Viabilidad en la producción de biomasa microalgal a partir de fotobioreactores solares en el Valle del Cauca, Colombia

Viability in the production of microalgae biomass from solar photobioreactors in Valle del Cauca, Colombia

Viabilidade na produção de biomassa de microalgas de fotobiorreactores solares no Valle del Cauca, Colômbia

José Luís Ramírez Duque

Ingeniero Mecánico, Magister en Ingeniería Mecánica, Doctor Energía y Fluidos

Universidad Javeriana Cali, Universidad Autónoma de Occidente. Cali, Colombia.

joslurad@gmail.com

Resumen

Las microalgas son una importante fuente de materias primas para la producción de biocombustibles y otras sustancias finas que pueden contribuir con la actual necesidad de energías renovables sostenibles. Las condiciones ambientales y climáticas afectan directamente la producción de la biomasa de los cultivos microalgales y, en general, las condiciones del departamento del Valle del Cauca, Colombia, son óptimas dados los niveles de radiación solar y su intensidad todo el año debidos a su ubicación geográfica. Considerando el potencial futuro de las microalgas en biofábricas, en este artículo se presenta una revisión de los factores que intervienen en el desarrollo de los cultivos microalgales y la tecnología necesaria para su explotación, se analiza también la viabilidad de fotobiorreactores cerrados debido a su alta transferencia de masa, mayor aprovechamiento de radiación solar y reducción de la contaminación por microorganismos foráneos, los cual es fundamental en la producción de biomasa. Esta información es útil para la aplicación de ingeniería y el desarrollo futuro de tecnología eficiente y comercialmente viable para la producción de biocombustibles a partir de microalgas.

Palabras clave: biocombustibles; biomasa, microalgas; energía, fotobiorreactores

Abstract

Microalgae is an important source of raw materials for the production of biofuels and other fine substances that can contribute to the current need for sustainable renewable energies. Environmental and climatic conditions directly affect the production of biomass from microalgae crops and, in general, the conditions of the department of Valle del Cauca, Colombia, are optimal given the levels of solar radiation and its intensity all the year due to its geographical location. Considering the potential of microalgae in biofactory, this article presents a review of the factors involved in the development of microalgae crops; and the technology necessary for its exploitation. Also analyzes the viability of closed photobioreactors due to its high mass transfer, greater use

of solar-based and reduction of pollution by foreign microorganisms, which is fundamental in the production of biomass. This information is useful for the application of engineering and the future development of efficient and commercially viable technology for the production of biofuels from microalgae.

Key-words: biofuels; biomass, microalgae; energy, photobioreactors

Resumo

As microalgas são uma importante fonte de matérias-primas para a produção de biocombustíveis e outras substâncias finas que podem contribuir para a atual necessidade de energia renovável sustentável. As condições ambientais e climáticas afetam diretamente a produção de biomassa de culturas de microalgas e, em geral, as condições do departamento do Valle del Cauca, na Colômbia, são ótimas devido aos níveis de radiação solar e sua intensidade ao longo do ano devido à sua localização geográfica. Considerando o potencial futuro das microalgas em biocombustíveis, este artigo apresenta uma revisão dos fatores envolvidos no desenvolvimento de culturas de microalgas e a tecnologia necessária para sua exploração, também analisa a viabilidade de fotobiorreactores fechados devido à sua alta transferência de massa, maior uso de radiação solar e redução de poluição por microorganismos estrangeiros, que é fundamental na produção de biomassa. Esta informação é útil para a aplicação de engenharia e desenvolvimento futuro de tecnologia eficiente e comercialmente viável para a produção de biocombustíveis a partir de microalgas.

Palavras chave: biocombustíveis; biomassa, microalgas; energia, fotobiorreactores

Introducción

El calentamiento global se ha convertido en la mayor problemática ambiental de la actualidad, que es generada principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero principalmente de los sectores industrial y de transporte (Chen *et al.,* 2010; IPCC, 2001 & Ormerod *et al.,* 2002). Esto acompañado de manera directa de un aumento en la demanda de energía a partir de combustibles fósiles, provocando un descenso en las reservas globales y por ende, un aumento en el precio (IPCC, 2007; BP, 2009), además se requiere plantear estrategias de reducción de niveles de contaminación como el cambio de carbón y petróleo a fuentes menos contaminantes (Urgate, 2003; EEA, 2009; Laherrere, 2005). Según Matta *et al.* (2010) para que los biocombustibles sean vistos como una medida real y contundente en la disminución de emisiones de CO2, además de hacer una sustitución gradual de éstos (FAO, 2000; Schenk *et al.,* 2008; Singh *et al.* (2010); Christi, 2007); se deben contemplar fuentes naturales que no pongan en riesgo la biodiversidad, el conflicto por uso de tierra y/o la seguridad alimentaria mundial (Demirbas & Demirbas, 2011; Beer *et al..,* 2009; Li *et al.,* 2008; Yuan *et al.,* 2008 & Carvalho *et al.,* 2006).

Colombia puede llegar a ser un potencial productor de biocombustibles debido al comportamiento ambiental, climático y/o atmosférico que presentan diversas regiones del país, en especial el departamento del Valle del Cauca, Colombia. Este artículo analiza desde un punto de vista climático y medioambiental, la viabilidad de emplear cultivos de microalgas en fotobiorreactores y considera la interacción de cada uno de éstos para determinar su potencial y el tipo que mejor se ajusta en esta región.

Biocombustibles y microalgas

Cualquier combustible proveniente o derivado a partir de biomasa se denomina biocombustible y puede ser sólido como el bagazo de caña, líquido como el etanol o el biodiesel, y gaseoso como el metano (Chinnasamy *et al.,* 2010). Además, poseen la ventaja de poder llegar a ser sustituto de los combustibles actuales sin efectuar cambios significativos y pueden ser aplicados a sectores energéticos, agrícolas, industriales y automotrices (Gilbert & Perl, 2008; Scarlat *et al.,* 2008), ya que pueden incorporarse fácilmente a tecnologías tradicionales como motores,

calderas, turbinas a gas, entre otras (Dewulf & Van Longenhove, 2006). El alcohol y el aceite de origen vegetal son una fuente casi inagotable de energía y ante el impulso en las políticas actuales a nivel regional, nacional y mundial, sumado a los costos y las dificultades en la obtención de combustibles fósiles, van a implicar cada vez más un aumento en la producción de etanol a partir de caña de azúcar y maíz, o de biodiesel a partir de palma de aceite, microalgas u otros cereales, y de otros tipos de energías renovables (IICA, 2010; Callahan & Sharp, 2003).

El proceso de producción del biodiesel se basa en la transesterificación, la cual, al adicionar aceite, alcohol (metanol o etanol) y un catalizador (hidróxido de potasio KOH), se obtiene biodiesel y como subproductos glicerina, agua y residuos que pueden utilizarse como fertilizantes (Neenan *et al.,* 1996) y en la industria cosmética. El biodiesel puro es biodegradable, no tóxico y esencialmente libre de azufre y compuestos aromáticos, sin importar significativamente el alcohol y el aceite vegetal que se utilicen en la transesterificación (MADR, 2006).

