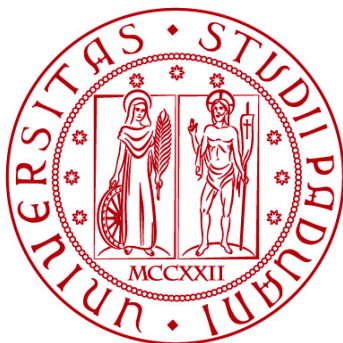


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA

Corso di Laurea in Biologia



ELABORATO DI LAUREA

**Valutazione della microalga *Nannochloropsis*
per l'industria alimentare**

Tutor: Prof. Alessandro Alboresi

Laureanda: Chiara Paolin

ANNO ACCADEMICO 2025/2026

Sommario

Abstract	4
1 Introduzione	5
2 Le microalghe nel settore alimentare e nutraceutico	6
2.1 Classificazione e caratteristiche generali.....	6
2.2 Metodi di coltivazione	8
2.3 Profilo nutrizionale.....	10
3 Il genere <i>Nannochloropsis</i>: caratteristiche biologiche e metaboliche	14
3.1 Inquadramento tassonomico e caratteristiche morfologiche	14
3.2 Composizione lipidica	16
3.2.1 Acidi grassi polinsaturi: biosintesi dell'EPA	18
3.3 Proteine e carboidrati	20
3.4 Pigmenti, vitamine e composti bioattivi	21
4 Applicazioni e prospettive di <i>Nannochloropsis</i> ...	22
4.1. EPA e salute cardiovascolare	22
4.2 Attività antiossidante e antinfiammatoria	23
4.3 Altre potenziali applicazioni nutraceutiche ...	25
4.4 <i>Nannochloropsis</i> come green factory.....	26
Conclusione.....	28
Bibliografia.....	29

Abstract

Negli ultimi anni le microalghe hanno suscitato un crescente interesse da parte della comunità scientifica e dell'industria alimentare grazie al loro elevato valore nutrizionale e al potenziale impiego come fonte sostenibile di composti bioattivi. Tra queste, il genere *Nannochloropsis* si distingue per l'elevata capacità di accumulare lipidi e acidi grassi polinsaturi a lunga catena, in particolare l'acido eicosapentaenoico (EPA), considerato un nutriente di grande interesse per la salute umana. L'obiettivo di questa tesi è analizzare, attraverso una revisione della letteratura scientifica disponibile, le principali caratteristiche biologiche e metaboliche di *Nannochloropsis*, con particolare attenzione ai meccanismi di sintesi dei lipidi e alle strategie biotecnologiche adottate per incrementarne la produttività. Verranno inoltre approfondite le applicazioni della biomassa e degli estratti lipidici nell'industria alimentare e nutraceutica, valutandone le potenzialità come alternativa sostenibile alle tradizionali fonti di omega-3, quali gli oli di pesce. Infine, saranno discusse le prospettive future legate all'impiego di questa microalga, considerando sia gli aspetti tecnologici ed economici ancora da ottimizzare, sia il suo possibile contributo allo sviluppo di sistemi produttivi più sostenibili e orientati ai principi dell'economia circolare.

1. Introduzione

Dal 1950 la popolazione mondiale è passata da circa 2,5 miliardi a oltre 8 miliardi di persone e, secondo le proiezioni delle Nazioni Unite, raggiungerà circa 9,7 miliardi entro il 2050. Questa crescita demografica è accompagnata da un progressivo aumento della domanda di alimenti. (United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2024)

Per rispondere a questa crescente domanda alimentare, la produzione agricola è aumentata attraverso l'espansione delle superfici coltivate e l'intensificazione delle pratiche agricole. Nonostante tali strategie abbiano consentito di incrementare la produzione di alimenti, hanno però determinato un significativo impatto ambientale.¹

Il sistema agroalimentare è responsabile di circa un terzo delle emissioni antropiche globali di gas a effetto serra ed è tra i principali responsabili del consumo di suolo, della perdita di biodiversità e dell'utilizzo delle risorse idriche.

La conversione di aree boschive in terreni agricoli determina una progressiva perdita di biodiversità e la distruzione di numerosi habitat naturali così come anche l'impiego intensivo di fertilizzanti e pesticidi che favoriscono fenomeni di erosione del suolo, eutrofizzazione delle acque e alterazione degli equilibri ambientali.

Queste criticità hanno evidenziato la necessità di sviluppare sistemi di produzione alimentare più sostenibili. In questo contesto, la ricerca si è orientata verso nuove risorse biologiche in grado di garantire elevata produttività, ridotto impatto ambientale e un uso più efficiente delle risorse naturali. (Canini et al., 2024)²

Tra le strategie proposte per rendere più sostenibili i sistemi di produzione alimentare, le microalghe hanno suscitato un crescente interesse grazie all'elevata

¹ *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The State of Food and Agriculture 2022. Rome: FAO, 2022. doi:10.4060/cb9479en.*

² *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The State of Food and Agriculture 2024. Rome: FAO, 2024. doi:10.4060/cd2616en.*

produttività di biomassa, al ridotto impatto ambientale e alla capacità di sintetizzare composti ad alto valore nutrizionale. (Huang et al., 2016; Canini et al., 2024)

Le microalghe sono microrganismi fotosintetici, prevalentemente unicellulari, in grado di convertire l'energia luminosa in energia chimica attraverso la fotosintesi, assimilando l'anidride carbonica e accumulandola sotto forma di biomassa. Rispetto alle colture terrestri presentano tempi di crescita generalmente più rapidi e, in condizioni ottimali, possono raggiungere produttività di circa 20–50 g di biomassa secca m⁻² giorno⁻¹, oltre a poter essere coltivate su terreni marginali utilizzando anche acqua marina o salmastra, (Chisti, 2007; Kusmayadi et al., 2021) senza competere direttamente con la produzione agricola destinata all'alimentazione umana. (Uthaiiah et al., 2025)

Tra le microalghe maggiormente studiate per applicazioni alimentari e nutraceutiche figurano *Arthrospira* (Spirulina), *Chlorella*, *Dunaliella* e *Haematococcus*. (Molino et al., 2018)

Tra queste, il genere *Nannochloropsis* ha suscitato un crescente interesse negli ultimi anni grazie all'elevato contenuto di acido eicosapentaenoico (EPA), per tale motivo costituisce l'oggetto del presente elaborato. (Canini et al., 2024; Navalho et al., 2025)

2. Le microalghe nel settore alimentare e nutraceutico

2.1 Classificazione e caratteristiche generali

Sebbene il termine microalghe sia ampiamente utilizzato in ambito scientifico e biotecnologico, esso non identifica un preciso gruppo tassonomico. Con questa denominazione si indica infatti un insieme eterogeneo di organismi fotosintetici appartenenti a differenti linee evolutive, accomunati principalmente dalle ridotte dimensioni cellulari, dalla capacità di svolgere la fotosintesi e dall'habitat prevalentemente acquatico. Tra questi organismi rientrano per lo più specie eucariotiche, ma il termine viene talvolta impiegato anche in senso più ampio per includere i cianobatteri.

I cianobatteri sono organismi procariotici, ma, dal punto di vista tassonomico, non sono classificati come alghe vere e proprie. Tuttavia condividono con le microalghe numerose caratteristiche fisiologiche ed ecologiche, oltre a presentare applicazioni biotecnologiche simili.(Thoré et al., 2023)

Le microalghe possono vivere come cellule isolate oppure formare colonie e aggregati; mostrano una grande variabilità nella forma e nelle dimensioni, che possono andare da pochi micrometri fino a diverse centinaia di micrometri.

Ad oggi sono state descritte più di 30.000 specie, ma si ritiene che la loro reale diversità sia legata non solo all'aspetto morfologico, ma anche al metabolismo, alla composizione cellulare e alla capacità di adattarsi a condizioni ambientali differenti.

