

Empleo de las microalgas en la fijación del CO₂ presente en los gases de chimenea de equipos industriales de combustión en Colombia

Andrea Paola Díaz Ovalle
Microbióloga con énfasis en el sector industrial
Esp. Química Ambiental,
Universidad Industrial de Santander
anpadiov@yahoo.com

Ricardo Restrepo Manrique
Esp. Química Ambiental,
Docente, Investigador Grupo GIADS,
Universidad Santo Tomás USTA
Bucaramanga, Colombia
restrepo.manrique@gmail.com

Resumen— El dióxido de carbono es uno de los Gases Efecto Invernadero (GEI) que se genera debido a las diferentes actividades realizadas por las industrias, que incrementan su concentración en la atmósfera y contribuyen al calentamiento global.

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos que han sido objeto de estudio por sus aplicaciones productivas y comerciales en el campo alimenticio y farmacéutico. Tenida en cuenta su capacidad para fijar el dióxido de carbono, investigadores han encontrado en ellos una alternativa para aprovechar el CO₂ de los gases de chimenea de equipos industriales y han proporcionado una tecnología ambiental para minimizar emisiones. Actualmente su empleo arroja altos valores de inversión y mantenimiento del sistema de cultivo, debido al desconocimiento e inexperiencia en el campo, por lo que se debe establecer un plan a mediano y largo plazo, según el progreso de cada una de las etapas del proceso.

Aunque el tema no ha sido profundizado en Colombia, las condiciones climáticas del país lo hacen apto para su producción y así determinar la viabilidad del proceso. Su aplicación traería beneficios económicos y ambientales a las industrias nacionales al efectuar proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), y a su vez se pueden obtener subproductos del cultivo de microalgas de gran valor.

Palabras clave— Dióxido de carbono, microalgas, gases de chimenea.

Abstract— The carbon dioxide is one of the Greenhouse Gases (GHG) that is generated due to the different activities of the industries, increasing the atmospheric concentration of CO₂ and contributing with the global warming.

The microalgae are photosynthetic microorganisms, they have been under study for its production and trade applications in the field of food and pharmaceutical. They have the capacity to fix the carbon dioxide and the investigators found in the microalgae an alternative to make use of CO₂ present in the flue gases of industrial equipment, providing an environmental technology for

minimize emissions. Currently its use gives high levels of investment and maintenance of the culture, due to ignorance and inexperience in the field. There must be a plan for medium and long term, keeping in mind the progress in each of the stages of process.

Although the subject is recent in Colombia, the climatic conditions make it suitable for production and determine the feasibility of the process. Its application would bring economic and environmental benefits to national industries when they carry out projects of Clean Development Mechanism (CDM), and can be obtained microalgal culture products of high value.

Keywords— Carbon dioxide, microalgae, flue gases

* Trabajo monográfico para optar al título de Especialista en Química Ambiental en la Universidad Industrial de Santander.

I. INTRODUCCIÓN

Según mediciones realizadas en el año 2000, la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera ha alcanzado una cifra de 387 ppm, que significa un crecimiento de casi el 40% desde la revolución industrial [1].

Grupos de investigación en busca de alternativas medio ambientales han planteado la posibilidad de determinar el potencial de los sistemas de cultivo de microalgas para mitigar o disminuir las emisiones de CO₂ [2].

Su aplicación implica una inversión de tipo económico e intelectual, debido a que es un tema del que se conoce poco. Algunos de los subproductos que se pueden obtener del cultivo de las microalgas son bio-combustible, fertilizantes y alimento animal.

La información recolectada para el desarrollo del trabajo se basó en los sistemas y condiciones

de cultivo de las microalgas, los productos que se obtienen a partir de estas, diversos estudios en la biofijación del CO_2 y su aplicabilidad.

A. Generalidades de las Microalgas

Son un conjunto de microorganismos fotosintéticos unicelulares procariontes y eucariontes, que se localizan en hábitats diversos como aguas marinas, dulces, salobres, residuales o en el suelo, bajo un amplio rango de temperaturas, pH y disponibilidad de nutrientes. Se han identificado alrededor de 40,000 especies aunque se estima que son 100,000, de las que se desconoce su composición bioquímica y metabolismo [3]. Las microalgas son muy importantes ya que son los principales productores primarios de materia orgánica a través de la fotosíntesis. Contribuyen con el 50% de la actividad fotosintética del planeta y forman la base de la cadena alimenticia para más del 70% de la biomasa del mundo [4]. Algunas de las divisiones microalgales más representativas son: Cyanophyta, Euglenophyta, Cryptophyta, Chrysophyta, Pyrrophyta y Chlorophyta.