El principal productor de biodiesel a nivel mundial es Europa (49,8% en el 2009, seguido del continente americano con 32,8% y Asia – Pacífico con 4,4%) alcanzando 7,8 millones t en el año 2009, comparado con 3,2 millones t en 2005 y 1,9 millones t en 2004 (CORPODIB, 2010). Canaki & Sanli (2008), afirman que esta tendencia seguirá al alza, si se asegura desde una perspectiva económica, que el biodiesel logre convertirse en el combustible alternativo más viable y competitivo para sobrevivir en el mercado, respecto al diesel en el mediano y largo plazo. Igualmente, en Colombia también se puede asumir dicha tendencia ya que cada día se opta más por equipos de uso industrial y automotriz -plantas, generadores, motores, etc.- por su costo, el cual es inferior respecto al costo de la gasolina.

Muchos estudios han resaltado diversas ventajas de utilizar microalgas para la producción de biodiesel en comparación con otras materias primas disponibles (Brennan & Owende, 2010; Hu *et al.,* 2008; Roessler *et al.,* 1994; Gravilescu & Chisti, 2005). Desde el punto de vista práctico, éstas son fáciles de cultivar, pueden crecer con poca atención o cuidado, en suelos no fértiles y toleran calidades de agua no aptas para el consumo humano. Además, éstas se reproducen mediante la fotosíntesis para convertir la energía solar en energía química y sus ciclos de crecimiento son rápidos (Chisti, 2007; Meeting, 1996; Spolaore *et al.,* 2006; Sheehan *et al.,* 1998). En cuanto a la productividad, se observa en la Figura 1, que las microalgas en una ha pueden tener un mayor rendimiento (Anderson & Eakin, 1985), respecto a la producción de aceite a partir de palma y otros cultivos para biocombustibles. Esto se debe principalmente, a que el alga tiene una capacidad mayor de fijación de CO_2 del ambiente, y mediante los procesos de fotosíntesis, obtiene precursores fundamentales para la biosíntesis de aceites naturales para la obtención de biodiesel (IICA, 2008).

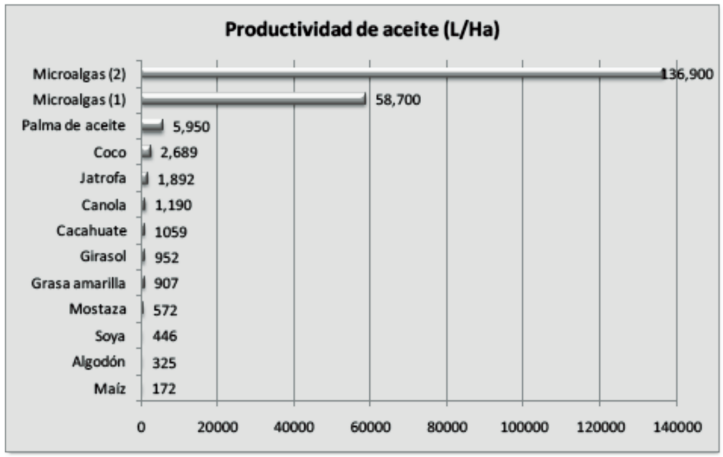


Figura 1. Productividad de aceite de las microalgas en comparación con los cultivos.
Fuente: Anderson & Eakin (1985).

Las investigaciones realizadas han demostrado que en el proceso de la síntesis y extracción del aceite de algas se predomina la recirculación aceites y metabolitos secundarios a partir de la fotosíntesis realizada por el alga y que es absolutamente compatible para la producción del aceite (Nelson, 2002). Actualmente, existen o se conocen más de treinta (30) especies de microalgas que pueden generar ácidos grasos para ser precursores de biodiesel (Kwong, 2001).

Cinética de las microalgas

Cuando se establecen cultivos controlados de microalgas para producción de biodiesel, se emplean sistemas abiertos -estanques o canales de crianza- o cerrados –fotobiorreactores-. El cultivo de microalgas en estanques abiertos y/o canales de crianza es una práctica bien desarrollada, pero sólo pocas especies pueden desarrollarse, ya que se requiere de sustancias altamente alcalinas o selectos ambientes salinos. Sin embargo, cuando se utilizan fotobiorreactores completamente cerrados, se tienen mayores oportunidades de cultivos ya que éstos permiten una óptima fijación y captación de CO_2 y crecimiento y desarrollo controlado, además de tener mayor asepsia que evita la infiltración de otros microorganismos que compiten por el medio (Chisti, 2007).

En un cultivo de microalgas por lote, el periodo de crecimiento se efectúa en cinco etapas de desarrollo (ver Figura 2). Cada etapa consiste de un conjunto de sucesos que tienen que ver con el metabolismo del microorganismo. En la etapa de inducción (1), las microalgas se adaptan al nuevo ambiente y a las nuevas condiciones de cultivo, el crecimiento neto es nulo y el tiempo es corto. En esta etapa, el uso de fotobiorreactores debe estar enfocado a tener un aprovechamiento máximo de exposición a la luz solar al igual que un suficiente y constante suministro de CO_2, y tener un mayor control sobre pH y temperatura del cultivo, principalmente. Una vez culmina la adaptación, la división celular se acelera y el crecimiento del número de microalgas se hace exponencial -etapa de crecimiento-, duplicándose a intervalos regulares de tiempo (etapa 2) donde el suministro de alimento y las condiciones óptimas de cultivo delimitan la tasa de crecimiento máxima; por lo tanto, se estima que factores como radiación e intensidad de luz solar se vuelva prioritario.

El crecimiento exponencial comienza a limitar el alcance de nutrientes y la penetración de luz en el cultivo, generando que la tasa de división celular se ralentice, requiriendo más tiempo aumentar la población, entrando el cultivo en la etapa de retardo (3). Como los sistemas cerrados –fotobiorreactores-, son más controlados que los sistemas abiertos, se espera que el suministro de CO_2 aumente y la deposición a radiación y luz solar sea constante, buscando extender ésta etapa, retrasando la entrada del cultivo a la etapa estacionaria (4), en la cual se establece un equilibrio dinámico entre la tasa de reproducción y la tasa de mortalidad celular. Esta etapa es relativamente corta y se origina a causa de escasez de nutrientes. Finalmente queda la fase de muerte o declinación (5), donde la tasa de mortalidad poblacional supera la tasa de crecimiento.

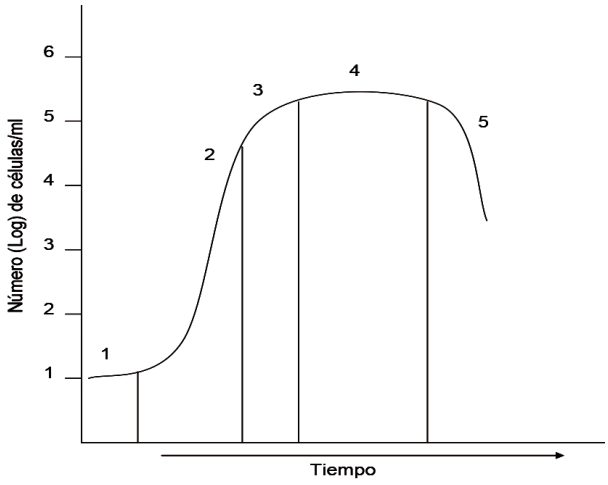


Figura 2. Etapas de crecimiento en cultivo de microalgas.

Fuente: Chisti (2007).

Requerimientos microalgales

El rango de pH para gran parte de las especies algales cultivadas, oscila entre 7,0 y 9,0; con un óptimo entre 8,2 – 8,7 (Moheimani, 2005; Weissman & Goebel, 1987; Richmond, 2004). Varios estudios realizados muestran de manera general para sistemas de cultivos abiertos y cerrados que un valor diferente al de este margen, puede desencadenar

en una súbita disminución de las actividades metabólicas y un decrecimiento del cultivo. El control de este parámetro se hace por medio del aire ingresado al cultivo. En el caso de un cultivo muy denso, la adición de CO_2 permite corregir el pH aumentado, cuyo valor máximo puede llegar a 9.0 durante el crecimiento microalgal (Eriksen, 2008).