La maggior parte delle microalghe vive in fiumi, laghi, mari e oceani, dove costituisce una parte importante del fitoplancton, alcune specie possono essere presenti anche in ambienti terrestri umidi o vivere in associazione con altri organismi.

La loro ampia distribuzione è legata alla capacità di adattarsi a condizioni molto diverse per temperatura, salinità, disponibilità di luce e nutrienti; questa loro caratteristica ha permesso una notevole diversificazione del gruppo e la presenza delle microalghe in quasi tutti gli ecosistemi acquatici.

La classificazione delle microalghe è complessa perché questi organismi non derivano da un unico antenato comune e perciò vengono considerate un gruppo polifiletico.(Thoré et al., 2023) (Molino et al., 2018)

La loro diversità è legata alla loro storia evolutiva, in particolare ai diversi eventi di endosimbiosi che hanno portato alla comparsa e alla diffusione dei plastidi fotosintetici nei vari gruppi eucariotici.

La fotosintesi ossigenica ha avuto origine nei cianobatteri, organismi procarioti, mentre gli eucarioti fotosintetici sono comparsi successivamente attraverso un evento di endosimbiosi primaria: una cellula eucariotica ancestrale ha inglobato un cianobatterio, che nel tempo si è trasformato in un plastidio. Da questo evento si sono originate le principali linee degli Archaeplastida, comprendenti alghe rosse, alghe verdi e glaucofite. Ulteriori eventi di endosimbiosi secondaria hanno permesso ad altri eucarioti di acquisire plastidi derivati da alghe rosse o verdi, determinando la comparsa di numerosi altri gruppi algali. (Thoré et al., 2023)

Tra i principali gruppi di microalghe eucariotiche rientrano le alghe verdi, le alghe rosse, le diatomee, i dinoflagellati, le aptofite, le criptofite, gli euglenoidi e le eustigmatoficee.

La loro classificazione non dipende da un'unica caratteristica, ma dall'insieme di elementi morfologici, biochimici, genetici e filogenetici. Specie appartenenti a gruppi diversi possono produrre pigmenti, lipidi, proteine e altri composti in quantità differenti: questa variabilità è importante sia dal punto di vista ecologico sia per le applicazioni biotecnologiche, poiché consente di selezionare specie con caratteristiche specifiche in base al prodotto che si vuole ottenere. (Molino et al., 2018; Thoré et al., 2023)

Tra le eustigmatoficee rientra il genere *Nannochloropsis*, il cui studio verrà approfondito nei capitoli successivi soprattutto per il suo innovativo ruolo in campo nutrizionale e per la capacità di accumulare lipidi e acidi grassi polinsaturi. (Canini et al., 2024; Ye et al., 2024)

2.2 Metodi di coltivazione

La coltivazione delle microalghe può essere realizzata attraverso differenti strategie, che si distinguono principalmente in funzione della fonte di energia e di carbonio utilizzata. La scelta del metodo influenza non solo la crescita cellulare, ma anche la resa e la composizione della biomassa prodotta, e deve quindi essere effettuata in relazione alla specie coltivata e all'obiettivo produttivo.

I metodi principali di produzione includono la coltivazione fotoautotrofa, eterotrofa e mixotrofa. (Huang et al., 2016; Daneshvar et al., 2021)

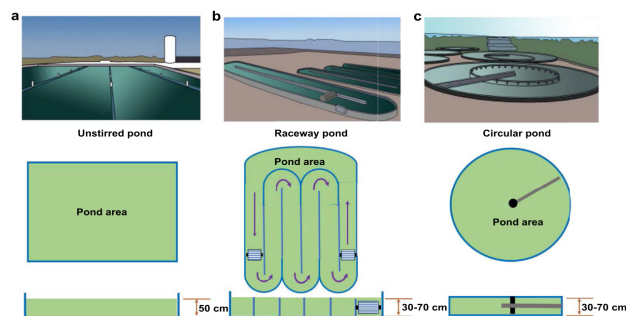
- La coltivazione fotoautotrofa rappresenta il metodo più comune e si basa sull'utilizzo della luce come fonte di energia e del carbonio inorganico, sotto forma di CO₂ o bicarbonato, come fonte di carbonio. Attraverso la fotosintesi, questi organismi trasformano il carbonio inorganico in materia organica e biomassa, permette anche la fissazione della CO₂, ma la produttività può essere limitata dalla disponibilità di luce e dal fenomeno dell'auto-

ombreggiamento, soprattutto quando la densità cellulare aumenta. (Chisti, 2007)

- Nella coltivazione eterotrofa le specie possono crescere in assenza di luce utilizzando composti organici come fonte sia di carbonio sia di energia, ciò consente di ottenere una maggiore densità cellulare, ma è applicabile soltanto a un numero limitato di specie e comporta un maggiore rischio di contaminazione da parte di batteri, lieviti e funghi. (Daneshvar et al., 2021)
- La coltivazione mixotrofa combina le caratteristiche delle due modalità precedenti, poiché utilizza contemporaneamente luce, carbonio inorganico e substrati organici. (Daneshvar et al., 2021)

A seconda della scala produttiva, le microalghe possono essere coltivate in sistemi aperti oppure in fotobioreattori chiusi.

A. Sistemi aperti



B. Sistemi chiusi

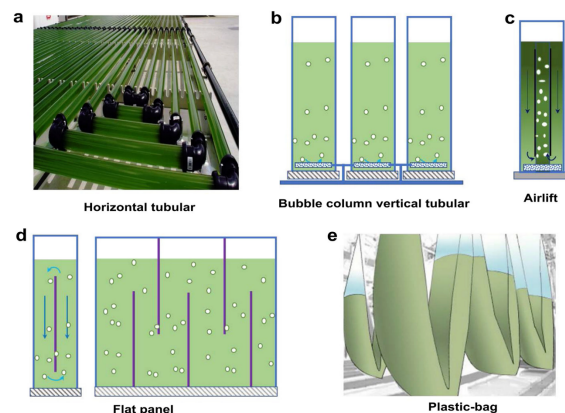


Figura 2.2. Principali sistemi utilizzati per la coltivazione delle microalghe. In alto sono rappresentati i principali sistemi aperti (unstirred pond, raceway pond e circular pond); in

basso alcuni esempi di fotobioreattori chiusi (horizontal tubular, bubble column, airlift, flat panel e plastic bag). Adattata da (Abdur Razzak et al., 2024)

- I sistemi aperti, come vasche e canali poco profondi, sono più semplici ed economici, ma consentono un controllo limitato delle condizioni ambientali e sono maggiormente esposti alla contaminazione.
- I fotobioreattori sono invece strutture trasparenti progettate per favorire l'illuminazione, l'aerazione e la circolazione del mezzo di coltura. Questi sistemi permettono di controllare con maggiore precisione fattori come temperatura, pH, disponibilità di CO₂ e nutrienti, ma richiedono costi di costruzione e gestione più elevati. (Daneshvar et al., 2021)

La scelta delle condizioni di coltivazione è quindi fondamentale, poiché luce, nutrienti, temperatura, pH e disponibilità di carbonio possono modificare non soltanto la quantità di biomassa prodotta, ma anche il contenuto di proteine, lipidi, carboidrati e pigmenti, aspetto importante quando la coltivazione è finalizzata alla produzione di composti di interesse alimentare o nutraceutico. (Daneshvar et al., 2021; Canini et al., 2024)

2.3 Profilo nutrizionale

Le microalghe rappresentano una fonte particolarmente ricca di composti bioattivi e nutrienti di interesse alimentare. Sebbene proteine, lipidi, carboidrati, vitamine e pigmenti siano presenti anche in altri organismi vegetali, nelle microalghe tali componenti possono raggiungere concentrazioni elevate e presentare un profilo nutrizionale particolarmente favorevole, variabile in funzione della specie e delle condizioni di coltivazione. (Molino et al., 2018; Wu et al., 2021; Canini et al., 2024)