Cerca del 90% de su peso seco está constituido por proteínas, lípidos y carbohidratos además de presentar ácidos nucleicos, vitaminas hidro y liposolubles, pigmentos y minerales.

B. Parametros de Cultivo

Las microalgas para su crecimiento y desarrollo deben contar con condiciones óptimas. La luz es la fuente de energía para realizar la fotosíntesis y así lograr los nutrientes necesarios, en este proceso, es útil el rango del espectro lumínico comprendido entre los 400 y 700 nm de longitud de onda [5]. Su temperatura de crecimiento es de 15 a 40°C, de acuerdo a cada especie, debido a que su respuesta a variaciones en la temperatura puede afectar sus requerimientos nutricionales, metabolismo y composición celular [6]. Por la carencia o abundancia de las sales necesarias para su desarrollo, se puede llegar a inhibir el crecimiento de las microalgas [7].

El pH es uno de los factores más importantes en el cultivo. Cada microalga tiene un pH óptimo para su cultivo (entre 7,0 y 8,0). Este se ve afectado por la cantidad de dióxido de carbono disuelto y la temperatura que, a su vez, controla la solubilidad del CO_2 , la actividad metabólica de las microalgas y la fuente de nitrógeno suministrada

para el crecimiento [8]. Los nutrientes requeridos se clasifican como macronutrientes, los cuales incluyen el carbono, nitrógeno, fósforo, calcio, magnesio, azufre y potasio. Por otro lado se encuentran los micronutrientes o elementos trazas como el cobre, hierro y zinc. Los requerimientos nutricionales varían según el tipo de microalga [9]. Una concentración alta de oxígeno producido por la fotosíntesis es un importante factor inhibitorio de crecimiento que se debe tener en cuenta en el cultivo de las microalgas. La supersaturación del oxígeno puede llevar a la inhibición de la fotorespiración y la muerte de la microalga por fotooxidación [10]. Las fuentes de agua para el cultivo pueden ser salinas (mar), dulces (ríos, lagos u otros) y aguas residuales del sector agropecuario.

La inyección de CO_2 en el cultivo previene la sedimentación de las microalgas y asegura que todas las células reciban la misma exposición a la luz y los nutrientes. El crecimiento de las microalgas puede inhibirse según la concentración de dióxido de carbono presente en el medio de cultivo. Esto depende del tipo de especie que se emplee. [11].

C. Sistemas de Cultivo

Los sistemas de cultivo de biomasa microalgal a gran escala pueden ser abiertos como los estanques o cerrados como los fotobioreactores.

1) *Sistemas de cultivo abiertos*

A nivel industrial la producción es hecha en tanques abiertos, con la operación en régimen continuo y semicontinuo, además de realizarse el control de los parámetros más importantes [12]. El sistema se puede realizar al aire libre, el cual consiste en piscinas descubiertas a las cuales se les suministran nutrientes para que las microalgas puedan reproducirse a un ritmo acelerado. Es el sistema menos eficiente aunque el más económico. Por otro lado puede realizarse bajo condiciones de invernadero, las ventajas de este sistema son un mejor control de la temperatura y una pérdida muy reducida de agua. Los materiales para la construcción del estanque dependen del tipo que se desea usar. En el caso de uno tipo pista requiere concreto, fibra de vidrio o materiales que garanticen la sostenibilidad en el tiempo y buena iluminación. También el plástico es una opción por su bajo costo. Las dimensiones típicas son de 30 cm de profundidad y entre 100 a 250 hectáreas [13].

Los tanques más usados son:

- Tanque circular: presenta un brazo de rotación, el cual puede ser operado en aguas de una profundidad de 10-20 cm con un sistema de mezclado para así prevenir sedimentación de células. [14].
- Tanque circular con agitación: de 45 m de diámetro y 30 a 70 cm de profundidad, en algunos casos son cubiertos con fibra de vidrio. Su diseño es menor a 10 hectáreas debido a la incapacidad del brazo de mezclar todo el cultivo uniformemente.
- Tanques tipo pista solo o en grupo: son poco profundos, entre 15 a 25 cm de profundidad y cubre cerca de 0,5 a 0,6 hectáreas. Hay sistemas para el mezclado como aspas y bombas de aire, lo que le proporciona una mayor productividad. Pueden estar forrados con plástico o cemento [15].

