

# El Biodiesel de Microlagas

## ¿Una Alternativa Adecuada para el Sector Energético?

Rafael Muñiz<sup>1</sup>,  
rmuniz53@gmail.com<sup>1</sup>

1 Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería (CIDI). Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, Venezuela.

Historia del Artículo  
Recibido 03 de Julio de 2017  
Aceptado 14 de Julio de 2017  
Disponible online: 14 de Julio de 2017

---

**Resumen:** Las microalgas son organismos eucariotas que se encuentran en la naturaleza con una amplia diversidad de taxonomías creciendo de forma autotrófica y heterotrófica. Son muy eficientes en la fijación de CO<sub>2</sub>, el principal agente responsable del efecto invernadero, por lo que sus cultivos podrían contribuir como un recurso valioso para controlar las emisiones de este gas en el planeta. El uso de las microalgas como biocombustible presenta una serie de ventajas en comparación con los que provienen de otros cultivos. Su aceite produce una combustión más limpia que la de los combustibles fósiles y en el caso de que ocurra un derrame, genera una menor contaminación en el ambiente al degradarse en un tiempo menor. No obstante, el cultivo de las microalgas a nivel industrial, presenta una serie de dificultades por el elevado costo del proceso y la inestabilidad de los cultivos debido a las condiciones variables del entorno y a la contaminación del medio nutritivo con otros microorganismos. En el presente trabajo se realizó una revisión de la literatura que involucra aspectos relacionados con la tecnología de microalgas y con el procesamiento de sus extractos a nivel industrial con el fin de producir biodiesel, estableciendo el alcance y las limitaciones de dicha técnica como una alternativa al uso de los combustibles fósiles.

**Palabras Clave:** Energías alternativas, Biodiesel, Microalgas.

**Abstract:** Microalgae are eukaryotic organisms found in nature with a wide variety of taxonomies growing in an autotrophic and heterotrophic form. They are very efficient in fixing CO<sub>2</sub>, the main agent responsible for the greenhouse effect, so their crops could contribute as a valuable resource to control the emissions of this gas on the planet. The use of microalgae as biofuel presents a number of advantages compared to those from other crops. Its oil produces cleaner combustion than that of fossil fuels and in the event of a spill, it generates less pollution in the environment as it degrades in a shorter time. Nevertheless, the cultivation of microalgae at the industrial level presents a series of difficulties due to the high cost of the process and the instability of the crops due to the variable conditions of the environment and the contamination of the nutrient medium with other microorganisms. This paper will discuss some aspects related to microalgae technology and the processing of extracts at the industrial level in order to produce biodiesel, establishing the scope and limitations of this technique as an alternative to the use of fossil fuels.

**Keywords:** Alternative energy, Biodiesel, Microalgae

---

## I. INTRODUCCIÓN

Como es del conocimiento público, se evidencia en todo el planeta un cambio en las condiciones climáticas cuya magnitud es de tal importancia que se incluye en la agenda política de los países y de las organizaciones internacionales. Este cambio climático entre sus múltiples efectos causa tanto sequías como inundaciones siendo la actividad humana su principal responsable, en particular debido a la contaminación causada por la quema de los combustibles fósiles.

Como un recurso para prevenir las consecuencias que genera la contaminación, se plantea el desarrollo de tecnologías limpias que se orienten a la preservación del medio ambiente, que permitan la reutilización de los residuos y que al mismo tiempo generen fuentes de energía de bajo costo

Entre las tecnologías disponibles para mitigar los efectos del cambio climático los cultivos de microalgas constituyen un recurso valioso, ya que reciclan de forma eficiente los contaminantes presentes en los medios líquidos y gaseosos al incorporarlos con su metabolismo a la biomasa del alga.

Desde comienzos de la década de los 50, se conocen reportes sobre el uso de microalgas mantenidas en cultivo a partir del agua de efluentes como una fuente de biomasa para la producción de metano. [ 1 ]

A inicios de la década de los 70, se plantea a nivel mundial la búsqueda de otras fuentes alternativas de energía. El interés en ese campo, se debía por una parte a la toma de conciencia sobre los problemas ambientales que generan los combustibles fósiles y por otra, como un resultado de la crisis energética mundial debida al elevado precio de este tipo de combustibles.[ 2 ]

Entre las alternativas disponibles para tratar de solventar el problema energético se encontraba la de desarrollar en gran escala la biotecnología de microalgas orientada a la producción de biocombustibles. La idea surge en los Estados Unidos al aplicar a los cultivos de microalgas corrientes de CO<sub>2</sub> generadas por la quema del carbón como un recurso para depositar el gas y que al mismo tiempo aportara una fuente de carbono para mantener el cultivo del alga. [3]

El denominado programa de especies acuáticas que se desarrolló también en los Estados Unidos desde finales de la década de los 70 hasta los años 90, cumplió con el objetivo de investigar entre las distintas especies de microalgas cuales podrían funcionar mejor para la producción de biocombustibles.

Aunque no se pudo encontrar una especie de microalga ideal para la producción de biocombustible, sí se logró identificar una amplia gama de especies, en su mayoría presentes en aguas continentales que eran capaces de almacenar aceites en niveles significativos y que mostraban además una muy buena tasa de crecimiento. [4]

En el curso de las décadas siguientes, entre los años 80 y 90 ,se prosigue con los estudios a gran escala logrando mantener cultivos en sistemas abiertos con un buen rendimiento de biomasa por períodos de un año.

