

Versión digital

Microalgas para la industria alimenticia

Leidy Johanna Rendón Castrillón
Margarita Enid Ramírez Carmona
Yesid Vélez Salazar



Universidad
Pontificia
Bolivariana

Microalgas para la industria alimenticia

Leidy Johanna Rendón Castrillón
Margarita Enid Ramírez Carmona
Yesid Vélez Salazar



333.9538
R397

Rendón Castrillón, Leidy Johanna y otros
Microalgas para la industria alimenticia / Leidy Johanna Rendón
Castrillón, Margarita Enid Ramírez Carmona y Yesid Hernán Vélez
Salazar. -- Medellín: UPB., 2015
72 p.: 19 x 24 cm.
ISBN: 978-958-764-228-5

1. Microalgas – Aplicaciones – 2. Biotecnología de alimentos –
3. Residuos orgánicos – Aprovechamiento – 4. Algas – Clasificación –
5. Microalgas – Cultivo – I. Ramírez Carmona, Margarita Enid – II. Vélez
Salazar, Yesid Hernán – III. Tit.

© Leidy Johanna Rendón Castrillón
© Margarita Enid Ramírez Carmona
© Yesid Vélez Salazar
© Editorial Universidad Pontificia Bolivariana

Microalgas para la industria alimenticia

ISBN: 978-958-764-228-5 (Versión web)

Primera edición, 2015

Escuela de Ingenierías

Facultad de Ingeniería Química

Gran Canciller UPB y Arzobispo de Medellín: Mons. Ricardo Tobón Restrepo

Rector General: Pbro. Julio Jairo Ceballos Sepúlveda

Vicerrector Académico: Pbro. Jorge Iván Ramírez Aguirre

Decana Escuela de Ingenierías: Piedad Gañán Rojo

Directora Facultad de Ingeniería Química: Fabio Castrillón Hernández

Editor: Juan José García Posada

Coordinadora de Producción: Ana Milena Gómez C.

Diseño y diagramación: Ana Mercedes Ruiz M.

Ilustración: Mauricio Márquez Jaramillo

Corrector de estilo: César Alejandro Buritica

Dirección editorial:

Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2015

Email: editorial@upb.edu.co

www.upb.edu.co

Telefax: (57)(4) 354 4565

A.A. 56006 - Medellín - Colombia

Radicado: 0993-27-04-12

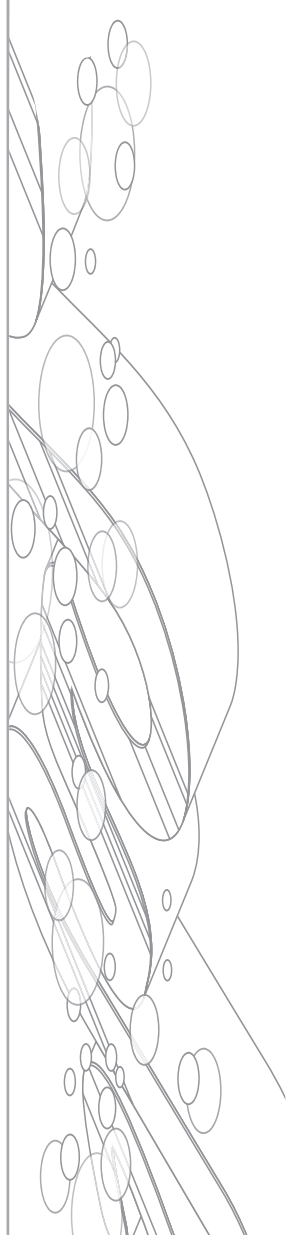
Prohibida la reproducción total o parcial, en cualquier medio o para cualquier propósito, sin la autorización escrita de la Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.

Tabla de contenido

Resumen.....	7
Introducción.....	9
1. Algas	13
1.1 <i>Macroalgas</i>	14
1.2 <i>Microalgas</i>	18
1.3 <i>Composición</i>	32
1.4 <i>Producción</i>	33
1.4.1 Medios de cultivo.....	33
1.4.2 Metabolismo.....	36
1.4.3 Condiciones operacionales	40
1.5 <i>Reactores</i>	43
1.6 <i>Aplicaciones</i>	48
1.6.1 Industria cosmética.....	48
1.6.2 Industria farmacéutica.....	49
1.6.3 Ácidos grasos	50
1.6.4 Pigmentos: Carotenoides	51
1.6.5 Astaxantina.....	51
1.6.6 Clorofila.....	52
1.6.7 Ficocoloides	52
1.6.8 Captura de CO ₂	52
1.6.9 Alimentación Humana	53
1.6.10 Acuicultura o Maricultura	53



1.6.11	Animales domésticos.....	54
1.6.12	Porcinos y rumiantes.....	54
1.6.13	Sustancias y fabricación de productos químicos de alto valor, salud humana.....	55
1.7	Proteína Unicelular	55
Conclusiones.....		57
Bibliografía		59

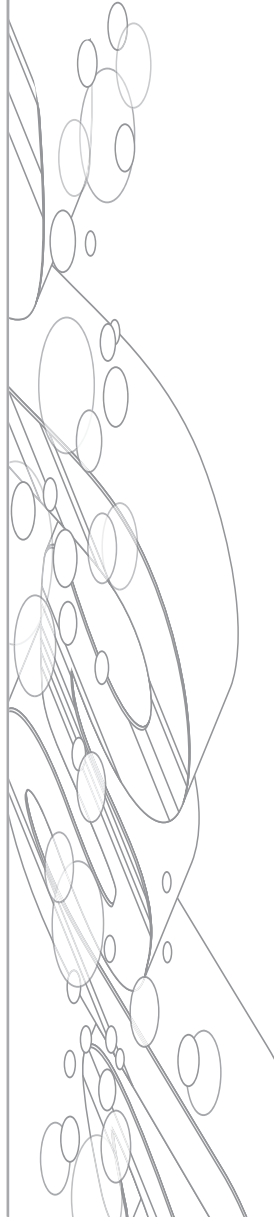


Resumen

La producción de proteína microalgal ha representado desde principios del siglo XX una opción biotecnológica de discutida viabilidad en el manejo y aprovechamiento de desechos orgánicos de origen agrícola, constituyendo una alternativa recurrente de convertir estas fuentes de contaminación en materiales útiles desde un punto de vista económico, nutricional e industrial.

En este libro se destacan las aplicaciones de las microalgas en la industria alimenticia, estableciendo la clasificación general de las algas.

Se realizó también la revisión del contenido de nutrientes esenciales para el cultivo de las microalgas, condiciones operacionales para el crecimiento (temperatura, distribución e intensidad de la luz, pH, oxígeno disuelto, entre otros), sistemas de reactores, tanto abiertos como cerrados, y composición (proteínas, carbohidratos, lípidos, entre otros), de aminoácidos.



Introducción

La tasa de crecimiento de la población se encuentra en aumento, especialmente en las naciones en vía de desarrollo, por lo cual se espera que para la primera década del siglo XXI, la población mundial alcance entre 6.8 a 9 billones de personas (Chacón, 2004), (Giraldo & López, 2008) y (Jess, 2010). Por lo cual, se ha incrementado la demanda de producción de alimentos en los países del tercer mundo, llevando a una enorme brecha en la demanda y la oferta y de este modo aumentando el número de personas que padecen hambre y desnutrición crónica (Anupama & Ravindra, 2000).

En promedio la desnutrición crónica afecta el 45% de los menores en la India y Pakistán, el 40% en los países del África sub-sahariana, el 21% en los países del sudeste asiático y el 16% en los países de América Latina y el Caribe (Gaviria & Palau, 2006) y (FAO, 2008). Guatemala y Honduras presentan niveles altos de desnutrición crónica con 46.4% (1999) y 29.2% (2001) respectivamente. Colombia para el 2010 presentó un 13.2% de niños desnutridos (ICBF,

2011), encontrándose en un lugar intermedio y los países con bajos niveles de desnutrición crónica en América Latina y el Caribe son Cuba y Chile con un 4.6% (2000) y 1.5% (2002) respectivamente (Yanez, 2006).

De igual forma, con el crecimiento de la población en la actualidad, es factible que las fuentes convencionales (agricultura, ganadería y pesca) no sean capaces de satisfacer la demanda proteica para esta población emergente, proyectándose entre los años 1980-2015 una producción agrícola igual a la generada a través de la historia (Giraldo & López, 2008) y (Sánchez M & et al., 2003).

La desnutrición, incrementa el riesgo de contraer enfermedades infecciosas y crónicas en todas las etapas del ciclo de vida. Los niños con bajos niveles de nutrición son más propensos a enfermedades coronarias, diabetes, presión arterial alta, obstrucción pulmonar, insuficiencia renal, entre otras enfermedades durante la edad adulta (Gaviria & Palau, 2006).

La Organización de las Naciones Unidas, en el año 2000, presentó un déficit de 400 millones de toneladas de cereales (harinas ricas en proteína), teniendo en cuenta la población prevista, motivando al consumo animal (Chacón, 2004).

El problema no sólo involucra a seres humanos, también a sus animales. El animal puede presentar una marcada escasez en el futuro, dado que se necesitará más ganado para suplir la demanda. Además, la alimentación adecuada de los animales representa un elevado costo en su producción (Giraldo & López, 2008).

Lo anterior obliga a buscar otras fuentes de proteína para la alimentación humana e incluso animal. Este problema se intentó resolver de diversas formas mediante el mantenimiento de la producción agrícola con la fertilización biológica, y la capacitación del personal en centros de adiestramiento para un mejor aprovechamiento de los recursos naturales, marinos y terrestres, sin embargo, esto no fue suficiente (Sánchez & Galán, 2007).

Esta situación creó una demanda para la formulación de fuentes de alimentos innovadores y alternativas de proteínas (proteína microalgal) (Becker, 2007) y (Bianchini & et al., 2006). Esta puede ser utilizada como suplemento proteínico de una dieta básica mediante la sustitución de fuentes convencionales y costosas como la harina de soya y la harina de pescado (Anupama & Ravindra, 2000).

El análisis químico de la proteína extraída de microalgas ha demostrado, en comparación con los estándares establecidos por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), que contiene todos los aminoácidos en una concentración adecuada para el consumo humano y animal. El valor nutritivo y el contenido de proteínas, se estima en aproximadamente el 50%, en comparación con el contenido de proteína de maní (50%), harina de soja (75%), carne (83%) y huevos (100%) (Embleton, 2007).

Hasta la fecha, en todo el mundo se emplean diferentes tecnologías para la producción masiva y el procesamiento de microalgas, donde la producción mundial anual de todas las especies se estima alrededor de 10,000 toneladas / año (Becker, 2007).

La biomasa microbiana puede utilizarse para desarrollar productos suplementarios por sus contenidos en lípidos y proteínas para la desnutrición y otras aplicaciones (Embleton, 2007), ácidos nucleicos, carbohidratos, vitaminas y puede incorporarse en productos cosméticos (Spolaroe & et al., 2006) y (Cardozo & et al., 2007).

Este texto es el resultado de un estudio sobre la aplicación de las microalgas en la industria alimenticia, como fuente de proteína, donde se determinó los nutrientes esenciales para su crecimiento, el metabolismo de las fuentes nutricionales, las condiciones de operación del cultivo, el sistema de reactores, entre otros.



1. Algas

Al hablar de algas nos referimos a un conjunto grande y variado de los organismos eucariotas que contienen clorofila y realizan la fotosíntesis utilizando oxígeno y liberando el agua como donador de electrones. Además, algunas algas pueden utilizar el H_2 para la fotosíntesis sin la liberación de oxígeno. Muchas algas son fotótrofas y por lo tanto requieren de luz para su crecimiento (Algas, 2004).

El término alga se aplicaba a todos los vegetales unicelulares (constituidos por una sola célula), cenobiales (constituidos por varias células sin división entre sí) y talófitos (no estructurados en raíz, tallo y hojas) que viven en aguas dulces o marinas, y que estaban provistos de pigmentos de asimilación (euglenofíceas, crisofíceas, pirrofíceas, xantofíceas, entre otros). En la actualidad las algas se engloban dentro de los protistas (Algas, 2004).

Las algas se clasifican en dos grupos (macroalgas y microalgas) o según su pigmentación en tres grupos (verde, rojo y marrón), donde se

observa la presencia de diferentes tipos de polímeros de carbono como producto de reserva, la estructura de la pared celular y el tipo de movilidad.

De igual forma, se evidencia que las algas ocupan el primer eslabón en la cadena alimenticia en el ambiente acuático. Son productores primarios capaces de elaborar sustancias orgánicas a partir de sustancias inorgánicas, transformando la energía luminosa que proviene del sol en energía química (Marinas, 2004).

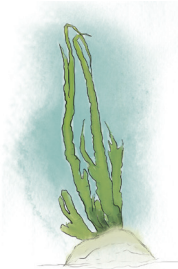
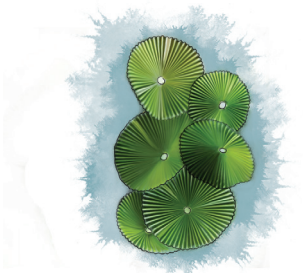
1.1 Macroalgas

Las formas de algas macroscópicas se fijan a una superficie firme y crecen en abundancia como algas marinas en zonas intermareales y submareales, a una profundidad de hasta 268m, según la penetración de la luz solar, también crecen sobre rocas que se encuentran en agua dulce estancada o corriente y, por lo general, se desprenden y flotan formando el verde de las aguas (Algas, 2004). Los ficólogos definen a las algas como organismos fotosintéticos con Clorofila a y con estructura de talo no diferenciada en raíces, tallo u hojas como las plantas vasculares (Algas, 2004).

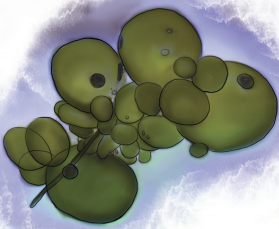
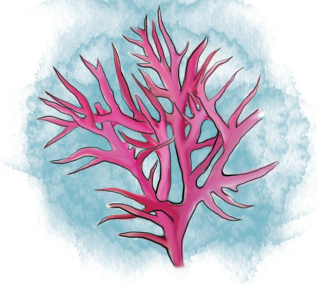
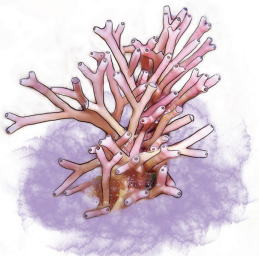
Las macroalgas son empleadas como antioxidantes, remineralizantes y en la industria cosmética (Algas, 2004). Los baños y envolvimientos con algas se usan en reumatismo, artritis, rigidez articular, lesiones, osteoporosis y raquitismo. En la Tabla 1, se muestra la clasificación de algunas macroalgas.

Tabla 1. Algas Chlorophyta (algas verdes), Rhodophyta (algas rojas) y Phaeophyta (alga café), (Algas, 2004)

Tipo de Macroalga	Macroalga		Características
Chlorophyta (Algas verdes)	<i>Briopsis sp.</i>		Cosmopolitas, más abundantes en aguas dulces. Prevalece el color verde. Poseen Clorofila a y b, carótenos, luteína, xantófilas y otros. Sustancia de reserva: Almidón. Las paredes celulares son de celulosa.

