

PRODUCCIÓN DE MICROALGAS CON APLICACIONES NUTRICIONALES PARA HUMANOS Y ANIMALES

María del Carmen Cerón García
Universidad de Almería

RESUMEN

Las microalgas son un diverso grupo de microorganismos fotosintéticos capaces de captar la luz solar para sintetizar reservas de energía tales como carbohidratos, lípidos o proteínas. A diferencia de los cultivos vegetales tradicionales, aquellas pueden ser cultivadas en sistemas de cultivos abiertos, como balsas o lagos, o en sistemas de cultivo cerrados altamente controlados con los que se alcanzan mayores productividades y en condiciones climáticas y regiones donde otros cultivos no pueden llevarse a cabo, tales como áreas desérticas o costeras. Hoy en día, el consumidor demanda alimentos más naturales con beneficios para la salud y, en consecuencia, se espera que la microalgas desarrollen en el futuro un importante papel en la industria alimentaria y farmacéutica.

SUMMARY

Microalgae are a diverse group of photosynthetic microorganisms capable of capturing sunlight to synthesize energy reserves such as carbohydrates, lipids or proteins. Unlike traditional crops, those can be grown in open culture systems such as ponds or lakes, or in closed culture systems with highly controlled conditions to achieve higher productivity and climatic conditions and regions where other crops cannot be carry out, such as desert or coastal areas. Today, consumers demand more natural food with health benefits and, therefore, are expected to develop in the future microalgae an important role in the food and pharmaceutical industries.

1. Introducción

Las microalgas son seres unicelulares muy variados en tamaño y forma, que existen en casi todos los hábitats conocidos, principalmente acuáticos, tanto marinos como dulceacuícolas o a veces bajo tierra. Las microalgas podrían caracterizarse por los siguientes rasgos:

- a) son seres principalmente fotoautotróficos (en menor medida heterótrofos), estimándose que el 90 % de la fotosíntesis total de la tierra es realizada por estos vegetales acuáticos;
- b) son seres con gran capacidad de producción de biomasa; a pesar de que la biotecnología de microalgas es similar a la agricultura convencional, las microalgas tienen muchas ventajas sobre las plantas terrestres. Ellas crecen con mayor rapidez por su facilidad de división, tienen mayor productividad que los cultivos tradicionales y pueden obtenerse en condiciones climáticas y regiones donde los cultivos no pueden hacerlo, tales como los desiertos o zonas costeras. Una de las principales ventajas de la microalgas es que sostienen (*hold*) el exceso del CO₂ atmosférico y producen O₂, que ayudan a reducir el efecto invernadero;
- c) son seres de composición compleja que encuentran un campo de actuación bastante amplio en la nutrición humana y animal, pudiendo ser comestibles las algas verdes (*chlorophyta*) y las cianobacterias. Por un lado contienen pigmentos útiles tales como clorofilas y carotenoides (xantofilas, carotenos y astaxantina), pertenecientes a las especies *Chlorella vulgaris*, *Haematococcus pluvialis*, *Dunaliella salina*, *Isochrysis galbana* y *Diacronema vlkianum*. También contienen sustancias de alto valor biológico, tales como ácidos grasos poliinsaturados, proteínas, antioxidantes, vitaminas y minerales. Por otro lado, recientes estudios indican que las microalgas podrían ser usadas para producir biodiesel e hidrogeno;
- d) son seres con gran plasticidad metabólica, constituyendo por ejemplo, la materia prima para obtener biodiesel y un importante eslabón formando el fitoplancton en la cadena trófica en acuicultura y
- e) el número de taxones es elevado, existiendo gran variedad de especies catalogadas y disponibles. Se cuentan hasta ahora más de 30.000 especies de microalgas sobrepasando las 10.000 especies de cianofíceas y clorofíceas, representando en la actualidad un recurso prácticamente inexplorado, ya

que son solo unas pocas las estudiadas y aprovechadas comercialmente, aproximadamente unas 50 especies han sido estudiadas con detalle desde el punto de vista fisiológico y bioquímico.

El éxito del mundo de la biotecnología de microalgas radica en elegir la correcta especie con relevantes propiedades para que, en condiciones específicas de cultivo, produzca los compuestos de interés. El mercado de la biomasa de microalgas tiene un tamaño de aproximadamente 5.000 toneladas/año de materia seca y genera un volumen de ventas de aproximadamente $1,25 \times 10^9$ dólares/año (Pulz y Gross, 2004).

La biotecnología de microalgas ha adquirido una considerable importancia en las últimas décadas. Las aplicaciones van desde la producción de simple biomasa para alimentos, piensos para animales o productos de valor para aplicaciones ecológicas. Considerando la enorme biodiversidad de microalgas y los recientes desarrollos en ingeniería genética, este grupo de organismos representa una de las fuentes más prometedoras para nuevos productos y aplicaciones. Con la investigación de sofisticados cultivos y técnicas de búsqueda de cepas, la biotecnología de microalgas ya puede satisfacer las altas exigencias de las industrias alimentaria y farmacéutica. Entre otras aplicaciones podemos citar la industria cosmética, la acuicultura, el tratamiento de aguas residuales, la bioremediación de suelos, los biocombustibles, etc. Pero en este trabajo nos centraremos en la principal forma de comercialización: la nutrición humana y animal.

2. Composición bioquímica de microalgas

Si comparásemos la composición bioquímica de las microalgas con la de los alimentos tradicionales sería posible que estas fueran capaces de aumentar el contenido nutricional de los alimentos tradicionales e incluso afectar positivamente tanto a la salud humana como a la animal. Esto es debido a su original composición química. La Tabla 1 presenta una comparativa entre la composición general de fuentes nutritivas para humanos y las diferentes especies de algas comestibles (Spolaore *et al.*, 2006; Becker, 2007 y Gouveia *et al.*, 2008).