En esa época fue célebre el desarrollo que se llevó a cabo en Roswell, Nuevo México, donde se alcanzaron densidades de cultivo que superaron los 50 gramos de masa por m<sup>2</sup> por día, obteniendo una tasa de captura del CO<sub>2</sub> de más del 90%. Este fue un logro considerable a pesar de las limitaciones que ocasionaba la disminución en la tasa de crecimiento de las microlagas debido a la baja temperatura nocturna del desierto. [5]

Las microalgas son organismos fotosintéticos microscópicos que crecen en ambientes acuáticos marinos y de agua dulce aunque se conocen especies terrestres. Los biólogos las han clasificado y caracterizado en diferentes grupos basándose en la pigmentación, su ciclo de vida, morfología, fisiología, genoma y su metabolismo. [ 6 ]

Se estima que existen unas 30000 especies de microlagas aunque solo unas 4000 han sido clasificadas. Los ficólogos las ubican en alguno de los siguientes grupos: algas verdes [Chlorophyceae], diatomeas [Bacillariophyceae], algas verde-amarillentas [Xanthophyceae], algas doradas [Chrysophyceae], algas rojas [Rhodophyceae] y algas pardas [Phaeophyceae]. Los biotecnólogos acostumbra incluir entre los grupos a las cianobacterias [Cyanophyceae] y a los dinoflagelados [Dinophyceae] aunque en sentido formal no se les clasifican como microalgas. [ 7 ]

En términos de la producción de biocombustibles, las microalgas más estudiadas son las diatomeas y las algas verdes, la investigación en este campo se ha enfocado en unas 300 especies capaces de producir cantidades significativas de aceite. [8]

## II. EL BIODIESEL: ALCANCE Y LIMITACIONES

Los biocombustibles se pueden obtener a partir de un amplio rango de productos agrícolas y forestales. La oferta en el mercado se concentra en dos tipos de productos: el bioetanol como un sustituto o complemento de la gasolina y el biodiesel para uso en el transporte pesado y en la industria.

Las principales fuentes energéticas para la producción del bioetanol son los cultivos de maíz y de caña de azúcar, mientras que la materia prima para el biodiesel proviene en general de cultivos de soya, de jatropha, de colza y de los aceites que se extraen de la palma y de ciertas especies de microalgas.

El biodiesel pertenece a un conjunto de combustibles que se emplean en fase líquida como biocarburantes y que se obtienen mediante procesos de transesterificación a partir del aceite que se extrae de la biomasa vegetal y de las grasas animales y que se usa como sustituto total o parcial de los combustibles fósiles. [ 9 ]

El biodiesel que se encuentra disponible en forma comercial hoy en día, se considera como biocombustible de primera generación y para su producción se cuenta con una tecnología bastante bien desarrollada que utiliza como materia prima los aceites vegetales. El biodiesel que se obtiene a partir de las microalgas se considera como un combustible de segunda

generación y se produce todavía a nivel experimental y en cantidades limitadas. .

Al igual que sucede con el impacto de otras tecnologías, se presentan oportunidades pero también riesgos asociados al desarrollo de los biocombustibles que dependen de varios factores, entre los cuales se encuentran, el tipo de cultivo que sirve como fuente de materia prima, la tecnología utilizada para la conversión del biocombustible y además en gran medida de cuáles son las políticas y los incentivos fiscales que se apliquen para promover el desarrollo de esta industria. [ 10 ]

Se han planteado frecuentes debates en torno al impacto que pudiera generar el crecimiento del mercado de los biocombustibles y su efecto sobre la seguridad alimentaria de los países. [ 11 ]

Otro de los elementos que afectan en gran medida al mercado de los biocombustibles lo constituyen las fluctuaciones que experimenta el precio del petróleo y que compromete la competitividad del sector debido a sus costos elevados de producción.

Desde los inicios del presente siglo, la producción de biocombustibles ha crecido a un ritmo anual de un 10% con una composición de un 80% de bioetanol y 20% de biodiesel, logrando una participación en el mercado de los biocombustibles que alcanza un 1,5% del combustible total empleado para el sector del transporte.[ 12 ] [ 13 ]

La proyección de mercado de biocombustibles del 2010 señalaba que solamente en cinco países se concentraba más del 60% de la producción mundial del biodiesel: Estados Unidos, Argentina, Alemania, Francia y Brasil.

Los costos de producción del biodiesel varían considerablemente en función de la fuente de materia prima, el método que se utilice para la extracción y purificación del biocombustible y también del país de origen.

El tema del costo es un factor clave en el análisis de la viabilidad de esta industria ya que el negocio no es un simple reflejo de las fuerzas que impone el mercado y como ya mencionamos recibe la influencia de las políticas que establecen los gobiernos para promover su producción, su uso y que se mantienen con el apoyo de los incentivos fiscales.[ 14 ]

La rentabilidad de la industria muestra una elevada sensibilidad a los cambios en el precio no solo del petróleo sino también de las materias primas. En el caso de los biocombustibles de primera generación, el propio cultivo contribuye con la mayor fracción en la estructura de costos del negocio. Para el caso del etanol de la caña, el valor puede alcanzar hasta un 60% de los costos totales y en comparación con el biodiesel obtenido a partir de cultivos de soya, este valor puede llegar a un 80%. [15 ]

La Agencia Internacional de Energía [AIE] ha efectuado una serie de proyecciones en el corto y largo plazo en relación con el posible precio de mercado de los biocombustibles

provenientes de distintas fuentes de materia prima. La situación del mercado varía diametralmente dependiendo del escenario que se asume tomando en cuenta los precios de los combustibles fósiles. [16 ]

Si se considera un escenario, donde el precio del barril de petróleo se mantiene a un nivel bajo de unos US\$ 50, con la excepción del etanol de caña de Brasil, los restantes biocombustibles de primera generación no podrían competir con la gasolina y la situación para los combustibles como el biodiesel de microalgas de segunda generación se torna todavía menos competitiva.