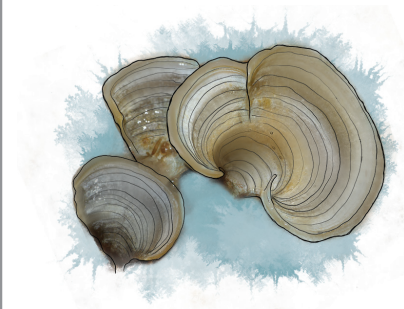
Tipo de Macroalga	Macroalga		Características
	<i>Ulva fasciata</i>		
	<i>Monostroma</i>		
	<i>Acetabularia</i> <i>sp.</i>		
	<i>Neomeris</i> <i>annulata</i>		



Tipo de Macroalga	Macroalga		Características
	<i>Entromarpha sp.</i>		
	<i>Valonia sp.</i>		
Rhodophyta (Algas Rojas)	<i>Gracilaria sp.</i>		Principalmente marinas, mayor frecuencia en mares tropicales y sub tropicales. Presenta coloraciones rosa, violeta y rojos intensos hasta café. Pigmentos: Clorofila a, ficoeritrina (rojo), ficocianina (azul). Sustancia de reserva almidón de las florideas, maltosa y sucrosa. Pared celular: Microfibrillas de celulosa, xilanos y mananos, externamente: el agar y los carragenanos.
	<i>Galaxaura sp.</i>		

Tipo de Macroalga	Macroalga		Características
	<i>Laurencia sp.</i>		La carragenina, es un polisacárido emulsionante, estabilizante y gelificante (Agarosa), que se utiliza en la industria láctea, cosmética, farmacéutica y textil.
	<i>Chondrus crispus</i>		
	<i>Porphyra</i>		
	<i>Gelidium</i>		



Tipo de Macroalga	Macroalga		Características
Phaeophyta (Algas café)	<i>Padina sp.</i>		Casi exclusivamente marinas. Abundantes en aguas templadas y sub polares. Coloraciones: pardo - café, marrón, verde oliva. Sustancia de reserva: laminaria, manitol y un hidrocoloide llamado alginato o ácido alginico. Pared celular: ácido manurónico. El ácido alginico se utiliza para fabricar geles, gomas o realizar películas protectoras y como coloide en los cosméticos.
	<i>Dictyota sp.</i>		
	<i>Colpomenia peregrina</i>		

1.2 Microalgas

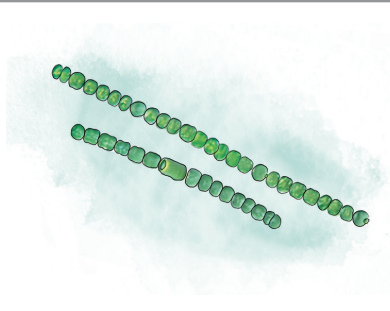
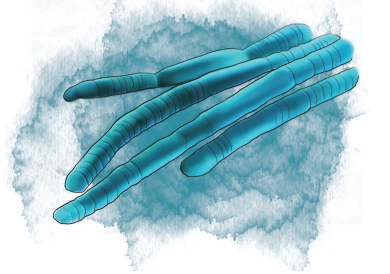
Las microalgas son microorganismos fotosintéticos procariotas o eucariotas que pueden crecer rápidamente debido a su estructura multicelular, unicelulares o simples (Mata, Martins, & Caetano, 2010).

Las microalgas están presentes en todos los ecosistemas de la tierra, no sólo acuáticos y terrestres, lo que representa una gran variedad de especies que viven en diferentes condiciones ambientales. Se estima más de 50.000 especies de microalgas, de las cuales, sólo un número limitado, de alrededor de 30.000, se han estudiado y analizado (Mata, Martins, & Caetano, 2010).

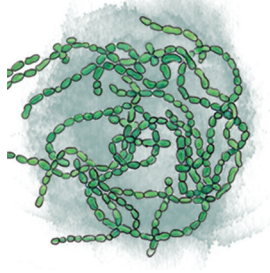
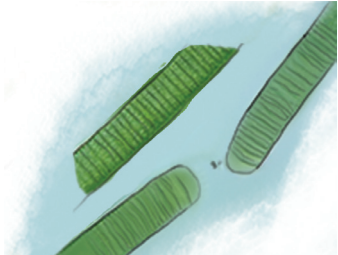
Durante las últimas décadas grandes colecciones de microalgas han sido creadas por investigadores de diferentes países. Un ejemplo es la colección de microalgas de agua dulce de la Universidad de Coimbra (Portugal), considerado uno de los más grandes del mundo, con más de 4.000 cepas y 1000 especies. Esta colección demuestra la gran variedad de microalgas diferentes, disponibles para ser seleccionados para su uso en una amplia diversidad de aplicaciones, tales como productos de valor agregado para uso farmacéutico, los cultivos de alimentos para el consumo humano y como fuente de energía (Mata, Martins, & Caetano, 2010).

De la Tabla 2 a la Tabla 9, se muestra la clasificación de las microalgas en sus diferentes grupos.

Tabla 2. *Microalgas Cianoficeas / Cyanophyta (Algas verde-azuladas), (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011).*

Tipo de microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Cianoficeas / Cyanophyta (Algas verde-azuladas)	<i>Anabaena sp.</i>		Forma filamentosa solitaria, que a veces se encuentra inserta en masas gelatinosas. Los filamentos son rectos o ligeramente curvados. Las células son esféricas o en forma de tonel.
	<i>Lyngbya sp.</i>		Filamentos largos, curvados, agrupados en haces de color verdeazulado. Los filamentos pueden presentar vainas gruesas, incoloras, que se pegan entre sí, formando un mucílago



Tipo de microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Cianofíceas / Cyanophyta (Algas verde-azuladas)	<i>Nostoc sp.</i>		Talos filamentosos con capa exterior gelatinosa. Las células son esféricas. Cuando los talos se desarrollan masivamente, dan aspecto de masas gelatinosas de color oscuro.
	<i>Oscillatoria limosa</i>		Talos de coloraciones verde oscura, libres o sésiles. Filamentos rectos, no estrangulados en las paredes laterales, finamente granuladas. Las células son anchas, de forma discoidal.
	<i>Oscillatoria rubescens</i>		Microalga filamentosa que presenta un tono ligeramente rosado. Las células terminales desarrollan extremos gradualmente apuntados.
	<i>Oscillatoria tenuis</i>		Talo de color verdeazulado. Los filamentos son rectos, con extremos no apuntados. Las células son en general cuadradas, siendo las terminales ligeramente cónicas.

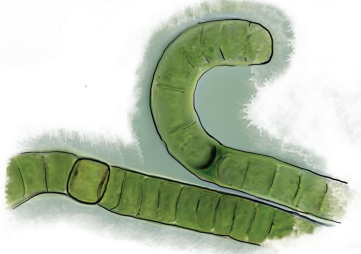
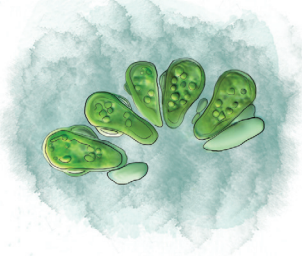
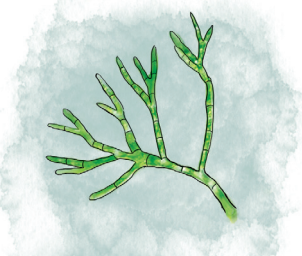
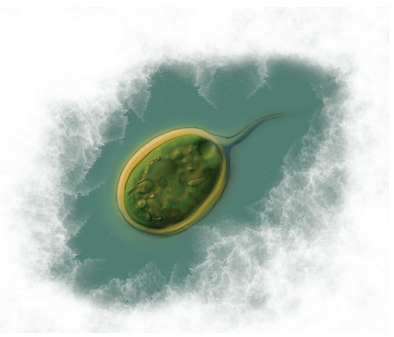
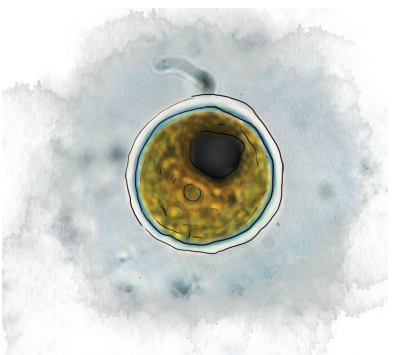
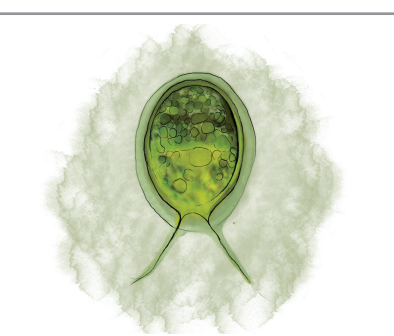
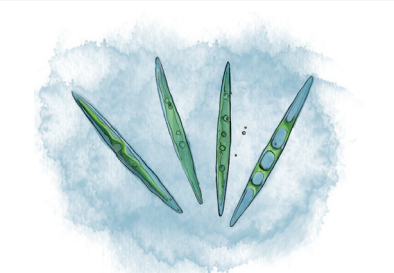
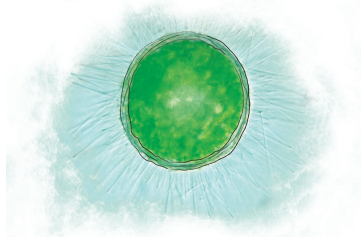
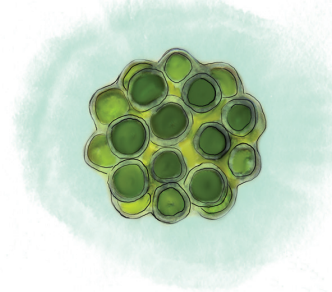
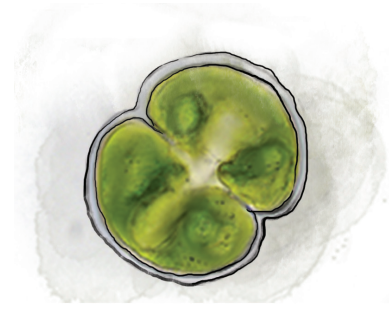
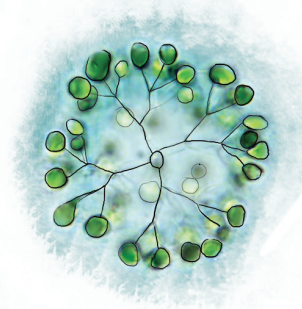
Tipo de microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Cianofíceas / Cyanophyta (Algas verde-azuladas)	<i>Tolypothrix lanata</i>		Talo formado por filamentos de hasta dos centímetros de longitud, con frecuentes pseudoramificaciones. Las células son cuadradas de color verde azulado.

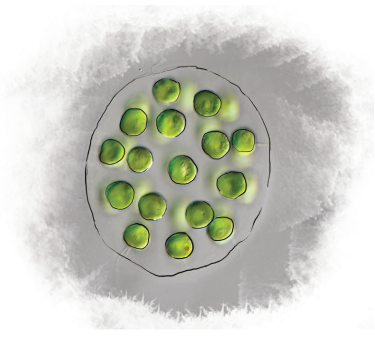
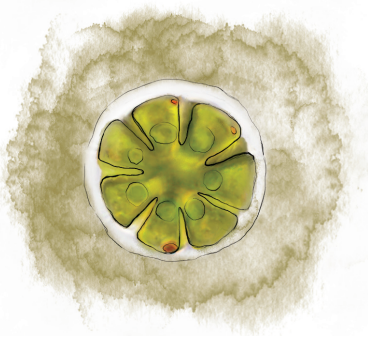
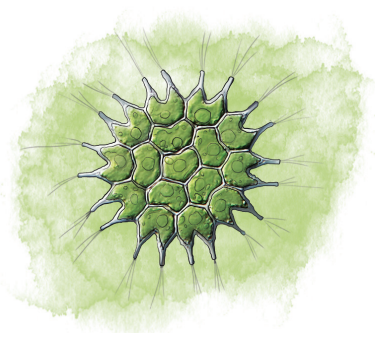
Tabla 3. *Microalgas Clorofíceas / Chlorophyta (Algas verdes), (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)*

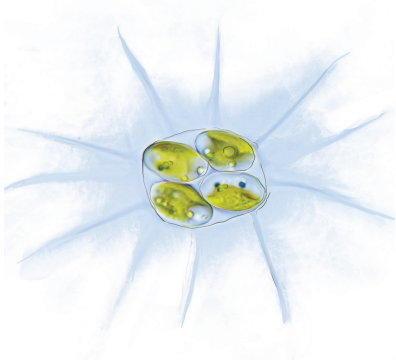
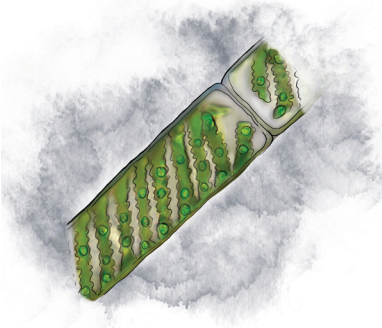
Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Clorofíceas / Chlorophyta (Algas verdes)	<i>Botryococcus brauni</i>		Es un alga colonial que crece principalmente en agua dulce y con frecuencia se la ve flotando sobre la superficie de aguas estancadas debido a la gran cantidad de hidrocarburos localizados extracelularmente.
	<i>Chaetophora elegans</i>		Los talos pueden alcanzar tamaños de cm., y son de color verde claro. A partir de una base de células laxamente unidas o de cortos filamentos surgen las ramificaciones.

Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
	<i>Chlamydomonas angulosa</i>		Células elípticas anchas. La membrana forma una ancha papila en la parte anterior celular. Cloroplasto con pirenoide cuadrangular. Mancha ocular grande en forma de bastón.
	<i>Chlamydomonas ehrenbergi</i>		Células con formas de irregular a ovadas. Membrana delicada, que puede estar algo separada del borde del citoplasma. Los flagelos parten de una pequeña protuberancia cutánea. Mancha ocular en el centro de la célula.
	<i>Chlamydomonas reinhardi</i>		Células casi esféricas. Membrana no engrosada en una papila anterior. Cloroplasto con un gran pirenoide. Mancha ocular grande.
	<i>Closteriosis sp.</i>		Células solitarias, libres, fusiformes y muy alargadas, puntiagudas en los dos extremos y desprovista de vaina gelatinosa. Presentan un plasto parietal con numerosos pirenoides.

Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
	<i>Chlorella sp.</i>		Es un género de una sola célula verde de algas. Es de forma esférica, de 2 a 10 micras de diámetro, y es sin flagelos.
	<i>Coelastrum sp.</i>		Microalga colonial, formada por colonias de 8 a 128 células, puede ser globosa, hueca o esférica. Las células se encuentran unidas por finas superficies gelatinosas.
	<i>Cosmarium botrytis</i>		Células solitarias con un profundo surco que las divide en dos hemi-células. La superficie se encuentra cubierta de pequeñas verrugas que le dan un aspecto característico.
	<i>Dictyosphaerium ehrenbergianum</i>		Colonias insertas en una masa gelatinosa claramente delimitada. Las células son ovaladas en disposición periférica y están unidas entre sí mediante cordones gelatinosos.



Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
	<i>Eudorina elegans</i>		Microalga colonial compuesta de células flageladas insertas en una vaina gelatinosa común.
	<i>Pandorina morum</i>		Colonia aproximadamente esférica, compuesta de 16 células flageladas de forma triangular -aovada, insertas en una vaina gelatinosa común.
	<i>Pediastrum duplex</i>		Las células marginales son profundamente recortadas, sólo fusionadas en la base, y presentan dos lóbulos muy prolongados.

Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
	<i>Scenedesmus quadricauda</i>		Individuo colonial, constituido por 4, 8 ó 12 células. Las células centrales con alargadas y sin apéndices, las terminales, se abomban en el centro y presentan dos espinas que se proyectan hacia el exterior.
	<i>Siderocelis sp.</i>		Especie que agrupa individuos con células elípticas que presentan numerosas verrugas pardas en su exterior. El color pardo se debe a la inclusión de sales de hierro.
	<i>Spirogyra sp.</i>		Microalga filamentosa con cloroplastos espiralados en doble hélice que recorren todo el tricoma.



