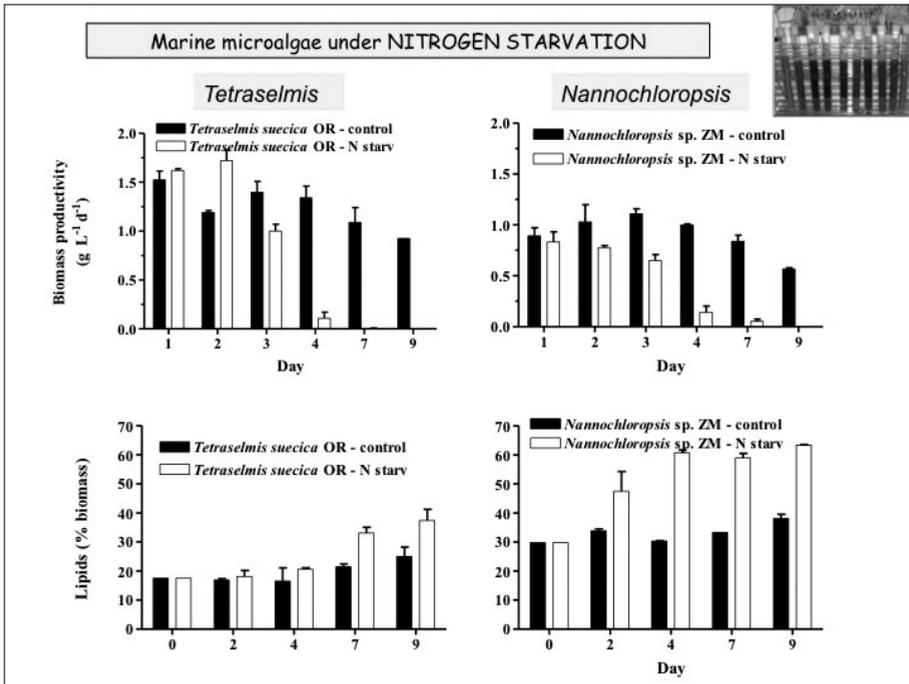


Fig. 17 Crescita e accumulo di lipidi in due microalghe marine («*Tetraselmis suecica*» F&M-M33 e «*Nannochloropsis*» sp. F&M-M24) in assenza di azoto

dell'aumento in lipidi si ha solo dopo una settimana di azoto-carenza e cioè quando la coltura non è più in attiva crescita e di conseguenza non si ha un forte incremento nella sintesi dei lipidi rispetto al controllo.

Molto più interessante il caso di *Nannochloropsis* sp. F&M-M24 (qui indicata come ceppo ZM). Anche qui la produttività diminuisce in assenza di azoto, ma il contenuto in lipidi raddoppia (dal 30 al 60%) in soli 3 giorni e quindi mentre la coltura sta ancora crescendo (più corretto è dire “aumentando di peso”) (fig. 17). Combinando i due fatti (accumulo di lipidi e crescita) ne risulta un produttività in lipidi fortemente aumentata.

I risultati illustrati nelle figure 16 e 17 sono stati ottenuti in esperimenti di laboratorio e perciò non adeguati a valutare il potenziale della coltura di alghe all'aperto. Questa valutazione è stata fatta successivamente con la sola *Nannochloropsis* sp. F&M-M24 in reattori Green Wall Panel (GWP) e in carenza di azoto o di fosforo. Le prove hanno confermato come in azoto-carenza anche all'aperto si riesce ad aumentare significativamente il tenore lipidico (in soli tre giorni dal 30 a oltre il 60%) e raddoppiare la produttività netta di lipidi (fig. 18). Analisi successive (Bondioli et al., 2010) hanno evidenziato come i