Sólo considerando un escenario donde se mantengan los precios del barril de petróleo sobre los US\$120 pasaría a ser rentable la producción de los biocombustibles tanto de primera como de segunda generación.

Una estrategia para incrementar la rentabilidad de esta industria es la de utilizar los productos colaterales que se generan en el mismo proceso productivo. El uso de la biomasa residual que permanece luego de la extracción del aceite puede servir como una fuente extra de combustible que ahorraría el consumo de energía que se emplea en la producción del biocombustible. [17]

Otra estrategia para sufragar los altos costos de producción sería el de la venta al sector farmacéutico o el alimenticio de otros productos que pudieran ser cogenerados en el proceso de extracción del aceite.

Rudolph Diesel, el pionero en el desarrollo del motor que lleva su nombre, utilizó el aceite de maní como su primer combustible de prueba pero no pasó mucho tiempo antes que ese combustible vegetal fuera sustituido a escala mundial por nuestro bien conocido óleo de la piedra el que hoy llamamos petróleo.

### III. LA TECNOLOGÍA DE MICROALGAS

La tecnología de microalgas ofrece la posibilidad de utilizar el material proveniente de los cultivos como una fuente de energía alternativa al uso de los combustibles fósiles bajo tres enfoques distintos. [18]

El primer enfoque es utilizar las microalgas como una fuente de biomasa para la producción de biogás y es independiente de la especie de alga que se cultive. Mediante el uso de procesos de degradación térmica o los de tipo biológico como la digestión enzimática y la fermentación anaerobia se pueden obtener como productos metano e hidrógeno.

Una variante que es todavía más sencilla es la quema directa del material seco del alga al igual que se usa la leña o el carbón.

Un segundo tipo de enfoque es generar etanol aplicando a la biomasa un proceso combinado de fermentación del homogenizado y la destilación posterior del extracto. Aunque esta estrategia no es despreciable para la cogeneración de combustible en paralelo con la producción de biodiesel, en términos de rendimiento las microalgas no compiten con la

producción de etanol que se obtiene del maíz y de la caña de azúcar.

El tercer enfoque está orientado específicamente hacia la producción de biodiesel para el mercado del parque automotor pesado y también para el uso industrial en centrales termoeléctricas y en sistemas de calefacción entre otros.

Es con este tercer enfoque donde la tecnología de microalgas ofrece una alternativa energética viable capaz de competir con los aceites que provienen de otras fuentes vegetales, sin afectar el nivel de la producción de aceites para el consumo humano.

Al igual que sucede en otros campos de la biotecnología, el éxito del proyecto depende en gran medida de las inversiones en investigación y desarrollo. En el caso de la tecnología de microalgas, la investigación se realiza en varias etapas. [ 19 ]

El primer paso es el de reunir un banco con diversas especies y mantenerlas vivas cultivándolas en placas de agar para su clasificación y el estudio de los aspectos relevantes de su bioquímica y su fisiología.

Es relativamente fácil coleccionar cepas de microalgas y poder mantenerlas en cultivo bajo condiciones estériles. Sin embargo, no todas las especies son eficientes para la producción de aceite y de que éste sea apto para producir biodiesel.

Las especies que acumulan altos niveles de aceite lo hacen porque desvían su metabolismo desde las rutas de producción de proteínas y glúcidos hacia las vías metabólicas que producen lípidos lo que en general restringe su crecimiento. Al crecer más lentamente que otras especies sus cultivos son proclives a la contaminación con otras especies no deseadas.

Los triacilgliceroles que componen el aceite le sirven a las microalgas no sólo como un material de reserva energética sino también como un recurso que usa el microorganismo para disminuir su densidad y así poder flotar en estratos superiores más próximos a la fuente de luz, lo que le permite lograr una mayor tasa fotosintética y poder competir con otras especies que no acumulan aceite.

El segundo paso en el esquema es desarrollar un protocolo de escalamiento que permita obtener los niveles de producción que se requieren para que el cultivo sea rentable. [ 20 ]

Se ha podido comprobar que los mejores resultados se obtienen cuando se utilizan microalgas que son autóctonas de la zona donde se propagará el cultivo. Sucede con frecuencia que algunas cepas que se comportan como “campeonas” en los cultivos a nivel del laboratorio fallan cuando se prueban en los estudios de campo a una escala mayor.

Para la producción a nivel industrial de microalgas se utilizan dos tipos de sistemas de cultivos: los sistemas abiertos y los cerrados.

Los sistemas abiertos son estanques al aire libre de poca profundidad [50 cm] que utilizan directamente el CO<sub>2</sub> atmosférico y la luz solar. Además disponen de un equipo

rotatorio con paletas que producen un flujo laminar en el sistema mezclando el cultivo sin dañar la suspensión de células. Estos sistemas suelen ser menos costosos que los cerrados en términos de su construcción y operación y tienen una vida útil más larga. [21]

Este tipo de piscinas al aire libre pueden producir en condiciones óptimas una cantidad considerable de microalgas, pero presentan también algunos inconvenientes.

Al ocupar mayores extensiones son también más propensos a la contaminación con otras microalgas foráneas y por bacterias no deseadas. Es por ello que para el cultivo en sistemas abiertos se prefiere el uso de cepas que puedan crecer en unas condiciones extremas que limitan la proliferación de otros organismos tales como valores de pH altos o bajos, temperaturas específicas o requerimientos nutritivos particulares a esa variedad de alga.

En los sistemas abiertos, la tasa de difusión y de disolución del CO<sub>2</sub> en el medio de cultivo puede limitar la tasa del crecimiento celular debido a que la atmósfera contiene relativamente una baja concentración de ese gas.