El alto contenido proteico de varias especies microalgales es una de las principales razones para considerarlas como una fuente de proteína no convencional. A su vez, el perfil de aminoácidos de casi todas las algas es más favorable que el comparado con las fuentes convencionales. Los carbohidratos en microalgas pueden ser encontrados en forma de almidón, glucosa, azúcares u otros polisacáridos. Su digestibilidad es alta,

por lo que no hay limitación de uso en preparados alimenticios tanto para animales como para humanos. Los lípidos en las microalgas están compuestos de glicerol, bases esterificadas de ácidos grasos saturados e insaturados (12 a 22 átomos de carbono). Entre todos los ácidos grasos en microalgas tienen especial interés algunos de las familias $\omega 3$ y $\omega 6$ (ácido eicosapentaenoico, 20:5n3 o ácido docohexaenoico, 22:6n3). La cantidad y la relativa proporción de ácidos grasos pueden estar afectadas por factores nutricionales y medioambientales, por ejemplo la limitación por nitrógeno, estrés producido por un exceso de luz o salinidad que pueden producir un aumento considerable del contenido en ácidos grasos (ejemplo de plasticidad metabólica).

Tabla 1. Comparación de la composición bioquímica de fuentes nutricionales convencionales humanas y de algunas microalgas comestibles marinas y de agua dulce. En porcentaje en peso seco

Especies comestibles	Composición Bioquímica		
	Proteínas (%)	Lípidos (%)	Carbohidratos (%)
Levadura de panadería	39	1	38
Carne	43	34	1
Leche	26	28	38
Arroz	8	2	77
Soja	37	20	30
Chlorella vulgaris	51-58	14-22	12-17
Haematococcus pluvialis	48	15	27
Dunaliella salina	39-61	14-20	14-18
Spirulina maxima	60-71	4-9	8-14
Chlamydomonas reinhardtii	48	21	17
Scenedesmus obliquus	50-56	12-14	10-17
Porphyridium cruentum	28-39	9-14	40-57

3. Aplicaciones de las microalgas

3.1. Biomasa microalgal

La biomasa de microalgas, que se suele comercializar en polvo o en forma de grageas comprimidas (Figura 1), es el producto predominante en la biotecnología microalgal.

Figura 1. Formas más comunes de presentación de microalgas (grageas o en polvo)



Spirulina sp.



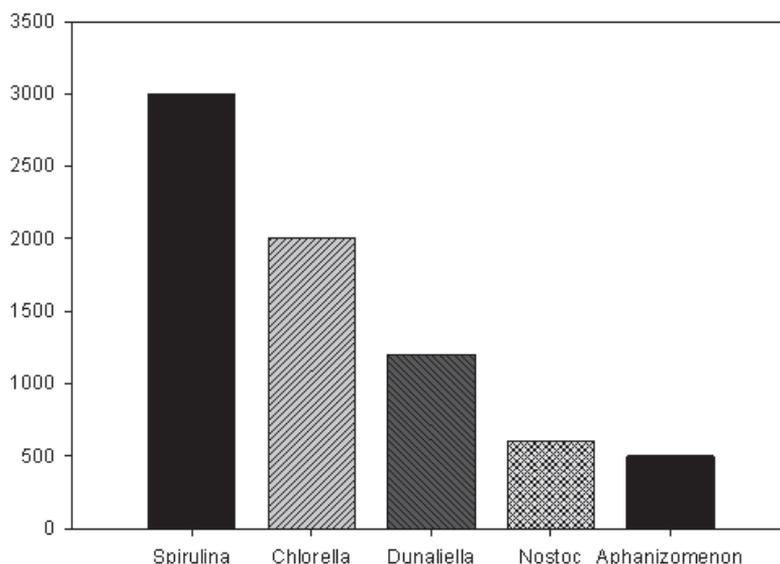
Haematococcus pluvialis



Chlorella pyrenoidosa

Esta biomasa es cosechada de aguas naturales, de lagos artificiales o fotobio-reactores con la correspondiente separación del medio de cultivo y posterior secado. Para quitarle la humedad a la biomasa existen diversos mecanismos de secado: al sol o liofilizando o por *spray*, preservándose sus propiedades en estas dos últimas operaciones básicas.

Gráfico 1. Producción anual mundial de biomasa de microalga. En toneladas/año



El Gráfico 1 presenta una estimación a groso modo de las producciones de microalgas más importantes del mundo. El producto final de la producción de biomasa tiene una coloración determinada (en función de la cepa), por ejemplo, verde o

rojo-anaranjado que se comercializa principalmente en el mercado de la alimentación humana saludable.

4. Alimento dietético

En los inicios de los años cincuenta los humanos comenzaron a usar microalgas en sus dietas, principalmente como suplementos dietéticos (proteicos y vitamínicos), en forma de polvo, capsulas, pastillas o tableta (Pulz y Gross 2004). Estas suelen ser incorporadas en alimentos tales como pasta, galletas, pan, caramelos, yogures o refrescos. A su vez, a día de hoy, se estima que aproximadamente el 30 % de las algas producidas en el mundo es usado en nutrición humana debido a su alto contenido en proteína.

Spirulina sp. y *Chlorella* sp. son cultivadas extensamente para uso alimenticio. Mientras que *Spirulina* posee grandes cantidades de 18:3n6 (GLA), tiene falta de cantidades de ácidos grasos ω -3, tales como el ácido eicosapentaenoico (20:5n3, EPA) o el ácido docohexanoico (22:6n3, DHA).