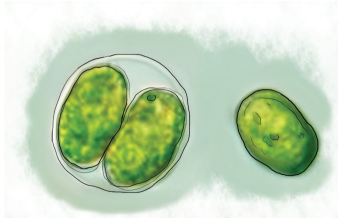
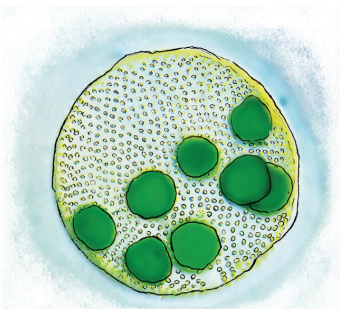
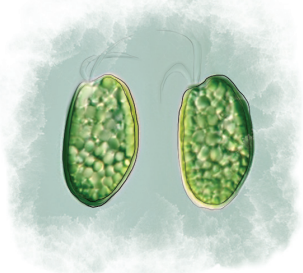
Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
	<i>Tetraselmis sp.</i>		Son verdes, mótils, y miden usualmente 10 μm de largo x 14 μm de ancho.
	<i>Volvox aureus</i>		Colonia esférica, gelatinosa, con las células situadas en la periferia. Vistas por encima, las células son circulares y se comunican entre sí mediante filamentos plasmáticos muy finos.

Tabla 4. Microalgas Criptofíceas / Cryptophyta (Algas pardas),
(Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)

Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Criptofíceas / Cryptophyta (Algas pardas)	<i>Cryptomonas</i> <i>sp.</i>		Células emarginadas en la parte anterior, más delgadas en la posterior, con la cara ventral plana y la dorsal abombada. Presentan dos cloroplastos y dos flagelos de igual longitud.

Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
	<i>Cryptomonas erosa</i>		Las células son fuertemente emarginadas en la parte anterior.

Tabla 5. *Microalgas Crisoficeas / Chrysophyta (Algas doradas), (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)*

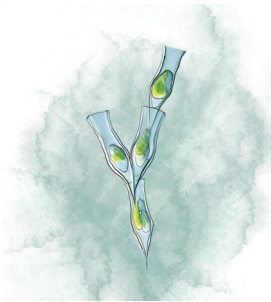
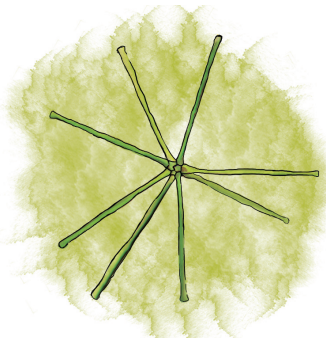
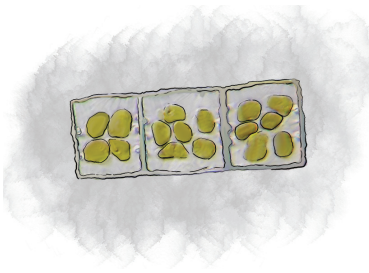
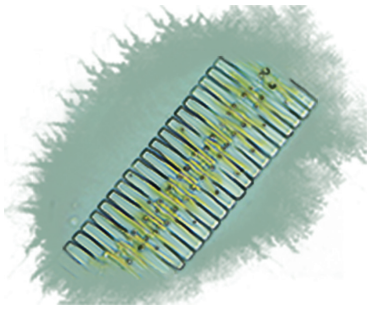
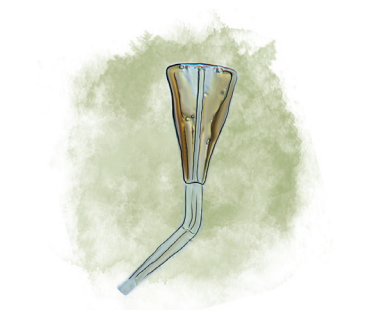
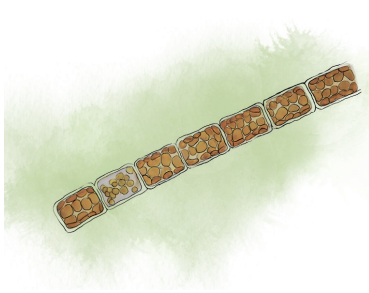
Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Crisoficeas / Chrysophyta (Algas doradas)	<i>Dinobryon divergens</i>		Individuo colonial de células sésiles con caparazones en forma de embudo. Las tecas se insertan unas a otras y se encuentran dilatadas en el centro, con la parte basal cónica.

Tabla 6. *Microalgas Diatomeas / Diatoms, (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)*

Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Diatomeas/ Diatoms	<i>Asterionella formosa</i>		Diatomea que forma colonias estrelladas de unas 8 células. Cada célula presenta un lado pleural, más ancho en los extremos. Las valvas son muy estrechas con los extremos algo abultados.

Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
	<i>Diatoma hiemale</i>		Diatomea colonial que forma cintas muy largas y densas. Las valvas son lanceoladas, lineales o elípticas. Presenta costillas robustas e irregulares.
	<i>Fragilaria crotonensis</i>		Diatomea de células dilatadas en el centro que se unen formando cintas curvadas y retorcidas. Las valvas son muy estrechas y presentan sutiles estrías transversales.
	<i>Gomphonema sp.</i>		Género de diatomea que agrupa células cuyas caras pleurales son cuneiformes. Las células se pueden encontrar fijadas a sustratos mediante pedúnculos gelatinosos simples.
	<i>Melosira varians</i>		Diatomea colonial que forma cadenas largas de células en forma de tambor. Presentan cloroplastos en forma de plaquitas de color pardo amarillento.

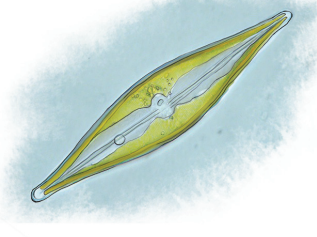
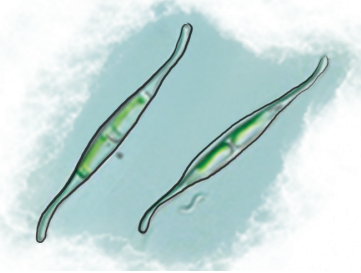
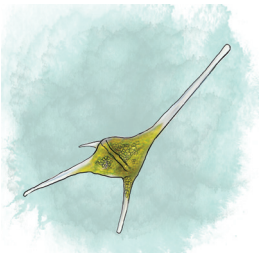
Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
	<i>Navícula sp.</i>		Incluye individuos con valvas lanceoladas, estriadas transversalmente en la zona media, en sentido opuesto a los polos. Los extremos de la célula son redondeados.
	<i>Nitzschia sp.</i>		Género que agrupa células, en general pequeñas, con valvas lanceoladas que presentan estrías transversales muy finas, apenas visibles y dispuestas densamente.

Tabla 7. Microalgas Dinofíceas / Dinophyceae, (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)

Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Dinofíceas / Dinophyceae	<i>Ceratium hirudinella</i>		Especie de contorno asimétrico, que presenta un cuerno apical muy largo, con el extremo abierto. Cuernos basales en número de 3.

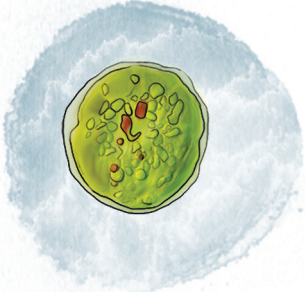
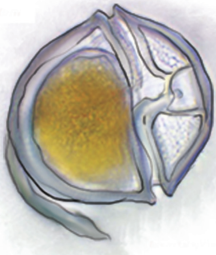
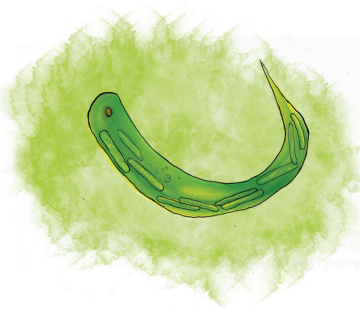
Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
	<i>Gymnodinium paradoxum</i>		Especie móvil, con células ovaladas, y surcos longitudinal y transversal poco profundos. Cloroplastos de color pardo oscuro dispuestos en manchas alrededor del núcleo central.
	<i>Peridinium cinctum</i>		Especie móvil formada por células esféricas, de sección arriñonada. Un caparazón, dividido en placas características de cada especie, rodea la célula. El caparazón también puede presentar espinas. Los cloroplastos son de color pardo.

Tabla 8. Microalgas Euglenofíceas / Euglenophyta, (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)

Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Euglenofíceas / Euglenophyta	<i>Euglena oxyuris</i>		Microalga constituida por células alargadas, con punta terminal corta, casi siempre retorcidas en sentido longitudinal. La membrana presenta estriación espiralada. El flagelo es relativamente corto. Presenta numerosos cloroplastos en forma de placa.

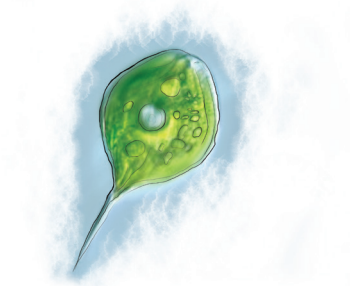
Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
	<i>Euglena viridis</i>		Individuos de aspecto fusiforme y con un flagelo de igual longitud que el cuerpo. Los cloroplastos tienen forma de cinta y están orientados hacia un pirenoide central. Aunque son fotosintéticos pueden ingerir materia orgánica.
	<i>Phacus pyrum</i>		Las células son aovadas, con el extremo posterior adelgazado en una espina larga y recta. Ocho estrías espiraladas confluyen en la desembocadura del sáculo del flagelo.
	<i>Phacus torta</i>		Células intensamente retorcidas, con larga espina caudal y membrana con estriación longitudinal. Los cloroplastos tienen forma de placa.



Tabla 9. Microalgas Xantofíceas / Xanthophyta, (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)

Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Xantofíceas / Xanthophyta	<i>Tribonema sp.</i>		Microalga que presenta numerosos cloroplastos. La membrana es fina y delicada presentando apéndices en forma de H bien visibles.

1.3 Composición

El componente cuantitativamente más importante de la biomasa algal son las proteínas, las cuales pueden representar hasta el 50% del peso seco total y que sumadas a los lípidos y a los carbohidratos constituyen hasta el 90% del peso seco total, mientras que los minerales, los ácidos nucleicos, los pigmentos y los demás componentes menores suman el 10% restante (Arredondo Vega & Voltolina, 2007), como se observa en la Tabla 10.

Tabla 10. Composición química (en % del peso seco total) de diferentes microalgas

Especie	Proteína	Carbohidratos	Lípidos
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50-56	10-17	12-14
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	08-18	21-52	16-40
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-17	14-22
<i>Spirulina maxima</i>	60-71	13-16	06-07
<i>Dunaliella Salina</i>	57	32	9
<i>Tetraselmis suecica</i>	39	8	7
<i>Isochrysis galbana</i>	41	5	21

Las algas presentan una considerable diversidad en la estructura y la composición química de sus paredes celulares. Éstas están constituidas por una multicapa de celulosa micro cristalina, generalmente intercalada con material amorfo (Brock & Madigan, 1993).

Una capa de material relativamente inerte, está presente en la mayoría de las células de las algas, la composición de hidratos de carbono consiste en homogéneos o heterogéneos. Estas capas pueden estar impregnadas con sustancias inorgánicas tales como Carbonato de Sílice, Calcio o Magnesio (Brock & Madigan, 1993).

En algunas algas, la pared se ve reforzada por la deposición de Carbonato de Calcio, y estos son llamados algas coralinas calcáreas, como de coral.

La pared celular puede ser modificada por la presencia de otros polisacáridos como la Pectina (Ácido Poligalacturónico), xilanos, mananos, Ácido Algínico y Ácido Fuccínico (Brock & Madigan, 1993).

La mayoría de las células de las algas son comúnmente compuestas por capas que tienen una importante capacidad de absorción característica de los metales debido a la presencia de ácidos urónicos (Brock & Madigan, 1993).

Por lo tanto, la pared celular es generalmente considerada como un complejo de intercambio iónico, similar a las resinas de intercambio iónico (Volesky, 1990). La capacidad de intercambio iónico se relaciona con la presencia de grupos funcionales y la estructura espacial de la pared celular.

1.4 Producción

1.4.1 Medios de cultivo

El medio de cultivo debe proporcionar los nutrientes suficientes para el crecimiento de las microalgas, como se muestra en la Tabla 11, los elementos fundamentales son Carbón, Nitrógeno, Fósforo y Azufre. Otros minerales esenciales son el Hierro, Magnesio, oligoelementos y, en algunos casos el Silicio (Zeng & et al., 2011).



Tabla 11. *Funciones de los nutrientes presentes en el medio de cultivo*

Nutrientes	Ingredientes principales	Función	Rango conveniente
Fuente de Carbono	CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-}	Proporcionar Carbono a la célula	1 – 10 g/L
Fuente de Nitrógeno	NO_3^- , Urea, N_2	Proporcionar Nitrógeno a la célula	10 – 2000 mg/L
Fósforo	Hidrofosfato y fosfato	Proporcionar Fosforo a la célula	10 – 500 mg/L
Sulfuros	Sulfato	Proporcionar Azufre a las proteínas y las reacciones	1 – 200 mg/L
Sales inorgánicas	K, Ca, Na y Mg.	Mantener la estructura y actividad celular	0.1 – 100 mg/L
Elementos trazas	Fe, Zn, Mn, Pb, Cd.	Factores coenzima	0.01–10 mg/L
Vitaminas	B, C, E	Ayuda a la división celular	0.01–1000 g/L

1.4.1.1 Fuente de Carbono

El macronutriente más importante es el Carbono que constituye el 50% de la biomasa microalgal. El crecimiento de la microalga está limitado por la fuente de Carbono y se ha utilizado Carbono orgánico e inorgánico (Quevedo , 2006).

Las fuentes de Carbono son necesarias para proporcionar la energía necesaria para el crecimiento celular. Cultivos de microalgas Heterotróficas son capaces de crecer en la oscuridad, por lo tanto, deben obtener energía de alguna fuente de Carbono orgánico, en forma de acetato o de Glucosa u otras formas como mono, di y polisacáridos (Fructosa, Sacarosa, Lactosa y Almidón) (Wen & Chen, 2003).

De igual forma esta fuente de Carbono es un factor esencial para los cultivos de microalgas, cuando se utilizan cultivos a gran escala es recomendable la inyección de CO_2 , para contribuir al proceso fotosintético (Franco Acosta, 2008).

Generalmente, una relación C/N puede influir en el contenido de lípidos y proteínas. Una relación alta de C/N favorece la acumulación de lípidos, que se incrementa por el agotamiento de Nitrógeno en el cultivo (Wen & Chen, 2003).

Una relación C/N también afecta a la composición de ácidos grasos, donde una relación baja de C/N favorece el porcentaje de ácidos grasos insaturados (Wen & Chen, 2003).

El CO_2 es la fuente de Carbono preferida por las microalgas, dado que se difunde rápidamente del agua al interior de la célula y es utilizable directamente en los procesos de fijación (Franco Acosta, 2008).

1.4.1.2 Fuente de Nitrógeno

El Nitrógeno, después del Carbono, es el segundo elemento que tiene una mayor contribución a la materia seca de las células microalgales. La fuente de Nitrógeno suele ser inorgánica (Nitratos, Nitritos y Amonio), aunque a veces se utiliza Nitrógeno orgánico y en este caso el compuesto más utilizado es la Urea.