Es posible analizar que, al limitar el comportamiento del crecimiento y desarrollo en las microalgas de éste parámetro, respecto a las incidencias climáticas del departamento del Valle del Cauca, no se obtiene un argumento sólido que permita establecer un beneficio o un factor de restricción para ser contemplado en la producción de biodiesel a partir de algas, ya que la regulación de pH depende directamente de variables como niveles de CO_2 y aire enunciado o explicado anteriormente. Sin embargo, el empleo de fotobiorreactores, en algunos casos -dependiendo del tipo de fotobiorreactor-, restringe el mantenimiento de CO_2 y una emisión eficiente de oxígeno en la mezcla, llevando al aumento de niveles de pH.

Las microalgas son organismos fotosintéticos, que absorben el carbono inorgánico de ambiente y lo transforman en materia orgánica (Ugwu *et al.,* 2008). La energía necesaria para esta reacción es suministrada por la luz y en este aspecto, la intensidad del espectro de radiación y la necesidad fisiológica de un foto-periodo son fundamentales. La intensidad de la radiación es primordial, pero los requisitos varían de acuerdo al tipo de alga, la profundidad y la densidad del cultivo -concentración celula-), la agitación y la capacidad de penetración de la luz debe aumentarse para atravesar el cultivo. La luz puede ser natural -Solar- o artificial -tubos fluorescentes- (Canaki & Sanli, 2008; Jansen *et al.,* 2003). El recalentamiento debido a la iluminación natural y artificial debe ser evitado o corregido mediante sistemas de refrigeración especiales.

La temperatura óptima para los cultivos de microalgas, está alrededor de los 20 °C a 24 °C, aunque estos valores pueden variar con la composición del medio de cultivo, la especie y la tensión a la que son expuestos los microorganismos. Por debajo del rango, el crecimiento de las especies se inhibe, mientras que, a temperaturas superiores, normalmente son mortales para una gran variedad de especies. El control de temperatura se realiza mediante el uso de líquidos y sistemas de refrigeración o por medio de aire directamente, el cual tiene una mayor facilidad de manejo y/o control en fotobiorreactores (Matta *et al.,* 2010).

En Colombia, el comportamiento de la temperatura varía dependiendo del lugar o región dada la variedad topográfica y/o fisiográfica que presenta éste país (Póveda *et al.,* 1998). De acuerdo a la información que suministra el Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Medio Ambiente -IDEAM, en la región Andina colombiana, a la que pertenece en gran parte el Departamento del Valle del Cauca, se presenta un régimen bi-modal -dos periodos húmedos que van de abril a mayo y de septiembre a noviembre; y dos periodos secos que va de junio a agosto y de diciembre a marzo-, con temperaturas promedio que oscilan entre 12°C – 24°C para locaciones que se encuentran en zonas templadas -o medias- y frías -altitud superior a 1000 msnm-; y de 25°C, o mayores aproximadamente en locaciones que se encuentran en zonas cálidas -altitud menor a 1000 msnm-. En esta región, se observa que las algas desde un punto de vista climático, tenga un mejor desarrollo ya que se encuentran locaciones con temperaturas acordes, especialmente en zonas medias donde la temperatura oscila entre 17 °C – 24 °C, que está dentro del rango óptimo para su crecimiento y desarrollo, cuando se emplean fotobiorreactores de placas, especialmente, ya que éstos no requerirán de termostatos o sistemas de control de temperatura.

La sedimentación es evitada por la mezcla, y procura una exposición regular de la totalidad de la población a luz y nutrientes, maximizando la homogenización del medio y evitando, por tanto, la estratificación termal (Molina & Fernández, 2001; García *et al.,* 2007). A su vez, se mejora el intercambio de gases entre el medio de cultivo y el aire; esto aporta beneficios tales como la fuente de carbono inorgánico más importante es el CO_2 del aire del ambiente y por medio del burbujeo se inyecta en el medio; no obstante, para cultivo muy densos, se hace necesario inyectar cantidades extras de CO_2 puro (Molina & Fernández, 2001). Usualmente el mezclado se alcanza revolviendo diariamente a

mano, aireando, o usando las ruedas con "paletas" y bombas de aire comprimido (Ugwu *et al.,* 2008).

La mayoría de especies microalgales son extremadamente tolerantes a los cambios de salinidad. La mayoría de las especies crecen mejor en salinidades que sean levemente más bajas que su habitad natural (Demirbas & Demirbas, 2011). Este factor se tiene especialmente en cuenta en fotobiorreactores, cuando en éstos se van a establecer cultivos de microalgas marinas (Campbell, 2008), ya que en estos dispositivos, la salinidad puede afectar el crecimiento y la composición celular de la microalga debido a que los cambios de salinidad generan estrés osmótico, producido por un aumento de la presión osmótica en las algas, siendo cada vez más difícil succionar nutrientes para su desempeño, llevándolas a realizar esfuerzos mayores difíciles de compensar que puede llevar a la muerte del cultivo.

La oxi-inhibición.se refiere a la inhibición de la fotosíntesis, causada por altos niveles de oxígeno -O_2- disuelto en el medio de cultivo. La oxi-inhibición, por lo tanto, acarrea con impedimentos para el crecimiento de las microalgas, llegando incluso a causarles la muerte por daño oxidativo cuando se presentan condiciones extremas. Una de las causantes principales de la oxi-inhibición es el aumento de dimensiones de los fotobiorreactores sin considerar la concentración de oxígeno (Loera-Quezada & Olguín, 2010). Por lo tanto, al emplear fotobiorreactores se debe contemplar sistemas de emisión de oxígeno del sistema.

El principal factor para determinar el crecimiento de las microalgas en fotobiorreactores es la disponibilidad e intensidad de luz en el cultivo pues estos parámetros controlan la productividad fotosintética de los microorganismos. Es decir, a mayor exposición de éstas a la luz, la radicación solar influye de manera directa en el fotobiorreactor, hay un incremento de la energía lumínica, por ende, la rapidez de la fotosíntesis también aumenta. Durante este comportamiento, la eficiencia fotosintética siempre va a ser mayor que la tasa de crecimiento del cultivo observando que la curva de incremento de la población se comporta de manera exponencial, Sin embargo, a partir de cierto valor de energía incidente (E_k), el estímulo a cambios en la tasa de fotosíntesis es pequeño, que teóricamente es cuando se presenta la fotoinhibición, tal como se ilustra en la Figura 3.

Puede también evidenciarse como la constante E_k, que indica el valor de energía luminosa comienza a saturar el foto-sistema de la microalga y se aproxime cada vez a los valores de eficiencia fotosintética, alcanzando el punto de equilibrio o de crecimiento máximo cuando el valor de dichos parámetros sea igual. Dicho punto de equilibrio indica el límite donde se espera el cambio de fase o el cambio a fotoinhibición. Por lo tanto, es de esperarse que a valores donde la curva de crecimiento o energía presenta valores mayores a la eficiencia, se genere la inhibición de la fotosíntesis, corriendo el riesgo de causar daños o deterioro en el cultivo (Molina *et al.,* 1999).