La especie más empleada para este fin es la cianobacteria *Spirulina*, la cual se usa como alimento de alto valor proteico en poblaciones de México y África Central. Hoy día, la mayor instalación comercial para la producción de biomasa de *Spirulina* con fines alimenticios se encuentra en el lago Texcoco (México). Otros importantes países productores son Taiwán, Estados Unidos, Tailandia, Japón e Israel, alcanzando una producción global de 850 toneladas/año (Richmond, 1986). *Spirulina* cuando es incorporada en los alimentos ayuda al tránsito digestivo estimulando el desarrollo de diferentes especies lactobacilas. También presenta diversas aplicaciones terapéuticas. Así, se comercializan compuestos nutracéuticos a base de *Spirulina* con propiedades como la protección anticancerígena por su contenido en β -caroteno (Richmond y Becker, 1986), la prevención de malnutrición en vitamina A y niveles de azúcar en sangre, la estimulación de ciertas prostaglandinas (PGE₁), la prevención de enfermedades degenerativas y la cicatrización acelerada de heridas (Yoshida, 1977).

Por otro lado, la microalga *Chlorella* se comercializa como preparado multivitamínico en Japón y Taiwán, y como alimento dietético en otros países occidentales. Su producción a escala comercial está relativamente extendida en el sudeste asiático. *Chlorella* sp., *Chlamydomonas reinhardtii* o *Stichococcus mirabilis* producen antibióticos, al igual que determinados ácidos grasos, como el EPA, que muestran también propiedades antibióticas. De la microalga *Porphyridium* se extrae la enzima superóxido

do dismutasa (SOD), utilizada como terapéutico frente a distintas enfermedades. Microalgas como *Scenedesmus*, *Muriellopsis* o *Chlorella* producen luteína, pigmento que previene la formación de cataratas o diversos tipos de cánceres (Granado *et al.*, 2003; Krinsky *et al.*, 2003).

5. Papel de los PUFAs de microalgas en la salud humana

En las dos últimas décadas evidencias médicas demuestran que el consumo de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga omega-3 (LC-PUFAs) previene enfermedades cardiovasculares (Shahidi y Miraliakbari, 2004), cáncer (Roynette *et al.*, 2004), infartos (Hankey y Jamrozik, 1996), diabetes (Seo *et al.*, 2005), enfermedades inflamatorias (Nagel *et al.*, 2003), desorden neuropsiquiátrico (Reddy y Yao, 2003). Actualmente la mejor fuente de los PUFAs son los alimentos de origen marino. En países desarrollados como Australia, EEUU, o Reino Unido el consumo de alimentos de origen marino es muy bajo. En Australia, por ejemplo, la dosis media de consumo de los dos más beneficiosos PUFA omega-3, ácido eicosapentaenoico (EPA) y ácido docosahexaenoico (DHA), es 30 mg/día (Australian Bureau of Statistics, 1995). Sin embargo, no ha sido aún recomendada la dosis diaria para EPA y DHA. Por ejemplo, el rango puede variar desde 450 mg/día recomendado por la agencia de alimentación del Reino Unido, hasta los 500 mg/día por la Sociedad Internacional para el Estudio de los Ácidos Grasos y Lípidos (ISSFAL), o 650 mg/día del combinado de EPA y DHA por grupos de expertos de Australia, quienes indicaron que el DHA debería representar un mínimo de 220 mg (Simopoulos *et al.*, 1999).

El contenido en lípidos de las microalgas se ve influenciado por los distintos factores ambientales en los que se desarrollan los cultivos, afectando tanto a la producción relativa de ácidos grasos como a su contenido total.

Con respecto a la luz, no se puede decir que exista una pauta de comportamiento general y los efectos dependen de la especie en estudio. Sin embargo, en estudios realizados con *Isochrysis galbana* y *Phaeodactylum tricornutum* se ha observado como el aumento de la intensidad media en el seno del cultivo favorece la poliinsaturación de los ácidos grasos, además de reducirse el contenido en lípidos totales (Molina Grima *et al.*, 1994b).

Respecto al nitrógeno, su limitación en el medio hace aumentar la síntesis de lípidos en las microalgas. Sin embargo, aunque el contenido en lípidos puede aumentar con esta limitación, la eficiencia de los cultivos disminuye debido a la menor

productividad de biomasa originada por reducirse la velocidad de crecimiento. Pohl (1974) informa que para el fitopláncton marino, concentraciones de nitrógeno en el agua superiores a 400 μ molar favorecen la síntesis de PUFAs, mientras que por debajo de esta, se ven favorecidos los ácidos grasos saturados y monoinsaturados.

También existen variaciones en los ácidos grasos encontrados en función de la especie estudiada. Así, *Porphyridium cruentum* y *Porphyridium aeruginosum* poseen altos niveles de ácido araquidónico (20:4n6), palmítico (16:0), oleico (18:1) y linoleico (18:2n6). En cambio, las crisofíceas tienen altos contenidos relativos de docosahexaenoico (22:6n3), y docosatetraenoico (22:4n6).

El ácido eicosapentaenoico tiene importantes aplicaciones comerciales en el mercado de alimentos dietéticos, se utiliza como complemento alimentario en acuicultura y como sustrato de síntesis en la industria farmacéutica. En los últimos años se viene trabajando tanto en su purificación a partir de aceites de pescado (Nisshing Oil Mills, 1986) como en su posible obtención a partir de microalgas que son los organismos que lo sintetizan y lo introducen en la cadena alimenticia marina (Robles Medina *et al.*, 1995).

Actualmente la fuente comercial de ácidos grasos poliinsaturados es el aceite de pescado, el cual es rico en estas sustancias debido a que los peces se nutren en una proporción elevada de fitopláncton marino que es el organismo que en origen los sintetiza. Desgraciadamente, la mayoría de los aceites de pescado que se producen hoy día se destinan a la producción de margarinas vía hidrogenación (Yongmanitchai y Ward, 1989), por lo que no se satisface la demanda mundial de estos compuestos.