2) Sistemas de cultivo cerrados

Son sistemas de cultivo cerrados, donde los conductos transparentes son aislados de exterior. Los parámetros como nutrientes, luz, intercambio de gases entre otros están controlados técnicamente. Los costos económicos y energéticos adicionales son altos, pero la contaminación es baja. Pueden estar situados dentro de invernaderos de plástico o de cristal, para disponer de una temperatura ambiente más elevada.

Hay diferentes tipos de fotobioreactores y se encuentran:

- Tubos plásticos o de vidrio de forma triangular: Se hacen fluir los gases de CO₂ y O₂ desde la parte baja de la hipotenusa y las microalgas con medio de cultivo fluyen en sentido opuesto.
- Tubulares en forma horizontal: son túbulos hechos de acrílico, vidrio, plástico o teflón con aprox. 3-6 cm de diámetro y de 10-100 m de longitud. El cultivo pasa a través de estos tubos por medio de bombas. Los tubos pueden estar organizados vertical, horizontal o cónico helicoidal. La temperatura se controla con enfriamiento evaporativo o intercambio de calor.
- Columna vertical de burbujas: Se genera circulación del medio con microalgas en una columna vertical a través del flujo de gases como dióxido de carbono. Se ilumina a través de tubos de luz y su objetivo es disminuir el

costo del cultivo a gran escala y hacerlo más simple.

- Flat Panel Reactors (Reactores de paneles planos): Consiste en una caja rectangular transparente con 1 a 5 cm de profundidad. Una capa fina de suspensión de células circula por una placa, lo cual permite que la luz pueda ser absorbida.

3) Mantenimiento de los sistemas de cultivo

Los *biofilms* que se forman en las paredes reduce la penetración de la luz. Este inconveniente se puede manejar al mantener un alto flujo de turbulencia con bombas de aire y lavar con peróxido de hidrógeno para remover partículas pequeñas. La remoción del agua se debe realizar para evitar el estancamiento de la misma y así evitar adherencia de microalgas a las paredes de los estanques, dificultar la cosecha de éstas y aumentar el intercambio del agua con el oxígeno [16].

II. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Biofijación del Dióxido de Carbono de los Gases de Chimenea

En diferentes grupos de investigación se ha estudiado la eficiencia de fijación de CO₂ por las microalgas por medio de la fotosíntesis. A escala de laboratorio Cheng *et al* en 2006 encontró una eficiencia de 6,24 g CO₂/L/día, si se mantiene esta tasa en un bioreactor a gran escala, la captura sería de 26 Kg/h de dióxido de carbono en un reactor de 100.000L o 114 T/año asumiendo días lumínicos de 12 h. Kajiwara *et al* en 1997 encontró que la cepa *Synechococcus* alcanzó una tasa máxima de absorción de CO₂ de 0,025 g/L/h o 0,6 g/L/día en una concentración de masa celular de 0,286 g/L. Si se aplica una ampliación a escala, equivaldría a un biorreactor de tamaño de 4000 m³ con una tasa de fijación promedio de 1 tonelada de CO₂/h de las fuentes de emisión.

Hirata *et al* en 1996 utilizó la cepa *Chlorella* sp. UK001. La tasa media de fijación de CO₂ fue de 0,0318 g CO₂/L/día. La eficiencia de conversión de energía a biomasa se estimó en 4,3%.

Murakami *et al* en 1997 utilizaron la cepa *Synechocystis* en un biorreactor de 5 litros con condiciones optimizadas, alcanzaron una velocidad máxima de fijación de CO₂ de 1,5 g CO₂/L/día. La cepa *Botryococcus braunii*, alcanzó una tasa

de crecimiento de alrededor de 0,5 g / L / día. La biomasa de esta microalga en particular contenía más del 15% de su peso seco como hidrocarburos, y su tasa de fijación de CO₂ superó a 1 g / L / día [17].

Dentro de los estudios realizados se plantea la posibilidad de acoplar a las chimeneas de emisión de CO₂ de las fábricas a un cultivo de las microalgas aprovechando dicho gas como fuente de carbono para su crecimiento y desarrollo, en lugar de ser emitido a la atmósfera, donde colabora con el efecto invernadero [18].