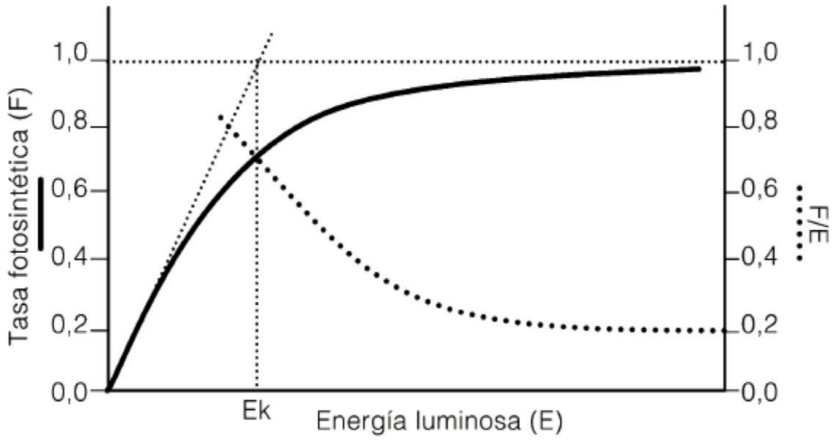


Figura 3. Efecto de la energía luminosa en la tasa y eficiencia fotosintética.
Fuente: Molina *et al.* (1999).

En la producción de biodiesel, en relación con el desempeño fotosintético de las algas, se espera que se obtenga una mejor retención o captación de CO_2 y grasas, logrando una producción mayor. En el departamento del Valle del Cauca, se analiza que la presencia de algas en sitios cálidos no necesariamente represente un desarrollo del cultivo de acuerdo con lo ilustrado en la Figura 3 debido a que se tienen que contemplar otros parámetros de entorno o ambiente que finalmente influyen sobre el crecimiento o desarrollo de éstas.

Según UPME & IDEAM (1993), tal como lo registran en el Atlas de Radiación Solar (Figura 4), la región Andina es la segunda región con mayores registros de radiación solar con un rango promedio entre 350 y 400 cal/cm^2/día. Si se establece una comparación con los registros de la región Caribe Colombiana (400 – 500 cal/cm^2/día) se analiza que se tendría una inhibición en el crecimiento de las algas y presentando inhibición en el desarrollo de éstas, llevando a una menor extracción de aceite para la producción de biodiesel (Colombo *et al.,* 2007). Este comportamiento se espera para algas terrestres, ya que en ésta región al igual que en la región Pacífica colombiana, existe una extensión considerable de algas marinas especialmente en lechos rocosos marinos, manglares, etc. (Dismukes *et al.,* 2008; León *et al.,* 2007) que pueden presentar un potencial productivo. Para la ciudad de Cali se presentan magnitudes de radiación solar entre 4.5 y 5 kWh/m^2; y gracias al registro multianual de radiación solar elaborado por CENICAÑA, se identificó el valor medio de la radiación solar desde 1997 es de 395 cal/cm^2.

Incidencia de las condiciones ambientales y climáticas del Valle del Cauca

La ciudad de Cali, ubicada en el departamento del Valle del Cauca tiene características climáticas variadas, siendo 25°C la temperatura promedio, para una altitud de 1000 msnm. La región del litoral Pacífico presenta precipitaciones que llegan a los 2000 mm al año, presentando un régimen de lluvias bimodal típico de esta región (CVC & UniValle, 2004). En relación con la temperatura promedio, se analiza que éste al ubicarse en una zona cálida y registrar un valor de temperatura promedio ligeramente mayor del rango óptimo para el crecimiento y desarrollo de algas, se observa que la distribución de lluvias durante el año conlleva a que las microalgas tengan un impacto en el crecimiento y desarrollo productivo del aceite.

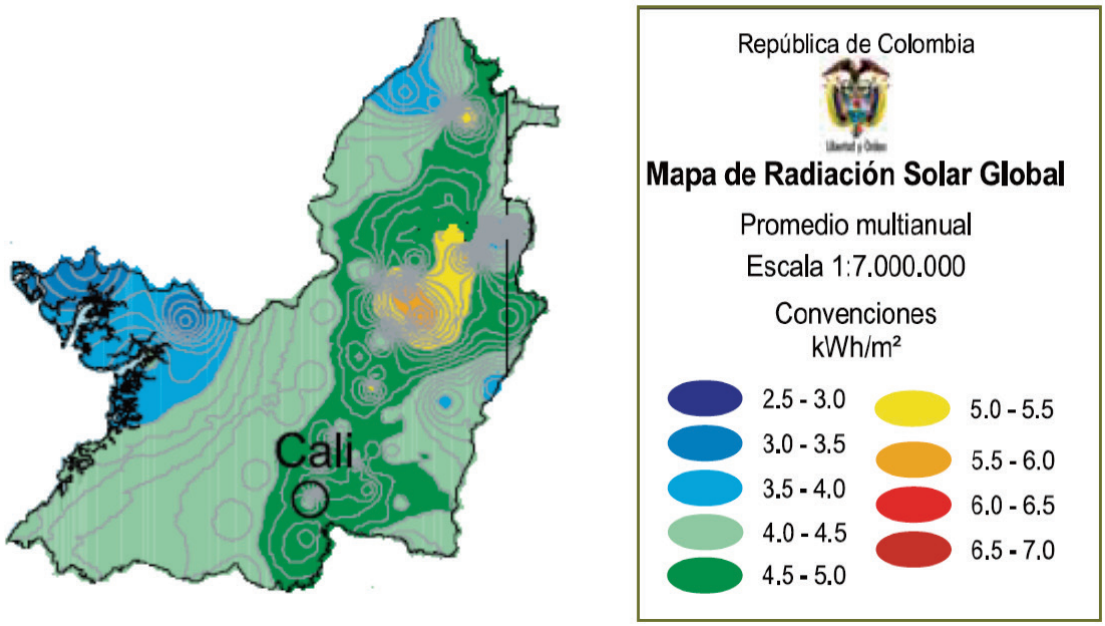


Figura 4. Mapa radiación solar global en el Valle del Cauca (KWh/m^2 día).

Fuente: IDEAM (1993).

Conjugando y relacionando las variables climáticas analizadas anteriormente, se define al departamento del Valle del Cauca como un área potencial para el cultivo de microalgas para producción de biodiesel. Además, desde el punto de vista de extensión, el cultivo de algas resulta atractivo dado su rendimiento o producción por hectárea respecto a cultivos como palma africana -comúnmente sembrado en Colombia para producción de biodiesel-, mitigando de manera considerable una confrontación entre la producción y oferta agrícola para garantizar la seguridad alimentaria y demanda de alimentos versus la producción agrícola para garantizar suficiencia y diversidad energética (FAO, 2007, 2008).

El departamento del Valle del Cauca se ve afectado por fenómenos climáticos tales como el NIÑO y la NIÑA. Para el primero, que se manifiesta en Colombia con periodos de sequía prolongados, se prevé un impacto directo en los cultivos de microalgas, ya que el aumento de intensidad de luz solar, radiación solar y temperatura generan condiciones óptimas para el desarrollo y funciones de las algas de una manera más rápida, el cual incide de manera directa en la producción de aceite para producción de biodiesel. El segundo fenómeno climático, el cual manifiesta un comportamiento contrario al primero, es de esperar reducciones en la producción de aceite y emplear mecanismos naturales y/o artificiales que permitan mitigar este efecto. Lógicamente, para respaldar este análisis, se deben efectuar estudios más profundos y enfáticos que analicen el comportamiento y la respuesta de las algas tanto en su desarrollo como en producción de aceite contemplando escenarios climáticos bajo periodos NIÑO y NIÑA, como en periodos donde no haya ocurrencia de éstos fenómenos.