Otro aspecto que se debe tomar en cuenta es que en los sistemas abiertos no se puede seguir un control estricto de las condiciones ambientales. Al variar factores como la temperatura del entorno y la intensidad lumínica, entre otros, se verá afectada la velocidad de crecimiento del cultivo. [ 22 ]

La luz del sol no puede penetrar sino a través de unas pocas pulgadas en el medio de cultivo por el efecto de sombreado entre las células del alga, siendo este un elemento limitante en las granjas de algas con estanques abiertos.

Otro de los parámetros que pueden tornarse críticos en los cultivos de microalgas son los incrementos del pH del medio. Las microalgas por efecto de la fotosíntesis alcalinizan el medio hasta niveles que no pueden ser compensados por el efecto neutralizador que genera la captura del CO<sub>2</sub> y la tasa respiratoria de las mismas microalgas por lo que es imprescindible mantener un control riguroso del pH en el medio de cultivo. [23]

De ahí que se prefiera en algunos casos mantener un consorcio microbiano controlado donde las microalgas crezcan junto con ciertas bacterias, en lugar de un cultivo puro [ del tipo axénico ] con solo microalgas. Las bacterias al respirar acidifican el medio y colaboran para compensar el desbalance del pH.

El otro tipo de cultivo son los sistemas cerrados que emplean tanques con agitación por burbujeo de CO<sub>2</sub> y fuente de luz natural y/o artificial, Por su tipo de diseño estos reactores permiten llevar a cabo un control más eficiente de las condiciones del cultivo ajustando los parámetros óptimos de crecimiento. [ 24 ]

Los sistemas cerrados como los fotobioreactores aunque son más costosos previenen la evaporación del agua y reducen las pérdidas del CO<sub>2</sub> que usualmente se suministra partiendo de fuentes externas de gas industrial, a esto se suma una

probabilidad menor de que el sistema se contamine y el pudiendo mantener constantes otras condiciones como la temperatura del cultivo.

Uno de los aspectos que determinan la eficiencia final de todo proceso para obtener el biodiesel es el de asegurar que la recolección de la biomasa de microalgas se logre en un tiempo corto y con el mayor rendimiento que sea posible.

Para lograr este propósito se aplica un procedimiento que sigue varias etapas de separación y purificación de la biomasa. Entre las alternativas disponibles para la separación de la biomasa están las técnicas de flotación, floculación y espesamiento del material y que prosigue con la filtración o cribado de la pasta y su precipitación por gravedad o por centrifugación a bajas revoluciones y en algunos casos aplicando en las últimas etapas técnicas de electroforesis. [ 25 ]

La combinación óptima de técnicas de extracción de la biomasa que se aplicará al cultivo se evaluará no solo por la eficiencia intrínseca de los métodos y el tiempo empleado sino también por el costo de la tecnología utilizada. La técnica más apropiada para efectuar la cosecha va a depender de las características físicas de las microalgas, de su tamaño y densidad y por supuesto de la rentabilidad que viene también en función del valor de los productos que se obtendrán al final del proceso.

Una vez que se ha aislado la biomasa del alga, ésta se debe secar con rapidez por ser un producto perecedero. Aunque el secado al sol es el método de menor costo se requieren tiempos prolongados de exposición lo que pudiera afectar la estabilidad del material, existen otros procedimientos más rápidos y eficientes que se pueden aplicar como el secado en tambor, la técnica del lecho fluido o la liofilización. [ 26 ]

La pasta de alga una vez seca se somete a un proceso de extracción que comienza con la lisis celular con homogeneizadores de alta presión seguido de la extracción con solvente de los ácidos grasos utilizando hexano, cloroformo, etanol y otros.

Los aceites que provienen de las microalgas al igual que la mayoría de los aceites vegetales presentan un inconveniente que es su elevada viscosidad lo que prácticamente imposibilita su uso directo como combustibles. La alta viscosidad se debe a la estructura molecular del aceite que en términos químicos es un triéster que une cadenas de ácidos grasos a una molécula de glicerol. [ 27 ]

Una forma de resolver el problema de la viscosidad es modificar el aceite mediante una reacción de transesterificación que disocia las cadenas de los ácidos grasos acoplándolos a una molécula de alcohol de bajo peso molecular como el metanol. Este proceso tiene la ventaja de que no forma emulsiones como ocurriría con una reacción de saponificación que al formar jabones anularía la posibilidad de utilizar el producto como un combustible para motores. [ 28 ]

Una parte considerable del esfuerzo proveniente de la investigación básica se ha centrado en el estudio del efecto que genera la limitación de la concentración de ciertos nutrientes como el N y el Si en los medios de cultivo.

Con la depleción de estos elementos, se ha demostrado en experimentos a pequeña escala, que se puede potenciar la acumulación del aceite [biodiesel] en varias especies de microalgas. [29 ]

No obstante, los resultados al final no han sido del todo favorables ya que se comprobó que ocurría una disminución importante en la tasa de crecimiento de las microalgas y que ésta anulaba el efecto potenciador de la depleción de los nutrientes en los niveles de los lípidos del alga.

Un enfoque relativamente reciente es la posibilidad de modificar los genes de las microalgas para que expresen en un mayor nivel ciertas enzimas como la Acetil CoA Carboxilasa cuya estimulación conduce hacia una mayor producción de aceite. [30]

En las plantas, la enzima ADP glucosa pirofosforilasa, cumple un papel central en la formación del almidón y se ha podido obtener cepas mutantes de algas que no expresan esta enzima logrando a su vez un incremento en el contenido de los lípidos totales.