Cuando el Nitrógeno se incorpora al medio de cultivo en forma oxidada, como nitrato o nitrito, debe ser reducido antes de que pueda incorporarse en materias orgánicas. La reducción del nitrito ocurre en dos pasos catalizado por la nitrato reductasa (NR) y la nitrito reductasa (NiR) (Quevedo , 2006).

La asimilación del Nitrógeno inorgánico es fuertemente dependiente de la luz. Tanto la intensidad de luz como su calidad pueden controlar la asimilación de NO_3^- a través de la regulación de la síntesis y actividad de la enzima nitrato reductasa (NR) (Mora & et al., 2002).

La capacidad de utilizar Nitrógeno en forma orgánica está ampliamente extendida entre las microalgas. En general, las amidas, Urea, Glutamina y Asparagina, resultan buenas fuentes de nitrógeno. Diversos aminoácidos, como la Glicina, Serina, Alanina, Lisina, Arginina, Ácido Glutámico o Ácido Aspártico, también pueden ser utilizados como fuente de Nitrógeno (Mora & et al., 2002).

Fuentes simples de Nitrógeno como nitrato y Urea podrían apoyar el crecimiento. Cuando se utiliza amonio como única fuente de Nitrógeno, el pH del medio tiende a fluctuar notablemente debido a la asimilación de amonio, que en última instancia inhibe el crecimiento y la producción de algunos ácidos (Wen & Chen, 2003).

Fuentes complejas de Nitrógeno tales como extracto de levadura, Triptona y licor de macerado de maíz pueden promover el crecimiento de la mayoría de especies algales (Wen & Chen, 2003).

1.4.1.4 Fuente de Fósforo

Interviene en la mayoría de los procesos celulares de transferencia de energía y síntesis de ácidos nucleicos. Como fuente de Fósforo se utiliza fundamentalmente fosfato inorgánico. Su deficiencia provoca un descenso en la síntesis de ácidos nucleicos, ATP y clorofila. De igual forma es importante la relación N/P (Quevedo , 2006).

El Fósforo juega un papel en la transferencia de energía de las células. Las síntesis de fosfolípidos y ácidos nucleicos también proporcionan Fósforo (Wen & Chen, 2003).



1.4.2 Metabolismo

El metabolismo de las microalgas, se parece al de las plantas superiores, con algunas diferencias (Pérez García, Escalante, De-Bashan, & Bashan, 2011); las cuales, emplean la luz y el CO_2 para su crecimiento.

Las industrias de alimentos emplean una amplia gama de algas, que se conocen por tener un alto contenido de fibra, minerales, vitaminas y antioxidantes y diferentes aminoácidos, como se muestra en las Figuras 1 y 2. En los últimos años, el énfasis ha pasado de las cosechas silvestres a la agricultura y el cultivo controlado para producir nuevos compuestos a gran escala, como las proteínas formadas por aminoácidos.

Figura 1. Ruta metabólica de la biosíntesis de algunos metabolitos primarios y secundarios

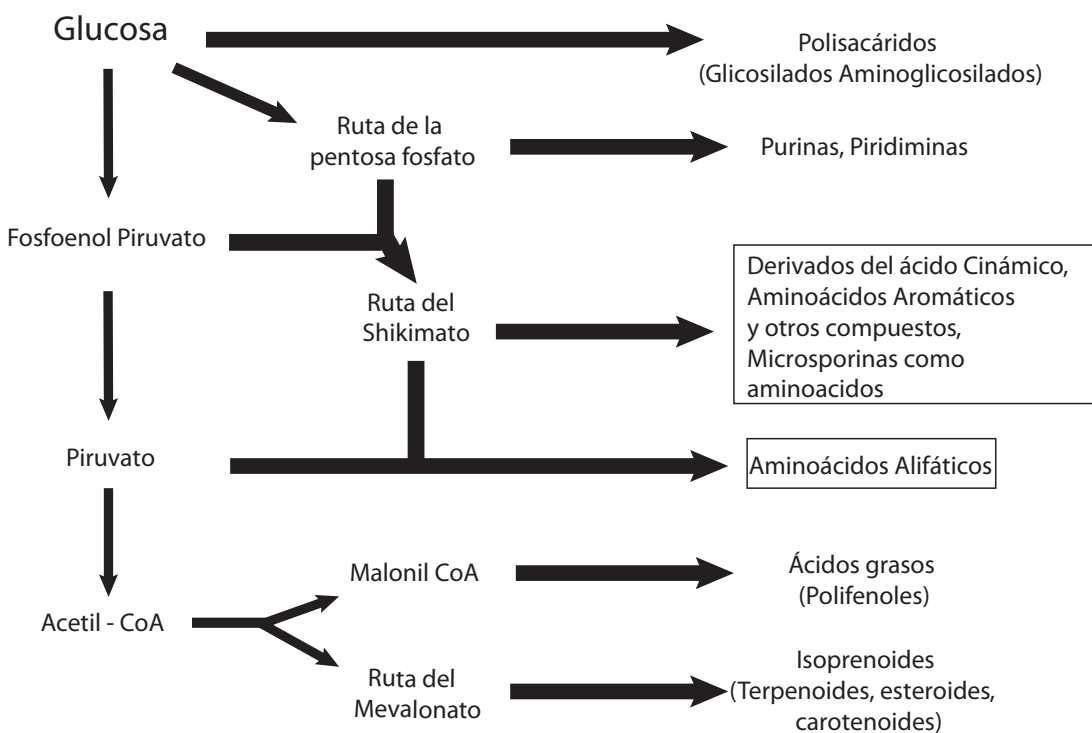
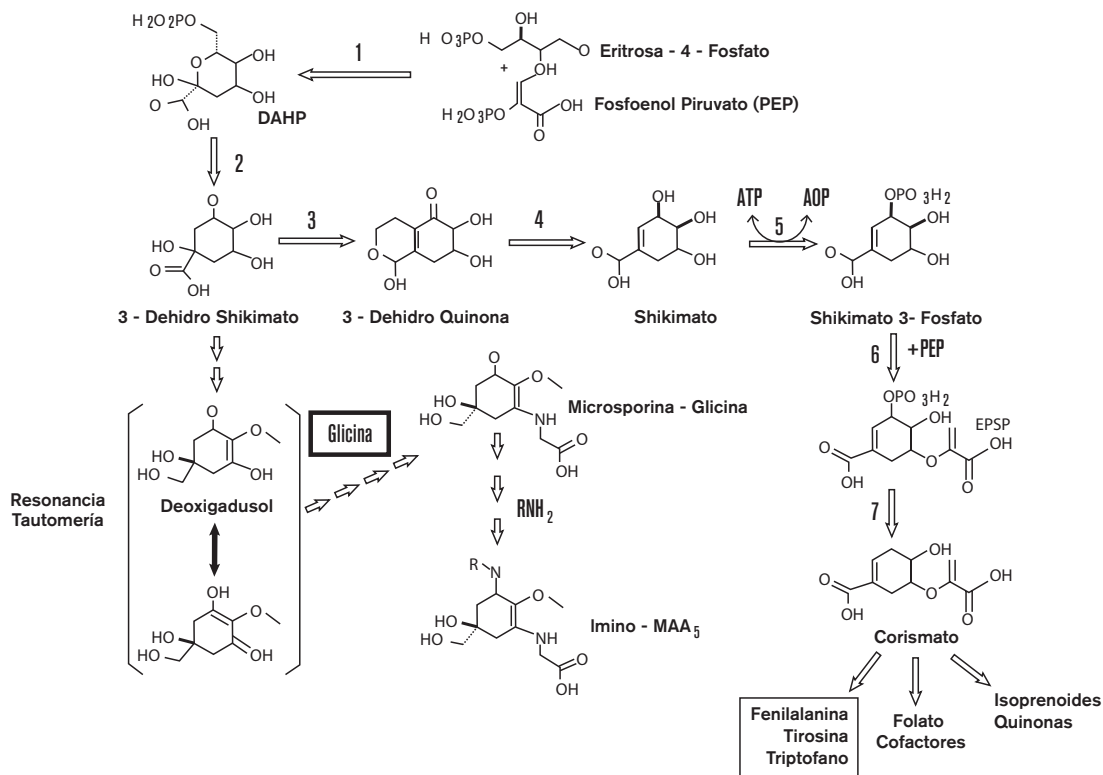


Figura 2. Biosíntesis de Micosporina y algunos aminoácidos



Enzimas: 1. DAHP sintasa; 2. DHQ sintasa; 3. DHQ deshidratasa; 4. Shikimato deshidrogenasa; 5. Shikimato quinasa; 6. EPSP Sintasa; 7. Corismatosintasa.

Las microalgas son organismos considerados como un modelo fotosintético. Como fuente de energía, la luz juega un papel vital en todo el crecimiento.

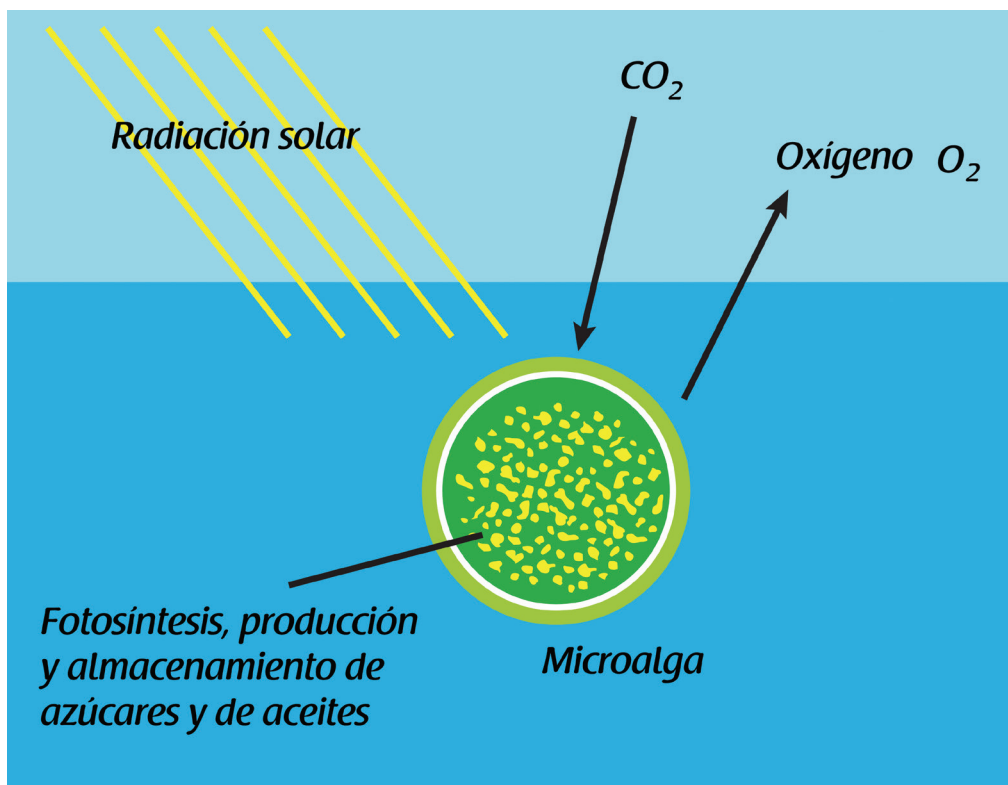
Las Figuras 3 y 4, muestran cómo las microalgas utilizan la energía de la luz de las reacciones fotoquímicas, rodeada por la antena en los complejos de cloroplastos que cosechan la energía de la luz y el transporte a los sistemas foto. Las microalgas han evolucionado para absorber más luz que necesitan para su fotosíntesis (Zeng & et al., 2001).

Las microalgas a partir de la fotosíntesis, son capaces de transformar la materia inorgánica en orgánica empleando la energía del sol (Barraza & et al., 2009). La luz solar es la fuente principal de energía para las microalgas, aunque los requisitos de intensidad de luz de las típicas células de

microalgas son relativamente bajos en comparación con los de las plantas superiores, las tasas de actividad metabólicas de las microalgas por lo general aumenta con el aumento de intensidad de la luz hasta $400 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Zeng & et al., 2011).

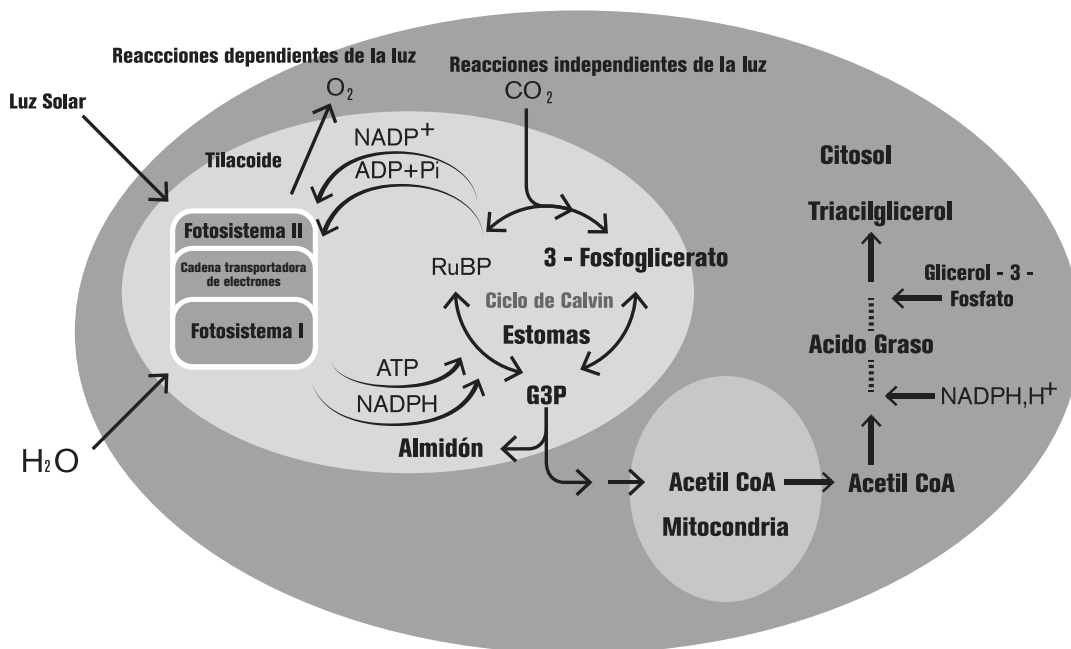
En la fotosíntesis, se emplea la energía del sol, en combinación con el CO_2 atmosférico y el agua y como resultado se produce Oxígeno que se libera a la atmósfera y azúcares que la microalga empleará para producir distintas sustancias como celulosa que conforma su estructura, aceites, entre otros, como se observa en la Figura 3. (Los biocombustibles a partir de microalgas, 2011).

Figura 3. Esquema del almacenamiento de energía en las microalgas
(Los biocombustibles a partir de microalgas , 2011).

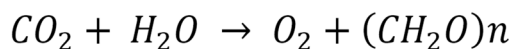


Las microalgas presentan una tasa de multiplicación elevada por lo que son capaces de absorber y almacenar una gran cantidad de energía del sol (Los biocombustibles a partir de microalgas, 2011).

Figura 4. Esquema de la fotosíntesis, fijación de CO_2 y acumulación de la células microalgales (Zeng & et al., 2011)



Como cualquier proceso bioquímico la fotosíntesis se puede representar por una ecuación global, que en este caso se resume en una reacción de óxido-reducción en la que el H_2O cede electrones (en forma de Hidrógeno) para la reducción del CO_2 a glúcidos $(\text{CH}_2\text{O})_n$, con liberación de O_2 (Monza & et al., 2002).