Fattori come l'intensità della luce, la disponibilità di nutrienti, la temperatura, la concentrazione di CO₂ e il pH influenzano il metabolismo cellulare e determinano l'accumulo dei vari componenti della biomassa in modo differenziato. Le variazioni delle condizioni ambientali inducono infatti modificazioni del metabolismo cellulare: in condizioni di stress nutrizionale o luminoso alcune specie tendono ad accumulare

lipidi, mentre in condizioni favorevoli alla crescita viene generalmente favorita la sintesi di proteine e di altri costituenti cellulari.(Canini et al., 2024; Ye et al., 2024)

Questa capacità di modulare la composizione della biomassa in risposta alle condizioni di coltivazione consente di indirizzare la produzione verso il composto di maggiore interesse, come proteine, lipidi ricchi di EPA o pigmenti, favorendo l'impiego delle microalghe nei settori alimentare, nutraceutico e farmaceutico.(Canini et al., 2024; Ye et al., 2024)

Le proteine rappresentano uno dei principali costituenti della biomassa microalgale e costituiscono uno degli aspetti che hanno attirato maggiore interesse della ricerca negli ultimi decenni.

In molte specie esse possono rappresentare dal 40 al 60% del peso secco, mentre in alcune microalghe il contenuto proteico può raggiungere valori ancora più elevati.

Tra gli esempi più noti vi sono la *Chlorella vulgaris*, con un contenuto proteico compreso tra il 51 e il 58%, e l'*Arthrospira* (Spirulina), nella quale le proteine possono arrivare fino al 70% del peso secco. (Molino et al., 2018; Navalho et al., 2025)

Anche la *Nannochloropsis* presenta un'elevata percentuale di proteine, generalmente compresa tra il 28 e il 41% della biomassa secca.

Dal punto di vista nutrizionale, le proteine delle microalghe sono caratterizzate da un profilo amminoacidico completo, comprendente sia gli aminoacidi essenziali sia non essenziali. (Kusmayadi et al., 2021; Navalho et al., 2025)

Gli aminoacidi essenziali, che l'organismo umano non è in grado di sintetizzare autonomamente, devono essere introdotti con la dieta e ne fanno parte: leucina, isoleucina, lisina, metionina, treonina e valina.

Per la rilevante presenza di questi macronutrienti, le microalghe sono considerate una promettente fonte proteica alternativa, particolarmente interessante anche per le diete vegetariane e vegane. (Kusmayadi et al., 2021)

I lipidi rappresentano uno dei componenti di maggiore interesse presenti nelle microalghe, sia per il loro valore nutrizionale sia per le numerose applicazioni in ambito alimentare e biotecnologico.

Il loro contenuto varia notevolmente tra le diverse specie e può essere influenzato dalle condizioni di coltivazione, come disponibilità di nutrienti, intensità luminosa e temperatura. (Navalho et al., 2025)

I lipidi costituiscono una riserva energetica per la cellula e comprendono trigliceridi, fosfolipidi e glicolipidi, oltre a una vasta gamma di acidi grassi.

Di maggiore interesse sono gli acidi grassi polinsaturi a lunga catena (LC-PUFA), come gli omega-3 e gli omega-6; questi sono considerati essenziali perché non possono essere sintetizzati dall'organismo umano in quantità sufficienti e devono quindi essere introdotti attraverso l'alimentazione. Tra gli omega-3, l'acido eicosapentaenoico (EPA) e l'acido docosaesaenoico (DHA) rivestono un ruolo fondamentale, in quanto contribuiscono al normale funzionamento del sistema cardiovascolare e nervoso e partecipano ai processi di regolazione dell'infiammazione.

Negli ultimi anni, le microalghe sono state oggetto di un interesse crescente come fonte alternativa di tali acidi grassi, essendo il produttore primario degli omega-3 negli ecosistemi marini. A confronto con gli oli di pesce, gli oli derivati dalle microalghe offrono inoltre il vantaggio di una ridotta contaminazione da sostanze indesiderate, oltre a presentare una modalità di produzione più sostenibile. (Navalho et al., 2025; Uthaiyah et al., 2025)

Numerose specie microalgali producono altri acidi grassi essenziali, tra cui acido α -linolenico (ALA), acido γ -linolenico (GLA), acido linoleico (LA) e acido arachidonico (ARA), tutti coinvolti in importanti funzioni fisiologiche e metaboliche dell'organismo umano, contribuendo al mantenimento dell'integrità delle membrane cellulari, alla regolazione della risposta infiammatoria e alla sintesi di numerose molecole bioattive. La composizione degli acidi grassi varia considerevolmente tra le diverse specie di microalghe. Alcune, come la *Nannochloropsis* e la *Phaeodactylum tricornutum*, sono particolarmente apprezzate per l'elevato contenuto di acido eicosapentaenoico (EPA), mentre altre specie vengono coltivate principalmente per la produzione di acido docosaesaenoico (DHA).

Questa diversità rende possibile selezionare la specie più adatta in funzione del composto di interesse e dell'applicazione prevista. (Navalho et al., 2025; Uthaiyah et al., 2025)

I carboidrati rappresentano un'altra importante componente della biomassa microalgale e svolgono principalmente una funzione di riserva energetica e strutturale. La loro quantità varia tra le diverse specie ed è influenzata sia dalle condizioni ambientali sia dalle modalità di coltivazione.

Nelle microalghe i carboidrati sono presenti sotto forma di monosaccaridi, polisaccaridi e amido; oltre a costituire una parte delle pareti cellulari, questi composti trovano impiego non solo nell'alimentazione umana e animale, ma anche nella produzione di ingredienti destinati all'industria alimentare, come addensanti gelificanti e fibre alimentari.(Molino et al., 2018)

Oltre ai macronutrienti, le microalghe producono pigmenti fotosintetici che svolgono un ruolo essenziale nella cattura dell'energia luminosa e nella protezione della cellula dallo stress ossidativo. I principali gruppi di pigmenti comprendono le clorofille, i carotenoidi e le ficobiliproteine, la cui presenza e concentrazione variano in base alla specie. Tra i pigmenti maggiormente studiati rientrano il β -carotene e l'astaxantina, impiegati anche come coloranti naturali e ingredienti funzionali.(Wu et al., 2021; Ye et al., 2024)

Oltre alla funzione biologica, questi pigmenti hanno suscitato interesse per le loro applicazioni industriali, in quanto rappresentano coloranti naturali utilizzabili nei settori alimentare, cosmetico e farmaceutico. (Ye et al., 2024)

Le microalghe rappresentano inoltre una fonte naturale di vitamine e di numerosi composti ad attività antiossidante. Le vitamine maggiormente presenti sono quelle del gruppo B, la vitamina C, la vitamina E e anche la vitamina A sotto forma di precursori carotenoidi. Questi micronutrienti sono coinvolti in numerosi processi fisiologici, tra cui il metabolismo energetico, il corretto funzionamento del sistema immunitario e la protezione delle cellule dallo stress ossidativo.

