



**Ana María Santos**

Profesora de la ETSI ICAI de la Universidad Pontificia Comillas de Madrid. Desarrolla su actividad en el Departamento de Ingeniería Mecánica y en el Instituto de Investigación Tecnológica. Es doctora en Ciencias Químicas (UCM). Sus áreas de investigación son desarrollo y validación de métodos analíticos para la determinación de esteroides y contaminantes en distintos tipos de muestras por Cromatografía Líquida de Alta Eficacia (HPLC) y análisis de ciclo de vida y uso de la biomasa como fuente de energía sostenible.



**Yolanda González-Arechavala**

Doctora Ingeniero Industrial del ICAI por la Universidad Pontificia Comillas y Licenciada en Informática por la Universidad del País Vasco. Actualmente, es Profesora del Departamento de Sistemas Informáticos e Investigadora del Instituto de Investigación Tecnológica de la ETSI ICAI. Sus áreas de investigación están centradas en el análisis de sistemas de seguridad ferroviarios y en el análisis de ciclo de vida y uso de la biomasa como fuente de energía sostenible.



**Carlos Martín-Sastre**

Ingeniero Agrónomo (UPM) y Máster en Investigación en Modelado de Sistemas en Ingeniería por la Universidad Pontificia Comillas. Actualmente es Investigador en Formación del Instituto de Investigación Tecnológica de la ETSI ICAI. Sus áreas de investigación están centradas en el análisis de ciclo de vida y el uso de la biomasa como fuente de energía sostenible.



# Uso y aplicaciones potenciales de las microalgas

Auto: F. Lamiot. <http://en.wikipedia.org/wiki/File:EtrotrophicationEtrotrophierung.jpg>

**Palabras clave:** Microalgas, usos energéticos, mitigación biológica, tratamiento de aguas residuales y productos de alto valor añadido.

**Key words:** *Microalgae, energy purposes, biological biomitigation, wastewater treatment and products with high added value.*

## Resumen

La investigación con microalgas ha alcanzado una enorme importancia debido, fundamentalmente, a la combinación de usos que pueden tener. Se pueden utilizar con fines energéticos, principalmente para la obtención de biodiésel aunque también se pueden obtener otros biocombustibles como bioetanol, biometano, biohidrógeno y generar calor y electricidad. Otras aplicaciones comerciales de las microalgas buscan obtener productos de alto valor añadido con aplicaciones en la nutrición y salud humanas, acuicultura, cosméticos y biofertilizantes. Además, las microalgas pueden ayudar, durante su crecimiento, a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> por biomitigación biológica e intervenir en el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo son los fines energéticos los que más están contribuyendo al enorme desarrollo que están experimentando las microalgas. Para que estos usos sean económicamente viables y medioambientalmente sostenibles, es necesario reducir significativamente los costes de producción y los impactos medioambientales, consiguiendo un balance energético y de CO<sub>2</sub> favorables. Estos procesos se pueden combinar de manera que se produzcan sinergias que incrementen la sostenibilidad global de los procesos productivos.

## Abstract:

*Research on microalgae has gained enormous importance due mainly to the combination of the uses it may have. They can be used for energy purposes; its main use is for bio diésel production, but you can also get other biofuels such as bioethanol, biomethane, biohydrogen and generate heat and electricity. Other potential use of microalgae is to get products with high added value in applications in nutrition and human health, aquaculture, cosmetics and bio-fertilizers, etc. Microalgae can help reduce CO<sub>2</sub> emissions by biological biomitigation, and may be involved in wastewater treatment. However, the energy purposes are leading the way in the enormous development that microalgae are experiencing nowadays. To achieve economic viability and environmental sustainability for these uses is necessary to significantly reduce production costs and environmental impacts, getting a favorable energy and CO<sub>2</sub> balance. These processes can be combined so as to produce synergies that increase the overall sustainability of production processes.*

## Obtención de biomasa de algas

Las microalgas han despertado un enorme interés debido a que son microorganismos fotosintéticos que se caracterizan por su rápido crecimiento, las células se duplican en un periodo de 1 a 10 días, tienen un alto contenido lipídico (más del 50% en peso de materia seca en algunos casos) y utilizan menos superficie para su cultivo. Además, se obtiene una producción de aceite de 15 a 300 veces mayor que con otras especies para un mismo área y son los microorganismos con mayor capacidad para fijar el CO<sub>2</sub> (Yusuf Chisti, 2007).

Las algas necesitan, para transformar la energía solar en energía química, luz, CO<sub>2</sub>, nutrientes y agua. La luz la obtienen del sol por lo que su utilización está limitada por el ciclo de luz natural y la variación estacional y restringida su viabilidad comercial a áreas con alta radiación solar. Se puede utilizar también luz artificial, aunque esta conlleva un mayor consumo energético y mayores emisiones de CO<sub>2</sub>. El CO<sub>2</sub> que necesitan lo pueden fijar de la atmósfera, de emisiones de gases industriales y de los carbonatos solubles, siendo lo más común la alimentación externa, bien por las emisiones industriales o por carbonatos solubles. Las microalgas pueden utilizar cualquier tipo de agua, lo que minimiza enormemente su consumo de agua dulce. En cuanto a los nutrientes necesarios para su crecimiento, fundamentalmente nitrógeno y fósforo, se tienen que adicionar en los sistemas de cultivo o captarlos de aguas residuales, siendo éste uno de los métodos actuales más efectivos para el tratamiento de aguas residuales.