Tipos de fotobiorreactores

Los fotobiorreactores son sistemas cerrados desarrollados para la producción de microalgas e impiden que el cultivo tenga contacto con el aire atmosférico. Se construyen de materiales transparentes como vidrio y policarbonato con el fin de permitir el paso de la radiación lumínica o artificial necesaria para los procesos fotosintéticos que se dan en su interior (Nielsen, 2008). Algunas de las ventajas que presentan son la posibilidad de producir cultivos con altas densidades de biomasa, mitiga la contaminación del medio por otros microorganismos, y se facilita el control de parámetros interiores tales como, pH, temperatura, nivel de oxígeno y porcentaje de nutrientes que son básicos en la producción del cultivo (Contreras *et al.,* 2003).

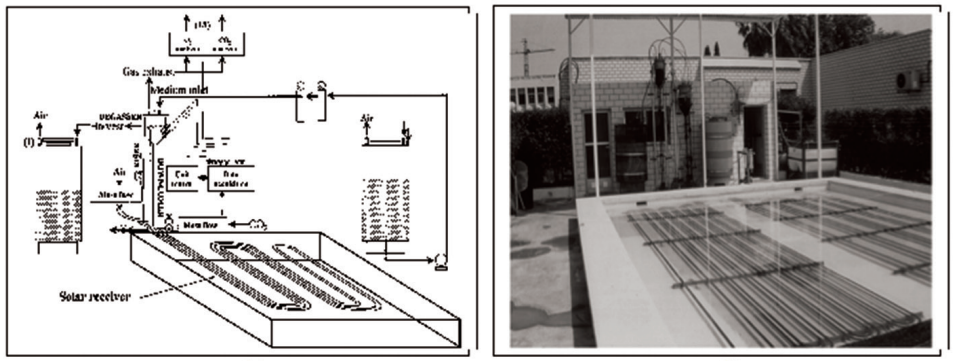
Entre los tipos de fotobiorreactores que han mostrado mayor desarrollo en los últimos años y que se vislumbran con grandes ventajas para la producción de ácidos grasos para la producción de biomasa en la industria de los biocombustibles se encuentran los fotobiorreactores tubulares, de placas y de columna de burbujas (Pulz, 2001).

1. Fotobiorreactores tubulares

Son los más adecuados para cultivos en exteriores bajo la acción de la radiación solar. Se compone de un colector solar, conformado por tubos rectos transparentes -de plástico o vidrio-, cuya su función es capturar la mayor cantidad de luz solar posible para el cultivo microalgal presente en su interior. Los tubos del colector solar son de diámetro pequeño, generalmente de 0.1 m o menos, debido a que la luz no alcanza a penetrar tan profundo en cultivos muy densos (Chisti, 2007). Este tipo de fotobiorreactor también contiene un tanque o columna de desgasificación que recibe la mezcla procedente de los colectores solares y en el que se inyecta aire y agua; una bomba que se encarga de impulsar la mezcla -por medio de sistema de aire comprimido- hacia los colectores solares y realizar la agitación mecánica -por medio de agitadores estáticos para proveer buenos niveles de mezcla y un óptimo aprovechamiento de la radiación solar-, y tuberías de distribución las cuales conectan todo el ciclo (Sobczuk *et al.,* 2006). El modo de activación del biorreactor es por medio de sistemas de alimentación continuo o batch alimentado (Benneman, 2009) mediante un ciclo en el cual desde el tanque desgasificación, la mezcla es bombeada hacia los colectores solares y regresando al punto inicial o tanque de dosificación (Figura 5).

Los diseños de estos fotobiorreactores pueden incluir el serpentín tubular organizado de manera horizontal, vertical, cónica, inclinada, entre otras. El colector solar es orientado de tal manera que se maximice la captura de luz solar. En un arreglo típico, los tubos son ubicados paralelos entre sí y planos sobre el suelo. Los tubos horizontales paralelos son algunas veces organizados como una valla con el fin de incrementar el número de tubos que pueden ser acomodados en un área determinada. Los tubos siempre son orientados Norte-Sur, y el suelo bajo el colector solar frecuentemente se pinta de color blanco para aumentar la reflectancia solar (Tredici, 1999). Las ventajas con base al registro de radiación solar e intensidad de luz que se da en el departamento del Valle del Cauca, el empleo en campo de este tipo de fotobiorreactor resulta adecuado, ya que los niveles de radiación solar permiten un aumento en la eficiencia fotosintética de las microalgas dada la gran área de exposición a la luz solar generando un mayor desarrollo de éstas, permitiendo así una mayor fijación de CO_2 y por lo tanto, una producción mayor y controlada de biomasa.

A su vez, la intensidad de luz solar la cual se comporta constante durante el año, descarta la necesidad de implementar otras alternativas de luminosidad artificial en la zona de los colectores solares. Sin embargo, algunas desventajas son la poca transferencia de masa, altos niveles de pH y oxígeno en la mezcla, el mantenimiento de los niveles de dióxido de carbono disueltos a lo largo de los tubos; las microalgas se encuentran limitadas por la disponibilidad luminosa dentro del cultivo – especialmente las que se acentúan en los tanques de gasificación-, además que algunas especies tienen sensibilidad a los esfuerzos cortantes que se presentan en los flujos turbulentos y que pueden generar daños en las paredes celulares de las microalgas (Contreras *et al.,* 1998; García Camacho *et al.,* 2007; Michels *et al.,* 2010). Igualmente, cuando se emplea a grandes escalas, se hace necesario un alto suministro de energía para su funcionamiento, resultando en costos de operación elevados.



(a) (b)

Figura 5. (a) Esquema y (b) Fotografía de un fotobiorreactor tubular.
Fuente: Molina *et al.,* (1999) y Rebolloso Fuentes *et al.,* (1998).

2. Fotobiorreactores de placas

Los fotobiorreactores de placas planas reúnen importantes requerimientos para a la producción de biomasa a partir de microalgas y cianobacterias, como un mayor aprovechamiento de la radiación lumínica solar, mayor área superficial expuestas a la luz, y además pueden ser orientados fácilmente de acuerdo la hora del día y su ubicación geográfica. La desgasificación del sistema también se facilita, ya que los gases que son obtenidos durante los procesos fisiológicos son extraídos por la parte superior de los paneles (Tredici *et al.,* 1991). Para la fabricación de estos dispositivos de cultivo, se utilizan placas planas verticales traslúcidas, que permiten la iluminación por ambos lados, y generalmente cuentan un sistema de agitación por aireación que a su vez remueve los excesos de oxígeno en el cultivo (Figura 6).

La principal ventaja de este tipo de fotobiorreactor radica en que éstos tienen una disponibilidad luminosa constante dentro del cultivo ya que dicho sistema no cuenta con tuberías de distribución ni tanque de gasificación (Doucha & Livansky, 1995). Las principales desventajas presentadas tomando en cuenta las condiciones ambientales y geográficas del departamento del Valle del Cauca presentadas en este tipo de fotobiorreactor, consisten la dificultad y complejidad para el control de parámetros, como el suministro de CO_2 y otros nutrientes, la temperatura uniforme en toda la geometría del panel, la circulación y agitación del cultivo y que no maneja grandes volúmenes, por lo tanto, su producción no puede ser a gran escala. Se debe contar con varios paneles para lograr cultivos masivos, lo cual aumenta los costos del sistema y la producción, pueden tener una mayor aflicción en el laboratorio que en la producción masificada a escala (Pulz *et al.,* 1995).