Cabe por tanto pensar en el fitoplancton marino como fuente potencial de ácidos grasos poliinsaturados, cuya principal dificultad estriba en la selección o mutación de la especie adecuada y en el desarrollo de sistemas de cultivo apropiados. Las ventajas de las microalgas como fuente de EPA respecto de los aceites de pescado son diversas. En primer lugar, el EPA obtenido a partir de microalgas se encuentra libre de colesterol, del olor propio del pescado, así como de diferentes tóxicos que tienden a acumularse en las grasas del pescado y facilita además una biomasa de composición homogénea lo cual simplifica en mucho los procesos de extracción y purificación posteriores.

6. Pigmentos procedentes de microalgas

Como organismos fotosintéticos, las microalgas contienen una serie de pigmentos captadores de la luz que suelen encontrarse en bajas concentraciones, si bien, bajo

ciertas condiciones fisiológicas, pueden acumularse en la célula alcanzando concentraciones considerables. Aparte de las clorofilas, los pigmentos más importantes desde el punto de vista comercial son las ficobiliproteínas (pigmentos antena que se encuentran en cianobacterias y algas rojas, como la ficocianina y la ficoeritrina) y los carotenoides (carotenos y xantofilas que actúan en las células como fotoprotectores y pigmentos antena, de los que existen unos 400 diferentes). Sin embargo, solo unos cuantos son utilizados comercialmente, como el β -caroteno, la zeaxantina, la astaxantina, la cantaxantina y la luteína.

β -caroteno: la microalga *Dunaliella bardawil* (= *Dunaliella salina*) puede acumular hasta un 10 % de su peso seco en forma de β -caroteno, lo que la convierte en una potencial fuente de este pigmento ha estimulado una gran inversión comercial (Cohen, 1986). Esta microalga ha sido cultivada para la obtención y comercialización de β -caroteno por diversas empresas (Richmond, 1990): Koor-Foods Ltd. (Israel), Microbio Resources, Inc. (Estados Unidos), Cyanotech Corp. (Estados Unidos), Western Biotechnology Ltd. (Australia), Betatene Ltd. (Australia) y Martek Corp. (Estados Unidos). La empresa Microbio Resources Inc. empleaba una cepa de *D. salina* mejorada por mutación y selección con un 20 % de su peso seco en forma de β -caroteno. El β -caroteno de *Dunaliella* presenta las formas *cis* y *trans*, mientras que el sintético solo presenta la forma *trans*. Esta microalga es cultivada en estanques abiertos gracias a que se trata de un organismo halotolerante capaz de crecer con concentraciones 3 M de NaCl, lo que evita la competencia con otras algas (Borowitzka, 1986). A pesar de ello, el β -caroteno obtenido de *Dunaliella* no es económicamente competitivo frente al fabricado sintéticamente, y su mercado depende de la aceptación de su consumo a un coste más elevado como producto «natural» frente al pigmento sintético. Su utilización comercial comprende el empleo como colorante alimentario natural, fuente de vitamina A (se trata del precursor de esta vitamina) y como fármaco antioxidante en la prevención del cáncer (Krinsky 2003; Spolaore *et al.*, 2006)

Astaxantina: Es un carotenoide de alto valor añadido con aplicaciones en la industria nutracéutica, cosmética y alimentaria. Esta xantofila se encuentra en muchas microalgas en muy bajas cantidades. *Haematococcus pluvialis* es la única microalga que se ha explotado comercialmente para la producción de este pigmento ya que su contenido en él puede contener hasta un 3 % del peso seco de la biomasa y cultivada a escala industrial (Del Campo *et al.*, 2007; Olaizola y Huntley, 2003). Por ejemplo, la empresa estaounidense Microbio Resources Inc. ha realizado cultivos de esta microalga con esa finalidad (Richmond, 1990). Este compuesto se utiliza en acuicultura para dar pigmentación a la carne de los peces.

La ingesta de astaxantina, acumulada en elevadas cantidades por la microalga *Haematococcus pluvialis*, resulta efectiva contra el cáncer de mama (Chew *et al.*, 1999). Por último, varios productos derivados de cianobacterias son activos *in vitro* contra el virus del SIDA. Estos productos activos se han identificado como glucolípidos pero no se han descrito hasta ahora ni su modo de acción ni el componente activo. Los contenidos en astaxantina en diversas especies varían además en función de las condiciones de cultivo; por ejemplo, la limitación de nitrógeno incrementa el contenido en astaxantina de *Haematococcus pluvialis* (Boussiba y Vonshak, 1991; Del Río *et al.*, 2005). Cyanotech corporation financia, por otro lado, un estudio sobre la astaxantina natural como protector solar (interno), protegiendo la piel del daño causado por la exposición a rayos UV. Demuestran, por tanto, que la astaxantina natural tiene un gran potencial como suplemento antiedad de belleza y protector de la piel (Capelly y cols., 2012).

Luteína: El organismo humano no biosintetiza la luteína, por lo que debe ser obtenida a partir de otras fuentes naturales para ser ingerida en la dieta. Estas fuentes naturales pueden ser microalgas, bacterias y plantas superiores, las cuales acumulan luteína como pigmento fotosintético y agente protector frente a la luz solar.

A pesar de la amplia distribución de la luteína en plantas superiores y en productos industriales no es hasta hace varias décadas cuando se están realizando esfuerzos para establecer una producción comercial de este pigmento a partir de microalgas. Estos microorganismos constituyen una importante fuente para la producción de carotenoides debido a que pueden ser acumulados en cantidades muy superiores a las de otros organismos fotosintéticos. La generación de estos pigmentos depende de la capacidad bioquímica de la especie de microalga seleccionada, ya que muchas se han especializado en acumular algún carotenoide en concreto en cantidades muy superiores a los que otra microalga o planta superior podría generar.

Las microalgas que han sido referenciadas como potencialmente útiles para esta aplicación por su elevado contenido en luteína son *Muriellopsis* sp., *Chlorella zofingensis*, *Chlorella protothecoides* y *Scenedesmus almeriensis* (Shi *et al.*, 2002; Sánchez-Fernández 2008). La síntesis de luteína está ligada a la generación de biomasa, de forma que las mayores productividades de luteína se alcanzan para las condiciones de cultivo que también maximizan la productividad de biomasa. En este sentido, con *S. almeriensis* se han referenciado productividades de luteína de hasta 1.400 kg/ha¹ x año empleando un fotobiorreactor tubular de 3.000 L (Molina *et al.*, 2005), muy superiores a los 22 kg/ha¹ x año obtenidos a partir de marigold.