En este apartado se revisa el estado en el que se encuentra la producción de biomasa de algas haciendo hincapié en los sistemas de cultivo y de separación de la biomasa.

### Sistemas de cultivo

Los sistemas de cultivo de microalgas se pueden clasificar, según su configuración y tipo de funcionamiento, en sistemas abiertos (estanques) y fotobiorreactores (FBRs) (Ho, 2011).

Los sistemas abiertos son los más comunes para la producción comercial de microalgas y son una tecnología relativamente sencilla, cultivándose las microalgas en estanques de unos 20 a 50 centímetros de profundidad. Los estanques de canales son los más empleados; suelen ser canales de hormigón ovalados donde el cultivo se recircula y mezcla para favorecer la estabilización del crecimiento y productividad de las microalgas. Las microalgas obtienen el CO<sub>2</sub> que necesitan por difusión desde la atmósfera o de emisiones de gases industriales, aunque a veces es necesario instalar difusores en el fondo del estanque. La producción mediante estanques tiene la gran ventaja de ser un método más barato que los FBRs, en inversión, mantenimiento y consumo energético. Sin embargo tiene desventajas, como su facilidad de contaminación, mezclado poco eficiente, la falta potencial de CO<sub>2</sub> y la limitación de la luz en las capas inferiores. En estos sistemas es difícil mantener una sola especie (se puede lograr extremando las condiciones ambientales) aunque esto sólo es válido para algunos tipos de algas: las denominadas extremófilas.

Los fotobiorreactores son sistemas cerrados transparentes, de plástico o vidrio, con geometrías de diversos tipos (tubulares, cilíndricas o planas). Su desarrollo es posterior al de los estanques y su configuración y geometría dependen de condiciones locales, del producto a obtener y de las especificaciones económicas del

sistema. En estos sistemas se obtiene una mayor productividad, fundamentalmente porque mejora la eficiencia de la fotosíntesis y la capacidad de fijación del CO<sub>2</sub>. Frente a los estanques, los FBRs necesitan un espacio menor y el coste de la recolección de la biomasa también es menor. Otra ventaja muy importante es su mayor facilidad para mantener un monocultivo sin contaminación por otras especies, lo que permite obtener un producto de pureza apta para su procesamiento en la industria farmacéutica o alimentaria.

Su desventaja fundamental es su coste, muy superior al de los estanques, por ser mayores los costes de inversión, de operación y de mantenimiento. Además, la productividad obtenida en los FBRs aún no es la máxima teórica. El desarrollo y optimización de FBRs que permitan el cultivo económico de microalgas a gran escala, es aún hoy en día una de las mayores tareas a realizar (Ho, 2011). En la actualidad se están optimizando nuevos diseños de FBRs para mejorar su eficiencia y abaratar costes. De hecho, todas las plantas de producción operativas de microalgas a gran escala utilizan estanques abiertos (Molina Grima, 2003).

En la Tabla I se muestra una comparación de las variables más significativas que afectan al cultivo de microalgas en los FBRs y los estanques. Se obtienen mejores resultados en todas las variables en el cultivo en FBRs, excepto en el precio y el escalado.

**Tabla I. Comparación entre estanques y FBRs para el cultivo de microalgas**

	Estanques	FBRs
Capacidad de fijación CO <sub>2</sub>	Baja	Alta
Productividad biomasa	Baja	Alta
Velocidad de crecimiento	Baja	Alta
Riesgo de contaminación	Extremadamente alto	Bajo
Pérdidas por evaporación	Altas	Bajas
Eficiencia de fotosíntesis	Baja	Alta
Área superficial	Baja	Extremadamente alta
Control del proceso	Difícil	Fácil
Coste de operación	Bajo	Alto
Escalado	Fácil	Difícil

La investigación en los sistemas de obtención de la biomasa de algas se está desarrollando en los siguientes campos:

- Optimización del diseño de los FBRs para maximizar la productividad y disminuir el consumo energético.
- Búsqueda y desarrollo de microalgas con gran capacidad de crecimiento, adaptabilidad, tolerancia a contaminantes y habilidad de producir productos de alto valor añadido.
- Combinación de distintos procesos en los que las microalgas son participantes para mejorar la viabilidad económica y medioambiental.

### Separación de las microalgas del medio de cultivo

La separación de las microalgas del medio de cultivo supone entre el 20 y 30% del coste total (Molina Grima, 2003), siendo esta etapa determinante en la economía y en el balance energético del proceso. Las microalgas son difíciles de separar por su pequeño tamaño. La técnica de separación utilizada depende del tipo de microalga, la den-

sidad del cultivo y su uso posterior. En general, la separación tiene lugar en dos etapas. En una primera etapa se concentra la biomasa de algas, realizándose floculación, sedimentación o flotación. En la segunda etapa, de secado, conlleva un mayor coste energético y se realiza por centrifugación, filtración o ultrasonidos. Y por último, una vez separada la biomasa, se deshidrata para evitar reacciones de descomposición mediante diferentes técnicas. En la extracción de lípidos para producir biodiésel, es importante encontrar el compromiso entre grado de secado y la rentabilidad del proceso.