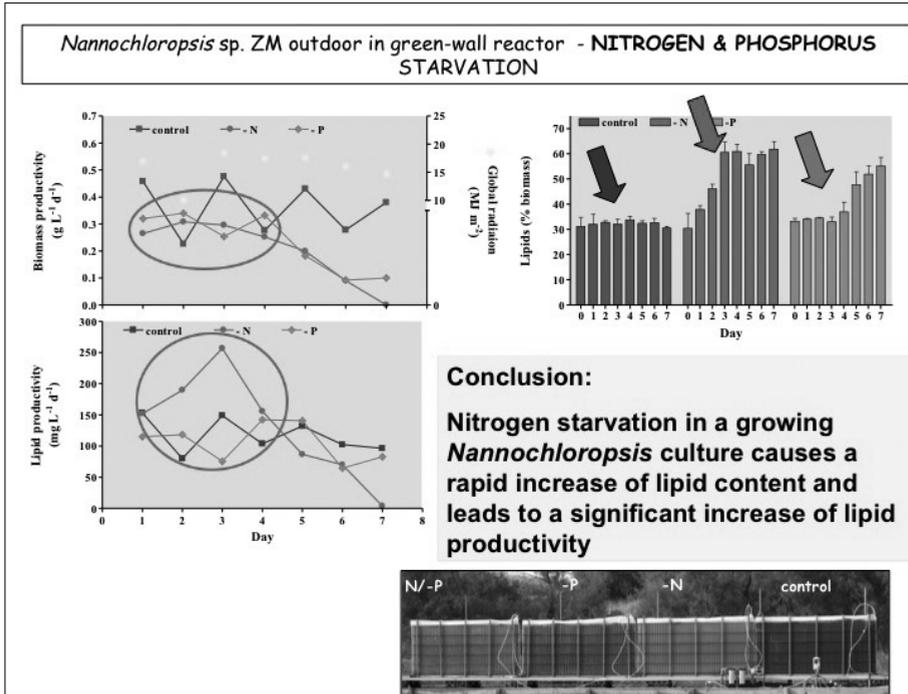


Fig. 18 *Produttività ed accumulo di lipidi in «Nannochloropsis» sp. F&M-M24 coltivata all'aperto in carenza di azoto o fosforo*

lipidi accumulati dalla coltura mantenuta in assenza di azoto siano costituiti principalmente da trigliceridi ricchi in acidi grassi saturi e quindi utili per ottenere biodiesel.

Una successiva sperimentazione condotta dal nostro gruppo utilizzando fotobioreattori GWP in un impianto appositamente allestito per simulare le condizioni "full scale" (fig. 19), ha dimostrato che la microalga marina *Nannochloropsis* sp. F&M-M24 è potenzialmente capace di produrre 20 tonnellate di lipidi per ettaro per anno nelle regioni del Mediterraneo e più di 30 tonnellate di lipidi per ettaro per anno in quelle tropicali a maggiore insolazione ($> 20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Recenti analisi economiche, tra cui una del nostro gruppo (Bassi e Tredici, 2010), prospettano per alghe prodotte in impianti ibridi (FBR + vasche raceway) da 400 ettari un costo di produzione della biomassa algale di circa 1,5 €/Kg qualora si acquistino sia i nutrienti che la CO_2 , e di meno di 0,5 €/Kg se la CO_2 e i nutrienti sono ottenuti da scarti o rifiuti. Ci sono quindi, al di là delle molte false promesse, elementi oggettivi che giustificano l'interesse