L'attività antiossidante delle microalghe è dovuta non solo alla presenza delle vitamine, ma anche di carotenoidi, composti fenolici e altri metaboliti bioattivi in grado di contrastare la formazione dei radicali liberi. (Wu et al., 2021; Ye et al., 2024)

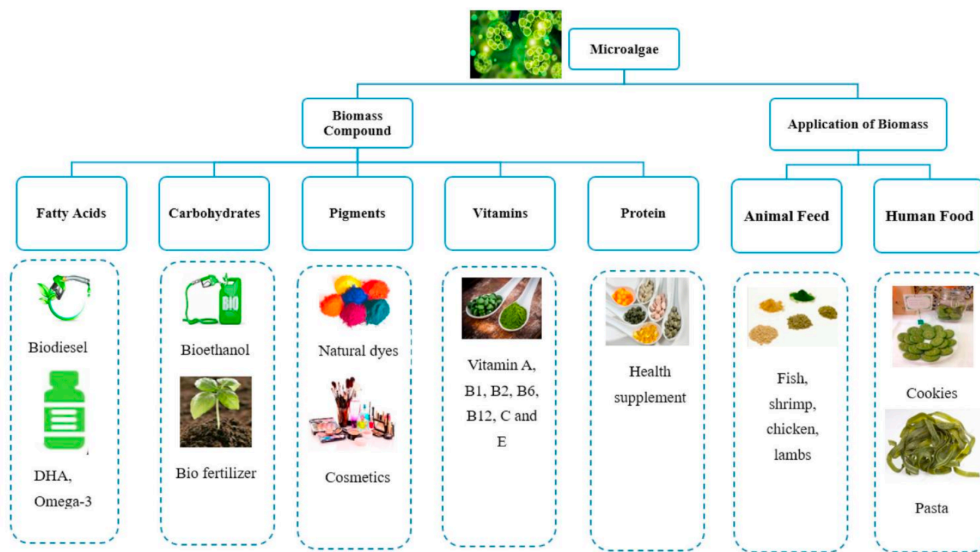


Figura 2.3. Principali componenti della biomassa microalgale e relative applicazioni nei settori alimentare, nutraceutico, zootecnico e industriale. Adattata da (Ye et al., 2024)

3. Il genere *Nannochloropsis*: caratteristiche biologiche e metaboliche

3.1 Inquadramento tassonomico e caratteristiche morfologiche

Dal punto di vista tassonomico il genere *Nannochloropsis* appartiene alla classe *Eustigmatophyceae*, diffuse principalmente negli ambienti marini e salmastri.

Inizialmente erano classificate tra le alghe verdi per via delle loro caratteristiche morfologiche, successivamente studi filogenetici e molecolari le hanno collocate all'interno del phylum *Ochrophyta*, evidenziandone la stretta relazione con altri organismi fotosintetici appartenenti agli eteroconti. (Canini et al., 2024; Ye et al., 2024)

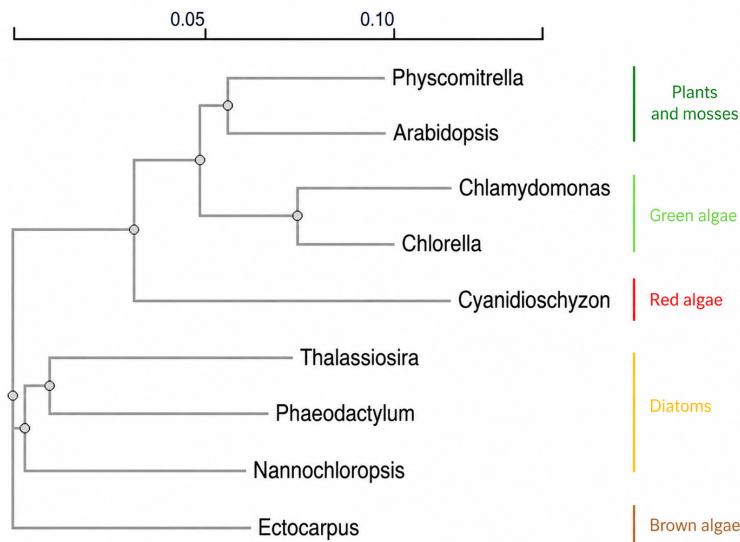


Figura 3.1. Albero filogenetico semplificato che mostra la posizione evolutiva del genere *Nannochloropsis* rispetto ai principali gruppi di organismi fotosintetici. Il cladogramma è stato ottenuto mediante analisi delle sequenze del gene dell'RNA ribosomiale 18S (18S rDNA). Figura adattata da (Canini et al., 2024)

Attualmente il genere comprende numerose specie, tra cui *Nannochloropsis gaditana*, *N. oceanica*, *N. salina*, *N. oculata* e *N. granulata*, tipologie ampiamente studiati sia per la ricerca di base sia per le loro applicazioni industriali. (Canini et al., 2024)

Dal punto di vista morfologico le cellule di *Nannochloropsis* sono di piccole dimensioni, comprese tra 2 e 5 μm di diametro, e presentano una forma sferica o ovoidale. (Savvidou et al., 2021)

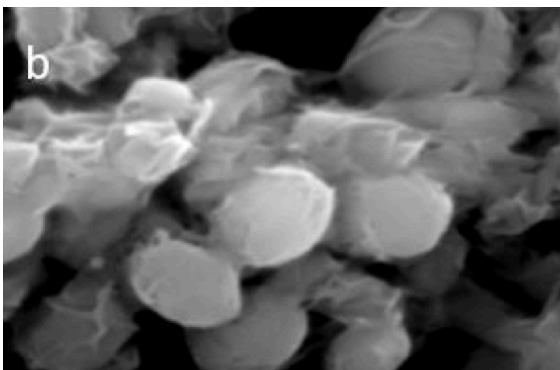


Figura 3.2. Micrografia elettronica a scansione (SEM) di cellule di *Nannochloropsis oceanica* non trattate. Le cellule mostrano una morfologia prevalentemente sferica e un diametro di pochi micrometri. Adattata da (Savvidou et al., 2021)

Sono organismi unicellulari privi di flagelli durante l'intero ciclo vitale e sono caratterizzati dalla presenza di un unico cloroplasto che occupa gran parte del volume cellulare.

La parete cellulare rappresenta una caratteristica distintiva che conferisce una notevole robustezza alla cellula essendo resistente e ricca di polisaccaridi; questa particolarità però può rappresentare un limite nei processi di estrazione dei composti bioattivi destinati alle applicazioni alimentari e nutraceutiche. (Savvidou et al., 2021; Canini et al., 2024)

Le specie appartenenti a questo genere sono distribuite in numerosi ecosistemi acquatici, soprattutto marini e costieri, dove contribuiscono alla produzione primaria, convertendo l'energia luminosa in biomassa attraverso l'attività fotosintetica.

La loro elevata adattabilità consente la crescita in un ampio intervallo di condizioni ambientali, con notevole tolleranza alle variazioni di salinità, intensità luminosa e disponibilità di nutrienti.

Il ciclo vitale è prevalentemente asessuato e avviene mediante divisione cellulare mitotica, con la formazione di cellule figlie geneticamente identiche. La velocità di crescita è influenzata da fattori quali luce, temperatura e disponibilità di nutrienti, condizioni che incidono sia sulla produttività della biomassa, ma anche sulla sintesi dei principali metaboliti di interesse. (Canini et al., 2024; Ye et al., 2024)

3.2 Composizione lipidica

I lipidi costituiscono una delle principali componenti biochimiche della biomassa di *Nannochloropsis* e rappresentano il principale fattore di interesse nutrizionale e biotecnologico di questo genere di microalghe.

Essi comprendono una vasta classe di molecole caratterizzate da proprietà idrofobiche o anfipatiche, fondamentali per l'accumulo di energia, l'organizzazione delle membrane cellulari e la regolazione di numerosi processi metabolici.

Nella *Nannochloropsis*, la composizione lipidica è complessa e comprende sia lipidi di riserva sia lipidi strutturali, la cui distribuzione e abbondanza dipendono dallo stato fisiologico della cellula e dalle condizioni di coltivazione. (Ma et al., 2016; Xu, 2022)

I lipidi in essa presenti sono classificati in lipidi neutri e lipidi polari.

I primi comprendono prevalentemente triacilgliceroli (TAG), accompagnati da quantità minori di diacilgliceroli (DAG), monoacilgliceroli (MAG) e steroli.