En la fase luminosa, también llamada fotodependiente, porque se da sólo en presencia de luz, ocurren dos procesos bioquímicos necesarios para la síntesis de Glucosa: la reducción de NADP a $\text{NADPH} \cdot \text{H}^+$ con los Hidrógenos de la molécula de agua y la síntesis de ATP (Monza & et al., 2002).

Cuando la utilización de los fotones aumenta en las microalgas, aumenta la eficiencia de conversión, y la capacidad de fijación del CO_2 aumenta también. Para mejorar la eficiencia fotosintética y reducir los efectos de la fotoinhibición en el crecimiento de microalgas, se centran en reducir el tamaño de la antena de la Clorofila (Zeng & et al., 2001).

En la fase luminosa los pigmentos como las clorofilas a y b, carotenos, xantofilas, ficoeritrinas y ficocianinas, que se encuentran asociados a la membrana tilacoidal, captan fotones y se excitan (Monza & et al., 2002).

La fijación de CO_2 y su reducción a moléculas glucídicas $(\text{CH}_2\text{O})_n$ se da en el estroma del cloroplasto a través de reacciones reductivas, fuertemente endergónicas: el poder reductor (NADPH.H) y la energía (ATP) son producidos en la fase luminosa (Monza & et al., 2002).

La energía y poder reductor generados en las reacciones fotoquímicas se usan para la conversión del CO_2 en glúcidos en el Ciclo de Calvin. Este ciclo ocurre en el estroma del cloroplasto, donde se encuentran las enzimas que catalizan la conversión de Dióxido de Carbono (CO_2) en glúcidos (triosas y Glucosa) (Monza & et al., 2002).

El CO_2 ingresa a través de los estomas y se une al aceptor, la Ribulosa 1,5 bifosfato, por acción de la enzima RUBISCO (ribulosa bifosfato carboxilasa oxigenasa). La RUBISCO constituye aproximadamente el 50% de las proteínas del cloroplasto y es la proteína más abundante en la naturaleza (Monza & et al., 2002) y (Zeng & et al., 2001).

El primer producto estable después de la carboxilación es el ácido 3 fosfoglicérico (3PGA), un compuesto de 3 carbonos, al que se debe la denominación de ciclo C3. En “un ciclo” se fijan 6 moles de CO_2 a 6 moles de ribulosa 1,5 bifosfato, y se forman 12 moles de 1,3PGA con un consumo de 12 moles de ATP (Monza & et al., 2002).

Para llegar a moléculas de glúcidos es necesaria la reducción del 1,3PGA a GA3P, lo que se logra con 12 moles de NADPH.H y la dirección de las reacciones son las mismas que las ocurridas en la glucogénesis (Monza & et al., 2002).

1.4.3 Condiciones operacionales

Ciertos parámetros afectan directamente el crecimiento de las microalgas, como la distribución e intensidad de la luz dentro del reactor, la temperatura, el tiempo de retención, la agitación o mezcla de los medios de cultivo, el intercambio gaseoso, el control del pH, entre otros. A continuación se describe cada uno de estos parámetros y el efecto que tienen sobre el cultivo masivo de estos microorganismos.

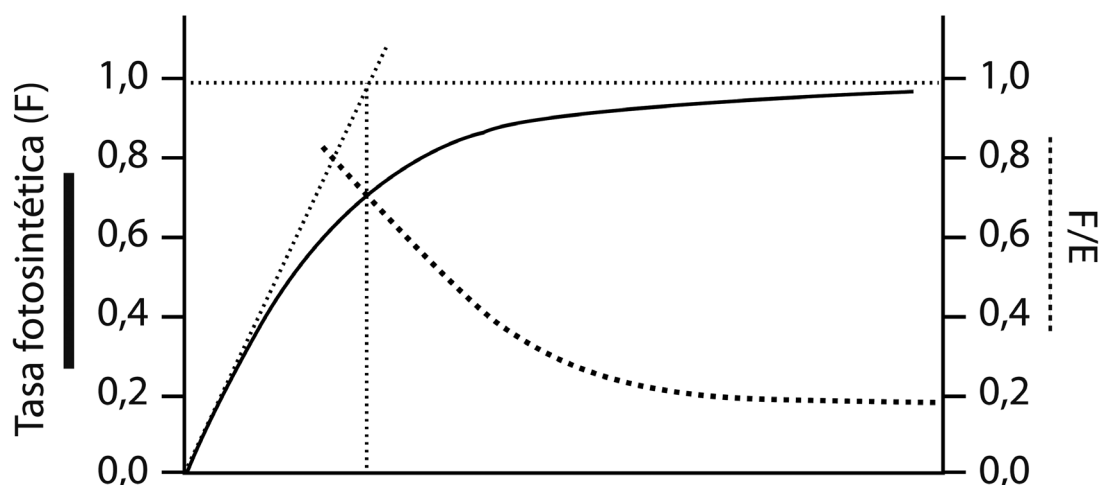
1.4.3.1 Temperatura, distribución e intensidad de la luz dentro del reactor

El cultivo de organismos fotoautotróficos en general, es el relacionado con el aprovechamiento de la energía radiante durante la fotosíntesis. La tasa de fotosíntesis celular (F, capacidad de captación de



fotones) depende de la energía luminosa que reciben las células. A bajos niveles de intensidad luminosa la rapidez de la fotosíntesis aumenta con la intensidad de luz, los niveles de energía incidente superiores a un cierto valor (E_k , constante de saturación) inducen sólo pequeños cambios en F , tal como se muestra en la Figura 5. La constante específica E_k , característica para cada organismo, indica el nivel de energía luminosa al que comienza a saturarse el fotosistema de un organismo. La energía incidente puede llegar a niveles que causan inhibición de los fotosistemas celulares, lo cual puede deteriorar el cultivo y causar incluso un daño irreversible.

Figura 5. Efecto de la energía luminosa (E) en la tasa fotosintética (F) y en la eficiencia fotosintética (F/E). E_k es la constante de saturación (Richnond, 2000).



1.4.3.2 Tiempo de retención

El tiempo transcurrido entre cada suministro de medio nuevo es el tiempo de retención si el sistema se halla en equilibrio dinámico. Lo ideal es que dicho período sea igual al que las microalgas precisan para consumir eficientemente los nutrientes suministrados: un plazo más breve suele eliminar microalgas en pleno crecimiento, un plazo más largo provoca una deficiencia nutritiva y la aparición de distintas malformaciones en las microalgas (Oron & Sfielee, 1981). El tiempo de retención depende del metabolismo de las microalgas, del medio de cultivo y de cada especie (Droop, 1983).

Otro aspecto relacionado con el tiempo de retención es la densidad del cultivo. Las densidades elevadas extinguen con mucha facilidad la luz que recibe el cultivo y hacen que este aspecto resulte



limitante de la producción masiva. Se debe regular la densidad celular en el cultivo para controlar el auto sombreado y se puede conseguir manipulando el tiempo de retención (Hartig & et al., 1988) o disminuir el diámetro de los reactores, aumentando el área superficial expuesta a la luz.

1.4.3.3 Agitación y densidad celular

La agitación favorece el intercambio gaseoso, evita la sedimentación de células, la formación de gradientes de condiciones ambientales y de concentración de nutrientes, su función principal es permitir que todas las células puedan acceder a las zonas iluminadas en un fotobiorreactor (Ugwu, Ogbonna, & Tanaka, 2002).

El mezclado puede inducirse de diversas formas; sin embargo, los sistemas basados en la aireación del cultivo con aire comprimido (columnas burbujeadas o airlift), se emplean comúnmente por su sencillez y porque pueden diseñarse para inducir un esfuerzo de corte pequeño que no cause daño mecánico a las células (Sánchez & et al., 2000).

El mezclado de un cultivo permite una utilización óptima de la luz y un mejor régimen de iluminación, sin embargo, puede también causar daño a las células. La fragilidad celular es con frecuencia un factor que limita la intensidad de mezclado que puede aplicarse a un cultivo. En virtud de que la fragilidad celular y las características fotosintéticas entre otros factores pueden variar de cepa a cepa, los niveles óptimos de mezclado dependerán de cada especie cultivada (Gudin & Chaumont, 1983).

La velocidad del medio de cultivo en los tubos tiene que ser suficiente para asegurar un flujo turbulento que evite el crecimiento en la pared del tubo o la sedimentación de las células por una parte, y por otra, que asegure un régimen de iluminación favorable para establecer una fotosíntesis intensa (Molina & et al., 1999). Una disminución en la velocidad de circulación del líquido (<15cm/s) casi siempre produce crecimiento en la pared y posiblemente inhibición del crecimiento por altas concentraciones de O₂ disuelto. La velocidad de líquido apropiada en la mayoría de los casos es de 30–50 cm/s.

1.4.3.4 Oxígeno disuelto y pH

El Oxígeno producido por las microalgas durante la fotosíntesis puede llegar a encontrarse en una concentración tan elevada que inhiba ésta, (inhibición por producto final, llamada en este caso efecto Warburg) y hacer que la producción del cultivo disminuya. Este riesgo se reduce si se agita

el cultivo, con lo cual se favorece el paso de Oxígeno a la atmósfera y de ese modo, disminuye su concentración en el medio.

El pH del medio de cultivo determina la solubilidad de CO_2 y de los minerales, así como la distribución relativa de las formas inorgánicas de Carbono, incluyendo directa e indirectamente el metabolismo de las microalgas. El pH tiene un efecto sobre la solubilidad de varios compuestos metálicos, un aumento de pH puede ocasionar una deficiencia en algunos elementos traza. El crecimiento fotosintético de las microalgas provoca cambios en el pH del medio, si éste aumenta hasta un pH 9, el carbonato puede precipitar lo que implica que los nutrientes no se encuentran disponibles (Richmond & Grobbelaar, 1986).

1.5 Reactores

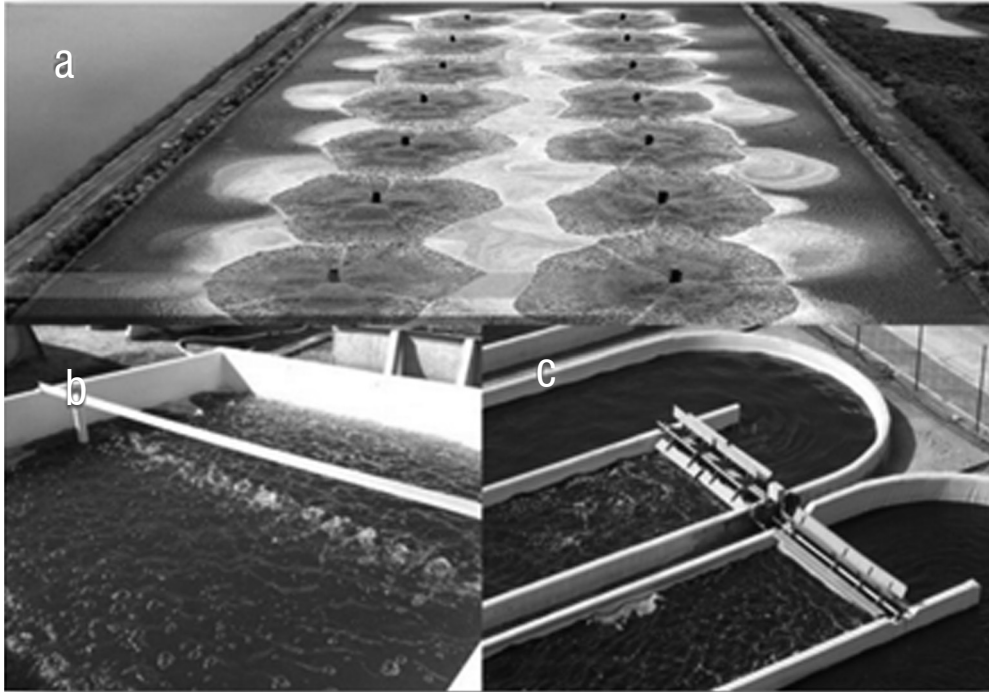
La biotecnología de las algas se basa en su cultivo masivo. Para su cultivo existen dos diseños básicos de reactores para la producción, estos pueden ser reactores abiertos o cerrados (Grobbelaar, 2000).

Los reactores abiertos, que son los más abundantes y más antiguos, presentan ciertas desventajas como: fácil contaminación del medio, difícil control de las condiciones de operación, pérdida del medio por evaporación, baja densidad celular, alta dependencia de las condiciones climáticas, entre otras; mientras los cerrados son más recientes y presentan ventajas como menor requerimiento de espacio, se reduce la contaminación del cultivo por otros organismos no deseados, flexibilidad en la producción, entre otras.

Existe una variedad de diseños de reactores abiertos para el cultivo masivo de microalgas, como se puede observar en la Figura 6. Estos sistemas se basan en un esquema similar de superficie variable y profundidad por lo general inferior a 50 cm. El pozo puede estar construido con materiales diversos (Dodd, 1986). Estos sistemas, pueden contar con canales poco profundos, construidos en forma de circuito cerrado, en los que el medio de cultivo es impulsado mediante paletas rotatorias como se muestra en la Figura 6 (c). También existen diseños en los que los estanques son mezclados con difusores de aire en el fondo como se observa en la Figura 6 (b) o turbinas flotantes, tal como lo indica la Figura 6 (a).



Figura 6. Reactores abiertos para el cultivo de microalgas
(a: turbinas flotantes, b: difusores de aire, c: canales con paletas rotatorias)



Este tipo de reactores generalmente requiere áreas de terreno entre 500 – 10.000 m² y alcanzan densidades celulares de 0,4 g/L (Dodd, 1986) y (Pulz, 2001), tienen como ventaja el bajo costo de producción de biomasa. La baja densidad celular origina varios inconvenientes, incluyendo baja productividad, fácil contaminación, costosa recuperación del producto de medios diluidos y dificultad para el control de la temperatura, las pérdidas de agua por evaporación.

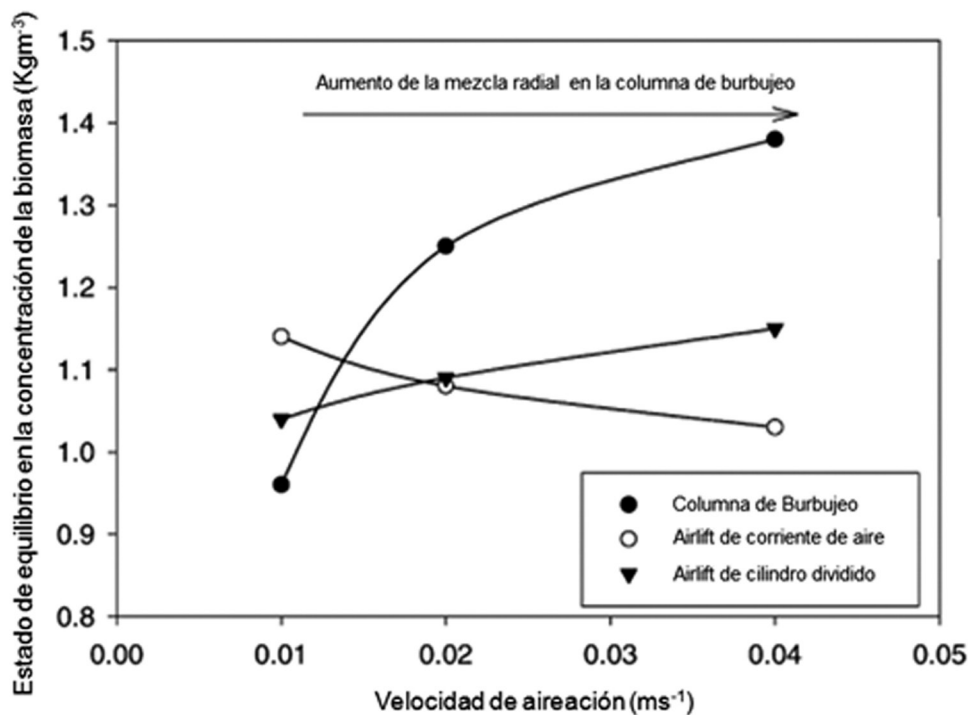
Estos inconvenientes estimularon el desarrollo de fotobiorreactores cerrados, entre los reactores cerrados existen varios tipos, se tienen los tubulares: horizontales, de planos inclinados o verticales. Estos tipos de reactores pueden ser contruidos en diversos materiales como vidrio, acrílico y fibra de vidrio de alta transparencia, lo que los hace costosos, ya que implementar esta tecnología a gran escala se dificulta porque el almacenamiento de líquido se encuentra limitado por el diámetro de los tubos. Entre los tres reactores tubulares, en la Figura 7 se evidencia que el mejor es el vertical (a) ya que por su disposición geométrica es capaz de tratar mayor volumen por área a diferencia de los reactores inclinados y horizontales que requieren mayor área para tratar el mismo volumen y que difícilmente se pueden extender en altura.