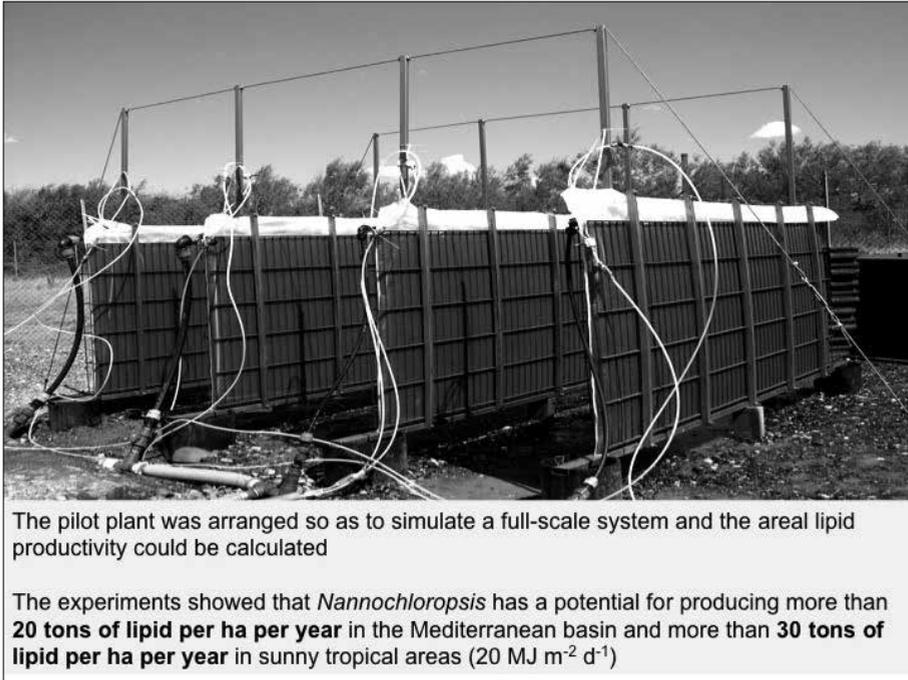


Fig. 19 Fotobioreattori GWP utilizzati nelle prove di produzione di lipidi all'aperto con «*Nannochloropsis*» sp. F&M-M24 in «nitrogen starvation»

verso questa biotecnologia e gli ingenti investimenti di cui recentemente il settore ha beneficiato. È utile ricordare tra i grandi finanziatori della ricerca su biocombustibili da colture algali Boeing, Continental Airlines, Bill Gates, Chevron, Shell, Exxon Mobil, BP, Enel, Eni, il Pentagono, la NASA, la Comunità Europea.

5. LA SECONDA RIVOLUZIONE VERDE

Per concludere questa rassegna non possiamo non soffermarci sull'urgente necessità di intervenire di fronte alle emergenze globali che affliggono l'umanità all'inizio del terzo millennio. Necessità urgente di dare soluzioni immediate e sostenibili all'incerto futuro ambientale e alimentare che ci attende. La popolazione mondiale nel 2050 si sarà accresciuta di altri due miliardi di abitanti che porteranno un'ulteriore pressione sulle già depauperate risorse del pianeta. Secondo la FAO, poco meno di un miliardo di persone già oggi non ha cibo a sufficienza e la più importante sfida dei prossimi decenni non



Fig. 20 *Sustaining food production is the global scientific challenge of our era, more urgent even than global warming (FAO, 2009)*

sarà adattarsi al cambiamento climatico, limitare la perdita di biodiversità o sostituire i biocombustibili fossili, bensì produrre cibo in quantità sufficiente ad assicurare la sopravvivenza delle popolazioni nelle regioni meno fortunate del pianeta ed evitare migrazioni catastrofiche di centinaia di milioni di persone in cerca del minimo per sopravvivere (fig. 20).

Molti sono convinti (o sperano) che ci verranno in soccorso le nuove tecnologie e, ancora una volta, potremo contare sui miracoli dell'agricoltura intensiva per evitare la catastrofe. Ma sono forti anche i timori delle conseguenze di un'ulteriore espansione dell'agricoltura. Metà delle acque italiane sono contaminate da pesticidi. L'allarme sull'aumento di veleni in fiumi, laghi, torrenti e nel sottosuolo viene dall'Ispra che avverte che "il rischio da esposizione potrebbe essere stato sottostimato" e che l'evoluzione della contaminazione a partire dal 2003 mostra un aumento della frequenza di pesticidi nell'ambiente. Ogni anno si perdono dai 5 ai 10 milioni di ettari di suolo agricolo a causa dell'erosione. Assieme alla lisciviazione di fertilizzanti e agli scarichi incontrollati di origine civile, agricola e industriale, l'erosione del suolo agricolo ha portato a un aumento impressionante in numero e dimensioni delle "ocean