En la Figura 1 se muestra un esquema de las fases de producción de biomasa de microalgas y sus posibles usos. Las algas para su crecimiento necesitan agua, CO<sub>2</sub>, luz y nutrientes. Se pueden cultivar en estanques y/o FBRs, y posteriormente se obtiene la biomasa separándola del medio de cultivo y se seca. Esta biomasa se puede utilizar con fines energéticos, o para obtener otros productos. Además, las microalgas durante su

crecimiento pueden captar el CO<sub>2</sub> de las emisiones de gases industriales y pueden utilizar aguas residuales de las que captan nutrientes.

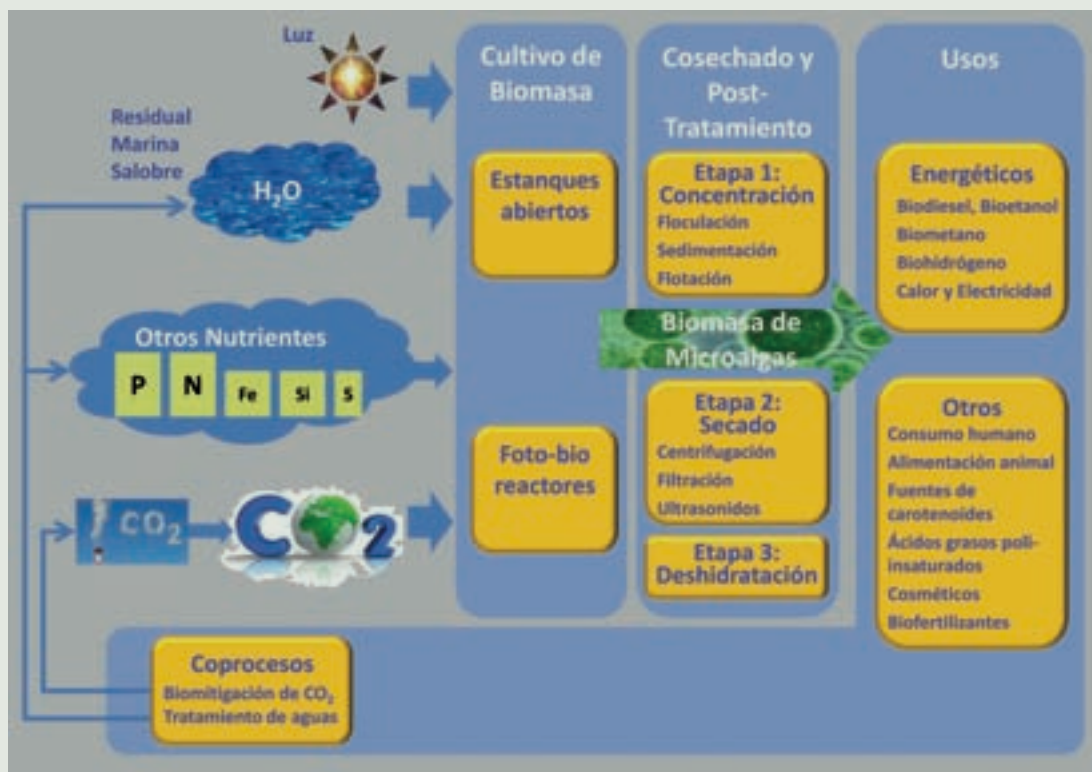
### Usos de las microalgas

En este apartado se revisan los posibles usos de las microalgas: como fuentes de energía, formando parte de coprocesos, como la biomitigación del CO<sub>2</sub> y el tratamiento de aguas residuales, y su utilización en la obtención de productos de alto valor añadido con aplicaciones en la alimentación humana, animal, cosmética, etc.

### Usos energéticos

Las sociedades se han visto obligadas a buscar nuevas fuentes alternativas de energía debido al elevado precio del petróleo, a factores medioambientales, a la necesidad de independencia energética y por oportunidad de negocio, siendo las microalgas una importante opción. De hecho, el aumento en el cultivo de algas se debe básicamente a sus propósitos

Figura 1. Esquema de las fases de producción de la biomasa de algas y sus posibles usos



energéticos, siendo su principal uso para la obtención del biodiésel, aunque también se pueden obtener otros biocombustibles.

En la actualidad, la tecnología necesaria para obtener biocombustibles a partir de las microalgas a escala industrial no está disponible. Los valores teóricos, así como algunos valores obtenidos a escala de laboratorio o de planta piloto, ratifican la potencialidad de estas tecnologías para la obtención de biocombustibles. Sin embargo, para que estas tecnologías sean económicamente viables y medioambientalmente sostenibles, es necesario que sus balances energéticos y de carbono sean favorables y que los impactos medioambientales y los costes de producción se reduzcan significativamente. Para que el balance energético sea favorable, son necesarios avances tecnológicos y mejoras notables en los sistemas de producción que consigan disminuir la energía necesaria. Finalmente, el diseño del sistema de producción de biomasa y su implementación, estará condicionado por las nece-