Cerca del 90% ó más del CO₂ inyectado en los estanques puede ser utilizado eficientemente por las microalgas [19]. Identificar las concentraciones de dióxido de carbono a las que las microalgas son tolerantes es importante, teniendo en cuenta que se tiene como fuente las emisiones de chimenea y asumiendo que presenta una cantidad de CO₂ disuelto en los gases a una concentración entre 15-20% v/v aproximadamente. Muchas especies han sido evaluadas en concentraciones por encima del 15%. Kodama *et al* en 1994, encontraron que *Chlorococcum littorale* puede crecer a 60% de CO₂ mediante técnicas de adaptación. Nakano *et al* en 1996, estudiaron la *Euglena gracilis*, la cual puede crecer entre 5-45% en presencia del gas, aunque su crecimiento es el mejor al 5%. Hirata y Hanagata en sus respectivos grupos de investigación manifestaron que *Chlorella sp* puede desarrollarse con éxito bajo un 10% de dióxido de carbono y aún con un 40%.

Scenedesmus sp crece a un 80%, pero su máxima masa celular se observó entre 10-20% según Haganata *et al* en 1992. *Cyanidium caldarium* y otras especies pueden crecer en CO₂ puro según estudios de Graham y Wilcox en 2000.

En algunas investigaciones se han encontrado microalgas tolerantes a ciertas concentraciones de gases ácidos como NO_x y SO₂, el caso de *Nannochloris sp*, *Dunaliella tertiolecta*, *Tetraselmis sp* y *Chlorella* según las condiciones de crecimiento. Las microalgas pueden asimilar la cantidad de CO₂ disuelto en el medio de cultivo a unas concentraciones entre 0.04 - 100% v/v, seleccionada la especie adecuada y un rango de temperatura de 25 a 100°C con la tecnología apropiada [20]. Seambiotic es la primera empresa en el mundo que ha desarrollado el cultivo y procesamiento de las microalgas marinas con gases de combustión

de Plantas Eléctricas. Se encuentra ubicada en Israel y plantea un sistema que consiste en conductos de desulfurización llamados FGD (Conductos de Gas para Desulfurización), la cual es una tecnología encargada de retirar el dióxido de sulfuro de las emisiones de las chimeneas, para evitar alguna inhibición por estos gases y poder ser asimilado el CO₂ por las microalgas. A partir de ello la planta produce yeso como subproducto y es reciclado como tablas de yeso o cemento. El SO₂ (óxido de azufre) es un gas ácido que puede ser removido con un material absorbente o de tipo alcalino [21].

CULTIVO DE LAS MICROALGAS

El inóculo de microalgas requerido para producción es pequeño, de acuerdo al tamaño de los estanques o fotobioreactores. Es cerca del 1-2% de la biomasa total [22].

Universidades y empresas dedicadas a su estudio han identificado el potencial de diferentes microalgas basándose en los subproductos que generan y sus condiciones de crecimiento. Dentro de la revisión bibliográfica realizada se elaboró una lista de las más importantes hasta el momento basándose en los estudios reportados. A continuación la Tabla 1 indica las microalgas más destacadas.

Tabla 1. Microalgas estudiadas con capacidad de biofijar dióxido de carbono según investigadores

Microalga	Fuente
Botryococcus braunii	HENNEBERG, 2009 PRIBALDI, 2009 ATEHORTUA, 2008
Chlorella sp	
Cryptocodinium cohnii	
Cylindrotheca sp	
Dunaliella primolecta	
Euglena gracilis	
Isochrysis sp	
Monallanthus salina	
Nannochloris sp	
Nannochloropsis sp	
Neochloris oleoabundans	
Nitzschia sp	
Phaeodactylum tricornutum	
Schizochytrium sp	
Spirulina sp	
Tetraselmis sueica	
Scenedesmus sP	QUEVEDO, 2006