7. Microalgas en alimentación animal

Hace pocos años, las algas eran usadas en la dieta de los rumiantes para enriquecer sus productos con ácidos grasos poliinsaturados de alto valor. Investigadores han mostrado que la adición de microalgas (*Schizochytrium* sp.) en dietas de vacas lecheras o cabras contribuyó por un lado a un incremento de los niveles de DHA y ácido linoleico, reduciéndose por tanto los ácidos grasos saturados en vacas, y por otro lado, que la adición de esta cepa en el alimento a cabras se traduce en el aumento de niveles de DHA y EPA en la leche y también en el yogurt o queso feta (Papadopoulos *et al.*, 2002).

Diversos investigadores han mostrado cómo la incorporación de *Spirulina platensis* en dietas para conejos reduce los niveles de colesterol en el suero de la sangre de animales e incrementa el colesterol lipoproteínico. Por otro lado, en otro estudio relativo a conejos adultos, encontraron que la incorporación de *S. platensis* en la dieta incrementó la digestibilidad de la proteína cruda. Además, se ha estudiado que el consumo de algas ricas en ácidos grasos poliinsaturados enriquece la carne con esos mismos ácidos grasos. A su vez, las microalgas *S. platensis* y *Schizochytrium* sp. han sido utilizada como un suplemento proteico y suplemento de DHA (en la dieta para cerdos).

Por otro lado, la alimentación de *Chlorella* en un porcentaje de un 2 y 10 % en gallinas condujo a un aumento del ácido linolénico y DHA en la yema de huevo, con una simultánea reducción del ácido docosatetraenoico, en especial cuando la cantidad de algas añadida a la alimentación excedía del 10 %. Además, la adición de *Spirulina* en la dieta de las gallinas ponedoras mejoró el color de la yema de huevo.

La acuicultura es una de las áreas de mayor crecimiento en los últimos años dentro del campo de la producción de alimentos. Esta aumenta cada día por su producción en cantidad y variedad de nuevas especies. Las microalgas son una importante fuente alimenticia y de aditivos en la cría comercial de muchas especies acuáticas, especialmente de larvas y rotíferos; estos últimos empleados en la crianza de crustáceos y peces, aunque existen otras alternativas a las algas como las levaduras y los alimentos microencapsulados. El cultivo de microalgas para este fin es una industria de alto valor y con un importante tamaño de mercado (Borowitzka, 1999).

Las microalgas son el punto de inicio biológico en el flujo de energía a través de las cadenas alimentarias acuáticas. Su presencia influye también en el contenido de O₂ y CO₂ del medio, afectando de forma directa al crecimiento de la fauna de los ecosistemas acuáticos. De este modo, su obtención y manipulación resulta funda-

mental en las operaciones acuícolas. El uso de las microalgas en la acuicultura permite simplificar las piscifactorías y aumentar la razón de supervivencia en larvas de peces y moluscos mediante la mejora de su alimentación y condiciones de desarrollo. Para ello, las microalgas utilizadas deben tener un tamaño y grosor de pared celular apropiados para que puedan ser adecuadamente digeridas, así como una composición bioquímica determinada, que puede variar según la especie que la consuma.

Las microalgas no son solamente consideradas como fuentes esenciales de alimentación en acuicultura, sino que también juegan un papel importante en el incremento de la calidad de las especies animales cultivadas. El contenido en aminoácidos, ácidos grasos, así como otras biomoléculas, influye de forma determinante en el desarrollo de larvas y bivalvos. Hoy en día existen más de 40 especies diferentes utilizadas en acuicultura (Tabla 2), seleccionadas según su aporte nutricional y la facilidad de su producción masiva.

Tabla 2. Perfil bioquímico de las cepas marinas destinadas a acuicultura con mayor contenido proteínico y lipídico

Especie de microalga	Proteínas, % d.w.	Carbohidratos, % d.w.	Lípidos, % d.w.
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	34	6,0	16
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	34	8,8	19
<i>Tetraselmis chui</i>	31	12,1	17
<i>Isochrysis aff. galbana</i> (T-ISO)	23	6,0	20
<i>Nannochloropsis</i> sp.	40	20,0	27
<i>Pavlova lutheri</i>	29	9,0	12

Fuente: Richmond *et al.* (2010).

El valor nutricional de una especie de microalga está relacionado con su composición bioquímica. En este sentido, la concentración de aminoácidos juega un papel fundamental en el crecimiento y desarrollo de larvas de bivalvos. Además, se ha demostrado que es de vital importancia la calidad de los lípidos, más que la cantidad de los mismos. Algunos ácidos grasos poliinsaturados sintetizados por las microalgas son esenciales para el crecimiento y supervivencia de muchas larvas de peces, peneidos (gambas, camarones) y moluscos bivalvos, encontrándose que una deficiencia en el contenido de ácidos grasos n3 de la microalga reduce su valor nutritivo sustancialmente.

El fitoplancton constituye la más importante fuente de alimento para la mayoría de los organismos acuáticos. Además, las microalgas pueden ser usadas como pigmentos en piensos para carpas, salmones, camarones, etc. (Gouveia *et al.*, 2008).

8. Comercialización de las microalgas

8.1. Mercado mundial

Varias empresas han desarrollado recientemente numerosos y novedosos sistemas para obtener productos microalgales para la producción y el tratamiento posterior de la biomasa. La Tabla 3 nos presenta un resumen de los principales productos microalgales desarrollados internacionalmente.