Mediante técnicas de manipulación genética se ha podido interferir en la expresión de varias enzimas reductoras que actúan sobre el metabolismo de lípidos incrementando los niveles intracelulares de aceite en el alga sin afectar su crecimiento.

Algunas empresas biotecnológicas han realizado importantes desarrollos en el campo del cultivo de microalgas para reducir los costos e incrementar el rendimiento de extracción de los biocombustibles.

Diversified Technologies utiliza la tecnología de campos eléctricos pulsantes [PEF por sus siglas en inglés] para reducir los costos de la extracción del aceite. El campo eléctrico aplicado en pulsos de alto voltaje mediante una cámara de electroporación genera agujeros en la pared celular de las microalgas permitiendo que el contenido intracelular difunda al medio circundante para su posterior purificación [31].

En comparación con las tecnologías clásicas que aplican etapas convencionales de secado y de extracción con solventes, el costo del PEF es considerablemente menor con un valor de US\$ 0.10 por galón de biocombustible frente a los US\$ 1.75 por galón que se gastan con las tecnologías anteriores. La diferencia radica en que se puede omitir la etapa de secado del material que representa muchas veces hasta un 75% del costo del proceso total de extracción del aceite.[12]

La empresa biotecnológica Originoil investiga con un método novedoso al que denominan fotobiorreactor de hélice. Este sistema emplea luces de bajo consumo de energía colocadas siguiendo un patrón helicoidal que rodea los tubos del reactor

y donde las células del cultivo reciben la cantidad de luz que necesita con un mínimo efecto de sombreo.

Cada foco de iluminación en el biorreactor emite luz en longitudes de onda específicas para la fotosíntesis lo que incrementa la tasa de crecimiento del cultivo.

Este tipo de biorreactor también resuelve otro problema clave en el crecimiento de células de algas; la incorporación continua del CO<sub>2</sub> y de los nutrientes al reactor sin tener que interrumpir el flujo.

Originoil emplea la fractura cuántica que es otro tipo de tecnología de punta en el sector de la industria de las microalgas. En una etapa previa a su inyección se comprimen el gas y los nutrientes a presiones muy altas de forma que al incorporarse al cultivo a presión atmosférica se producen micro burbujas en el medio. Este efecto aumenta la eficiencia del proceso de absorción y al mismo tiempo garantiza la integridad de las células.[ 32]

#### IV. VENTAJAS QUE OFRECEN LOS CULTIVOS DE MICROALGAS

Una de las principales ventajas que ofrecen los cultivos de microalgas proviene de su balance positivo en el uso del anhídrido carbónico que absorben de la atmósfera. Igual que sucede con todas las plantas, al mismo tiempo que producen CO<sub>2</sub> con la respiración lo incorporan de nuevo mediante la fotosíntesis para producir materia orgánica. Como la tasa de fotosíntesis en las microalgas supera a la respiratoria fijan más CO<sub>2</sub> que el que producen sus células con una ganancia neta de oxígeno que luego difunde a la atmósfera.

Además, como no todo el CO<sub>2</sub> que fija el alga pasa a formar aceite, existe una fracción que deriva hacia otros componentes hidrocarbonados que permanecen en la biomasa residual y que actúa como un sumidero adicional de carbono.

Así el proceso de captura y emisión del gas da un balance neto positivo permitiendo que se fije un excedente del CO<sub>2</sub> proveniente de la atmósfera contribuyendo con la disminución del efecto invernadero en el planeta. [33]

Otro aspecto que se debe tomar en cuenta en relación con el balance de carbono, es que algunas especies de algas, además de acumular aceites producen cantidades considerables de carbohidratos en sus células.

Una vez que se extrae el aceite, la biomasa residual puede ser tratada con enzimas y sometida a un proceso de fermentación aeróbica para producir etanol que aporta un segundo biocombustible a partir de un mismo cultivo.

El etanol se puede ofrecer en el mercado como un aditivo para la gasolina y de forma indirecta disminuir los costos de la producción del biodiesel o se puede usar como estrategia de cogeneración para que aporte la energía que se necesita para el funcionamiento del mismo proceso.

El biodiesel que se extrae de las microalgas es biodegradable y es menos dañino en otros aspectos que los combustibles fósiles. El nivel de material particulado, como el

hollín que se produce en su combustión es considerablemente inferior y es menos carcinogénico. Adicionalmente, el nivel de azufre que contiene el biodiesel es menor al de los combustibles que provienen del petróleo, lo que incide positivamente en la reducción del problema de las lluvias ácidas. [ 34 ]

En adición a su contribución con la reducción de los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, las microalgas son notablemente eficientes también en otros aspectos. Al igual que sucede con otros microorganismos, ellas se multiplican de forma exponencial a una tasa que alcanza un máximo de crecimiento en unas 4 horas, obteniéndose un rápido incremento en la masa celular en un período de sólo 24 horas de cultivo, superando la tasa de crecimiento de las plantas terrestres.

Estos organismos proliferan como células aisladas o en agrupaciones de pocos individuos y esto les permite transformar la energía solar en compuestos orgánicos con una eficiencia mucho mayor a los cultivos de las plantas superiores.

El hecho de crecer como suspensiones acuosas les garantiza el suministro de radiación lumínica a todos los individuos siempre y cuando la agitación sea adecuada. Además les brinda un acceso prácticamente directo al agua del medio, al CO<sub>2</sub> disuelto y a los otros elementos nutritivos que le son esenciales para su crecimiento, tales como, el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y el magnesio. [ 35 ]

Si no se presenta ningún otro tipo de limitaciones en las condiciones del cultivo [nutrientes, temperatura, suministro de CO<sub>2</sub>] la eficiencia y la cinética de la fotosíntesis viene dada directamente en función de la calidad e intensidad de la radiación lumínica que incide sobre el cultivo.