Fuente: Autor

La producción de microalgas y la obtención de sus productos es uno de los campos menos explorados en Colombia, falta investigar las cepas silvestres y determinar su posible aplicación a nivel industrial. La Universidad de Antioquia a través de un grupo de investigadores del Instituto de Microbiología ha desarrollado estudios para la aplicación de las microalgas en la producción de biocombustible y así llegar a establecer un prototipo de cultivo [23]. En el Grupo de Bioprocesos del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad ya mencionada, se realizaron pruebas con la microalga *Scenedesmus sp*, debido a que posee niveles de lisina superiores al patrón de la FAO, proporcionó una aplicación potencial en la industria de alimentos balanceados para animales [24]. Por otro lado, un estudio científico de la Universidad Nacional desde hace dos años se concentró en hallar microalgas colombianas capaces de producir biocombustible, al investigar los géneros *Chlorella* y *Botryococcus* para agua dulce, y *Nanochloropsis* e *Isochrysis* para agua salada. En el país las pocas investigaciones realizadas no han tenido gran alcance, falta inversión y apoyo por parte del Estado, lo que impide la elaboración de estudios más profundos sobre estos microorganismos para obtener mayores beneficios [25]. El clima en el país es tropical, mantiene una temperatura uniforme la mayor parte del año. Está determinado por aspectos geográficos y atmosféricos que desarrollan un amplio mosaico de climas que van desde 30°C (nivel del mar) hasta temperaturas bajo 0°C (alta montaña en nieves perpetuas). Algunas ciudades como Barranquilla, Santa Marta y Cartagena tienen una temperatura media anual de 27-28 °C, la cual es óptima para el cultivo y producción de las microalgas [26]. El potencial energético solar en todo el territorio tiene un promedio diario multianual cercano a 4,5 kWh/m², en la península de La Guajira tiene un valor de 6,0 kWh/m² [27]. La intensidad media de radiación medida fuera de la atmósfera en un plano normal es aproximadamente de 2.26 kW/m² [28].

B. Cosecha del Sistema de Cultivo

En la producción de microalgas se conocen diferentes técnicas para la cosecha como son:

- Filtración: Separa el cultivo en una fase líquida y en una sólida, la cual contiene los microorganismos o biomasa.

- Centrifugación: Se basa en la diferencia de densidad entre las microalgas y el medio líquido, extrae el 80-90% con un aceleración de 500 a 1000 rpm. Se aplica a cultivos pequeños debido a su alto costo energético, por lo que a gran escala resulta muy costoso.
- Biofloculación: Es un proceso espontáneo de floculación- sedimentación de las células en el cual se conoce poco las causas de este fenómeno. Otra técnica consiste en interrumpir el flujo de CO₂ que ocasiona auto-floculación [29].
- Floculación química: Se usa aluminio, cloruro férrico y Chitosin, el cual es un producto comercial. Su aplicación es costosa, si se tiene en cuenta que la cosecha se realiza en sistemas a amplia escala [30]. Los técnica para realizar la cosecha del cultivo se pueden combinar entre si, como filtración seguida de sedimentación o la centrifugación y posterior floculación química [31]. El 20 a 40% del volumen del tanque puede ser cosechado diariamente, teniendo en cuenta la época del año y otros factores. En el momento no se ha encontrado una tecnología para la cosecha a bajo costo y práctica, debido a que las características de los métodos anteriormente expuestos dificultan su aplicación industrial [32].

Aplicaciones de las Micro algas

Las aplicaciones productivas y comerciales de las microalgas son numerosas, van desde la producción de suplementos alimenticios y nutricionales de consumo humano y animal hasta la obtención de productos activos para la industria farmacéutica y cosmética.

Las microalgas pueden llegar a ser una fuente renovable de bio-combustible pues producen, biodiesel, bioetanol, metanol e hidrógeno, además de servicios medio ambientales como tratamiento de aguas residuales. Los restos de biomasa pueden utilizarse para compost y fertilizantes [33]. Las microalgas deben competir con la industria de síntesis química y petroquímica, así como con la agricultura para crear un interés en la economía e industria contemporánea. Algunos productos que representan ganancia son carotenoides, ácidos grasos poliinsaturados y polisacáridos, debido a

su uso en el campo farmacéutico y alimenticio [34].

C. Costos de la Producción

Calcular los costos de un sistema de cultivo de microalgas es complejo debido a que se debe tener en cuenta diferentes puntos del proceso. Según Rosch, en su artículo estima la producción de biomasa en 4.785 a 11.964 dólares por kilogramo, y el tipo de cosecha empleado influye en la variación del valor [35]. Por otro lado un análisis de viabilidad económica y de ingeniería realizado por una empresa privada manifiesta que al trabajar con un tanque abierto sencillo, el sistema en general puede tener un costo de por lo menos \$100,000 dólares por hectárea. Además habría que sumar los costos de operación, la locación que debe tener un clima favorable, disponibilidad de agua (puede ser salina, salobre o agua residual), fuente de CO₂ y en una zona plana [36].