Tabla 3. Estimaciones de mercado para productos microalgales

Grupo de producto	Producto	Coste (U.S. \$x 10 ⁶)	Desarrollo
Biomasa	Alimento salud	1250-2500	En fase de crecimiento
	Alimento funcional	800	En fase de crecimiento
	Aditivo pienso	300	Rápido crecimiento
	Acuicultura	700	Rápido crecimiento
	Acondicionador de suelos		Prometedor
Colorantes	Astaxantina	<150	En fase de inicio
	Ficocianina	>10	Estancado
	Ficoeritrina	>2	Estancado
Antioxidantes	β - caroteno	>280	Prometedor
	Tocopherol		Estancado
	Extracto antioxidante	100-150	
	ARA	20	En fase de crecimiento
	DHA	1500	Rápido crecimiento
Productos especiales	Extractos PUFA	10	
	Toxinas	1-3	
	Isótopos	>5	

Fuente: Pulz *et al.* (2004).

En la Tabla 4 se recogen los compuestos de interés que producen diferentes microalgas comercializadas, su área de aplicación y las empresas productoras.

Tabla 4. Especies de microalgas con alta relevancia en aplicaciones biotecnológicas

Especie	Producto/ Áreas de aplicación	Usos terapéuticos	Compañías
<i>Spirulina pl.</i>	Biomasa ^a , ácido γ -linolenic, ficocianina ^a , alimentos saludables ^a , cosmética ^{a,d} , fórmulas infantiles ^a , suplementos nutricionales ^a , nutrición humana y animal ^d , vitamina B12 ^a .	Tratamiento de enfermedades del corazón, obesidad, depresión maníaca, efecto antitumoral, actividad antioxidante ^e , suplementos nutricionales para inhibir la replicación e infección de virus incluyendo HIV, CMV y HSV.	Cyanotech (www.cyanotech.com) ^{a,d,f} (EEUU), Earthrise Nutritionals (www.earthrise.com) ^{a,d,f} (EEUU), Panmol/Madaus (www.panmol.com) ^a (Austria), Parry Nutraceuticals (www.murugappa.com) ^d (India), Spirulina Mexicana (Sosa Texcoco) SA ^b (México), Siam Alga Co., Ltd. ^b , Nippon Spirulina Co., Ltd. ^c , Koor Foods Co., Ltd. ^c , Nan Pao Resins Chemicals Co., Ltd. ^c , Hainan Simai Pharmacy Co., Ltd. ^b Myanmar Spirulina Factory (Myanmar) ^{c,d} , Blue Continent Co., Ltd. ^b .
<i>Chlorella</i>	Biomasa ^a , carbohidratos ^a , ficobili-proteínas ^a , alimentos salud ^a , suplementos alimenticios ^{a,d} , suplementos piensos ^{a,d} , cosmética, nutrición humana y animal ^d , acuicultura ^d	Mejora el sistema inmune ^{a,d} , reduce lípidos en sangre ^d , antioxidante ^d , Alimento mejora salud ^d : úlcera gástrica, prevención arterosclerosis y hipercolesterolemia y acción antitumoral	Nikken Sohonsa Corp. (www.chlostanin.co.jp) ⁱ (Japon), Earthrise Nutritionals (www.earthrise.com) ^f (EEUU), Ocean Nutrition (www.ocean-nutrition.com) ^g (Canada), l'age vert ^d (www.agevert.com), Chlorella manufacturing and Co. ^d (Taiwan), Klötzel ^d (Germany)
<i>Dunaliella</i>	β - caroteno ^a , glicerol ^a , alimento salud ^{a,e} , suplemento alimenticio ^a , suplemento pienso ^a , pigmentos ^a , nutrición animal y humana ^a , fuente de proteína ^a	Precursor de vitamina A ^a , anticarcinógeno, antioxidante ^{d,e} , antiviral, influencia positiva en el metabolismo de la piel ^d , analgésico ^a , relajante muscular ^a , actividad anti edema ^a .	Nature Beta Technologies Cognis (www.cognis.com) ^d (Australia), Cyanotech (www.cyanotech.com) ^{d,e} (EEUU), Nikken Sohonsa Corp. (www.chlostanin.co.jp) ^f (Japan), Earthrise Nutritionals (www.earthrise.com) ^f (EEUU), Betadene (www.betadene.com.au) ^e (Australia), Inner Mongolia Biological Eng. ^{d,e} (China), Nature Beta Technologies ^d , ^e (Israel), Parry agro Industries (www.murugappa.com) ^e (India), ABC Biotech Ltd. ^e (India), Tianjin Lantai Biotechnology ^d , ^e (China), Western Biotechnology Ltd. ^e (Australia), Aqua Carotene Ltd. ^e (Australia), Dutch State Mines, Proalgen Biotech, Shaanxi Scipharm Biotechnology Co.,
<i>Haematococcus</i>	Astaxantina ^a , carotenoides ^a , alimentos salud ^a	Antiinflamatorio ^a , antioxidante ^e , tratamiento del síndrome carpal ^a , farmacéuticos, aditivos en piensos ^a , nutrición humana, acuicultura ^{d,e} , cosmética	Mera Pharmaceuticals (www.aquasearch.com) ^{a,e} (EEUU), Cyanotech (www.cyanotech.com) ^{a,e} (EEUU), BioReal (www.bioreal.se) ^{d,e} (EEUU), Algatech Algaltechnologies (www.algotech.com) ^d (Israel), Fuji Health Science (www.fujichechemical.co.jp), Dutch State Mines (http://www.dsm.com), Changsha Organic Herb Inc. (http://www.organic-herb.com), Health Sources Industry Co., Ltd (http://health-sources.com), Parry agro Industries (www.murugappa.com) ^e (India).
<i>Odontella au.</i>	Ácidos grasos ^a , farmacéutica ^a , cosmética ^a , alimento de bebé ^a , EPA y DHA	Antiinflamatorio	InnovalG (France) ^h Pharmaceuticals l'age vert (http://www.agevert.com/), Cosmetics Blue-Biotech Int. Mikroalgen Biotechnologie (http://www.bluebiotech.de/)
<i>Porphyridium</i>	Polisacáridos, farmacéutica, cosmética ^{a,e} , fórmula infantil ^d , nutrición ^{a,d} , B-ficocitrina ^a , C-ficocianina ^a	Nutrición, actividad antioxidante	InnovalG (France)
Especie	Producto/ Áreas de aplicación	Usos terapéuticos	Compañías
<i>Schizochytrium</i>	Aceite de DHA, biomasa, alimentos salud, cosmética, alimento bebé y fórmula infantil ^d , aditivos alimentos, acuicultura ^d	Tratamiento cerebro y ataques de corazón, ayuda al desarrollo del cerebro	In research by Sciro-Australia
<i>Isochrysis</i>	Aceite de DHA, ácidos grasos poli-saturados ^a , suplemento alimenticio, nutrición animal ^d	Nutrición humana, biodiesel	Innovative Aquaculture Products Ltd. (http://www.innovativeaqua.com/)