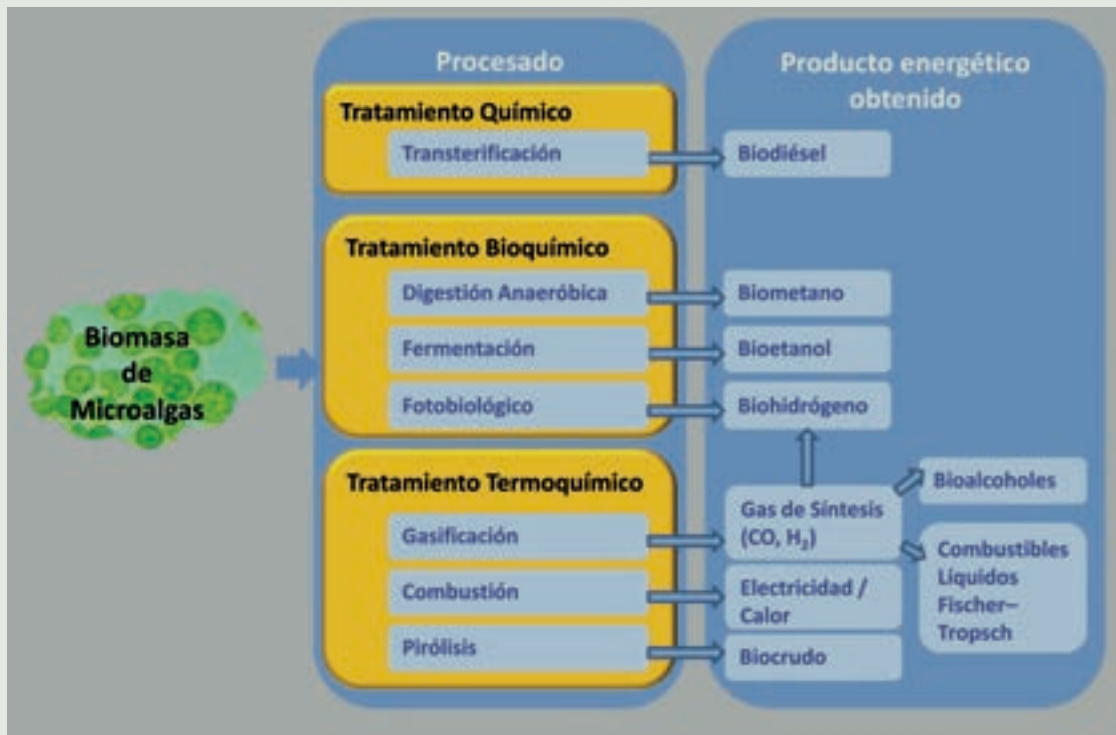
sidades de agua y nutrientes y por las emisiones de  $\text{CO}_2$ . Para realizar un análisis de costes detallado, sería necesario disponer de datos de sistemas específicos de producción de biocombustibles que son complicados de conseguir. En cualquier caso, los costes deben reducirse significativamente; se estima que se pueden reducir más de un 50%, si el  $\text{CO}_2$ , los nutrientes y el agua se obtienen a bajo coste, lo que podría disminuir notablemente el número de localizaciones disponibles.

En la Figura 2 se muestra un esquema de los principales productos energéticos obtenidos a partir de biomasa de microalgas, indicando el sistema de procesado. A continuación, se irán describiendo todos estos procesos en el texto.

El biodiésel de microalgas es el biocombustible más estudiado ya que las microalgas son la mejor fuente de lípidos convertibles a biodiésel debido a su elevado crecimiento. El parámetro clave para que la producción de este biodiésel sea factible es la productividad de lípidos, que

depende tanto de la productividad de la biomasa de microalgas como del contenido celular de lípidos en la microalga. Un proceso ideal debería permitir alta productividad de lípidos con una alta productividad de biomasa y con el mayor contenido posible de lípidos en las células (Q. Li et al., 2008). Desafortunadamente esta situación es muy difícil de obtener; dado que las células con alto contenido de lípidos se obtienen bajo condiciones de estrés fisiológico, el cual está asociado a condiciones limitantes de nutrientes y, por ello, se obtiene una baja productividad de biomasa. El contenido total de lípidos en las microalgas se suele encontrar entre el 20% y el 50% del peso seco, dependiendo de la especie y de las condiciones de cultivo (Yusuf Chisti, 2007). Los factores que más afectan a la alta productividad de lípidos son la deficiencia de nutrientes (nitrógeno, fósforo, azufre y silicio), especialmente el nitrógeno (Gouveia & Oliveira, 2009), y las altas intensidades luminosas, ya que incrementan la cantidad de triglicéridos.

**Figura 2. Principales procesos de obtención de energía a partir de biomasa de algas**



Los procesos de producción de biodiésel con microalgas deberían:

- Seleccionar las mejores cepas en términos de máximo contenido de lípidos y máxima productividad, mejor perfil de lípidos y adaptabilidad al tipo de agua a utilizar y a las condiciones ambientales.
- Establecer estrategias de cultivo adecuadas que permitan lograr la máxima productividad de lípidos y de biomasa.
- Disminuir los costes.

Se han realizado numerosos estudios para determinar qué cepas son las más adecuadas para la obtención de biodiésel, aunque no se ha alcanzado un acuerdo (Gouveia & Oliveira, 2009). Uno de los cuellos de botella a vencer más importante en la producción de biomasa de microalgas y de metabolitos en particular, es el cosechado (20-30% coste total) y la extracción de los mismos. La extracción de los lípidos intracelulares, se puede realizar con ruptura celular previa ("prensa francesa", electroporación) o sin ella, extrayendo los lípidos con solventes químicos (que no son respetuosos con el medioambiente), o con métodos alternativos como la "Extracción Acuosa", que implica una menor inversión de capital, una operación más segura y una producción simultánea de aceite y de fracciones ricas en proteína con menos daño.