En comparación con las plantas superiores que realizan la fotosíntesis con una eficiencia promedio del 2%, las microalgas, debido a que poseen una estructura simple y mantienen un bajo consumo energético, alcanzan una eficiencia fotosintética superior. Existen especies que en función de las condiciones de cultivo pueden alcanzar una eficiencia de hasta un 8%. [17]

Además, las microalgas ofrecen otras ventajas adicionales, pueden ser cosechadas siguiendo un régimen prácticamente continuo en contraste con los cultivos tradicionales terrestres que permiten solo cosechas anuales o bianuales y no requieren del uso de pesticidas y herbicidas.

Las microalgas requieren de un consumo menor de agua si se le compara con otros cultivos tradicionales como el maíz y la caña de azúcar. En el caso de los cultivos de algas, a menos que se presente algún tipo de contaminación particular, el medio de cultivo se puede reciclar compensando la pérdida de nutrientes absorbidos añadiendo una cierta proporción de medio fresco.

Las técnicas que comúnmente se utilizan para extraer del cultivo la biomasa de algas, tales como, el cribado, la filtración y la centrifugación en tambor a bajas revoluciones no descartan la totalidad del material celular del medio,

permitiendo que las células que permanecen en el percolado y en el sobrenadante actúen como semillas para seguir un nuevo ciclo.

Algunas especies se comportan como heterótrofos facultativos y pueden crecer tanto en presencia como ausencia de luz siendo capaces de nutrirse metabolizando sustratos orgánicos que captan directamente del medio de cultivo. Esta propiedad les confiere otra ventaja adicional y es que pueden crecer muy bien en aguas residuales tanto residenciales como de origen industrial. [ 36 ]

Este tipo de aguas de desecho no sólo aporta los nutrientes que el alga requiere como el nitrógeno y el fósforo sino que además constituye un recurso para la purificación de efluentes que en principio no serían aptos para el riego directo de cultivos agrícolas ni para el consumo animal y humano.

El tratamiento de esos efluentes actúa al evitar que ocurran problemas posteriores por efectos eutróficos en áreas sensibles a ese tipo de perturbación en ciertos tipos de ecosistemas.

La literatura es pródiga en reportes sobre el uso de la tecnología de microalgas para el tratamiento de efluentes provenientes de diversas fuentes como la industria pesquera, de productos cárnicos de aves, porcinos, ganado vacuno y de la industria vinícola. [ 37 ]

Por ser organismos unicelulares, su biomasa entera posee los compuestos de interés comercial, a diferencia de las plantas superiores en las que los productos recuperables se encuentran en sitios u órganos específicos, lo que dificulta su extracción y una cantidad considerable del material se pierde como desecho. Ciertas especies de microalgas pueden llegar a producir un rendimiento de aceite para uso como biodiesel que alcanza valores de hasta un 70% del peso seco del alga. Las producciones anuales de aceites a base de microalgas son mucho mayores, hasta 500 veces superiores que para cualquier otro tipo de cultivo.

Actúan también como agentes biodetectores y bioremediadores, logrando de forma eficaz la remoción de metales pesados a partir de efluentes industriales con un alto nivel de contaminación como es el caso, de *Chlorella* y *Scenedesmus*, que son capaces de eliminar de la solución acuosa niveles importantes de metales tóxicos como el cadmio, cromo, mercurio y plomo.

Ciertos metales pesados inducen cambios genéticos en las microalgas por efecto de mutación. Sin embargo existen especies que en lugar de intoxicarse se vuelven tolerantes y acumulan el metal. El mecanismo de detoxificación al parecer es específico y depende del tipo de alga y del metal. El Zinc y el Cadmio se acumulan en general en las vacuolas, pero otros metales se fijan a los exoesqueletos y también en otros organelos subcelulares. [ 38 ]

La versatilidad que demuestran las microalgas para poder crecer en diversos ambientes y en condiciones que le son adversas a otros organismos se debe en gran medida a su capacidad para sintetizar compuestos que poseen ciertas propiedades especiales y que les protegen de condiciones

medioambientales extremas, como en el caso, de una intensa radiación solar [betacaroteno], del impacto osmótico cuando proliferan en soluciones hipersalinas [glicerol] o incluso si le otorgan ventajas competitivas frente a otras variedades de algas por el acceso a la luz [aceites]. [ 39 ]

Las microalgas como es el caso de la *Spirulina* que se ofrece comercialmente aportan proteínas de alta calidad nutricional aptas para el consumo humano lo que podría reducir el consumo de carne de vaca ahorrando para la agricultura amplias extensiones de tierras de pastoreo y recordemos además que por ser rumiantes contaminan el aire con sus “emanaciones” de gas metano, otro contribuyente importante al efecto invernadero. [ 40 ]

Por otro lado, en el campo de la zootecnia se viene trabajando desde hace tiempo con algunas especies de microalgas que sirven de alimento para cultivar el zooplancton que se usa para la cría de camarones y para la piscicultura.