^a Pulz y Gross (2004); ^b Shimamatsu (2004); ^c Gouveia *et al.* (2008); ^d Spolaore *et al.* (2006); ^e Dufossé *et al.* (2005); ^f Walker *et al.* (2005).

Fuente: Chacón-Lee y González-Mariño (2010).

9. Mercado e investigación nacional

Las microalgas son el objeto de interés de las grandes empresas del sector alimentario. Actualmente en España podemos encontrar alguna que otra empresa reciente sobre microalgas en vías de producción, entre ellas podemos citar Easy algae, Algae-nergy o Aqualgae (EBT) para acuicultura o Cleanalgae también para el mercado de la acuicultura o incluso empiezan en el mercado de la cosmética, nutrición, farmacéutica o bioenergía. Por otro lado, solo en España se implementan más de un centenar de proyectos de desarrollo tecnológico basados, en microalgas y más de una decena de grandes proyectos de construcción de plantas de cultivo.

Figura 2. Bio-fotorreactor experimental



Fuente: Foto cedida por Cajamar.

Sin ir más lejos, en Almería se encuentra la estación experimental de Cajamar, que se ha convertido en un aliado fundamental para avanzar en el conocimiento de la producción de las microalgas. En sus instalaciones está la planta de producción de estos microorganismos vegetales más eficiente del mundo, un sistema llevado a cabo con tecnología almeriense y en cuya construcción han participado varios grupos de investigación de la Universidad de Almería, concretamente, el Grupo de Biotecnología de Microalgas Marinas dirigido por Emilio Molina Grima es el que impulsa su construcción. La planta de Cajamar, con una capacidad de 40 m³, permite producir

unas 70 toneladas de microalgas al año por cada hectárea (Figura 2). Las que más se acercan son unas plantas alemanas que solo producen 20 toneladas al año por hectárea. Esta instalación es de carácter demostrativo y muestra los avances que se van generando en el laboratorio. Todos los proyectos han sido financiados con fondos del actual Ministerio de Economía y Competitividad, o de la Junta de Andalucía y cofinanciado con el apoyo de diversas empresas como Acciona, Aqualia SA, Albaida SA, Endesa o Algaenergy, participada por grandes compañías energéticas como Repsol o Iberdrola. En esta estación, la finalidad de producción de microalgas para fines nutricionales se ha centrado, entre otras en la obtención de carotenoides, ácidos grasos poliinsaturados o biomasa microalgal destinada a acuicultura.

Referencias bibliográficas

- AUSTRALIAN BUREAU OF STATISTICS (1995): *National nutrition survey, foods eaten, Australia* 4804.0.
- BECKER, E. W. (2007): «Micro-algae as a source of protein»; *Biotechnol* (25); pp. 207-210.
- BOROWITZKA, M. A. (1999): «Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters»; *Journal of Biotechnology* (70); pp. 313-321.
- BOUSSIBA, S. y VONSHAK, A. (1991): «Astaxanthin accumulation in the green alga *Haematococcus pluvialis*»; *Plant Cell Physiol* 32(7); pp. 1077-1082.
- CAPELLI, B. y CYSEWSKI, G. (2012): «Interal Beauty Pill? Sunscreen in a pill?»; *The world's best kept health secret: Natural Astaxanthin*. Cyanotech Corporation.
- CHACON- LEE, T. L. y GONZÁLEZ-MARIÑO G. E. (2010): «Microalgae for «Healthy» Foods-Possibilities and Challenges Comprehensive Reviews»; *Food Science and Food Safety* 9(6); pp. 655-675.
- CHEW, B. P.; PARK, J. S.; WONG, M. W. y WONG T. S. (1999): «A comparison of the anticancer activities of dietary β -carotene, canthaxanthin and astaxanthin in mice in vivo»; *Anticancer Res.* (19); pp. 1.849-1.854.
- COHEN, D.; FINKEL, A. y SUSSMAN, M. (1976): «On the role of algae in larviculture of *Macrobrachium rosenbergii*»; *Aquaculture* (8); pp. 199-207.