I TAG sono costituiti da tre acidi grassi esterificati a una molecola di glicerolo e rappresentano la principale forma di riserva energetica della cellula, accumulandosi soprattutto in condizioni di stress ambientale, come la limitazione dell'azoto o l'elevata intensità luminosa.

Oltre ad accumulare energia, i TAG rappresentano una riserva di carbonio che la cellula può utilizzare, quando le condizioni ambientali tornano favorevoli, per sintetizzare nuovi componenti di membrana e sostenere la crescita.

La sintesi dei lipidi è il risultato di una rete metabolica strettamente regolata, nella quale il diacilglicerolo (DAG) rappresenta un intermedio centrale.

Attraverso la via di Kennedy, il glicerolo-3-fosfato viene convertito in acido lisofosfatidico (LPA), quindi in acido fosfatidico (PA) e infine in DAG. Quest'ultimo costituisce un punto di snodo metabolico, poiché può essere destinato sia alla sintesi dei TAG, attraverso l'azione della diacilglicerolo aciltransferasi (DGAT), sia alla formazione dei principali lipidi strutturali delle membrane cellulari. (Xu, 2022)

La biosintesi lipidica coinvolge principalmente due compartimenti cellulari: il cloroplasto e il reticolo endoplasmatico. Nel cloroplasto prevale la sintesi dei glicolipidi coinvolti nell'organizzazione delle membrane tilacoidali, mentre nel reticolo endoplasmatico avviene la maggior parte della sintesi dei triacilgliceroli, dei betaina-lipidi e degli acidi grassi polinsaturi a lunga catena.

I lipidi polari comprendono fosfolipidi, glicolipidi e betaina-lipidi, componenti essenziali delle membrane biologiche.

Queste molecole possiedono una porzione idrofila e una porzione idrofobica, questa caratteristica conferisce loro proprietà anfipatiche indispensabili per la formazione del doppio strato fosfolipidico.

Nei cloroplasti sono maggiormente presenti i glicolipidi, quali monogalattosildiacilglicerolo (MGDG), digalattosildiacilglicerolo (DGDG) e sulfochinovosildiacilglicerolo (SQDG), fondamentali per il corretto funzionamento dell'apparato fotosintetico.

I fosfolipidi, tra cui fosfatidilcolina (PC), fosfatidilglicerolo (PG), fosfatidiletanolamina (PE) e fosfatidilinositolo (PI), sono invece coinvolti nell'organizzazione delle membrane cellulari e partecipano ai processi di sintesi e rimodellamento degli acidi grassi. (Ma et al., 2016; Xu, 2022)

Gli acidi grassi che costituiscono queste diverse classi lipidiche possono differire per la lunghezza della catena carboniosa e per il grado di insaturazione.

In base al numero di doppi legami vengono distinti in acidi grassi saturi (SFA), monoinsaturi (MUFA) e polinsaturi (PUFA). Tra questi ultimi rivestono maggior interesse gli acidi grassi della serie ω -3 e ω -6, poiché svolgono importanti funzioni fisiologiche e nutrizionali.

La *Nannochloropsis* si distingue soprattutto per la capacità di sintetizzare elevate quantità di acido eicosapentaenoico (EPA, C20:5 ω -3), uno degli acidi grassi polinsaturi a lunga catena di maggiore interesse per l'alimentazione umana, che verrà approfondito nel paragrafo successivo. (Xu, 2022; Ye et al., 2024; Navalho et al., 2025)

3.2.1 Acidi grassi polinsaturi: biosintesi dell'EPA

Tra gli acidi grassi presenti nella frazione lipidica di *Nannochloropsis*, il composto di maggiore interesse è l'acido eicosapentaenoico (EPA; 20:5 n-3), un acido grasso polinsaturo a lunga catena appartenente alla famiglia degli ω -3.

L'EPA rappresenta il principale PUFA accumulato da questo genere di microalghe e costituisce uno dei principali motivi del crescente interesse nei confronti di *Nannochloropsis* per applicazioni alimentari e nutraceutiche.

Oltre all'EPA, sono presenti altri acidi grassi polinsaturi, tra cui l'acido arachidonico (ARA; 20:4 n-6), l'acido linoleico (LA; 18:2 n-6) e, in quantità inferiori, l'acido α -linolenico (ALA; 18:3 n-3), che rappresentano intermedi o precursori della biosintesi dei PUFA a lunga catena.

A differenza di altre microalghe produttrici di DHA, le specie appartenenti al genere *Nannochloropsis* sono prive della $\Delta 4$ -desaturasi e dell'elongasi ELOVL2, enzimi coinvolti nell'ultimo passaggio della conversione dell'EPA in DHA. Di conseguenza, l'EPA rappresenta il principale acido grasso polinsaturo a lunga catena accumulato da queste microalghe. (Xu, 2022; Navalho et al., 2025)

La sintesi dell'EPA avviene principalmente nel reticolo endoplasmatico attraverso una successione di reazioni di desaturazione ed elongazione catalizzate rispettivamente dagli enzimi desaturasi ($\Delta 9$, $\Delta 12$, $\Delta 6$, $\Delta 5$) ed elongasi. Come dimostrato nella figura 3.3 il processo prende origine dall'acido stearico (18:0), che viene inizialmente convertito in acido oleico (18:1) e successivamente in acido linoleico (18:2). Da questo punto la via biosintetica può seguire due percorsi distinti, appartenenti rispettivamente al gruppo ω -6 e ω -3.

Nella via ω -6 l'acido linoleico viene convertito in acido γ -linolenico (GLA), successivamente in acido diomo- γ -linolenico (DGLA), quindi in acido arachidonico (ARA) e infine in EPA. Nella via ω -3, invece, il linoleico viene convertito in α -linolenico (ALA), in seguito in acido stearidonico (SDA), acido eicosatetraenoico (ETA) e infine in EPA.

Studi di radiomarcatura indicano che, nelle specie di *Nannochloropsis*, la via ω -6 rappresenta il percorso biosintetico predominante per la produzione di EPA. (Xu, 2022)

Gli acidi grassi polinsaturi non svolgono esclusivamente una funzione di riserva energetica. Essi sono prevalentemente esterificati nei lipidi polari delle membrane cellulari, in particolare nei glicolipidi delle membrane tilacoidali, dove contribuiscono al mantenimento della fluidità di membrana, all'organizzazione dei fotosistemi e al corretto svolgimento dei processi fotosintetici.

Inoltre, il grado di insaturazione degli acidi grassi influenza la permeabilità delle membrane, la funzionalità delle proteine di membrana e la capacità della cellula di adattarsi alle variazioni ambientali, come cambiamenti di temperatura, intensità luminosa e disponibilità di nutrienti. (Xu, 2022; Navalho et al., 2025)

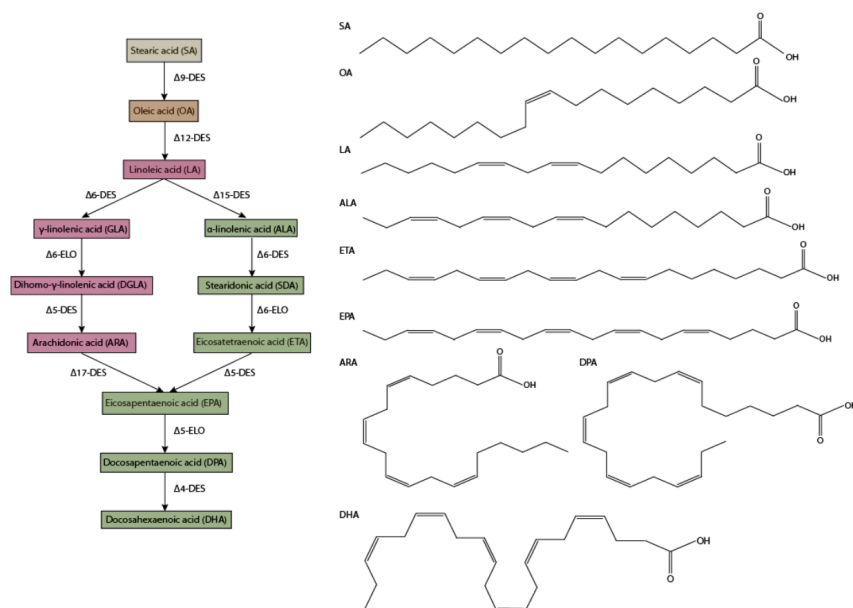


Figura 3.3 Schema semplificato della via biosintetica degli acidi grassi polinsaturi (PUFA) in *Nannochloropsis*.