Fig. 21 «Overfishing» & «bycatch» sono causa del depauperamento delle risorse ittiche marine

dead zones”, aree oceaniche vaste in qualche caso centinaia di chilometri in cui una rapida deossigenazione dell’acqua porta alla scomparsa di ogni forma di vita marina. L’ossigeno viene a mancare per effetto dei nutrienti che, lisciviati dai campi e dalle città verso i fiumi e i mari, alimentano la crescita incontrollata di macroalghe e microalghe. Alla loro morte, le biomasse algali vengono decomposte da microrganismi eterotrofi aerobi che consumano l’ossigeno disciolto e “soffocano” il mare. Il mare è già all’estremo e si prevede il collasso totale della pesca entro il 2050 se oltre alla eutrofizzazione continueranno gli attuali livelli di cattura e lo spreco di risorse ittiche a causa di prelievi “non intenzionali” (*bycatch*) di specie che dopo la cattura vengono rigettate in mare come rifiuti (fig. 21).

Come raddoppiare la produzione di alimenti in qualche decennio se manca l’acqua per irrigare i campi e la desertificazione avanza (fig. 22) proprio in quei paesi che maggiormente ne hanno bisogno? Come produrre più alimenti quando le fonti di energia fossile sono in via di esaurimento e sempre più costose e rischiose da sfruttare, come dimostra il disastro causato dall’esplosione della piattaforma petrolifera “Deepwater Horizon” nel Golfo del Messico (fig. 23)? In un contesto di forte riduzione delle risorse primarie (suolo, acqua,

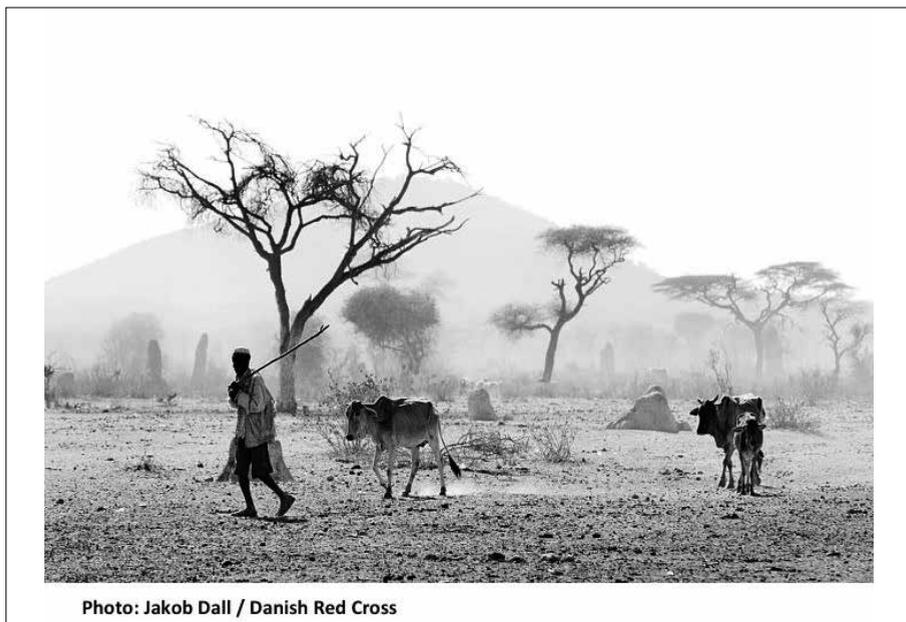


Fig. 22 *La siccità colpisce la città di Dida Guchi (Etiopia) nella primavera 2008. Foto: Jakob Dall (Danish Red Cross)*



Fig. 23 *L'esplosione della «Deep Horizon» della BP. Da “What are we doing to the planet we call Home?” (Elanne Palcich – 2010)*



Fig. 24 *Conseguenze, non prevedibili nella loro evoluzione, del cambiamento climatico*

energia) e sotto la minaccia del riscaldamento globale (fig. 24), di cui, sebbene se ne conoscano le cause principali, nessuno riesce a prevedere in maniera certa l'evoluzione, il problema centrale del secolo diviene come provvedere cibo e materie prime a una umanità in espansione senza devastare oltre il punto di non ritorno la qualità degli ecosistemi terrestri e acquatici sopravvissuti alla rivoluzione industriale.