- DEL RIO, E.; ACIÉN, F. G.; GARCÍA-MALEA, M. C.; RIVAS, J.; MOLINA, E. y GARCÍA GUERRERO, M. (2005): «Efficient one-step production of astaxanthin by the microalga *Haematococcus pluvialis* in continuous cultura»; *Biotechnology and Bioengineering* 91(7); pp. 808-815.
- DUFOSSÉ, L. y PINTEA, A. (2005): «Third International Congress on pigments in food (Conference Paper)»; *Food Research International* (38); pp. 381-382.
- GOUVEIA, L.; BATISTA, A. P.; SOUSA, I.; RAYMUNDO, A. y BANDARRA, N. M. (2008): «Microalgae in novel food products»; en PAPADOPOULOS, K. N., ed.: *Food chemistry research developments*. Nova Science Publishers, Inc. Nueva York, EEUU.
- GRANADO, F.; OLMEDILLA, B. y BLANCO, I. (2003): «Nutricional and clinical relevante of lutein in human health»; *British Journal of Nutrition* (90); pp. 487-502.
- HANKEY, G. J. y JAMROZIK, K. (1996): «Risk factors for stroke: lifestyle factors»; *Cardiovasc Risk Factors* (6); pp. 5-17.
- KRINSKY, N. I.; LANDRUM, J. T. y BONE, R. A. (2003): «Biologic mechanisms of the protective role of lutein and zeaxanthin in the eye»; *Ann. Rev. Nutr.* (23); 171-201.
- MOLINA GRIMA, E.; SÁNCHEZ PÉREZ, J. A.; GARCÍA CAMACHO, F.; FERNÁNDEZ SEVILLA, J. M.; ACIÉN FERNÁNDEZ, F. G. y URDA CARDONA, J. (1994b): «Biomass and eicosapentaenoic acid productivities from an outdoor batch culture of *Phaeodactylum tricornutum* UTEX 640 in an air-lift photobioreactor»; *Appl. Microbiol. Biotechnol.* (42); pp. 658-663.
- MOLINA, E.; FERNÁNDEZ, J. M.; ACIÉN, F. G.; SÁNCHEZ, J. F.; GARCIA, J.; MAGÁN, J. J. y PÉREZ, J. (2005): «Production of lutein from the microalga *Scenedesmus almeriensis* on a industrial size photobioreactor: case study»; Oral communication. *6th European Workshop Biotechnology of Microalgae*. Potsdam, Alemania.
- OLAIZOLA, M. y HUNTLEY, M. E. (2003): «Recent advances in commercial production of astaxanthin from microalgae»; in FINGERMAN, M. y NAGABHUSHANAM, R., eds.: *Recent advances in marine biotechnology. Biomaterials and bioprocessing* (9); Enfield, NH: Science Publishers. pp. 143-164.
- PAPADOPOULOS, G.; GOULAS, C.; APOSTOLAKI, E. y ABRIL, R. (2002): «Effects of dietary supplements of algae containing polyunsaturated fatty acids, on milk yield and the composition of milk products in dairy ewes»; *J. Dairy. Res.* (69), pp. 357-365.

- POHL, P. (1974): «Control of Unsaturated Fatty Acid Biosynthesis in Unicellular Algae by the Nitrogen Content of the Nutrient Medium and by the Wavelength of Light»; *J. Am. Oil Chemists Soc.* (51); p.521.
- PULZ, O y GROSS, W. (2004): «Valuable products from biotechnology of microalgae»; *Appl Microbiol Biotechnol* 65(6); pp. 635-648.
- RICHMOND, A. y BECKER, E. W. (1986): «Technological aspects of mass cultivation, a general outline»; *Handbook of Microalgal Mass Culture, Richmond*, ed.: CRC Press Inc. Boca Ratón. Florida. pp. 245-263.
- ROBLES MEDINA, A.; GIMÉNEZ GIMÉNEZ, A.; GARCÍA CAMACHO, F.; SÁNCHEZ PÉREZ, J. A.; MOLINA GRIMA, E. y CONTRERAS GÓMEZ, A. (1995): «Concentration and Purification of Stearidonic, Eicosapentaenoic, and Docosahexaenoic Acids from Cod Liver Oil and the Marine Microalga»; *Isochrysis galbana, J. Am. Oil Chem. Soc.* 72(5); pp. 575-583.
- ROYNETTE, C. E.; CALDER, P. C.; DUPERTUIS, Y. M. y PICHARD, C. (2004): «n-3 Polyunsaturated fatty acids and colon cancer prevention»; *Clin. Nutr.* (23); pp. 139-151.
- SÁNCHEZ, J. F.; FERNÁNDEZ-SEVILLA, J. M.; ACIÉN, F. G.; CERÓN, M. C.; PÉREZ-PARRA, J. y MOLINA-GRIMA, E. (2008): «Biomass and lutein productivity of *Scenedesmus almeriensis*: Influence of irradiance, dilution rate and temperature»; *Appl. Microbiol. Biotechnol.* (79); pp. 719-729.
- SEO, T.; BLANER, W. S. y DECKELBAUM, R. J. (2005): «Omega-3 fatty acids: molecular approaches to optimal biological outcomes»; *Curr Opin Lipidol* (16); pp. 11-18.
- SHI, X. M.; JIANG, Y. y CHEN, F. (2002): «High-yield production of lutein by the green microalga *Chlorella protothecoides* in heterotrophic fed-batch culture»; *Biotech. Prog.* 18(4); pp. 723-727.
- SHIMAMATSU, H. (2004): «Mass production of Spirulina, an edible microalga (Conference Paper)»; *Hidrobiologia* (512); pp. 39-44.
- SHAHIDI, F. y MIRALIKBARI, H. (2004): «Omega-3 (n-3) fatty acids in health and disease: Part I-Cardiovascular disease and cancer»; *J. Med. Food* (7); pp. 387-401.
- SPOLAORE, P.; JOANNIS-CASSAN, C.; DURAN, E. y ISAMBERT, A. (2006): «Commercial applications of microalgae»; *J. Biosci. Bioeng.* (101); pp. 87-97.
- WALKER, A. y WALKER, B. (2005): «Why is there disinterest in the appreciation of beneficial dietary recommendations?»; *American J. Clinic. Nutr.* 81(1); p. 197.

YONGMANITCHAI, W. y WARD, O. P. (1989): «Omega-3 fatty acids: alternative sources of production»; *Process Biochem* (24); pp. 117-125.

YOSHIDA, R. (1977): «*Spirulina* hydrolysates for cosmetic packs»; *Kokai* (77)31. Japan; p. 836.