Figura 7. Fotobiorreactores tubulares (a: verticales, b: inclinados, c: horizontales)



Los reactores verticales de burbujeo que pueden ser también de diferentes tipos: air-lift, columna de burbujeo y Split (cilindros divididos). Entre éstos, la columna de burbujeo alcanza mayores rendimientos en la producción de biomasa, ya que su eficiencia aumenta al aumentar la aireación del sistema como se muestra en la Figura 8 (Sánchez M & et al., 2003).

Figura 8. Producción de biomasa de tres reactores verticales a diferentes velocidades de aireación (Sánchez M & et al., 2003).



Entre los reactores cerrados, también se encuentran los reactores planos o de paneles que comúnmente son fabricados en materiales transparentes como el vidrio o el acrílico como se muestra en las Figuras 9 y 10.

Figura 9. *Reactores cerrados tipo panel*



Los reactores planos favorecen la absorción de la luz, ya que este tipo de configuración permite construir reactores donde la trayectoria de la luz puede ser más corta, favoreciendo la absorción de la luz, necesaria para la fotosíntesis y la reproducción de las microalgas. Para lograr cultivos de ultra alta densidad celular (UADC) se han utilizado diversas geometrías de fotobiorreactores y fuentes de iluminación, tales como reactores planos verticales con lámparas fluorescentes de luz blanca (Hu, 1998 b), reactores iluminados cuasi-internamente por diodos (Lee & Palsson, 1994), reactores iluminados internamente mediante fibra óptica (Javanmardian & Palsson, 1991), y reactores planos inclinados con iluminación solar mantenidos en exteriores (Hu, 1998 b).

Figura 10. Fotobiorreactores cerrados



Los fotobiorreactores tubulares, de placas planas, entre otros, han recibido mucha atención, ya que permiten establecer cultivos de alta densidad celular, tres o más veces en comparación con los sistemas convencionales.

Estos Fotobiorreactores cerrados presentan ventajas como: facilidad para cultivar la biomasa, mantenimiento del cultivo sin contaminación y mejor control de las condiciones de cultivo.

Los sistemas cerrados permiten un mayor control en la mayoría de los parámetros en comparación con los sistemas abiertos. El ambiente controlado del sistema cerrado permite alcanzar una mayor productividad, indicador significativo en la implementación de esta tecnología.

En la Tabla 12, se muestra una comparación de las condiciones de operación de tanques abiertos y fotobiorreactores.



Tabla 12. Comparación entre biorreactores cerrados y abiertos

Condición	Sistema cerrado	Sistema abierto
Control de contaminación	Fácil	Difícil
Riesgo de contaminación	Reducido	Alto
Esterilización	Posible	Imposible
Control del proceso	Fácil	Difícil
Mezcla	Uniforme	Muy pobre
Régimen de operación	Batch o semicontinuo	Batch o semicontinuo
Espacio requerido	Menor que en los sistemas abiertos	Alto
Relación Área/Volumen	Alta (20-200m ⁻¹)	Baja (5-10m ⁻¹)
Población densidad celular	Alta	Baja
Costos de operación	Altos	Altos
Eficiencia de absorción de luz	Alta	Baja
Control de temperatura	Más uniforme	Difícil
Productividad	3-5 veces más que los sistemas abiertos	Baja
Evaporación del medio	Baja	Alta

1.6 Aplicaciones

Las microalgas presentan un amplio rango de aplicaciones derivadas de su uso, desde producción de biomasa para alimentación, su empleo en acuicultura o su uso como biofertilizante, hasta la obtención de productos de valor terapéutico o industrial. Las microalgas son una fuente rica en numerosas moléculas bioactivas, cosméticos y de interés en alimentación y salud humana (Gómez & et al., 2009). De igual manera, la aplicación en la obtención de biomoléculas como pigmentos y aceites de ácidos grasos poliinsaturados, la producción de biocombustibles, y la captura biológica de CO₂ (Cardozo & et al., 2007).

1.6.1 Industria cosmética

Las algas absorben y concentran elementos tales como vitaminas, minerales, oligoelementos, aminoácidos, entre otros, importantes para la salud y en concreto para mantener el buen aspecto externo de la piel del ser humano (Viscasillas & Del Pozo, 2005).

Algunos extractos de las microalgas pueden ser encontrados en productos para la cara y piel, ya sea como cremas o productos refrescantes y regenerativos, además son utilizados para la fabricación de productos de protección solar y cuidado del cabello. Un ejemplo de productos comerciales son los extractos ricos en proteínas de *Arthrospira spp.* que se utilizan para reparar los signos tempranos del envejecimiento y prevención de la aparición de estrías, también los extractos de *Chlorella vulgaris*, estimulan la síntesis de colágeno en la piel y promueven la regeneración celular (Spolaroe & et al., 2006) y (Toledo, 2010).

Los primeros laboratorios especializados en la investigación y comercialización de cosméticos en algas se sitúan en Francia. Jabones, cremas de afeitar, champús, tintes, lápices de labios, tónicos, productos de maquillaje, espumas o productos de baño, pueden incorporar en su composición algas marinas (Viscasillas & Del Pozo, 2005).

1.6.2 Industria farmacéutica

Las microalgas presentan un potencial para proveer productos farmacéuticos, tales como; aminoácidos, carotenoides, ácidos grasos, vitaminas y antioxidantes. La literatura muestra que las microalgas, específicamente *S. limacinum* y *Cryptothecodinium cohnii*, son ricos en compuestos de Omega-3 ácido docosahexaenoico (DHA) y ácido eicosapentaenoico (EPA), lo cual es importante para prevenir las enfermedades cardiovasculares (Suali & Sarbatly, 2012).

Las especies de *Arthrospira*, son utilizadas por su alto contenido de proteínas y valor nutritivo, además estas microalgas tienen aplicación terapéutica, promoviendo el alivio de la hiperlipidemia (aumento de la concentración de lípidos en la sangre), la disminución de la hipertensión, la protección contra daño renal y el crecimiento y promoción de los *Lactobacillus* intestinales. En las especies de *Chlorella* producidas por más de 70 compañías, la sustancia más importante es el β -1,3-glucan, el cual es un inmunoestabilizador activo, un radical libre que reduce los lípidos de la sangre; además se le han atribuido otros efectos terapéuticos por su eficacia en el tratamiento de las úlceras gástricas, la prevención contra la arteroesclerosis y por su acción antitumoral (Toledo, 2010).

El Beta-caroteno es un precursor de la vitamina A, que es esencial para muchas funciones en el cuerpo humano, tales como visión, el crecimiento y desarrollo de los huesos y actúa como una coenzima, de igual forma, tiene funciones en el equilibrio de las hormonas (Suali & Sarbatly, 2012).

La capacidad antioxidante de las microalgas despierta interés en la terapia de enfermedades relacionadas con la oxidación, como la degeneración macular o diverso tipo de inflamaciones, así como en la prevención de ciertos desarrollos tumorales (de piel, de mama y de colon, entre otros), lo que confiere a estas moléculas valor como aditivos alimentarios (Gómez & et al., 2009).



Los antibióticos y antifúngicos representan otro grupo de productos de algas con un interés económico potencial. *Scenedesmus oblicuo* se ha utilizado en cuidados postoperatorios; extractos *Asterionella* mostraron efectos antivirales y antimicóticos. Otras algas como *Chaetocerus lauderi*, *Chaetocerus socialis*, o *Fragilaria pinnata* mostraron actividad antifúngica significativa. Finalmente, los extractos de microalgas como *Chlorella*, *Stichococcus mirabilis*, y *C. reinhardtii* también han demostrado efectos antivirales (Vilchez & et al., 1997).

1.6.3 Ácidos grasos

Los ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs) juegan un papel clave en la célula y el metabolismo de los tejidos, incluyendo la regulación de la fluidez de la membrana, transporte de electrones y Oxígeno, así como la adaptación térmica. Sin embargo, unas pocas microalgas presentan potencial para la producción industrial, principalmente debido al tipo de cultivo, presentando un nivel bajo de crecimiento (Cardozo & et al., 2007).

Además, los ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs) son esenciales para el consumo humano y el desarrollo fisiológico, de igual manera, se ha demostrado que estos ácidos grasos reducen el riesgo de enfermedad cardiovascular (Brennan & Owende, 2010).

En la actualidad, el pescado y el aceite de pescado son las principales fuentes de ácidos grasos poliinsaturados, la aplicación como aditivo alimentario es limitada debido a la posible acumulación de toxinas, olor a pescado, sabor desagradable y la presencia de ácidos grasos mezclados, no adecuados en las dietas vegetarianas (Brennan & Owende, 2010).

En la Tabla 13, se presentan los ácidos grasos de microalgas, como principal fuente de PUFAs (Brennan & Owende, 2010).

Tabla 13. Microalgas potenciales como fuentes primarias de PUFAs (Brennan & Owende, 2010).

AGPI	Aplicación potencial	Microorganismo productor
Ácido Docosahexaenóico (DHA)	Preparados infantiles para lactantes	<i>Cryptocodinium</i> , <i>Schizochytrium</i>
	Suplementos nutricionales	
	Acuicultura	
Ácido Eicosapentanoénico (EPA)	Suplementos nutricionales	<i>Nannochloropsis</i> , <i>Phaeodactylum</i> , <i>Nitzschia</i> <i>Pavlova</i>
	Acuicultura	
g-Ácido Linoléico (GLA)	Suplementos nutricionales	<i>Spirulina</i>
	Acuicultura	

AGPI	Aplicación potencial	Microorganismo productor
Ácido Araquidónico (AA)	Preparados infantiles para lactantes	<i>Porphyridium</i>
	Suplementos nutricionales	

1.6.4 Pigmentos: Carotenoides

Los carotenoides son isoprenoides lipofílicas sintetizados por todos los organismos fotosintéticos (incluidas las plantas, algas y cianobacterias), y también por algunas bacterias no fotosintéticas y hongos. Dos clases de carotenoides se encuentran en la naturaleza, tales como los carotenos β -caroteno, hidrocarburos lineales que se pueden ciclar en uno o ambos extremos de la molécula, y derivados de carotenoides oxigenados tales como Luteína, Violaxantina, Neoxantina y Zeaxantina, llamado xantofilas (Valduga & et al., 2009).

Los carotenoides se emplean como suplemento alimenticio, en el teñido, en productos farmacéuticos, cosméticos y alimentos para animales. Investigaciones recientes han demostrado su capacidad para reducir los riesgos de muchas enfermedades degenerativas como el cáncer, enfermedades cardiovasculares, cataratas y degeneración macular (Valduga & et al., 2009). Una ventaja de los carotenoides es el hecho de que el cultivo en condiciones controladas no depende de la composición de clima, la estación o el suelo (Valduga & et al., 2009) y (Bianchini Derner & et al., 2006).

De igual forma son pigmentos de gran interés comercial, actúan como pigmentos fotosintéticos fotoprotector. Varias especies pueden acumular concentraciones de Beta-caroteno, por ejemplo, Astaxantina o Cantaxantina, que tienen una amplia aplicación como colorantes naturales y como antioxidantes.

1.6.5 Astaxantina

La Astaxantina presenta un interés científico y comercial, ya que es una molécula activa de origen natural de alto valor agregado, que tiene grandes perspectivas de aplicación, en la industria farmacéutica como marcador en el seguimiento de células, como agente antioxidante y antitumoral; en la industria de cosméticos como colorante en diversos aspectos y antioxidante; en la industria alimenticia como suplemento y complemento en la coloración directa e indirecta de diversos productos, como en la dieta de las aves de corral con la finalidad de incrementar la coloración en la yema del huevo; en la acuicultura como fuente de pigmentación en la dieta de crustáceos (camarón, langosta) (Salazar, La astaxantina y su biosíntesis, 2000).

La producción de Astaxantina por la microalga *Haematococcus pluvialis* (H.p), se debe a la aplicación de diferentes factores que ocasionan estrés fisiológico: alta intensidad luminosa, temperatura



superior a 30°C, deficiencia de N y P así como la adición de NaCl. La combinación de estos factores pueden incrementar la síntesis de Astaxantina como una respuesta de foto protección de la célula (Salazar & et al., 200) y (Bianchini Derner & et al., 2006).

1.6.6 Clorofila

El contenido de Clorofila en las células microalgales usualmente está cerca del 0.5-1.5% del peso seco (Becker, 1994).

En la industria, la Clorofila se emplea como ingrediente en la manufactura de pastas dentales, enjuagues bucales, detergentes, pastillas para combatir la halitosis. Además puede ser un buen desodorante, antiséptico, y algunas evidencias sugieren su capacidad anticancerígena (Mora & et al., 2002)

1.6.7 Ficocoloides

Los Ficocoloides son polisacáridos de alto peso molecular compuesto de polímeros de azúcares. Ellos son el principal componente estructural de las paredes celulares de algas y pueden estar involucrados en el mecanismo de reconocimiento entre las algas y los patógenos. Algunos polisacáridos se han descrito con actividades antioxidantes, antivirales, antitumorales y anticoagulante. Los polisacáridos extraídos de algas marinas son el Agar, el Carragenano y el Alginato, debido a su amplio uso en la industria alimentaria y cosmética (Cardozo & et al., 2007).

1.6.8 Captura de CO₂

Como todos los organismos fotosintéticos, las microalgas utilizan el CO₂ como fuente de Carbono. En ausencia de este compuesto el crecimiento se considera nulo, al igual que un suministro insuficiente a menudo es el factor limitante de la productividad. Según la composición química media de la biomasa de las algas, se necesitan 1.8 toneladas de CO₂ para producir una tonelada de biomasa (Garcia, 2010).

El ciclo comienza con la fijación del CO₂ atmosférico a través de los procesos de fotosíntesis, realizados por las microalgas. Estos organismos incorporan el CO₂ atmosférico a los procesos metabólicos para la formación de materia orgánica y Oxígeno, a la larga esta materia orgánica es degradada e incorporada de nuevo al ciclo del Carbono (Toledo, 2010).

1.6.9 Alimentación Humana

Actualmente se encuentran en el mercado las microalgas en forma de tabletas, cápsulas y líquidos para nutrición humana, también pueden ser incorporadas en pastas, bocadillos y barras de dulces o incluso en goma de mascar. Debido a sus diversas propiedades químicas, pueden utilizarse como suplementos alimenticios o representar una fuente natural de colorante para alimentos (Toledo, 2010).