Sono sempre più numerose le previsioni catastrofiche. *Beyond the Limits*, *World on the Edge*, *The Crash Course*, sono alcuni dei titoli di recenti pubblicazioni in cui gli autori sostengono che siamo su un treno che corre deciso verso l'abisso, rimane solo da definire la velocità della corsa e quanto tempo ci rimane prima del salto finale (fig. 25). Catastrofisti eccessivi? Può darsi, ma appare ormai chiaro anche ai più ottimisti che il teorema dello *sviluppo all'infinito* non funziona più. Non possiamo più permetterci gli sprechi del passato, non possiamo continuare a gettare nella pattumiera il 20% degli alimenti che acquistiamo, non saremo in grado garantire una vita degna sulla terra a 9 miliardi di abitanti, non stiamo facendo abbastanza per assicurare anche ai nostri figli un mondo vivibile.

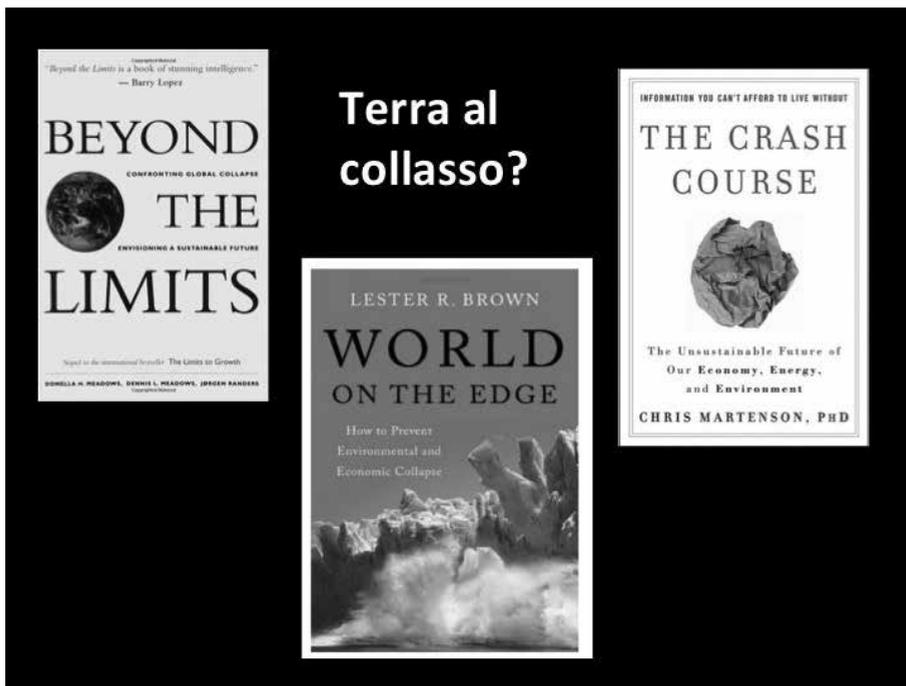


Fig. 25 Titoli di recenti pubblicazioni che prevedono il collasso dell'umanità

Solo una seconda rivoluzione verde può salvare l'umanità da un inesorabile declino. La prima rivoluzione verde, che nella metà del secolo scorso ha portato a enormi aumenti di produttività delle colture alla base dell'alimentazione umana (riso, grano, mais), è stata sostenuta da varietà selezionate per l'alta produttività, uso massiccio di fertilizzanti e pesticidi, meccanizzazione spinta e irrigazione. In sostanza la prima rivoluzione si è resa possibile solo grazie ad alti input di energia a basso costo sui quali la seconda, a venire, non potrà contare. Non sappiamo dire se la prossima necessaria rivoluzione si avvarrà di OGM o di nuove specie ibride o di tecniche agricole ancora in fase di studio. Molto probabilmente sarà sostenuta dalla integrazione di diverse tecnologie. Tra queste potrebbe trovare posto la coltura di microalghe marine.