La sintesi dell'acido eicosapentaenoico (EPA) avviene attraverso successive reazioni di desaturazione ed elongazione che coinvolgono le vie metaboliche ω -3 e ω -6. Adattata da (Navalho et al., 2025)

3.3 Proteine e carboidrati

Oltre all'elevato contenuto lipidico, *Nannochloropsis* presenta una composizione nutrizionale ricca di proteine e carboidrati, che contribuiscono alle proprietà della biomassa e ne ampliano le potenziali applicazioni. La quantità di questi macronutrienti può variare in funzione della specie e delle condizioni di coltivazione. Nello studio di Molino et al., il contenuto proteico di *Nannochloropsis* risulta pari a $26,67 \pm 1,10\%$ del peso secco, mentre i carboidrati rappresentano il $32,05 \pm 0,70\%$ del peso secco della biomassa.

Le proteine costituiscono una componente fondamentale della biomassa microalgale e svolgono un ruolo essenziale nei processi strutturali e metabolici della cellula. Per il loro contenuto proteico, *Nannochloropsis* è considerata una promettente fonte alternativa di proteine di origine vegetale per lo sviluppo di ingredienti destinati

all'alimentazione umana e animale. (Molino et al., 2018; Kusmayadi et al., 2021; Navalho et al., 2025)

La presenza di una parete cellulare particolarmente resistente, costituita principalmente da cellulosa e algaenano, può limitare l'accessibilità delle proteine e ridurre la digeribilità. Per questo motivo, vengono spesso impiegati trattamenti di pre-lavorazione in grado di favorire la rottura della parete cellulare e migliorare il rilascio dei nutrienti intracellulari.

I carboidrati sono presenti principalmente sotto forma di polisaccaridi strutturali della parete cellulare e di composti di riserva coinvolti nel metabolismo energetico. Sebbene il principale interesse nei confronti di *Nannochloropsis* sia legato alla produzione di lipidi, anche la frazione glucidica contribuisce alle caratteristiche funzionali della biomassa e può essere valorizzata nei processi di bioraffineria per la produzione di ingredienti destinati ai settori alimentare e biotecnologico. (Molino et al., 2018; Kusmayadi et al., 2021)

3.4 Pigmenti, vitamine e composti bioattivi

Oltre ai lipidi, alle proteine e ai carboidrati, *Nannochloropsis* contiene numerosi composti bioattivi che contribuiscono ad aumentarne il valore nutrizionale e le potenziali applicazioni. Di particolare importanza sono i pigmenti fotosintetici e alcune vitamine, coinvolti sia nei processi fisiologici della microalga sia nelle proprietà funzionali della biomassa.

Nannochloropsis contiene clorofilla *a*, unico pigmento clorofilliano presente, accompagnata da diversi carotenoidi, tra cui violaxantina, vaucherixantina e β -carotene. (Wu et al., 2021; Ye et al., 2024)

Questi pigmenti svolgono un ruolo fondamentale nella fotosintesi, consentendo l'assorbimento dell'energia luminosa e proteggendo le cellule dai danni provocati da un'eccessiva esposizione alla luce grazie alla loro attività fotoprotettiva e antiossidante.

Oltre ai pigmenti, *Nannochloropsis* presenta una fonte di vitamine liposolubili, come vitamina E e vitamina D₃, entrambe considerate di interesse nutrizionale. La

vitamina E contribuisce alla protezione delle membrane cellulari dai processi ossidativi, mentre la presenza naturale di vitamina D₃ rappresenta un potenziale ingrediente per alimenti funzionali e prodotti nutraceutici.

La presenza di pigmenti, vitamine e altri composti bioattivi amplia il potenziale di *Nannochloropsis*, rendendola una microalga di interesse non solo per la produzione di lipidi ricchi in EPA, ma anche come fonte di molecole ad elevato valore aggiunto, il cui impiego nei settori alimentare e nutraceutico sarà approfondito nel capitolo successivo. (Ye et al., 2024; Navalho et al., 2025)

4. Applicazioni e prospettive di *Nannochloropsis*

4.1. EPA e salute cardiovascolare

Tra i composti bioattivi prodotti da *Nannochloropsis*, l'acido eicosapentaenoico (EPA) rappresenta il principale costituente di interesse nutraceutico grazie ai numerosi effetti benèfici documentati sulla salute cardiovascolare.

L'EPA appartiene alla famiglia degli acidi grassi polinsaturi omega-3 a lunga catena ed è noto per la capacità di modulare diversi processi fisiologici coinvolti nell'omeostasi cardiovascolare.

Le principali fonti alimentari di EPA sono rappresentate dai pesci grassi e dagli oli di origine marina; tuttavia, il progressivo sfruttamento delle risorse ittiche e la crescente richiesta di alternative sostenibili hanno orientato la ricerca verso nuove fonti, tra cui le microalghe. (Wu et al., 2021; Navalho et al., 2025)

Nannochloropsis si distingue come una delle specie più promettenti, per via della capacità di accumulare elevate quantità di EPA nella propria biomassa, rendendola una valida alternativa vegetale agli oli di pesce.

Numerose evidenze scientifiche hanno dimostrato che un adeguato apporto di EPA contribuisce al mantenimento della salute cardiovascolare attraverso diversi meccanismi d'azione. Tra gli effetti maggiormente documentati vi è la riduzione della concentrazione dei trigliceridi plasmatici, che può raggiungere il 20–30% nei soggetti con ipertrigliceridemia.

Tale patologia è considerata uno dei principali fattori di rischio per lo sviluppo delle malattie cardiovascolari. L'EPA esercita anche un'importante attività antinfiammatoria, modulando la produzione di mediatori lipidici e favorendo la sintesi di molecole coinvolte nella risoluzione del processo infiammatorio. Questo effetto contribuisce a limitare l'infiammazione cronica di basso grado, oggi riconosciuta come uno dei meccanismi alla base della progressione dell'aterosclerosi e di numerose patologie cardiometaboliche.