En cuanto a los datos económicos, el trabajo de Gao (Gao et al., 2012) proporciona unos costes de 10,03 €/litro de energía equivalente de diésel para FBRs, supuesto un rendimiento de aceite de un 40% sobre el total de la biomasa algal y unos costes de 1,11 €/litro de energía equivalente del diésel regular; para los estanques abiertos con un rendimiento de aceite de un 15 %. Los elevados costes de los FBRs se podrán reducir con la mejora de la tecnología, la experiencia y las economías de escala. Los costes de los estanques son significativamente inferiores, debido a que tienen costes de capital muy bajos, siendo importante el coste de entrada del CO<sub>2</sub>. Sin embargo, su rendimiento nunca puede ser tan alto como en los FBRs. En el trabajo de Gao proponen diferentes



Autor: JanB46. [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Microalgenkwekerij\\_te\\_Heure\\_bij\\_Borculo.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Microalgenkwekerij_te_Heure_bij_Borculo.jpg)

escenarios de mejora para estanques con precios que llegan a ser de 0,39 €/litro de energía equivalente, supuesto un rendimiento que alcance el 30% y un precio del CO<sub>2</sub> de 0,15 €/Kg.

Estos escenarios de mejora son de gran ayuda para que los biocombustibles de algas puedan alcanzar la viabilidad económica, aunque el principal problema continúa siendo el costo de la producción de biomasa (Yusuf Chisti, 2008). Por esta razón, ninguna de las 50 empresas que han surgido para producir este tipo de biodiésel, lo producen aún a escala comercial y a costes competitivos. Los requisitos esenciales para que la obtención de biodiésel sea competitiva son:

- Reducir considerablemente el precio de la producción de la biomasa.
- Obtener simultáneamente una serie de coproductos de alto valor añadido a partir de la biomasa residual que queda después de la extracción del aceite.

En la bibliografía hay pocas evidencias de la viabilidad técnica de la utilización de biomasa de algas para generar calor y electricidad por combustión directa. Aunque la combustión directa de biomasa, tiene una eficiencia de conversión más favorable que la del carbón, tiene la desventaja de que solo funciona con biomasa con contenidos de agua inferiores al 50%, lo que implica tener que reducir el contenido de agua (Brennan & Owende,

2010). Este área requiere mayor investigación para determinar su viabilidad.

Se puede obtener un gas de síntesis de bajo poder calorífico compuesto fundamentalmente por CO y H<sub>2</sub>, por oxidación parcial de la biomasa a altas temperaturas (de 800 a 1000°C) (gasificación). Este gas de síntesis se puede: quemar directamente como combustible, separar el hidrogeno producido o servir de materia prima para obtener combustibles líquidos como biodiésel mediante el proceso de Fischer-Tropsch.

La digestión anaeróbica consiste en transformar los residuos orgánicos en ausencia de oxígeno, en un biogás (Biometano) compuesto fundamentalmente por CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. Este proceso es apropiado para residuos orgánicos con contenidos de humedad de 80-90%, lo que lo hace aplicable a la biomasa húmeda de algas (Brennan & Owende, 2010). Diversos autores han ensayado procesos para la codigestión de biomasa de algas con purines y glicerol con buenos resultados.

Las microalgas son ricas también en hidratos de carbono que se pueden utilizar como fuentes de carbono para obtener bioetanol por fermentación. Por lo tanto, las microalgas han generado un gran interés como biomasa para la producción de bioetanol y pueden competir favorablemente con biomasa obtenidas de cultivos alimentarios como la caña de azúcar y

el maíz. El bioetanol de microalgas se puede obtener mediante dos tecnologías: fermentación, que consiste en la conversión de los materiales de la biomasa que contienen azúcares en etanol por levaduras, y gasificación, que implica convertir la biomasa en un gas de síntesis y éste se convierte en etanol posteriormente por catálisis. Ambas tecnologías actualmente están en sus inicios, siendo crucial y costoso el pretratamiento de la biomasa para en la fermentación, liberar los polisacáridos atrapados en las paredes celulares de las microalgas en subunidades susceptibles de fermentar y en la gasificación, obtener un gas de síntesis suficientemente limpio para que sea susceptible de transformarse en bioetanol por catálisis.

El hidrógeno se puede obtener fotobiológicamente y termoquímicamente. La producción fotobiológica requiere que las microalgas reúnan unas determinadas características genéticas, metabólicas y enzimáticas y su producción se puede realizar por dos métodos. El método de las dos etapas que sintetiza el hidrógeno y el oxígeno parcialmente separados. En la 1ª etapa las algas crecen fotosintéticamente bajo condiciones de cultivo normales y en la 2ª se exponen las microalgas a condiciones anaeróbicas y se limita el sulfuro. Con este método no se generan productos tóxicos y sí compuestos de alto valor añadido. El método de una etapa, produce simultáneamente hidrógeno y oxígeno pero obtiene peores resultados debido a que la producción de hidrógeno es rápidamente inhibida por la acción del oxígeno. Para la producción termoquímica se ha estudiado el efecto de la temperatura en el rendimiento de la obtención de hidrógeno por pirólisis y gasificación con vapor y en ambos casos, los rendimientos aumentan al aumentar la temperatura.