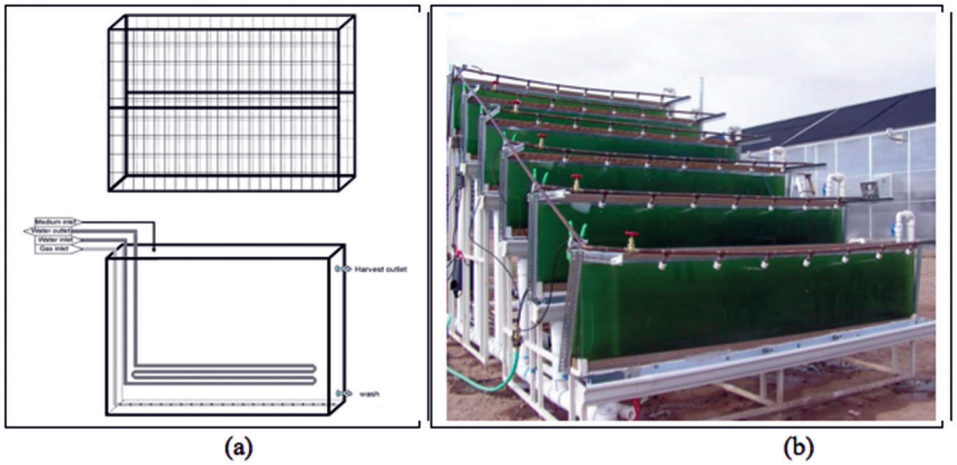


Figura 6 (a) Estructura y (b) Fotografía de un sistema de fotobiorreactores de placas planas.
Fuente: Rebolloso Fuentes *et al.,* (1998); Sierra *et al.,* (2007).

3. Fotobiorreactores de columna de burbujas

Los fotobiorreactores tipo columna de burbujas (Figura 7) se caracterizan por ser compactos -ocupan espacio en base y altura-, de bajo costo y fáciles de operar. Además, son muy prometedores para el cultivo de microalgas a gran escala (Sánchez *et al.,* 1999). Los fotobiorreactores de columna de aire con sistema de bombeo de aire comprimido pueden obtener una concentración final de biomasa y una tasa de crecimiento específico, muy similares a lo que se obtiene con los fotobiorreactores tubulares. Estos sistemas cuentan con varias ventajas, entre las que se encuentran la alta transferencia de masa, buena agitación con bajos esfuerzos cortantes obteniendo una buena aireación - mezcla, bajo consumo de energía, fácil limpieza y esterilización, adecuado control de la temperatura del medio de cultivo, y reducidas foto- inhibición y foto-oxidación. En relación con las condiciones ambientales del departamento del Valle de Cauca, éstos al situarse en forma vertical y su poca área superficial, se exponen de manera muy limitada a la intensidad de luz solar y recibe menor radiación solar respecto a otros tipos de fotobiorreactores, llevando a suplir dichas falencias con incorporación de intensidad de luz artificial haciendo más complejo la utilización de éstos. Por lo tanto, este tipo de fotobiorreactor es el menos recomendable para instalar en el Valle del Cauca respecto a los analizados anteriores, además que su construcción requiere materiales sofisticados. Dado que estas columnas requieren de una altura y un espesor determinado para controlar la inyección de aire, no es recomendable superar cierto volumen pues la velocidad del fluido aumentar y puede generar esfuerzos cortantes que pueden dañar la pared celular y matar las células (Richmond, 2000).

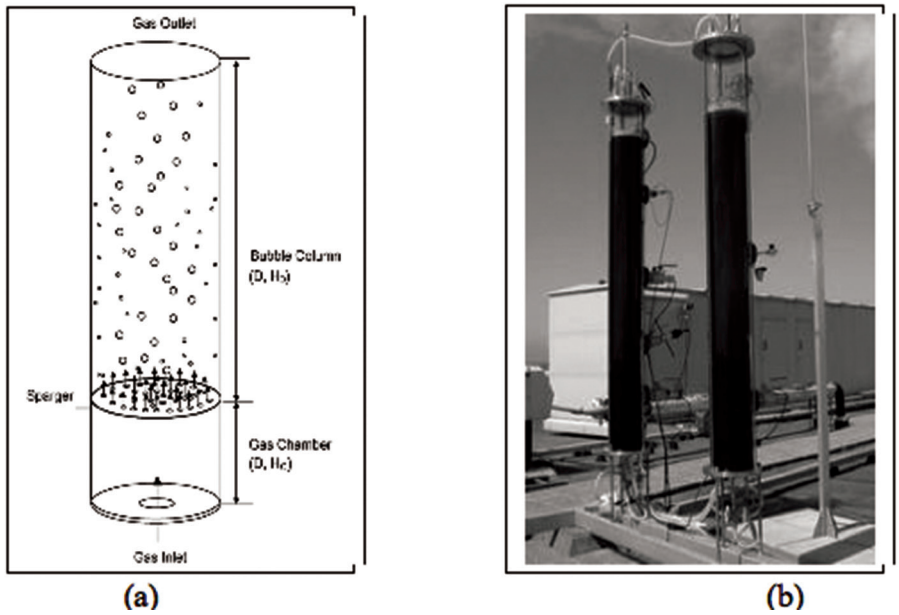


Figura 7. (a) Estructura y (b) fotografía de un sistema de fotobiorreactores de columna de Burbujas.

Fuente: Dhotre & Joshi (2006); Bioenergy Noe (2011).

Conclusiones

El biocombustible derivado de biomasa microalgal tiene un futuro muy prometedor, gracias a que es el único biocombustible que puede potencialmente desplazar a los combustibles líquidos derivados del petróleo. El creciente aumento en los precios de estos combustibles, las políticas gubernamentales de apoyo económico a energías renovables, mercados de carbono, bonos verdes y el uso de las microalgas en otros mercados como el farmacéutico, el cosmético, el alimenticio, el tratamiento de aguas residuales y la fijación de CO_2 podría hacer viable económicamente el uso de la tecnología de sistemas de cultivo microalgal. La posibilidad de establecer cultivos comerciales de microalgas en el departamento del Valle del Cauca puede tener un gran potencial a futuro debido a la gran disponibilidad de radiación durante todo el año y las adecuadas características climatológicas de la región. Además, por el hecho de pertenecer a un país en vía de desarrollo, tiene mayor disponibilidad de suelos para cultivos que los países desarrollados, los cuales presentan una mayor densidad poblacional.

En vista de la productividad mucho mayor que presentan los fotobiorreactores tubulares en comparación con otros sistemas de cultivo, los hace susceptibles de ser utilizados en la producción de gran parte de la biomasa de microalgas necesaria para la producción de biocombustible. Los fotobiorreactores proporcionan un ambiente controlado que se pueden adaptar a las demandas específicas de las microalgas de alta productividad para alcanzar una consistentemente buena producción de aceite. A pesar de los grandes desarrollos y estudios hechos en las últimas décadas en referencia al diseño e implementación de fotobiorreactores, se requiere aun mejorar la tecnología y adaptarla a las condiciones tropicales del Valle del Cauca y las cepas algales locales, ya que la mayoría de estudios y desarrollos se han hecho en países de diferentes latitudes con condiciones climáticas y niveles de radiación incomparables por su ubicación geográfica. Tratar de usar directamente estas tecnologías, ya desarrolladas, en nuestro país podría acarrear problemas de adaptación de los microorganismos, afectando su metabolismo, capacidad fotosintética y, por ende, el potencial de producción de biomasa.