Para hacer rentable su aplicación se debe obtener productos que representen un valor adicional como alimentos para animales, fertilizantes, biocombustibles, es decir multipropósito [37].

III. CONCLUSIONES

Desde comienzos del siglo pasado se han estudiado las microalgas y su potencial productivo. Grupos de investigación de universidades y empresas privadas han trabajado en obtener una producción a escala industrial económicamente factible, para lo que sería necesario superar obstáculos biotécnicos, medio ambientales y de costos. Es necesario desarrollar un cultivo, cosecha y sistemas de extracción de nutrientes con una alta productividad.

La rentabilidad del cultivo de microalgas es posible aplicándolas como biofijadores de dióxido de carbono de gases de chimenea y en el tratamiento de aguas residuales, así como la producción de suplementos alimenticios para humanos y animales.

En Colombia no se han realizado investigaciones acerca de las microalgas como fijadoras de CO₂ presente en los gases de chimenea de equipos industriales, lo cual sería una alternativa ambiental a la contaminación generada.

Las condiciones climáticas del país lo hacen apto para su producción, lo cual hace posible es-

tudiar las microalgas en el medio, que determinan así la viabilidad del proceso. La aplicación del sistema de cultivo depende más de la capacidad de inversión, debido a que los fotobioreactores cuentan con tecnología más avanzada, controlada y por ende representa un mayor costo. Los tanques abiertos son más económicos, se pueden mantener al aire libre y controlar algunos parámetros de importancia, pero son menos eficientes.

La aplicación de esta tecnología por las industrias nacionales les permitiría implementar proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), crear un bien ambiental viable, una asistencia financiera para la promoción del desarrollo sostenible y beneficios adicionales según los protocolos de Kyoto y Copenhague. Por otro lado, se puede obtener subproductos como fertilizantes, alimento para animales, bio-combustible, según el del microorganismo empleado.

A medida que una nueva tecnología se da a conocer los costos disminuyen. Según información recopilada durante la revisión bibliográfica, su aplicación arroja altos valores de inversión y mantenimiento del sistema de cultivo, debido al desconocimiento e inexperiencia en el campo.

Según un estudio realizado por Krishnahadi Pribaldi en el 2009 en Indonesia, el desarrollo de este tipo de tecnología debe establecer un plan a mediano y largo plazo, realizar una inversión paulatina y tener en cuenta el progreso de cada una de las etapas del proceso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Industrial de Santander, Escuela de Química, por el apoyo técnico en el desarrollo de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] La concentración de CO₂ en la atmósfera alcanza niveles récord. [artículo de internet]. [http://www.cambio-climatico.com/la-concentracion-de-CO₂-en-la-atmosfera-alcanza-niveles-record](http://www.cambio-climatico.com/la-concentracion-de-CO2-en-la-atmosfera-alcanza-niveles-record). [Consulta: 20 febrero de 2010].
- [2] MOHEIMANI, Navid. The culture of Coccolithophorid algae for carbon dioxide bioremediation [Tesis de Doctorado]. Australia: Murdoch University. 2005. 35-41p. <http://www.lib.murdoch.edu.au/adt/pubfiles/adt->