En el trabajo de Slade (Slade & Bauen, 2013) se han examinado tres aspectos de la obtención de biomasa de microalgas para que la producción de biocombustibles de algas sea económicamente viable y medioambientalmente sostenible. Estos aspectos son el balance energético y

de carbono, los impactos medioambientales y los costes de producción. Frente a cada uno de estos aspectos la producción de microalgas presenta un panorama mixto. Para que el balance energético sea favorable, se necesitan avances tecnológicos y mejoras notables en los sistemas de producción (reducir la energía necesaria para el bombeo del cultivo, la construcción del sistema, los fertilizantes y para los procesos de secado y de deshidratación). La mitigación de los aspectos medioambientales y en particular la gestión del agua presentan retos y oportunidades, muchos de los cuales solo se podrán resolver a nivel local. Las actuales estimaciones de costes necesitan que éstos mejoren, y para ello es necesario disponer de datos empíricos de sistemas diseñados específicamente para producir estos biocombustibles.

Aunque en el momento actual la tecnología para la producción de biocombustibles de algas no está disponible a escala comercial, hay razones para el optimismo ya que, con la elevada diversidad de especies de algas, es muy probable que se obtengan nuevas aplicaciones y productos. Además, las algas tienen potenciales beneficios adicionales como son la venta de bonos de carbono, la venta del sobrante de biomasa rica en nutrientes para la cría de ganado, así como la quema de los restos de biomasa para obtener

energía eléctrica. Una advertencia importante de todas estas conclusiones es que reflejan el estado de la literatura existente y éste es un reflejo imperfecto de la situación del sector. Es muy posible que muchos de los desafíos identificados se estén abordando, sin embargo, la información acerca de cómo esto se está logrando no es todavía de dominio público.

## Coprocesos

En este apartado se revisa la posible utilización de las microalgas en coprocesos como la biofijación de  $\text{CO}_2$  para reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$  y el tratamiento de aguas residuales para su depuración.

Las microalgas son una interesante opción para mitigar el  $\text{CO}_2$ , ya que son los mayores biofijadores de  $\text{CO}_2$  del planeta. El  $\text{CO}_2$  que necesitan para su crecimiento lo pueden obtener del aire, de carbonatos solubles y de emisiones industriales. Éstas últimas son las que proporcionan mayores rendimientos por su mayor contenido en  $\text{CO}_2$ , el problema es que estas emisiones pueden incluir contaminantes inhibidores de la fijación del  $\text{CO}_2$ , de manera que es deseable seleccionar especies de algas que toleran elevadas temperaturas, altas concentraciones de  $\text{CO}_2$  y contaminantes como  $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$ .

En la bibliografía se indica que para producir un kg de biomasa seca



Autor: Steve Jurvetson. <http://www.flickr.com/photos/jurvetson/58591531/>

se necesitan como mínimo 1,88 kg CO<sub>2</sub> (Yusuf Chisti, 2008), aunque la cantidad realmente necesaria de CO<sub>2</sub> puede llegar a ser varias veces esa cantidad, dependiendo del sistema de cultivo y de las condiciones operativas. En la práctica, la eficiencia de fijación de CO<sub>2</sub> en los estanques puede ser inferior al 10% y en los de poca profundidad, puede ser de un 35%. En cambio, la eficiencia de fijación en FBRs es superior llegando en tubulares hasta un 75%. En el estudio de Ho (Ho 2011) se comparan los datos publicados de fijación de CO<sub>2</sub> de 25 especies de algas. En muchos casos los datos de fijación del CO<sub>2</sub> se han obtenido multiplicando los datos de productividad de biomasa por 1,88, situándose el consumo normal de microalgas entre 200 y 600 mg L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> aunque para alguna especie se han obtenido valores entre 800 y 1000 mg CO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>.

El aporte necesario de CO<sub>2</sub> afecta tanto a la situación de los sistemas de producción como al balance de energía del sistema. Para utilizar el CO<sub>2</sub> de los gases de combustión, el sistema de producción debe estar cerca de una estación de alimentación y estas se concentran cerca de zonas industriales. Además, es preferible utilizar directamente el gas de combustión

para evitar el consumo energético que supondría su separación.

Los aspectos más importantes a investigar y desarrollar para alcanzar el objetivo de mitigar el CO<sub>2</sub> se centran en la selección de las microalgas, el diseño y operación de los FBRs, el uso eficiente de los procesos de combustión y el desarrollo de procesos de aprovechamiento integral de la biomasa (combinación con la obtención de biocombustibles, de otros compuestos de interés novedoso y con el tratamiento de aguas residuales).

La utilización de microalgas para la depuración de aguas residuales comenzó a finales de los años 50; en los 70 se desarrollaron en EEUU estanques de cultivo de microalgas para el tratamiento de aguas residuales aunque la extensión de este sistema se frenó por el auge de otros sistemas. Las algas se emplean en numerosas partes del mundo para el tratamiento de aguas residuales, pero a pequeña escala.

Se han empleado para eliminar nutrientes en efluentes de residuos porcinos, de acuicultura y en aguas residuales industriales para eliminar metales pesados o compuestos tóxicos orgánicos. Para una eliminación efectiva se necesitan altas productividades de biomasa, y especies de microalgas que soporten las condiciones del me-

dio y los posibles contaminantes. Otro inconveniente del empleo de microalgas en el tratamiento de aguas a gran escala es la dificultad y coste de la separación de la biomasa generada del agua depurada. Estos altos costes se pueden evitar fijando las algas inmovilizando en matrices sintéticas o naturales, alcanzándose porcentajes de eliminación de nutrientes satisfactorios.