Sulla base di dati scientifici più volte verificati, possiamo ragionevolmente ritenere che con le tecnologie e i ceppi in nostro possesso, e in attesa di un' "alga sintetica ad alta resa", sia oggi tecnicamente fattibile una coltura su larga scala (da qualche centinaio a migliaia di ettari) di una microalga marina selezionata, in grado di conseguire un'efficienza di conversione dell'energia solare intorno al 2% e di produrre quindi, in zone adeguate (vedi figura 13), 70



**...e L'EROI della produzione di
biomassa algale in reattori GWP-II
integrati con celle solari sale a 1,5**

Fig. 26 *Reattore GWP della Fotosintetica & Microbiologica S.r.l.*

tonnellate di biomassa per ettaro e per anno, di cui 15-20 tonnellate di olio e 30-45 tonnellate di proteine. Già negli anni ottanta il nostro gruppo aveva sperimentato con successo nell'Italia meridionale (Lamezia Terme, Calabria) la coltura di microalghe marine con rese di oltre 50 tonnellate per ettaro e per anno di biomassa in coltura all'aperto. Oggi stiamo lavorando su diversi fronti, tra cui lo sviluppo di nuovi sistemi di coltura integrati con celle solari che forniscono tutta l'energia necessaria per la coltivazione e la raccolta (GWP di terza generazione) portando l'EROI del processo a 1,5 (fig. 26), la selezione di ceppi resistenti alle alte temperature, e le interazioni alghe-batteri per sfruttare a pieno le potenzialità dei consorzi microbici e assicurare non solo alte produttività ed economicità, ma anche la necessaria stabilità della coltura nel lungo periodo. L'anidride carbonica necessaria in grandi quantità dovrà essere di scarto (quindi provenire da gas di combustione o da fermentazioni), così come potrebbero esserlo, in certe condizioni, gli altri principali nutrienti (azoto e fosforo) che si dovranno comunque utilizzare con efficienze vicine al 100% per evitare gli sprechi e l'inquinamento del suolo, delle acque e della atmosfera che le colture agrarie tradizionali non riescono a ridurre se non marginalmente. Nuovi e più durevoli materiali plastici per la costruzione dei



Fig. 27 *L'umanità è sull'orlo dell'abisso. Le nuove tecnologie agrarie, tra cui la coltura di microalghe marine ci aiuteranno a conservare la terra che conosciamo?*

fotobioreattori e più efficienti tecniche di rimescolamento e di separazione della biomassa dal mezzo di coltura potranno infine assicurare un bilancio energetico, decisamente maggiore di uno (EROI di 3 o maggiore) e di conseguenza ridurre l'impatto ambientale.

Il successo della tecnologia delle alghe dipenderà infine dal fatto che la biomassa prodotta venga sfruttata secondo i concetti della bioraffineria, cioè di un sistema integrato che prende in considerazione non solo l'energia ma, tutti i componenti della biomassa algale (proteine, vitamine, acidi grassi, pigmenti, polimeri di parete e di riserva, ecc.) per ottenere oltre al biocombustibile anche alimenti, mangimi, bioplastiche, fibre, materie prime e prodotti derivati.

La vera innovazione, e quindi la sostanza della rivoluzione basata sulla tecnologia algale, starà nel fatto che le attività produttive (e possibilmente anche quelle di trasformazione) verranno condotte su terreni desertici o in aree marginali utilizzando come risorse primarie sole e acqua di mare o salmastra, senza competere con le colture agricole tradizionali per la produzione di alimenti.