- MU20050901.140745/02Whole.pdf. [Consulta: 22 marzo de 2009].
- [3] GARIBAY, Adriana, et al. Biodiesel a partir de microalgas. *BioTecnología* 2009; 13 (3): 38-61. http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2009_3/Biodiesel.pdf. [Consulta: 20 mayo de 2009].
- [4] QUEVEDO, Catalina. Selección de un medio de cultivo para la producción de proteína microalgal a partir de *Scenedesmus* sp [Tesis de pregrado]. Medellín: Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería; 2006. 23 p.
- [5] GARIBAY, Adriana, et al. Biodiesel a partir de microalgas. *BioTecnología* 2009; 13 (3): 38-61. http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2009_3/Biodiesel.pdf. [Consulta: 20 mayo de 2009].
- [6] MOHEIMANI, Navid. The culture of Coccolithophorid algae for carbon dioxide bioremediation [Tesis de Doctorado]. Australia: Murdoch University. 2005. 35-41p. <http://wwwlib.murdoch.edu.au/adt/pubfiles/adt-MU20050901.140745/02Whole.pdf>. [Consulta: 22 marzo de 2009].
- [7] MOHEIMANI, Navid. The culture of Coccolithophorid algae for carbon dioxide bioremediation [Tesis de Doctorado]. Australia: Murdoch University. 2005. 35-41p. <http://wwwlib.murdoch.edu.au/adt/pubfiles/adt-MU20050901.140745/02Whole.pdf>. [Consulta: 22 marzo de 2009].
- [8] QUEVEDO, Catalina. Selección de un medio de cultivo para la producción de proteína microalgal a partir de *Scenedesmus* sp [Tesis de pregrado]. Medellín: Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería; 2006. 23 p.
- [9] QUEVEDO, Catalina. Selección de un medio de cultivo para la producción de proteína microalgal a partir de *Scenedesmus* sp [Tesis de pregrado]. Medellín: Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería; 2006. 23 p.
- [10] MOHEIMANI, Navid. The culture of Coccolithophorid algae for carbon dioxide bioremediation [Tesis de Doctorado]. Australia: Murdoch University. 2005. 35-41p. <http://wwwlib.murdoch.edu.au/adt/pubfiles/adt-MU20050901.140745/02Whole.pdf>. [Consulta: 22 marzo de 2009].
- [11] RAMOS, Carlos, et al. Maximization of *Scenedesmus dimorphus* lipid yield for the production of biodiesel [Tesis de pregrado]. San Juan: Universidad Politécnica de Puerto Rico. Facultad de Ingeniería; 2010. <http://www.slideshare.net/kabronic/maximization-of-scenedesmus-dimorphus-lipid-yield-for-the-production-of-biodiesel>. [Consulta: 1 abril de 2010].
- [12] HENNENBERG, Klaus, et al. Aquatic Biomass: Sustainable Bio-energy from algae? [artículo en Internet] http://www.bioenergywiki.net/International_Workshop_on_Sustainable_Bioenergy_from_Algae. [Consulta: 18 abril de 2010].
- [13] Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Producción de biodiesel a partir de microalgas: Introducción a la Ingeniería Bioquímica. 2009; 1-20p. www.monografias.com/...microalgas/produccion-biodiesel-microalgas. [Consulta: 26 abril de 2010].
- [14] VEMA, Narendra, et al. Prospective of biodiesel production utilizing microalgae as the cell factories: A comprehensive discussion. *African Journal of Biotechnology*. 2010; 9 (10):1402-1411. <http://www.academicjournals.org/AJB>. [Consulta: 29 mayo de 2010].
- [15] MOHEIMANI, Navid. The culture of Coccolithophorid algae for carbon dioxide bioremediation [Tesis de Doctorado]. Australia: Murdoch University. 2005. 35-41p. <http://wwwlib.murdoch.edu.au/adt/pubfiles/adt-MU20050901.140745/02Whole.pdf>. [Consulta: 22 marzo de 2009].
- [16] Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Producción de biodiesel a partir de microalgas: Introducción a la Ingeniería Bioquímica. 2009; 1-20p. www.monografias.com/...microalgas/produccion-biodiesel-microalgas. [Consulta: 26 abril de 2010].
- [17] Phycomitigacion – Mitigación de dióxido de carbono en algas. [artículo de internet]. <http://www.ficoespectro.com/category/soluciones/>. [Consulta: 18 mayo de 2010].
- [18] BENEMAN, Jhon. Algae Biofuels-a brief introduction. [Artículo de Internet]. www.adelaide.edu.au/biogas/renewable/biofuels_introduction.pdf [Consulta: 23 marzo de 2010].
- [19] Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Producción de biodiesel a partir de microalgas: Introducción a la Ingeniería Bioquímica. 2009;