También se puede obtener metano por digestión anaeróbica de la torta de algas mejorándose así la renovabilidad y reduciendo su costo y el impacto ambiental.

### Otras aplicaciones de las microalgas

Actualmente, la producción mundial de microalgas se destina principalmente a aplicaciones de elevado valor añadido (Milledge, 2011), ya que la biomasa de algas, además de contener proteínas, lípidos esenciales, pigmentos, carbohidratos, minerales y vitaminas, posee excelentes cualidades para la obtención de productos naturales. La mayor parte de esta biomasa se comercializa como alimentos medicinales en forma de tabletas o polvo como aditivos. También se pueden extraer compuestos con valiosas aplicaciones como pigmentos, aditivos alimentarios, antioxidantes, cosméticos y biofertilizantes. Además, hay que tener



Autor: Sustainable Initiatives Fund Trust (SIFT).  
<http://www.flickr.com/photos/siftnz/4170457412/>

en cuenta que las microalgas representan un recurso en gran parte sin explotar ya que sólo se ha estudiado una pequeña parte de ellas.

El consumo humano de microalgas está restringido a unas pocas especies debido a las estrictas regulaciones de seguridad alimentaria, factores comerciales y demanda del mercado. Las especies que mayoritariamente se cultivan para consumo humano son *Chlorella*, *Spirulina* y *Dunaliella* y tienen como denominador común, crecer en estanques en medioambientes altamente selectivos siendo inmunes a la contaminación de otras algas y protozoos. Entre los beneficios citados del consumo de *Chlorella*, se encuentran el tratamiento de úlceras gástricas, acción preventiva frente a la arterioesclerosis e hipercolesterol y actividad antitumoral. La *Spirulina* (*Arthrospira*) se utiliza debido a su elevado contenido proteico y su excelente valor nutricional; también es una fuente esencial de ácidos grasos y ácido linoleico que no pueden sintetizar los humanos. Mientras que la *Dunaliella* salina, como se verá a continuación, se utiliza fundamentalmente por su elevado contenido en Betacaroteno.

Las algas contienen carotenoides. Aunque se conocen unos 400 tipos de carotenoides, solo unos pocos se utilizan comercialmente, principalmente el  $\beta$ -caroteno y la Astaxantina, y se usan fundamentalmente como colorantes y suplementos de alimentación humana y animal (Milledge, 2011). La concentración promedio máxima de carotenoides en las algas es de entre 0,1% y 2%; sin embargo la *Dunaliella*, cuando crece en condiciones de alta salinidad e intensidad de luz, puede llegar a acumular hasta un 14% de  $\beta$ -caroteno. Existen plantas de producción activas en Australia, Israel, Usa y China y representan una industria en crecimiento y económicamente viable. Las principales aplicaciones de la Astaxantina son en las granjas acuícolas y como suplemento a la dieta o antioxidante.

Las microalgas son también una fuente de ácidos grasos poliinsaturados (*Polyunsaturated fatty acids, PUFA*) y suministran estos componentes vitales a plantas más



altas y animales que carecen de las enzimas necesarias para sintetizarlos, siendo los PUFA esenciales para el desarrollo humano y fisiológico. Actualmente, el pescado y sus aceites son las principales fuentes de PUFAs, aunque su aplicación como aditivos para comidas está limitada por la posible acumulación de toxinas, el olor a pescado y su sabor desagradable. Estas limitaciones se han superado empleando los PUFA de las microalgas como aditivos a leches infantiles y a pollos para producir huevos enriquecidos con Omega-3.

Los dos PUFA más importantes son el ácido Docohexanoico (DHA) y el ácido Eicosapentanoico (EPA). El DHA se obtiene de la *Cryptocodinium cohnii* y se utiliza como suplemento en fórmulas infantiles y dietas, siendo esencial para el funcionamiento apropiado del cerebro adulto, y para el desarrollo del sistema nervioso y habilidades visuales durante los primeros seis meses de vida. El EPA se obtiene de *Phaedactylum tricoratum* por un proceso desarrollado por la universidad de Almería (España). Se estima que se producen 430 kg del 96% de pureza al año, con un coste de 3,54 €/kg. El precio se tiene que reducir en un 80% para que el proceso sea económicamente viable.

Aproximadamente un 30% de la producción actual de algas se vende para alimentación animal, siendo esenciales en acuicultura, y forman parte

de la cadena alimentaria en cualquier criadero convencional. Numerosos estudios han mostrado que las algas pueden reemplazar a proteínas convencionales como las de la soja o pescados. Sin embargo, la alimentación en el resto de animales con algas no está tan extendida ya que, excepto la *Spirulina*, se digieren mal por su alto contenido de celulosa. Sólo los rumiantes se podrían alimentar directamente de ellas por ser capaces de digerir bien este material celulósico, pero a día de hoy, apenas se usa este tipo de alimentación en rumiantes. Un problema en la alimentación animal mediante microalgas es que un consumo elevado puede cambiar el color de la piel (en el caso de los pollos, incluso el color de los huevos). Como beneficios adicionales, cabe destacar una mejor respuesta inmune, mayor fertilidad, mejor control del peso y mejoras en la piel.