Un'ulteriore caratteristica consiste nel contributo dell'EPA al mantenimento di un equilibrato rapporto tra acidi grassi omega-6 e omega-3 nella dieta. Le moderne abitudini alimentari dei Paesi occidentali sono infatti caratterizzate da un'elevata assunzione di acidi grassi omega-6 rispetto agli omega-3, una condizione associata a un aumento dello stato infiammatorio e del rischio cardiovascolare. L'impiego di *Nannochloropsis* come fonte di EPA può quindi rappresentare una strategia nutrizionale utile per riequilibrare questo rapporto, favorendo un profilo lipidico più favorevole e contribuendo alla prevenzione delle malattie cardiovascolari. (Wu et al., 2021; Navalho et al., 2025)

L'utilizzo di *Nannochloropsis* presenta importanti vantaggi in termini di sostenibilità ambientale. A differenza dell'olio di pesce, la produzione di EPA da microalghe non dipende dallo sfruttamento degli ecosistemi marini e può essere realizzata attraverso processi di coltivazione controllati, riducendo la pressione sulle risorse ittiche. Per questo motivo, gli estratti lipidici ricchi di EPA ottenuti da *Nannochloropsis* sono oggi considerati una delle più promettenti alternative per la formulazione di integratori nutraceutici e alimenti funzionali destinati alla promozione della salute cardiovascolare. Sebbene l'EPA rappresenti il principale composto bioattivo responsabile dell'interesse nutraceutico verso *Nannochloropsis*, questa microalga contiene anche numerose altre molecole funzionali, tra cui carotenoidi, fitosteroli e vitamine, che contribuiscono sinergicamente alle sue proprietà biologiche. (Ma et al., 2016; Wu et al., 2021; Navalho et al., 2025)

4.2 Attività antiossidante e antinfiammatoria

Nannochloropsis è caratterizzata dalla presenza di numerosi composti bioattivi dotati di attività antiossidante e antinfiammatoria. Tra questi sono di maggior importanza i carotenoidi, come la violaxantina e il β -carotene, insieme a fitosteroli, vitamine e altri metaboliti secondari, che contribuiscono in maniera sinergica alla protezione delle cellule dallo stress ossidativo e dai processi infiammatori. L'azione combinata di queste molecole rende *Nannochloropsis* un ingrediente di crescente interesse per lo sviluppo di nutraceutici destinati alla promozione della salute e alla prevenzione delle patologie croniche. (Wu et al., 2021; Ye et al., 2024)

Lo stress ossidativo rappresenta una condizione caratterizzata da uno squilibrio tra la produzione di specie reattive dell'ossigeno (ROS) e la capacità dei sistemi antiossidanti dell'organismo di neutralizzarle. Un'eccessiva formazione di radicali liberi può determinare danni a lipidi, proteine e acidi nucleici, contribuendo allo sviluppo di numerose patologie croniche, tra cui malattie cardiovascolari, disturbi neurodegenerativi e alterazioni metaboliche. In questo contesto, i carotenoidi presenti in *Nannochloropsis* sono in grado di contrastare l'azione delle specie reattive dell'ossigeno, limitando l'ossidazione cellulare e contribuendo al mantenimento dell'integrità delle membrane biologiche. (Wu et al., 2021; Ye et al., 2024)

Parallelamente all'attività antiossidante, studi in vitro hanno evidenziato che gli estratti di *Nannochloropsis* possiedono anche proprietà antinfiammatorie. Tali effetti sembrano derivare dalla presenza simultanea di EPA, carotenoidi e fitosteroli, capaci di modulare la produzione di mediatori coinvolti nella risposta infiammatoria e di attenuare l'attivazione di specifiche vie di segnalazione cellulare associate all'infiammazione cronica. Sebbene i meccanismi molecolari siano ancora oggetto di approfondimento, i risultati ottenuti suggeriscono che questi composti possano contribuire a ridurre lo stato infiammatorio cronico di basso grado, riconosciuto come un importante fattore di rischio per numerose patologie cronico-degenerative. (Wu et al., 2021; Ye et al., 2024)

A supporto di queste potenziali applicazioni, alcuni studi sperimentali hanno mostrato che estratti di *Nannochloropsis* oceanica ricchi di violaxantina esercitano un effetto

protettivo nei confronti del danno cellulare indotto dalle radiazioni UV-B, riducendo la senescenza delle cellule e preservando l'espressione del collagene nei fibroblasti dermici umani. Analogamente, estratti di *Nannochloropsis* oculata ricchi di fitosteroli hanno evidenziato una significativa attività antinfiammatoria in modelli cellulari, confermando il potenziale di questa microalga come fonte di composti bioattivi destinati allo sviluppo di nuovi nutraceutici. È tuttavia importante sottolineare che gran parte delle evidenze disponibili deriva da studi in vitro o da modelli sperimentali e necessita di ulteriori conferme attraverso studi clinici sull'uomo. (Ma et al., 2016; Ye et al., 2024)

4.3 Altre potenziali applicazioni nutraceutiche

La presenza di diversi composti bioattivi, tra cui EPA, carotenoidi, fitosteroli e vitamina D₃, suggerisce infatti un possibile ruolo nella prevenzione e nel supporto nutrizionale di numerose condizioni patologiche, sebbene molte delle evidenze disponibili derivino ancora da studi preclinici.

Tra gli aspetti più promettenti vi è il possibile contributo al mantenimento della salute neurologica. Gli acidi grassi omega-3, e in particolare l'EPA, attraverso il mantenimento della fluidità delle membrane neuronali e la modulazione dei processi neuroinfiammatori, sono coinvolti nel corretto funzionamento del sistema nervoso e sono stati associati alla protezione delle funzioni cognitive e alla riduzione del rischio di declino cognitivo legato all'età. Sebbene gli studi disponibili riguardino principalmente gli omega-3 nel loro complesso e non esclusivamente quelli derivati da *Nannochloropsis*, la presenza di elevate concentrazioni di EPA rende questa microalga una promettente fonte alternativa per la formulazione di integratori destinati al supporto della salute cerebrale. (Wu et al., 2021; Navalho et al., 2025)

Un ulteriore elemento di interesse è rappresentato dalla vitamina D₃, naturalmente presente in *Nannochloropsis*, sebbene il contenuto possa variare significativamente in funzione della specie e delle condizioni di coltivazione.

Questa caratteristica risulta particolarmente rilevante poiché le fonti alimentari vegetali di vitamina D₃ sono estremamente limitate. La possibilità di ottenere tale

vitamina da una microalga potrebbe favorire lo sviluppo di nutraceutici destinati a soggetti con aumentato fabbisogno o che seguono regimi alimentari vegetariani e vegani, ampliando le alternative alle fonti tradizionali di origine animale. (Wu et al., 2021; Ye et al., 2024)

Nel complesso, le evidenze disponibili indicano che *Nannochloropsis* rappresenta una promettente fonte di composti bioattivi per lo sviluppo di nuovi nutraceutici. Nonostante il crescente numero di studi, restano ancora da chiarire diversi aspetti relativi alla biodisponibilità dei suoi principi attivi, ai dosaggi ottimali e agli effetti a lungo termine nell'uomo. Per questo motivo, saranno necessari ulteriori studi clinici per confermare il reale potenziale di questa microalga e favorirne un impiego sempre più diffuso nel settore della nutrizione e della salute. (Ma et al., 2016; Wu et al., 2021)

4.4 *Nannochloropsis* come green factory

Il termine green factory identifica organismi biologici utilizzati come piattaforme sostenibili per la produzione di molecole ad alto valore aggiunto. Tra le microalghe di maggiore interesse, *Nannochloropsis* rappresenta uno dei modelli più promettenti grazie alla combinazione di elevata produttività, rapidità di crescita e capacità di accumulare numerosi composti bioattivi.

Il concetto di bioraffineria applicato alle microalghe si basa sull'utilizzo integrale della biomassa, con l'obiettivo di recuperare in modo sequenziale le diverse frazioni ad alto valore aggiunto. In un processo integrato, dalla stessa biomassa possono essere estratti lipidi ricchi di EPA destinati al settore nutraceutico, pigmenti per applicazioni alimentari e cosmetiche, proteine per ingredienti funzionali e la frazione residua può essere valorizzata per la produzione di biofertilizzanti, mangimi o bioenergia. Questo approccio consente di aumentare l'efficienza economica del processo e di ridurre la produzione di scarti, favorendo lo sviluppo di modelli produttivi più sostenibili. (Canini et al., 2024; Uthaiyah et al., 2025)

La possibilità di modulare le condizioni di coltivazione consente inoltre di indirizzare il metabolismo cellulare verso la produzione selettiva di specifici metaboliti, rendendo

Nannochloropsis una piattaforma biotecnologica particolarmente versatile in funzione dell'applicazione industriale desiderata.