Otro ejemplo es el caso de la *Dunaliella salina* que es la principal fuente de betacaroteno para la industria farmacéutica. Este pigmento es un excelente fotoprotector para la piel y un antioxidante eficaz que protege al organismo contra los radicales libres y además actúa como precursor de la vitamina A. [ 41 ]

En términos de la economía del sistema de cultivo de microalgas resulta conveniente considerar otras estrategias de producción basadas en un concepto integral de biorefinería, donde la biomasa además de ser una fuente de biodiesel provea otros productos comercializables tales como: alimento para el ganado, compuestos de valor farmacéutico como vitaminas y antibióticos y otros biocombustibles adicionales como el etanol y el biogás. [ 42 ]

Otros tipos de enfoques se vienen desarrollando para sustituir a los combustibles fósiles en el sector del transporte. Sin embargo, opciones como los vehículos eléctricos no constituyen por el momento una alternativa válida para la sustitución por el alto costo de adquisición del vehículo y su reducida autonomía por limitaciones en el número de las fuentes de recarga y los tiempos prolongados de conexión. [43]

El uso de las celdas solares en el sector del transporte no constituye una opción competitiva y como prueba un ejemplo. El Solar Impulse 2 es una aeronave experimental propulsada exclusivamente por paneles de energía fotovoltaica. Utilizando este tipo de tecnología limpia el avión hace la travesía transoceánica entre New York y Madrid sin escalas, pero tarda en hacer el viaje 70 horas. [44]

## V. CONCLUSIONES

El uso de las celdas solares en el sector del transporte no constituye una opción competitiva y como prueba un ejemplo. El Solar Impulse 2 es una aeronave experimental propulsada exclusivamente por paneles de energía fotovoltaica. Utilizando este tipo de tecnología limpia el avión hace la travesía transoceánica entre New York y Madrid sin escalas, pero tarda en hacer el viaje 70 horas. [44]

En el trabajo presentamos una serie de evidencias y de criterios que apoyan la viabilidad del uso del biocombustible de microalgas como una alternativa para sustituir al menos parcialmente a los combustibles fósiles.

El biodiesel de microalgas cumple con una serie de criterios de sostenibilidad ambiental: genera un balance positivo en la reducción de los gases de efecto invernadero, preserva la biodiversidad de los ecosistemas, mantiene la integridad de los sumideros naturales de carbono ya que no requiere del uso de la tierra virgen de los bosques, humedales y turberas, reduce la práctica común y perjudicial de la quema para adecuar el terreno para la siembra, y cumple también con un objetivo de sostenibilidad social como es el de crear puestos de trabajo para un personal poco calificado algo que es valioso en particular para los países en desarrollo

A pesar de sus ventajas, la tecnología microalgal también presenta algunas limitaciones, entre las más relevantes se cuentan: la dificultad para mantener en sistemas abiertos monocultivos de algas sin que se contaminen y que al mismo tiempo produzcan un alto rendimiento de biomasa y la dificultad para obtener especies de microalgas oleaginosas que se adapten con facilidad a distintos ambientes.

El elevado consumo de energía que involucran los procesos de bombeo, transferencia de gases, mezclado, recolección y sobretodo la deshidratación de la biomasa de microalgas, se reflejan tanto de forma directa como indirecta en los costos de producción que en general superan con creces el costo de extracción y refinación de los combustibles fósiles.

No obstante, los costos de producción del biocombustible de microalgas se pueden reducir aplicando diversas estrategias entre las que se deben incluir: los nuevos avances en la tecnología de los fotobioreactores, la disminución de los costos para la recolección de la biomasa, el uso de reacciones de transesterificación que no requieran de etapas previas de deshidratación del material, la recuperación del recurso hídrico a partir de las aguas residuales.

Por otra parte, se dispone de la tecnología para modificar las propiedades metabólicas de las microalgas mediante la ingeniería genética a fin de mejorar la productividad, incrementar la concentración de aceite en las células y controlar procesos como la fotoinhibición y la fotooxidación que reducen la tasa efectiva de fotosíntesis del alga.

## REFERENCIAS

[1] Burlew J. [1953]. *Algal culture from laboratory to pilot plant*. Carnegie Institution of Washington, Washington DC, 357

[2] Slade R. y Bauen A. [2013]. Microalgae cultivation for biofuels: cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. *Biomass and bioenergy* 53 : 29-38

[3] Mann G., Schlegel R., Schumann G. y Sakalauska A. [2009]. Biogas-conditioning with microalgae. *Agronomy Research* 7[1]: 33-38.

[4] Weissman J. y Tillett, D. [1989]. *Design and operation of an outdoor microalgae test facility*. *Aquatic Species Program*. Annual report. Bollmeier WS, Sprague S [eds.] Solar Energy research Institute golden Soeder C. [1986]. *An historical outline of applied algology*. In

Richmond A [ed.], *Handbook of Microalgal Mass Culture*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 25-41

[5] Soeder C. [1986]. *An historical outline of applied algology*. In Richmond A [ed.], *Handbook of Microalgal Mass Culture*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 25-41

[6] Chisti Y. [2007]. *Biodiesel from microalgae*. *Biotechnology Advances* 25: 294–306

[7] Ben-Amotz A., Tornabene T. y Thomas W. [1985]. Chemical profile of selected species of microalgae with emphasis on lipids. *J. Phycol.* 21: 72-81.

[8] Fischer C., Klein-Marcuschamer D. y Stephanopoulos G. [2008]. *Selection and optimization of microbial hosts for biofuels production*. *Metab. Eng.* 10: 295-304.

[9] Gao Y , Gregor C. , Liang Y. , Tang D. y Tweed C. [2012]. *Algae biodiesel a feasibility report*. *Chemistry Central Journal* 6 [Suppl 1] : S1

[10] Hernández-Pérez A. y Labbé J. [2014]. *Microalgas, cultivo y beneficios*. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* Vol. 49, Nº2: 157-173.

[11] Chakravorty U., Hubett M., Nøstbakken L. [2009]. *Fuel versus food*. *Annu. Rev. Resour. Econ.* 1: 645-663.

[12] FAO [2008]. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*.