Algunas tecnologías de conversión de la biomasa de las algas, especialmente la pirólisis, originan un residuo carbonoso que tiene aplicaciones potenciales en agricultura como biofertilizante, aprovechando la capacidad de las cianobacterias para fijar el nitrógeno atmosférico y para controlar la erosión. Algunos de sus extractos se han revelado como buenos promotores de la germinación y la floración. Las futuras tendencias en el uso agrícola de las microalgas parecen apostar por su actividad preventiva frente



al desarrollo de enfermedades que ciertos virus y bacterias generan en plantas.

Algunas especies de microalgas producen extractos que se utilizan en productos cosméticos (cremas anti-arrugas, regeneradoras, protección del sol, etc.), siendo las principales especies *Arthosphaera* y *Chlorella* y *Spirulina*. Estas especies son utilizadas por reputadas marcas internacionales de cosmética que han investigado sus propios sistemas de producción de algas e incluyen ya en sus fórmulas extractos de estos microorganismos unicelulares, con las exigentes propiedades requeridas para estas aplicaciones: una alta calidad y la ausencia total de contaminaciones.

En la Tabla 2 se resumen posibles aplicaciones de algunas especies de microalgas.

## Conclusiones

En este artículo se presentan las microalgas como una prometedora fuente de energía renovable, además de poder producir otros productos con aplicaciones en nutrición humana y animal. También poseen un gran potencial como biomitigadores de

CO<sub>2</sub> y para tratamiento de aguas residuales, aunque todavía es necesario superar algunos problemas para su producción comercial. El fuerte impulso al cultivo de microalgas en las últimas décadas ha sido provocado por la necesidad de obtener fuentes alternativas de energía más sostenibles. El biodiésel es el biocombustible más estudiado ya que las microalgas son la mejor alternativa para obtener triglicéridos destinados a producir biodiésel, aunque también se pueden obtener otros biocombustibles como bioetanol, biometano y biohidrógeno. Sin embargo, la tecnología necesaria para obtenerlos todavía no está disponible a escala industrial, siendo necesario centrar los esfuerzos de investigación en la búsqueda y el desarrollo de microalgas más adecuadas para cada posible uso, la mejora del diseño de los sistemas de cultivo para maximizar la productividad y reducir costes, el uso eficiente del CO<sub>2</sub> procedente de los gases de combustión y el desarrollo de coprocesos que permitan un aprovechamiento integral de la biomasa. Actualmente, la mayor parte de la producción mundial de microalgas

se destina a la obtención de productos de alto valor añadido como los utilizados en alimentación humana y animal, cosmética y biofertilización. Además, las microalgas mejoran la sostenibilidad medioambiental y económica de ciertos procesos por su capacidad para mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> (ya que son los mayores fijadores de CO<sub>2</sub> del planeta) y para el tratamiento de aguas residuales, captando los nutrientes necesarios para su crecimiento y eliminándolos así del agua. Por todo ello, las perspectivas para el uso industrial de las microalgas son optimistas, pero todavía se han de superar diversos retos para conseguir una utilización rentable de la biomasa de microalgas. ■

**Tabla 2. Posibles aplicaciones de algunas especies de microalgas**

Especie de microalga	Posible aplicación
<i>Chlorella</i>	Salud
	Aditivo de alimentación
	Nutrición animal
	Cosméticos
<i>Dunaliella salina</i>	Biocombustibles
	Betacaroteno
	Suplemento alimentario
<i>Botryococcus braunii</i>	Cosmético
	Biodiésel
<i>Spirulina platensis</i>	Farmacéuticos
	Nutrición humana
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Astaxantina
	Aditivo alimentario
<i>Arthrospira</i>	Farmacéuticos
	Carotenos
<i>Nannocloropsis</i>	Cosméticos
	Ácido ecosapentanoico
	Biodiésel

## Bibliografía

- Brennan, Liam, & Owende, P. (2010). *Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of bio-fuels and co-products*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 557-577.
- Gao, Y., Gregor, C., Liang, Y., Tang, D., & Tweed, C. (2012). *Algae bio diésel - a feasibility report*. *Chemistry Central Journal*, 6, 1-16.
- Gouveia, L., & Oliveira, A. C. (2009). *Microalgae as a raw material for biofuels production*. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 36(2), 269-274.
- Ho, S.-H., Chen, C.-Y., Lee, D.-J., & Chang, J.-S. (2011). *Perspectives on microalgal CO<sub>2</sub>-emission mitigation systems—A review*. *Biotechnology Advances*, 29(2), 189-198.
- Milledge, J. (2011). *Commercial application of microalgae other than as biofuels: a brief review*. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 10(1), 31-41.
- Molina Grima, E., Belarbi, E.-H., Ación Fernández, F.G., Robles Medina, A., & Chisti, Y. (2003). *Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics*. *Biotechnology Advances*, 20(7-8), 491-515.
- Q., Du, W., & Liu, D. (2008). *Perspectives of microbial oils for bio diésel production*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 80(5), 749-756.
- Slade, R., & Bauen, A. (2013). *Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects*. *Biomass and Bioenergy*, Volume 53, June 2013, 29-38
- Yusuf Chisti. (2007). *Bio diésel from microalgae*. *Biotechnology advances*, 25(3), 294-306.
- Yusuf Chisti. (2008). *Bio diésel from microalgae beats bioethanol*. *Trends in Biotechnology*, 26(3), 126-131.