RIASSUNTO

Oggi assistiamo a un crescente interesse per le colture algali, principalmente volto al loro sfruttamento a scopi energetici. Purtroppo, al di là delle aspettative, la bassa efficienza fotosintetica e un bilancio energetico (EROI) non favorevole si traducono in costi di produzione della biomassa algale di oltre 3000 €/ton, incompatibili con l'uso energetico di questo *feedstock*. Tuttavia, il potenziale delle microalghe quali fonte di cibo e combustibili rimane molto elevato e così l'interesse del mondo della ricerca e dell'industria. La coltura delle microalghe non necessita di terreni fertili, non richiede acqua dolce, può usare CO₂ da fumi di combustione o fermentazioni come fonte di carbonio, non richiede pesticidi ed utilizza i fertilizzanti con un'efficienza vicina al 100% ed è, infine, in grado di conseguire produttività in termini di olio e proteine di oltre 15 e 30 tonnellate per ettaro all'anno. Tutto ciò si traduce in un'importante riduzione degli impatti sulle risorse primarie (suolo, acqua), sempre più scarse e degradate, che invece caratterizzano le colture agrarie tradizionali. Al fine di migliorare i bilanci energetici ed economici della produzione di biomassa algale, il nostro gruppo a Firenze sta sperimentando nuovi sistemi di coltura (fotobioreattori) integrati con celle fotovoltaiche in grado di portare l'EROI del processo oltre 1,5. Assieme all'isolamento e messa in coltura di nuovi ceppi termotolleranti e in grado di ottenere elevate produttività su acqua salmastra o di mare, questa tecnologia ha il potenziale per produrre in modo sostenibile biomassa algale per alimenti e, in un futuro più lontano, bio-energia.

ABSTRACT

The interest in microalgae as a source of renewable fuels is still growing. However, the high capital and operating costs of microalgae farming and the non-sufficiently positive energy balance still prevent the development of algal fuels and algal food to commercial scale. Microalgae have several advantages and their potential as source of food, feed and fuels is very high. Microalgae can be cultivated in deserts or marginal lands (they do not need fertile soils) using brackish water or seawater. The efficiency in the use of fertilizers of algae cultures can reach 100% (with minimal pollution of water, soil and atmosphere). Their cultivation does not need pesticides. A suitable technology is however necessary to attain a positive EROI and produce cost-effective algal biomass. In the last years, the researches carried out by our group have been aimed to reduce the inputs for algae cultivation. A new reactor design that integrates photovoltaic elements has been developed and tested outdoors. The experiments have shown that, by intercepting with solar cells about 30% of the impinging photons, electricity can be generated in a quantity sufficient to cover all the operational energy needs of the system (including harvesting) without reducing algal productivity and bring the EROI over 1.5. Together with new strains able to grow at high temperatures at varying salinity, this technology has the potential to contribute to the sustainable production of algal biomass for food and fuels.

BIBLIOGRAFIA PER APPROFONDIMENTI

- BIONDI N., RODOLFI L., TREDICI M.R. (2008): *Bioattività dei microrganismi fotosintetici*, in *Microbiologia Agroambientale*, Bruno Biavati & Claudia Sorlini, eds. Casa Editrice Ambrosiana, Milano, Italy, pp. 635-656.
- BROWN L. R. (2012): *Full planet, empty plates: The new geopolitics of food scarcity*, Earth Policy Institute.
- CRIB J. (2008): *The coming famine: The global food crisis and what we can do to avoid it*, University of California Press.
- RODOLFI L., CHINI ZITTELLI G., BASSI N., PADOVANI G., BIONDI N., BONINI G., TREDICI M.R. (2009): *Microalgae for oil: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor*, «Biotechnol. Bioeng.», 102, pp. 100-112.
- TREDICI M.R. (2008): *Colture massive di microalghe: Calamità o risorsa?*, in «Atti dell'Accademia dei Georgofili», Serie VIII, Vol. 3, Firenze, Italy, pp. 635-650.
- TREDICI M.R. (2010): *Photobiology of microalgae mass cultures: understanding the tools for the next green revolution*, «Biofuels», 1 (1), pp. 143-162.
- TREDICI M.R., BIONDI N., CHINI ZITTELLI G., PONIS E., RODOLFI L. (2009): *Advances in microalgal culture for aquaculture and other uses*, in *New Technologies in Aquaculture: Improving production efficiency, quality and environmental management*, Gavin Burnell & Geoff Allan, eds. CRC Press, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, pp. 610-676.
- TREDICI M.R., RODOLFI L., CHINI ZITTELLI G. (2009): *Photobioreactors*, in *Wiley Encyclopedia of Industrial Biotechnology*, Michael C. Flickinger & Stephanie Anderson eds. John Wiley & Sons, Inc. (NJ), USA.