Algunos de los factores a mejorar en el diseño de fotobiorreactores son maximizar el aprovechamiento de la radiación solar con base en los niveles de foto-inhibición permisibles según el tipo de alga, optimizar las capacidades volumétricas de los fotobiorreactores conservando altas concentraciones celulares, mejorar la transferencia de masa teniendo en cuenta todas las variables que afectan el metabolismo fotosintético, el desarrollo de materiales transparentes con poca fotosensibilidad de bajo costo, y el avance de dispositivos de bajo consumo energético que puedan abaratar los costos de construcción que permitan su explotación a nivel comercial.

Literatura citada

1. Anderson, DB. & Eakin, D.E. (1985). A process for the production of polysaccharides from microalgae. *Biotechnol Bioengn. Symp*. 15, 533-547.
2. Beer, L.; Boyd, E.; Peters, J. & Posewitz, M. (2009). Engineering algae for biohydrogen and biofuel production. *Current Opinion and Biotechnology, 20*: 264 – 271,
3. Benneman, J. (2009). Microalgae biofuels: A brief introduction. Recuperado de: *http://bit.ly/2gOAC1V*
4. Bioenergy Noe (2011). Biomass cultivation, handling and properties. Biofuels: photobioreactor. Recuperado de: *http://www.bioenergy-noe.com/?_id=232*
5. BP - British Petroleum (2009). BP Statistical review of world energy. BP Annual report. United Kingdom.
6. Brennan, L. & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae-a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable Sustainable Energy Review,* 14, 557–577.
7. Callahan, T.J. & Sharp, C.A. (2003). Evaluation of Methyl Soyate/Diesel Fuel Blends as a Fuel for Diesel Engines. Southwest Research Institute. Final Report to the American Biofuels Association, 1,149.
8. Campbell, N. (2008). Biodiesel: Algae as a renewable source for liquid fuel. *Guelph Engineering Journal,* 1, 2–7.
9. Canaki, M. & Sanli, H. (2008). Biodiesel production of various feedstocks and their effects on the fuel properties. *Journal of the industrial microbiology and biotechnology,* 35, 431 – 441.
10. Carvalho, A.P., Meireles, L.A. & Malcata, F.X. (2006) Microalgae reactors: a review of enclosed system designs and performances. *Biotechnological Programme*, 22, 1490–1506.
11. Chen, C.Y., Yeha, K.L., Aisyaha, R., Leec, D.J. & Chang, J.S. (2010). Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technology,* 71-81.
12. Chinnasamy, S., Bhatnagar, A., Hunt, R.W. & Das, K.C. (2010). Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biofuel applications. *Bioresources Technologies,* 101, 3097–3105.
13. Christi, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances,* 25, 294 – 306.
14. Christi, Y. (2007). Hydrocarbon recovery by extraction with a biocompatible solvent from free and immobilized cultures of Botryococcusbraunii. *Enzyme Microbioligy Technologies,* 11, 717.
15. Colombo, R.; Marín, O.; Irázabal, S. & Tezara, W. (2007). Relaciones hídricas, fotosíntesis y dos especies del género *calotropis. Revista Interciencia.* (32) 11, 791-796.
16. Contreras, A., Garcia, F., Molina, E. & Merchuk JC. (1998). Interaction between CO2-mass transfer, light availability, and hydrodynamic stress in the growth of phaeodactylumtricornutum in a concentric tube airlift photobioreactor. *Biotechnological Bioengineering,* 60, 317–325.
17. Contreras, C.; Peña, J.M.; Flores, L.B. & Cañizares, R.O. (2003). Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia,* 28 (8), 450-456.
18. CORPODIB, Corporación para el Desarrollo Industrial de la Biotecnología y Producción Limpia (2010). Estado del arte de las tecnologías de producción de biodiesel. Recuperado de: *www.corpodib.com/documentos/.../Biodiesel/Capitulo%207.p*
19. CVC, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) & Universidad del Valle. (2004). Identificación de parámetros críticos en el Río Cauca y sus principales ríos tributarios. Tramos Salvajina – La Virginia. Caracterización y modelación matemática del Río Cauca PMC – FASE II. Cali. Universidad del Valle.
20. Demirbas, A. & Demirbas, M. (2011). Importance of algae oil as a source of biodiesel. *Energy Conversion and Management,* 52, 163 – 170.
21. Dewulf, J. & Van Longenhove, H. (2006). Renewables based technology: Sustainable assement. JhonWilley and sons Ltd.
22. Dhotre, M.T. & Joshi, J.B. (2006). Design of a gas distributor: Three-dimensional CFD simulation of a coupled system consisting of a gas chamber and a bubble column. Institute of Chemical Technology, University of Mumbai, Matunga, Mumbai 400019, India.
23. Dismukes G.C.; Carneri, D.; Bennette, N.; Ananyev, G.M. & Posewitch, M.C. (2008). Aquatic phototrops: Efficient alternatives to land-based crops for biofuels. *Current Opinion Biochtenology,* 19, 235–240.
24. Doucha, J. & Livansky, K. (1995). Novel outdoor thin-layer high-density microalgal culture system: productivity and operational parameters. *Algol*. *Stud*, 76, 129–147.
25. Eriksen, N. (2008). The technology of microalgal culturing. *Biotechnology letters,* 30 (9), 125–136.
26. European Environmental Agency -EEA- (2009). Greenhouse gas emissions trends and projections in Europe 2009 tacking progress towards Kyoto targets. Environmental Report No. 9. Copenhagen, Denmark.

Recuperado de: *file:///C:/Users/estudiante/Downloads/GHG%20trends%20and%20projections%202009%20SUMMARY.pdf*

27. FAO, Food and Agriculture Organization of United Nations (2000). The energy and agriculture nexus. Environmental and natural resources working. Recuperado de: *http://www.fao.org/docrep/003/x8054e/x8054e00.htm*

28. FAO, Food and Agriculture Organization of United Nations (2007). Sustainable bioenergy: a framework for decision makers. United Nations Energy. Rome, Italy. Recuperado de: *http://www.fao.org/docrep/010/a1094e/a1094e00.htm*

29. FAO, Food and Agriculture Organization of United Nations (2008). The state of food and agriculture. New York, USA. Recuperado de: *http://www.fao.org/docrep/011/i0100e/i0100e00.htm*

30. García, F.; Gallardo, J.; Sánchez, A.; Cerón, M.C.; Belarbi, E.H. & Chisti, Y. (2007). Biochtecnological significance of toxic marine dinoflagellates. *Biotechnology advances,* 25, 176–194.

31. García Camacho, F.; Gallardo Rodríguez, J.J.; Sánchez Mirón, A.; Cerón García M.C.; Belarbi, E.H. & Molina Grima, E. (2007). Determination of shear stress thresholds in toxic dinoflagellates cultured in shaken flasks, Implications in bioprocess engineering. *Processing Biochemical.* (42), 1506–1515.

32. Gilbert, R. & Perl, A. (2008). Transport revolutions: Moving people and freight whitout oil. Earthscan.

33. Gravilescu, N. & Chisti, Y. (2005). Biotechnology: A sustainable alternative for chemical industry. *Biotechnologies advances,* 23, 471- 499.

34. Hu, Q., Sommerfeld, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., Seibert, M. & Darzins, A. (2008). Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *Plant Journal,* 54, 621–639.