El consumo de biomasa microalgal por humanos se limita a muy pocas especies debido a las estrictas normas de seguridad alimentarias, factores comerciales, la demanda del mercado y la preparación específica de éstos (Brennan & Owende, 2010).

Las microalgas, *Chlorella*, *Spirulina* y *Dunaliella* dominan el mercado. La biomasa microalgal se comercializa en forma de tabletas o en polvo como aditivos alimentarios, por lo general en mercados de alimentos saludables, que se espera mantengan un mercado estable (Brennan & Owende, 2010).

En el 2003 la producción registrada de *Chlorella*, que presenta un valor nutricional y alto contenido proteico, fue de 2000 toneladas por año (Brennan & Owende, 2010).

1.6.10 Acuicultura o Maricultura

La acuicultura es una de las áreas de más rápido desarrollo en el campo de la producción alimenticia y las microalgas son el punto de partida biológico para el inicio del flujo de energía en las cadenas alimenticias acuáticas. A pesar de los esfuerzos realizados para reemplazar las microalgas por dietas inertes, la acuicultura depende todavía de su producción y utilización como alimento vivo para animales acuáticos comerciales (Franco Acosta, 2008).

Las microalgas representan una gran variedad de grupos, que además de aportar Oxígeno durante el día, tienen contenidos nutritivos importantes, como lo son polisacáridos, aminoácidos, enzimas y otras proteínas (Castro & al., 2003).

Las microalgas más utilizadas en la acuicultura son las diatomeas de los géneros *Chaetoceros* e *Isochrysis*, así como las algas flageladas como *Dunaliella* sp. (Castro & al., 2003).

Las especies de microalgas y zooplancton de mayor uso en Acuicultura, se muestran en la Tabla 14 (Guillar, 1973; Hirata, 1974; Watanabe et al., 1978). Estas especies han sido seleccionadas en base a su aporte nutricional y a las facilidades que permiten su producción masiva (Franco Acosta, 2008).



Tabla 14. Especies de microalgas y zooplancton de mayor uso en la acuicultura (Franco Acosta, 2008)

Tipo	Algas de uso común
<i>Bacillariophyceae</i>	<i>Skeletonema costatum</i> , <i>Thalassiosira pseudonana</i> , <i>Chaetoceros calcitrans</i>
<i>Haptophyceae</i>	<i>Isochrysis galbana</i> , <i>Isochrysis sp.</i> , <i>Pavlova lutheri</i>
<i>Chrysophyceae</i>	<i>Tetraselmis suecica</i> , <i>Tetraselmis chuii</i>
<i>Chlorophyceae</i>	<i>Chlorella autotrophica</i> , <i>Chlorella saccharophila</i>
<i>Chryptophyceae</i>	<i>Chroomonas salina</i>
<i>Cyanophyceae</i>	<i>Spirulina sp.</i> , <i>Spirulina máxima</i>
<i>Rotífera</i>	<i>Brachionus plicatilis</i>

1.6.11 Animales domésticos

Especies específicas de algas son adecuadas para la preparación de alimentos como suplementos para animales. Especies de algas, tales como *Chlorella*, *Scenedesmus* y *Spirulina* tienen aspectos beneficiosos, como la mejora en la respuesta inmunológica, mejora la fertilidad, mejora el control de peso, y proporciona una piel más sana y brillante (Brennan & Owende, 2010).

1.6.12 Porcinos y rumiantes

Los cerdos constituyen otro grupo de animales que pueden ser potencialmente consumidores de microalgas. Ya en 1966, se utilizó una mezcla de *Chlorella* y *Scenedesmus* para sustituir distintas proporciones de harina de soja y de algodón en fórmulas para cerdos, sin que se apreciaran diferencias importantes en el índice de conversión. También se utilizó *Scenedesmus* para sustituir a la harina de alfalfa en pienso para cerdos en una proporción del 12% de la ración, obteniéndose resultados aceptables (Gonzalez, Aguado, & Alvares, 1996).

Ensayos realizados en 1960 para determinar el valor nutritivo de *Chlorella*, *Scenedesmus obliquus* y *S. quadricauda*, producidos en agua residual, indicaron que en ovejas el coeficiente de digestibilidad de la fracción hidrocarbonada de las algas fue menor que el del heno, debido a la menor digestibilidad de la fibra de las algas. En vacuno se apreció una tendencia similar (Gonzalez, Aguado, & Alvares, 1996).

1.6.13 Sustancias y fabricación de productos químicos de alto valor, salud humana

Mientras que las microalgas pueden ser de crecimiento rápido (productos primarios), muchas sustancias químicas deseables son el producto del metabolismo secundario. Además, una vez que un producto químico es descubierto y caracterizado podría ser producido sintéticamente (Olaizola, 2003).

Los consumidores buscan controlar las enfermedades (por ejemplo, el Colesterol, enfermedades del corazón, osteoporosis y cáncer) con productos sintetizados por las microalgas (Mata, Martins, & Caetano, 2010).

Tradicionalmente, los suplementos nutricionales derivados de las plantas se han utilizado y predominado en el mercado. No obstante, las algas se están investigando y reconociendo como suplementos nutricionales. Las microalgas tienen una proteína de mayor calidad que otras fuentes vegetales, por ejemplo, trigo, arroz y legumbres (Mata, Martins, & Caetano, 2010).

El alga *Chlorella*, se utiliza como protección contra la insuficiencia renal y las infecciones intestinales, causadas por lactobacilos, con un valor medicinal (Brennan & Owende, 2010).

El futuro de las microalgas en el sector manufacturero podría ser limitado a los productos químicos complejos que no pueden sintetizarse químicamente o por vías que no pueden ser transferidos a otros organismos. Para productos químicos que se producen por microalgas es necesario desarrollar nuevas cepas (presentar un crecimiento rápido y una alta concentración de productos químicos) (Olaizola, 2003).

1.7 Proteína Unicelular

Se denomina proteína unicelular o bioproteína aquella obtenida de la biomasa microbiana de algas, bacterias, levaduras y hongos filamentosos, cultivados en condiciones fermentativas apropiadas y controladas, que garantizan una adecuada tasa de crecimiento, por medio del aprovechamiento de sustratos enriquecidos con Carbono, Nitrógeno y Fósforo (Gaviria U & Palau M, 2005).

Las microalgas representan una fuente proteínica con posibles aplicaciones en la nutrición humana y como complemento alimenticio de animales, debido a su elevado contenido protéico, potenciados por el hecho de poseer un buen balance de aminoácidos y bajos valores de ácidos nucleicos en comparación con otras fuentes de proteína unicelular (Becker, 2007) y (Cardozo & et al., 2007).

La mayoría de las cifras publicadas en la literatura sobre la concentración de las proteínas de las algas, se basa en las estimaciones de crudo llamado proteínas, comúnmente utilizados en la

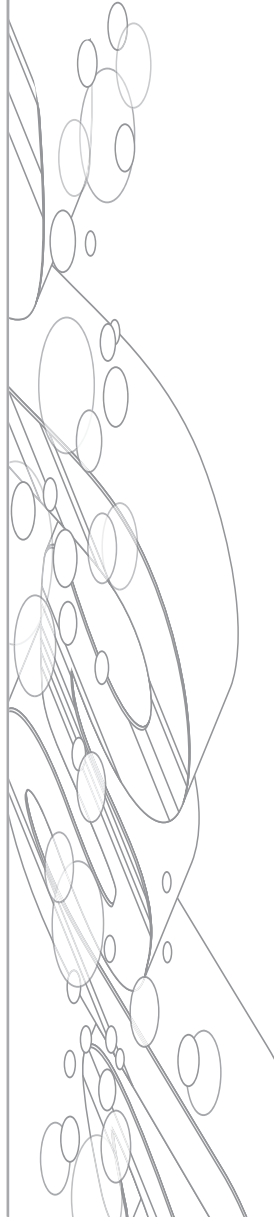


evaluación de los alimentos y piensos. Esta cifra se obtiene por hidrólisis de la biomasa algal y la estimación del nitrógeno total. Además, otros componentes de las microalgas como los ácidos nucleicos, por ejemplo, aminas, glucosamidas, y materiales de la pared celular contienen Nitrógeno. De acuerdo con cifras publicadas, la cantidad en el contenido de proteína, no de nitrógeno, se encuentra en 12% en *Scenedesmus obliquus*, 11,5% en *Spirulina sp* y el 6% en *Dunaliella sp*, (Becker, 2007).

Las proteínas se componen de diferentes aminoácidos, y por lo tanto, la calidad nutricional de una proteína se determina por el contenido de la proporción y la disponibilidad de sus aminoácidos. En la Tabla 15, se muestra el perfil de aminoácidos de diferentes algas en comparación con algunos básicos de los alimentos convencionales y un patrón de referencia de una proteína bien balanceada, recomendada por la OMS / FAO(1973). Se puede observar que el patrón de aminoácidos de casi todas las algas se compara a favor con el poder de la de referencia y las proteínas de otros alimentos (Becker, 2007).

Tabla 15. Perfil de aminoácidos de diferentes algas en comparación con las fuentes convencionales de proteína y el patrón de referencia de la (Organización Mundial de la Salud) OMS / FAO (por cada 100 g de proteína), (Becker, 2007)

Fuente	Ile	Leu	Val	Lys	Phe	Tyr	Met	Cys	Try	Thr	Ala	Arg	Asp	Glu	Gly	His	Pro	Ser
OMS/FAO	4.0	7.0	5.0	5.5	6.0	3.5	1.0											
Huevos	6.6	8.8	7.2	5.3	5.8	4.2	3.2	2.3	1.7	5.0		6.2	11.0	12.6	4.2	2.4	4.2	6.9
Soya	5.3	7.7	5.3	6.4	5.0	3.7	1.3	1.9	1.4	4.0	5.0	7.4	1.3	19.0	4.5	2.6	5.3	5.8
<i>Chlorella vulgaris</i>	3.8	8.8	5.5	8.4	5.0	3.4	2.2	1.4	2.1	4.8	7.9	6.4	9.0	11.6	5.8	2.0	4.8	4.1
<i>Dunaliella Salina</i>	4.2	11.0	5.8	7.0	5.8	3.7	2.3	1.2	0.7	5.4	7.3	7.3	10.4	12.7	5.5	1.8	3.3	4.6
<i>Spirulina sp</i>	6.7	9.8	7.1	4.8	5.3	5.3	2.5	0.9	0.3	6.2	9.5	7.3	11.8	10.3	5.7	2.2	4.2	5.1
<i>Scenedesmus obliquus</i>	3.6	7.3	6.0	5.6	4.8	3.2	1.5	0.6	0.3	5.1	9.0	7.1	8.4	10.7	7.1	2.1	3.9	3.8
<i>Arthrospira sp.</i>	6.0	8.0	6.5	4.6	4.9	3.9	1.4	0.4	1.4	4.6	6.8	6.5	8.6	12.6	4.8	1.8	3.9	4.2



Conclusiones

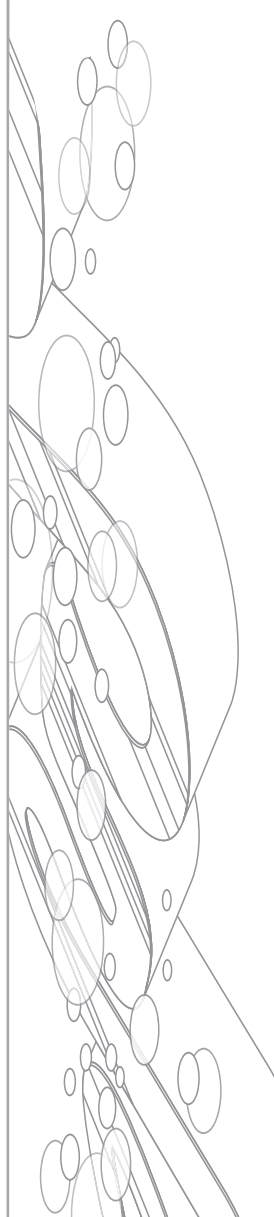
De las algas se pueden extraer diferentes productos, tanto para usos industriales como alimenticio. En la industria se utiliza para la obtención de compuestos farmacéuticos, cosméticos, entre otros y en alimentación se utilizan para la obtención de aditivos o compuestos para productos para animales y humanos, entre otras aplicaciones.

Existen parámetros que afectan el crecimiento de las microalgas, como la distribución e intensidad de la luz dentro del reactor, la temperatura, el tiempo de retención, la agitación o mezcla de los medios de cultivo, el intercambio gaseoso, el control del pH, entre otros.

El diseño del reactor (cerrado o abierto) favorece la absorción de la luz, ya que la configuración del reactor, define si la trayectoria de ésta puede ser más corta favoreciendo la absorción de la luz, necesaria para la fotosíntesis y la reproducción de las microalgas.

Con la obtención de proteína unicelular, no sólo se disminuye el déficit de proteínas, sino que se potencializa ésta como un nutriente de alta calidad comparable con las proteínas vegetales convencionales y también se potencializan los subproductos, dándole un valor agregado en el mercado.

El valor dietético de una microalga depende de su composición y de su contenido energético, el cual se relaciona con la cantidad de materia orgánica presente en la biomasa.



Bibliografía

Algas. (2004). Botánica General. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Facultad de Ciencias Naturales. *Departamento Biología General*.

Álvarez Cobelas, M., & Gallardo, T. (1989). Una Revisión Sobre la Biotecnología de las Algas. *Bot. Complutensis* N° 15. Edit Universidad Complutense, 9-60.

Anupama, & Ravindra, P. (2000). Value-added food: Single cell protein. *Biotechnology Advances*. Vol. 18, 59–479.

Arredondo Vega, B., & Voltolina, D. (2007). *Métodos y herramientas analíticas en la evaluación de la biomasa microalgal*. México: CIBNOR.

Barraza, C., & et al. (2009). Producción de biodiesel a partir de microalgas. *Pontificia universidad católica de Valparaíso. Facultad de ingeniería. Escuela de Ingeniería bioquímica*.

- Becker, E. (2007). Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*. Vol. 25, 207 – 210.
- Bianchini Derner, R., & et al. (2006). Microalgae, products and applications. *Ciência Rural*. Vol.36. N.6, 1959 - 1967.
- Bianchini, R., & et al. (2006). Microalgas, produtos e aplicações. *Ciência Rural, Santa Maria*. Vol. 36. No. 6, 1959–1967.
- Borowitzka, M. A. (1997). Microalgae for aquaculture: opportunities and constraints. *J. Appl. Phycol.* Vol. 9, 393–401.
- Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 14, 557–577.
- Brock, D. T., & Madigan, M. (1993). “*Microorganismos Eucarióticos*”. México: Prentice Hall Hispanoamericana S.A. (eds), Microbiología, 6 ed, capítulo 21, .
- Brown, M. e. (1997). Nutritional properties of microalgae for mariculture. *Aquaculture*. Vol. 151 , 315-331.
- Cardozo, K. H., & et al. (2007). Metabolites from algae with economical impact. *Comparative Biochemistry and Physiology*. Vol. 146, 60–78.
- Castro, T., & al., e. (2003). Alimento vivo en la acuicultura. *El Hombre y su Ambiente*, 27 - 33.
- Chacón, A. (2004). Perspectivas actuales de la proteína unicelular (SCP) en la agricultura y la industria. *Agronomía Mesoamericana*. Vol. 15. No. 1, 93–106.
- Dodd, J. C. (1986). Elements of pond design and construction. En: A RICHMOND ED., *CRC Handbook of Microalga/ Mass: Culture CRC Press Inc. Boca Ratón (Florida)*, 265 -283.
- Droop, N. R. (1983). 25 years of algal growth kinetics: a personal view. *Bat Mar*. Vol. 26, 99 – 112.
- Embleton, N. D. (2007). Optimal protein and energy intakes in preterm infants. *Early Human Development*. Vol. 83, 831–837.
- FAO. (2008). Nutrición Humana en el Mundo en Desarrollo. *Deposito de documentos de la FAO, producción y seguridad alimentaria*. Vol. 2.