- 1-20p. www.monografias.com/...microalgas/produccion-biodiesel microalgas. [Consulta: 26 abril de 2010].
- [20] CUELLO, Joel y ONO, Eiichi. Selection of optimal microalgae species for CO₂ sequestration. [Artículo de Internet]. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/carbonseq/PDFs/158.pdf>. [Consulta: 29 mayo de 2010]
- [21] BEN-AMOTZ, Ami. Bio-fuel and CO₂ capture by algae. En: Third generation Biofuels; 2009 Feb 5; Paris. <http://newbusiness.grc.nasa.gov/wp-content/uploads/2008/12/benamotz-nasanov-2008.pdf>. [Consulta: 22 marzo de 2010].
- [22] BENEMAN, John, et al. Technology Roadmap for Biofixation of CO₂ and Greenhouse Gas Abatement with Microalgae. [artículo en Internet]. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/carbon-seq/PDFs> <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/carbon-seq/PDFs>. [Consulta: 16 febrero de 2010].
- [23] Microalgas una maravilla para biodiesel. [artículo en internet]. <http://biodiesel.com.ar/444/microalgas-una-maravilla-para-biodiesel>. [Consulta: 8 julio de 2010].
- [24] Crecimiento de *Scenedesmus* sp en diferentes medios de cultivo para la producción de proteína microalgal. [Artículo en internet]. <http://www.scielo.org.co/scielo.php?>. [Consulta: 8 julio de 2010].
- [25] Microalgas otra opción para producir biocombustible. [Artículo en internet]. <http://www.fede-biocombustibles.com/v2/nota-web-id-429.htm>. [Consulta: 8 julio de 2010].
- [26] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. [Artículo en internet]. <http://www2.ideam.gov.co/biblio/bol17/bol17a.htm>. [Consulta: 29 mayo de 2010].
- [27] Atlas de Radiación Solar de Colombia. [Artículo en internet]. http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/O-Primera_Parte.pdf. [Consulta: 16 julio de 2010].
- [28] Energía Solar. [artículo en internet]. <http://www.ecotec2000.de/espanol/sun1.htm>. [Consulta: 16 julio de 2010].
- [29] BENEMAN, Jhon. Algae Biofuels-a brief introduction. [Artículo de Internet]. www.adelaide.edu.au/biogas/renewable/biofuels_introduction.pdf [Consulta: 23 marzo de 2010].
- [30] ROSCH, Christine; SKARKA, Johannes y PATYK, Andreas. Microalgae-Opportunities and challenges of an innovative energy source. En: 17th European Biomass Conference and Exhibition; 2009 Jun 29-Jul 3; Alemania. <http://www.itas.fzk.de/deu/lit/2009/roua09b.pdf>. [Consulta: 16 febrero de 2010].
- [31] ROSCH, Christine; SKARKA, Johannes y PATYK, Andreas. Microalgae-Opportunities and challenges of an innovative energy source. En: 17th European Biomass Conference and Exhibition; 2009 Jun 29-Jul 3; Alemania. <http://www.itas.fzk.de/deu/lit/2009/roua09b.pdf>. [Consulta: 16 febrero de 2010].
- [32] BENEMAN, Jhon, et al. Technology Roadmap for Biofixation of CO₂ and Greenhouse Gas Abatement with Microalgae. [Artículo en Internet]. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/carbon-seq/PDFs>. [Consulta: 16 febrero de 2010].
- [33] BENEMAN, Jhon. Algae Biofuels-a brief introduction. [artículo de Internet]. www.adelaide.edu.au/biogas/renewable/biofuels_introduction.pdf [Consulta: 23 marzo de 2010].
- [34] Composición nutritiva de las microalgas. [artículo en Internet]. <http://www.ual.es/~jlguil/Investigacion/Composicion.htm> [Consulta 5 de mayo 2010].
- [35] ROSCH, Christine; SKARKA, Johannes y PATYK, Andreas. Microalgae-Opportunities and challenges of an innovative energy source. En: 17th European Biomass Conference and Exhibition; 2009 Jun 29-Jul 3; Alemania. <http://www.itas.fzk.de/deu/lit/2009/roua09b.pdf>. [Consulta: 16 febrero de 2010].
- [36] BENEMAN, Jhon. Algae Biofuels-a brief introduction. [Artículo de Internet]. www.adelaide.edu.au/biogas/renewable/biofuels_introduction.pdf [Consulta: 23 marzo de 2010].
- [37] ROSCH, Christine; SKARKA, Johannes y PATYK, Andreas. Microalgae-Opportunities and challenges of an innovative energy source. En: 17th European Biomass Conference and Exhibition; 2009 Jun 29-Jul 3; Alemania. <http://www.itas.fzk.de/deu/lit/2009/roua09b.pdf>. [Consulta: 16 febrero de 2010].