[13] CEPAL [2008]. Comisión Económica para América Latina y el Caribe *Biocombustibles líquidos para transporte en América Latina y el Caribe*

[14] Williams P. [2007]. Biofuel: microalgae cut the social and ecological costs. *Nature*, 450: 478

[15] CEPAL [2011]. Comisión Económica para América Latina y el Caribe Estudio regional sobre la economía de los biocombustibles en 2010: temas clave para los países de América Latina y el Caribe

[16] International Energy Agency [2011]. *Annual Report 2010. Algal Biofuels Status and Prospects* IEA Bioenergy Task 39

[17] Ación F. , Fernández J. , Magán J. y Molina E. [2012]. *Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it*. *Biotechnology Advances* 30: 1344-1353

[18] Chaumont D. [1993]. Biotechnology of algal biomass production: a review of systems for outdoor mass culture. *Journal of Applied Phycology* 5: 593-604,

[19] Brennan L. y 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* 14: 557–577

[20] Deng X, Li Y. y Fei X. [2009]. *Microalgae: A promising feedstock for biodiesel* *African Journal of Microbiology Research* 3: 1008-1014

[21] Garibay A. , Vázquez R. , Sánchez M., Serrano L. , y Martínez A. [2009]. *Biodiesel a Partir de Microalgas*. *BioTecnología*, Vol. 13 No. 3

[22] Borowitzka M. [1999]. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of Biotechnology* 70: 313-332

[23] Berenguel M., Rodríguez G. , Ación M. y García J. [ 2004 ]. *Model predictive control of pH in tubular photobioreactors*. *Journal of Process Control* 14: 377-387

[24] Laws E. , Taguchi S., Hirata J., Pang L. [1988]. *Mass culture optimization studies with four marine microalgae*. *Biomass* 16: 19-32.

[25] Richmond A. [1992]. Open systems for the mass production of photoautotrophic microalgae outdoors: physiological principles. *J. appl. Phycol.* 4: 281-286.

[26] Terry K. y Raymond L. [1985]. *System design for the autotrophic production of microalgae*. *Enzyme Microb. Technol.* 7: 474-487.

[27] Stephenson A., Kazamia E., Dennis J., Howe, C., Scott, S. y Smith, A. [ 2010 ]. Life-cycle assessment of potential algal biodiesel production in the United Kingdom: A Comparison of raceways and air-lift tubular bioreactors. *Energy Fuels*, 24 [7]: 4062–4077.

[28] Liu B. y Zhao Z. [2007]. Biodiesel production by direct methanolysis of oleaginous microbial biomass. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 82: 775-780.



- [29] Ho S. , Chen C. y Chang J. [2012]. Effect of light intensity and nitrogen starvation on CO<sub>2</sub> fixation and lipid/ carbohydrate production of an indigenous microalga *Scenedesmus obliquus* CNW-N. *Bioresource Technology* 113: 244-252
- [30] Parker M. , Mock T., Armbrust E. [2008]. *Genomic insights into marine microalgae*. *Annu. Rev. Genet.* 42: 619-645.
- [31] Diversified Technologies, Inc. Company Profile . Disponible en: <http://www.divtecs.com/company-profile/> . Consultado en septiembre 2016
- [32] OriginOil Inc . Directory: OriginOil. Disponible en: <http://peswiki.com/directory:originoil> Consultado en septiembre de 2016
- [33] González-López C. , Acién F. , Fernández-Sevilla J. y Molina E. [2011]. *Uso de microalgas como alternativa a las tecnologías disponibles de mitigación de emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub>*. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental Algal* 2[2]: 93-106.
- [34] Zeng X., Danquah M., Dong-Chen X. y Lu Y. [2011]. *Microalgae bioengineering: From CO<sub>2</sub> fixation to biofuel production*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 3252-3260.
- [35] Schenk P. , Thomas-Hall S. , Stephens E., Marx U. , Mussgnug J., Posten C., Kruse O. y Hankamer B. [2008]. *Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production*. *Bioenerg. Res.* 1: 20-43.
- [36] Chiu S. , Kao C., Huang T., Lin C. , Ong S. , Chen C. , Chang J. y Lin C. [2011]. Microalgal biomass production and on-site bioremediation of carbon dioxide, nitrogen oxide and sulfur dioxide from flue gas using *Chlorella* sp. cultures. *Bioresource Technology* 102: 91359142.
- [37] Park J. , Craggs R. y Shilton A. [2011]. *Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production*. *Bioresource Technology* 102: 35-42.
- [38] Peña-Castro J. , Martínez-Jerónimo F. , Esparza-García F. y Cañizares-Villanueva R. [ 2004 ]. *Heavy metals removal by the microalga Scenedesmus incassatus in continuous cultures*. *Bioresource Technology* 94: 219-22
- [39] Harun R., Singh M., Forde G. y Danquah M. [2010]. *Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 1037-1047.
- [40] Richmond A., Lichtenberg E., Stahl B. y Vonshak A. [1990]. Quantitative assessment of the major limitations on productivity of *spirulina platensis* in open raceways. *Journal of Applied Phycology* 2: 195-206
- [41] Spolaore P., Joannis-Cassan C., Duran E. y Isambert A. [2006]. *Commercial Applications of Microalgae*. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 101[2]: 87-96
- [42] Wijffles R. y Barbosa, M. [2010]. *Perspective: An outlook on microalgal biofuels*. *Science*: 329: 796 – 799
- [43] Freyssenet M. [2011]. *Lo más dudoso no es lo más improbable, el coche eléctrico. La nueva revolución del automóvil*. *Jornada internacional. Movilidad sostenible y el vehículo eléctrico , el motor de la innovación*.
- [44] BBC NEW. Science & Environment . [2016] *Solar Impulse completes historic round-the-world trip*. Disponible en: <http://www.bbc.com/news/scienceenvironment-36890563>. Consultado en junio 2017