- Franco Acosta, L. (2008). PRODUCCIÓN DE BIOMASA DE LA MICROALGA *Chlorella sp.* EN UN REACTOR DE 10 LITROS. *Tesis. Universidad de Antioquia*, 1 - 91.
- García, M. (2010). Captura de CO₂ mediante algas unicelulares. *Escuela Técnica superior de ingenieros agrónomos, departamento de producción vegetal*, 1 -189.
- Garibay Hernández, A., & et al. (2009). Biodiesel a partir de Microalgas. *Biotecnología. Vol. 13. No. 3*, 1 - 11.
- Gaviria U, A., & Palau M, M. d. (2005). Nutrición y salud infantil en Colombia: determinantes y alternativas de política.
- Gaviria, A., & Palau, J. M. (2006). Nutrición y salud infantil en Colombia: determinantes y alternativas de política. *Coyuntura Económica. Vol. XXXVI. No. 2*, 33–63.
- Giraldo, M. V., & López, P. L. (2008). Producción de proteína unicelular a partir de desechos agroindustriales. *Manejo de Residuos. Vol. ISSN 1900-6241.No. 82*, 2–19.
- Gómez, J., & et al. (2009). Las microalgas, nuevos caminos hacia alimentos funcionales. *I JORNADAS DEL CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL AGROALIMENTARIO*, 1 - 4.
- González de Chabbarri, E., Aguado, R., & Álvarez, B. (1992). Las microalgas: ¿Una potencial alternativa de producción? *Mundo Ganadero*.
- Gonzalez, E., Aguado, J., & Alvares, B. (1996). Las microalgas: ¿una potencial alternativa de producción? *Departamento de producción animal. Facultad de Veterinaria UCM*, 42 - 45.
- Griffiths, D., Thresher, C., & Street, H. (2011). The heterotrophic nutrition of *Chlorella vulgaris*. *Ann. Bot.* 24, 1 -11.
- Grobbelaar, J. U. (2000). Physiological and technological considerations for optimizing mass algal cultures. *J. Appl. Phycol.* 12, 201 - 206.
- Gudin, C., & Chaumont, D. (1983). Solar biotechnology study and development of tubular solar receptors for controlled production of photosynthetic cellular biomass. En: Palz W, Pirrwitz D (Eds.) *Proceedings of the Workshop and EC Contractor's Meeting in Capri. Reidel. Dordrecht. Holanda*, 184 – 193.
- Hartig, F. J., & et al. (1988). On the mass culture of microalgae: Areal density as an important factor for achieving maximal productivity. *Biomass. Vol. 15*, 211 – 221.



- Harun, R., & et al. (2010). Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 14, 1037–1047.
- Hu, Q. e. (1998 b). Ultrahigh-cell-density culture of a marine green alga *Chlorococcum littorale* in a flat-plate photobioreactor. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 49, 655 - 662.
- Huang, G., & et al. (2009). Biodiesel production by microalgal biotechnology. *Appl Energy*, 1 - 9.
- ICBF. (2011). COLOMBIA ES EL PAÍS CON MENOR DESNUTRICIÓN INFANTIL COMPARADO CON 12 NACIONES DE AMÉRICA LATINA. *Encuesta Nacional de la Situación Nutricional – ENSIN*. [Online]. www.icbf.gov.co.
- Javanmardian, M., & Palsson, B. O. (1991). High-density photoautotrophic algal cultures: design, construction, and operation of a novel photobioreactor system. *Biotechnol. Bioeng.* Vol. 38, 1182 – 1189.
- Jess, A. (2010). What might be the energy demand and energy mix to reconcile the world's pursuit of welfare and happiness with the necessity to preserve the integrity of the biosphere? *Energy Policy*. Vol. 38., 4663–4678.
- Lee, C. G., & Palsson, B. O. (1994). High density algal photobioreactors using light emitting diodes. *Biotechnol. Bioeng.* Vol. 44, 1161 – 1167.
- Los biocombustibles a partir de microalgas* . (25 de Mayo de 2011). Recuperado el 25 de Mayo de 2011, de Los biocombustibles a partir de microalgas : <http://www.sitiosolar.com/biocombustibles%20de%20microalgas.htm#PROCESO>
- Mandalam, R. K., & Palsson, B. O. (1998). Elemental balancing of biomass and medium composition enhances growth capacity in high-density *Chlorella vulgaris* cultures. *Biotechnol Bioeng*, 605 - 611.
- Marinas, A. (2004). Seaweeds & Agar Company Pacific E.I.R.L. *los vegetales del mar. Chile*.
- Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 217–232.
- Metting, F. B. (1996). Biodiversity and application of microalgae. *J. Ind. Microbiol.* Vol. 17, 477–489.
- Microorganisms Atlas. Algae. AYMA* . (26 de Noviembre de 2011). Recuperado el 26 de Noviembre de 2011, de Microorganisms Atlas. Algae. AYMA : http://personal.telefonica.terra.es/web/ayma/atlas_m.htm#Tolypothrix lanata

- Molina, E., & et al. (1999). Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. *Journal Biotechnology*. Vol. 70, 231 – 248.
- Monza, J., & et al. (2002). FOTOSINTESIS. *Fotosintesis*, 1 - 11.
- Mora, R., & et al. (2002). Efecto del nitrato, irradiancia y salinidad sobre la producción de Clorofila a de microalgas cultivadas y aisladas en la region Noroccidental de Venezuela. *Oceánides*. Vol. 17 (2), 73 -83.
- Muller-Feuga, A. (2000). The role of microalgae in aquaculture: situation and trends. *J. Appl. Phycol.* Vol. 12, 527–534.
- Neilson, A., & Lewin, R. (1974). The uptake and utilization of organic carbon by algae: an essay in comparative biochemistry. *Phycologia*. 13, 227-264.
- Olaizola, M. (2003). Commercial development of microalgal biotechnology: from the test tube to the marketplace. *Biomolecular Engineering*. Vol. 20, 459 - 466.
- Oron, G. G., & Sfielee, A. L. (1981). Algal polymorphism in high rate wastewater treatment ponds. *Hydrobiologia*. Vol. 77, 167 – 175.
- Ortelli, D., & et al. (2008). Fast screening and quantitation of microcystins in microalgae dietary supplement products and water by liquid chromatography coupled to time of light mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta* 617, 230-237.
- Ortiz, R., & al., e. (2006). Análisis de la Política de Nutrición en Colombia. *Salud Pública*. Vol. 8. No. 1, 1–13.
- Packer, M. (2009). Algal capture of carbon dioxide; biomass generation as a tool for greenhouse gas mitigation with reference to New Zealand energy strategy and policy. *Energy Policy*. Vol. 37, 3428–3437.
- Pérez G, O., & et al. (2011). Heterotrophic cultures of microalgae: Metabolism and potential products. *Water research*. 45, 11 - 36.
- Pérez García, O., Escalante, F. M., De-Bashan, L. E., & Bashan, Y. (2011). Heterotrophic cultures of microalgae: Metabolism and potential products. *Water research*. Vol. 45, 11-36.
- Pulz, O. (2001). Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *En: Appl Microbiol Biotechnol*. 57, 287 - 293.



- Quevedo, C. (2006). Selección de un medio de cultivo para la producción de proteína microalgal a partir de *Scenedesmus* sp. *Tesis Ingeniería Química*, 1 - 120.
- Ramírez, H. F. (2009). Desnutrición en Colombia. *Cuadernillo Cultural*, 1–4.
- Richmond, A. (1996). Efficient utilization of high irradiance for production of photoautotrophic cell mass: a survey. *J. Appl. Phycol.* 8, 381 - 387.
- Richmond, A. (2000). Microalgal biotechnology at the turn of the millennium: a personal view. *J. Appl. Phycol.* Vol. 12, 441 – 451.
- Salazar, M. (2000). La astaxantina y su biosíntesis. *Departamento de Biotecnología*, 61 - 64.
- Salazar, M., & et al. (200). Fotoproducción de Astaxantina a partir de *Haematococcus plvialis*. *Universidad Autónoma Metropolitana. Departamento de Biotecnología*, 1 - 2.
- Sánchez M, A., & et al. (2003). Shear stress tolerance and biochemical characterization of *Phaeodactylum tricornutum* in quasi steady-state continuous culture in outdoor photobioreactors. *Biochemical Engineering Journal.* 16, 287 – 297.
- Sánchez, A., & et al. (2000). Bubble column and air lift photobioreactors for algal culture. *Aiche J.* Vol. 46, 1872 – 1877.
- Sánchez, J. M., & Galán, L. J. (2007). Síntesis de biomasa proteína de origen unicelular de *Saccharomyces exiguus* en ácido acético. *Microbiología ambiental*, 1-9.
- Spolaroe, P., & et al. (2006). Commercial Applications of Microalgae. *Journal of bioscience and bioengineering.* Vol. 101. N. 2, 87–96.
- Suali, E., & Sarbatly, R. (2012). Conversion of microalgae to biofuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* Vol. 16, 4316 – 4342.
- Toledo, A. L. (2010). Captura de CO₂ por una comunidad de microalgas obtenidas de un ecosistema natural mexicano. *Universidad Autónoma Metropolitana*, 1 - 116.
- Ugwu, C., Ogbonna, J. C., & Tanaka, H. (2002). Improvement of mass transfer characteristics and productivities of inclined tubular photobioreactors by installation of internal static mixers. *En: Appl. Microbiol. Biotechnol.* Vol. 58, 600 – 607.
- Valduga, E., & et al. (2009). PRODUÇÃO DE CAROTENOIDES: MICRORGANISMOS COMO FONTE DE PIGMENTOS NATURAIS. *Quim. Nova.* Vol. 32. No. 9, 2429-2436.

- Vilchez, C., & et al. (1997). Microalgae-mediated chemicals production and waste removal. *Elsevier Science Inc.*, 2 - 11.
- Viscasillas, A., & Del Pozo, A. (2005). El uso de las algas en cosmetica. *UNIDAD DE TECNOLOGIA FARMACÉUTICA. FACULTAD DE FARMACIA*. Vol. 24, 126 - 127.
- Volesky, B. (1990). *Biosorption of heavy metals*. Florida: CRC Press.
- Wang, B., Li, Y., Wu, N., & Lan, C. (2008). CO₂ bio-mitigation using microalgae. *Appl. Microbiol. Biotechnol. Springer-Verlag Berlin Heidelberg*. [Versión electrónica].
- Wen, Z.-Y., & Chen, F. (2003). Heterotrophic production of eicosapentaenoic acid by microalgae. *Biotechnology Advances*. Vol. 21, 273 – 294.
- Yanez, M. R. (2006). Desnutrición infantil en América Latina y el Caribe. *Desafíos, Boletín de la infancia y adolescencia sobre el avance de los objetivos de desarrollo del Milenio*. Vol. ISSN 1816-7535. No. 2, 1–12.
- Yang, C., Hua, Q., & Shimizu, K. (2000). Energetics and carbon metabolism during growth of microalgal cells under photoautotrophic, mixotrophic and cyclic light-autotrophic/dark-heterotrophic conditions. *Biochemical Engineering Journal*. Vol. 6 , 87–102.
- Zeng, X., & et al. (2001). Microalgae bioengineering: From CO₂ fixation to biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 15, 3252– 3260.

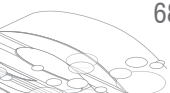


Lista de tablas

Tabla 1. Algas Chlorophyta (algas verdes), Rhodophyta (algas rojas) y Phaeophyta (alga café), (Algas, 2004)	14
Tabla 2. Microalgas Cianofíceas / Cyanophyta (Algas verde-azuladas), (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011).	19
Tabla 3. Microalgas Clorofíceas / Chlorophyta (Algas verdes), (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)	21
Tabla 4. Microalgas Criptofíceas / Cryptophyta (Algas pardas), (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)	26
Tabla 5. Microalgas Crisofíceas / Chrysophyta (Algas doradas), (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)	27
Tabla 6. Microalgas Diatomeas / Diatoms, (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)	27
Tabla 7. Microalgas Dinofíceas / Dinophyceae, (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)	29
Tabla 8. Microalgas Euglenofíceas / Euglenophyta, (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)	30



Tabla 9. MicroalgasXantofíceas / Xantophyta, (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)	32
Tabla 10. Composición química (en % del peso seco total) de diferentes microalgas	32
Tabla 11. Funciones de los nutrientes presentes en el medio de cultivo	34
Tabla 12. Comparación entre biorreactores cerrados y abiertos	48
Tabla 13. Microalgas potenciales como fuentes primarias de PUFAs (Brennan & Owende, 2010).	50
Tabla 14. Especies de microalgas y zooplancton de mayor uso en la acuicultura (Franco Acosta, 2008)	54
Tabla 15. Perfil de aminoácidos de diferentes algas en comparación con las fuentes convencionales de proteína y el patrón de referencia de la (Organización Mundial de la Salud) OMS / FAO (por cada 100 g de proteína), (Becker, 2007)	56



Lista de figuras

Figura 1. Ruta metabólica de la biosíntesis de algunos metabolitos primarios y secundarios	36
Figura 2. Biosíntesis de Micosporina y algunos aminoácidos	37
Figura 3. Esquema del almacenamiento de energía en las microalgas (Los biocombustibles a partir de microalgas, 2011).	38
Figura 4. Esquema de la fotosíntesis, fijación de CO_2 y acumulación de la células microalgales (Zeng & et al., 2011)	39
Figura 5. Efecto de la energía luminosa (E) en la tasa fotosintética (F) y en la eficiencia fotosintética (F/E). Ek es la constante de saturación (Richnond, 2000).	41
Figura 6. Reactores abiertos para el cultivo de microalgas (a: turbinas flotantes, b: difusores de aire, c: canales con paletas rotatorias)	44
Figura 7. Fotobiorreactores tubulares (a: verticales, b: inclinados, c: horizontales)	45



Figura 8. Producción de biomasa de tres reactores verticales a diferentes velocidades de aireación (Sánchez M & et al., 2003). **45**

Figura 9. Reactores cerrados tipo panel **46**

Figura 10. Fotobiorreactores cerrados **47**



SU OPINIÓN



Para la Editorial UPB es muy importante ofrecerle un excelente producto.
La información que nos suministre acerca de la calidad de nuestras publicaciones será muy valiosa en el proceso de mejoramiento que realizamos.
Para darnos su opinión, comuníquese a través de la línea (57)(4) 354 4565
o vía E-mail a editorial@upb.edu.co
Por favor adjunte datos como el título y la fecha de publicación, su nombre,
e-mail y número telefónico.



La producción de proteína microalgal ha representado desde principios del siglo XX una opción biotecnológica de discutida viabilidad en el manejo y aprovechamiento de desechos orgánicos de origen agrícola, constituyendo una alternativa recurrente de convertir estas fuentes de contaminación en materiales útiles desde un punto de vista económico, nutricional e industrial.

En este libro se destacan las aplicaciones de las microalgas en la industria alimenticia, estableciendo la clasificación general de las algas.

Se realizó también la revisión del contenido de nutrientes esenciales para el cultivo de las microalgas, condiciones operacionales para el crecimiento (temperatura, distribución e intensidad de la luz, pH, oxígeno disuelto, entre otros), sistemas de reactores, tanto abiertos como cerrados, y composición (proteínas, carbohidratos, lípidos, entre otros), de aminoácidos.

ISBN: 978-958-764-228-5



9 789587 642285