Nonostante i progressi raggiunti, la piena valorizzazione di *Nannochloropsis* come green factory richiede ulteriori sviluppi nell'ottimizzazione delle tecniche di coltivazione, nei processi di estrazione e nelle strategie di miglioramento genetico, con l'obiettivo di aumentare la resa produttiva e ridurre i costi di produzione. L'integrazione delle tecnologie *omics* con gli strumenti di biologia sintetica e di ingegneria metabolica consentirà la progettazione razionale di ceppi più efficienti, caratterizzati da una maggiore produttività e da un accumulo selettivo dei metaboliti di interesse, ampliando ulteriormente le applicazioni di questa microalga nel contesto della bioeconomia circolare.

Come illustrato in Figura 4.4, il crescente interesse industriale verso *Nannochloropsis* è sostenuto dall'aumento della domanda di ingredienti funzionali e fonti sostenibili di EPA, ma la sua diffusione su larga scala è ancora limitata da sfide tecnologiche ed economiche. Il superamento di tali criticità sarà determinante per favorire l'impiego di questa microalga in un numero sempre maggiore di applicazioni alimentari, nutraceutiche e industriali.(Canini et al., 2024; Uthaiah et al., 2025)

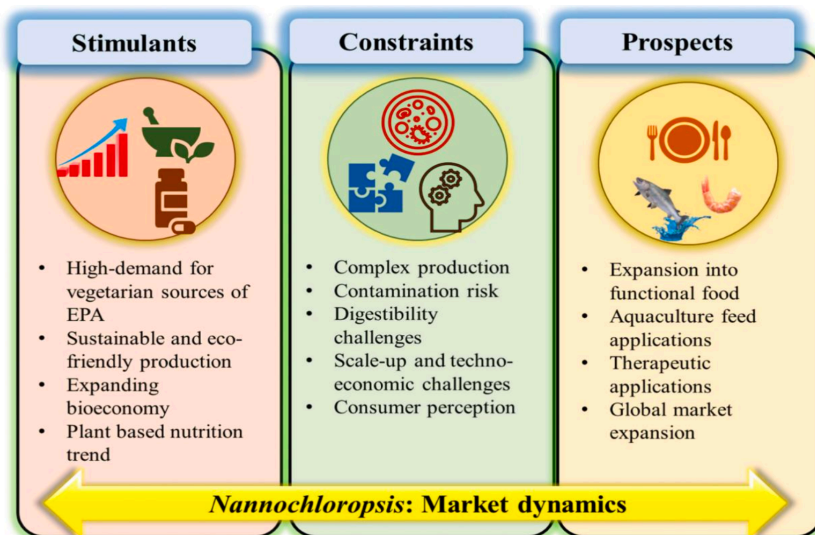


Figura 4. Principali fattori che promuovono lo sviluppo di *Nannochloropsis* (stimulants), principali limitazioni (constraints) e prospettive future (prospects) per il suo impiego nei settori alimentare, nutraceutico e dell'acquacoltura. Adattata da (Uthaiah et al., 2025)

Conclusione

La revisione della letteratura ha evidenziato come *Nannochloropsis* rappresenti una delle microalghe di maggiore interesse nel panorama biotecnologico e alimentare, grazie alla combinazione di elevata produttività, adattabilità a differenti condizioni di coltivazione e ricca composizione biochimica. Il contenuto di acido eicosapentaenoico (EPA), proteine, pigmenti, vitamine e altri composti bioattivi conferisce a questo genere un elevato valore nutrizionale e ne giustifica il crescente interesse per applicazioni alimentari e nutraceutiche.

Le evidenze analizzate mostrano inoltre che le condizioni di coltivazione influenzano profondamente la composizione della biomassa, rendendo possibile indirizzare la produzione verso specifici metaboliti di interesse. Questa versatilità, unita ai progressi nelle tecnologie di coltivazione e trasformazione della biomassa, amplia le potenzialità applicative di *Nannochloropsis*.

Sebbene siano ancora presenti criticità legate alla produzione su larga scala e ai costi dei processi industriali, i continui progressi della ricerca lasciano prevedere un impiego sempre più esteso di questa microalga come fonte sostenibile di ingredienti funzionali e molecole bioattive. Nel complesso, *Nannochloropsis* rappresenta una risorsa promettente per lo sviluppo di sistemi produttivi più sostenibili e innovativi, con potenziali ricadute nei settori alimentare, nutraceutico e biotecnologico.

Bibliografia

Abdur Razzak S, Bahar K, Islam KMO, Haniffa AK, Faruque MO, Hossain SMZ, Hossain MM (2024) Microalgae cultivation in photobioreactors: sustainable solutions for a greener future. *Green Chem Eng* **5**: 418–439

Canini D, Ceschi E, Perozeni F (2024) Toward the Exploitation of Sustainable Green Factory: Biotechnology Use of *Nannochloropsis* spp. *Biology* **13**: 292

Chisti Y (2007) Biodiesel from microalgae. *Biotechnol Adv* **25**: 294–306

Daneshvar E, Sik Ok Y, Tavakoli S, Sarkar B, Shaheen SM, Hong H, Luo Y, Rinklebe J, Song H, Bhatnagar A (2021) Insights into upstream processing of microalgae: A review. *Bioresour Technol* **329**: 124870

Huang Y, Zhang D, Xue S, Wang M, Cong W (2016) The Potential of Microalgae Lipids for Edible Oil Production. *Appl Biochem Biotechnol* **180**: 438–451

Kusmayadi A, Leong YK, Yen H-W, Huang C-Y, Chang J-S (2021) Microalgae as sustainable food and feed sources for animals and humans – Biotechnological and environmental aspects. *Chemosphere* **271**: 129800

Ma X-N, Chen T-P, Yang B, Liu J, Chen F (2016) Lipid Production from *Nannochloropsis*. *Mar Drugs* **14**: 61

Molino A, Iovine A, Casella P, Mehariya S, Chianese S, Cerbone A, Rimauro J, Musmarra D (2018) Microalgae Characterization for Consolidated and New Application in Human Food, Animal Feed and Nutraceuticals. *Int J Environ Res Public Health* **15**: 2436

Navalho S, Ferrer-Ledo N, Barbosa MJ, Varela J (2025) *Nannochloropsis* Lipids and Polyunsaturated Fatty Acids: Potential Applications and Strain Improvement. *Mar Drugs* **23**: 128

Savvidou MG, Ferraro A, Schinas P, Mamma D, Kekos D, Hristoforou E, Kolisis FN (2021) Magnetic Immobilization and Growth of *Nannochloropsis oceanica* and *Scenedasmus almeriensis*. *Plants* **11**: 72

Thoré ESJ, Muylaert K, Bertram MG, Brodin T (2023) Microalgae. *Curr Biol* **33**: R91–R95

United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2024) World Population Prospects 2024: Summary of Results. United Nations, New York

Uthaiah NM, Venkataramareddy SR, Sheikh AY (2025) Oleaginous microalgae *Nannochloropsis* sp. as a potential source of EPA and bioactive metabolites: Bottlenecks in the downstream processing and unravelling the challenges in its food, feed and therapeutic application. *Algal Res* **86**: 103897

Wu J, Gu X, Yang D, Xu S, Wang S, Chen X, Wang Z (2021) Bioactive substances and potentiality of marine microalgae. *Food Sci Nutr* **9**: 5279–5292

Xu Y (2022) Biochemistry and Biotechnology of Lipid Accumulation in the Microalga *Nannochloropsis oceanica*. *J Agric Food Chem* **70**: 11500–11509

Ye Y, Liu M, Yu L, Sun H, Liu J (2024) *Nannochloropsis* as an Emerging Algal Chassis for Light-Driven Synthesis of Lipids and High-Value Products. *Mar Drugs* **22**: 54