35. IDEAM, Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Medio Ambiente (2011). Mapas de disponibilidad hídrica. Recuperado de: *http://bit.ly/2tuZRfq*

36. IICA, Instituto Iberoamericano de Integración para la Agricultura (2008). Situación Petrolera Mundial y producción de Biocombustibles. Informe Técnico. San José, Costa Rica.

37. IICA, Instituto Iberoamericano de Integración para la Agricultura (2010). Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: II biodiesel. Programa hemisférico en agroenergía y biocombustibles. Informe Técnico. San José, Costa Rica. Recuperado de: *http://unpan1.un.org/intradoc/groups/public/documents/icap/unpan045305.pdf*

38. IPCC, Intergovernmental Panel on Climatic Change (2001). Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Report of working group II of the IPCC. Cambridge, United Kingdom.

39. IPCC, Intergovernmental Panel on Climatic Change (2007). Climate Change 2007, the physical science basis. Contribution of working Group I to the fourth assesment report of the IPCC. Cambridge University Press. Reino Unido. Recuperado de: *http://www.ipcc.ch/ipcreports.yar4wg1.htm*

40. Jansen, M.; Tramper, J.; Mur L.R.; Hervé, A. & Durand, P. (2003). Enclosed outdoor photobiorreactors: Light regime, photosynthetic efficiency, scale-up and futures prospects. *Biotechnology and bioengineering,* 81 (2), 193 -210.

41. Kwong, T.A. (2001). Ethanol as a lead replacement: phasing out leaded gasoline in Africa. *Energy Policy,* 29 (13), 1133-1143. *https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00041-6*

42. Laherrere, J. (2005). Forescasting production from discovery. ASPO.

43. León, R.; Pardo, C. & Trespalacios, A. (2007). Evaluación y utilización potencial de algas marinas del Caribe y pacífico de Colombia: Estado actual de su conocimiento. *Revista Biosalud,* 6, 113-129.

44. Li, Y.; Wang B.; Wu N. & Lan, C.Q. (2008). Effects of nitrogen sources on cell growth and lipid production of *Neochlorisoleoabundans. Applied Microbiology and Biotechnology,* (81) 4, 629 – 636.

45. Loera-Quezada, M.M. & Olguín, E.J. (2010). Las microalgas oleaginosas como fuente de biodiesel: Retos y oportunidades. *RevLatinoamBiotecnolAmbAlgal,* 1(1), 91-116.

46. MADR, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2006). Estrategia de desarrollo de biocombustibles: Implicaciones para el sector agropecuario. Colombia. 21 p.

47. Matta T.; Martins A. & Caetano N. (2010). Microalgae for biodiesel production and other application: A review. *Renewable and sustainable Energy Reviews,* 14, 217-232

48. Meeting, F.B. (1996). Biodiversity and application of microalgae. *Journal of industrial microbiology,* 17(5), 477–489.

49. Michels H. A.; Van der Goot A.J.; Norsker N. & Wijffels R.H. (2010). Effects of shear stress on the microalgae *Chaetocerosmuelleri. Bioprocess Ingeneering Biosystems,* 33 (8), 921-927. *https://doi.org/10.1007/s00449-010-0415-9*

50. Molina Grima E.; Acién, F.; García, F. & Chisti, Y. (1999). Photobioreactors: Light regime, mass transfer and scale up. *Journal Biotechnology,* 70, 231-247.

51. Molina Grima, E. & Fernandez, F.G. (2001) Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. *Journal of Biotechnology,* 70, *231-247.*

52. Neenan, B.; Feinberg, D.; Mcintosh, K. & Terry, A. (1996). Fuels from microalgae: Technology status, potential, and research requirements. *Report, Solar Energy Research Institute. Golden, Colorado. SERI/SP,* 231 (2), 150-158.

53. Nelson, J. (2002). An investigation of the availability of carbon dioxide for the production of microalgae lipids in the southwest. Report to the Argonne National Laboratory, 117 p.

54. Nielsen, D.C. (2008). Oilseed productivity under varying water availability. In: Proceedings of 20th annual central plains irrigation conference and exposition, pp. 30–33.

55. Ormerod, W.G.; Freund P.; Smith, A. & Davinson, J. (2002). Iea Greenhouse gas. R&D Programme.UK: International Agency.

56. Póveda, G.; Gil, M. & Quiceno, N. (1998). El ciclo anual de la hidrología de Colombia en relación con el ENSO y la NAO. *Bulletin Istitute Francaise d´ étudeandines,* 27 (3), 721-731.

57. Pulz, O.; Gerbsch, N. & Bacholz, R. (1995). Light energy supply in plate-type and light diffusing optical fiber bioreactors, *J. Appl. Phycol,* 7, 145–149.

58. Pulz, O. (2001). Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Appl Microbiol Biotechnol,* 57, 287–293.

59. Rebolloso Fuentes, M.M.; García Sánchez, J.L.; Fernández Sevilla, J.M.; Acién Fernández, F.G.; Sánchez Pérez, J.A. & Molina Grima, E. (1998). Outdoor continuous culture of Porphyridiumcruentumin a tubular photobioreactor: quantitative analysis of the daily cyclic variation of culture parameters. Departamento de Ingeniería Química, Uni6ersidad de Almería, E-04071 Almería, España.

60. Richmond, A. (2000). Microalgal biotechnology at the turn of the millennium: a personal view. *Journal Applications Phycology,* 12, 441-451.

61. Richmond, A. (2004). Handbook of microalgal cultures: Biotechnology and applied phycology. Blackwell Science Ltd.

62. Roessler, P.G.; Brown, L.M.; Dunahay, T.G.; Heacox, D.A.; Jarvis, E.E. & Scheneider, J.C. (1994). Genectic engineering approaches for enhanced production of biodiesel fuel from microalgae. *ACS Sympser,* 1, 255 – 270.

63. Sánchez A.; Contreras, A., García, F., Molina, E. & Chisti, Y. (1999). Comparative evaluation of compact photobioreactors for large-scale monoculture of microalgae. *J. Biotechnol,* 70, 249–270.

64. Scarlat, N.; Dallemand, J.F. & Pinilla, F.G. (2008). Impact on agricultural land resources of biofuels production and use in the European Union: Bioenergy, changes and opportunities. Internacional Conference and exhibition on Bioenergy. Germnay.

65. Schenk, P.M.; Thomas-Hall, S.R.; Stephens, E.; Marx, U.C.; Mussgnug, J.H.; Posten, C.; Kruse, O. & Hankamer, B. (2008). Second-generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. *Bioenergy Resources*, 1, 20–43.

66. Sheehan, J.; Dunahay, T.; Benemann, J. & Roessler, P. (1998). A look back at the U.S. Department of Energy's aquatic species program: biodiesel from algae. USA National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-580-24190.

67. Sierra, E.; Acién, F.G.; Fernández, J.M.; García, J.L.; González, C.; Molina, E. (2007). Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae. Department of Chemical Engineering, University of Almería, E-04071, España.

68. Singh, A.; Singh, P. & Murphy, J. (2010). Renewable fuels from algae: An answer to debatable land based fuels. *Bioresource Technology,* 102, 10-16.

69. Sobczuk, T.M., Camacho, F.G., Grima, E.M. & Chisti, Y. (2006). Effects of agitation on the microalgae Phaeodactylum tricornutum and Porphyridium cruentum. *Bioprocess Biosyst. Eng.* 28, 243–250.

70. Spolaore, P.; Joannis, C.; Duran, E. & Isambert, A. (2006). Commercial Applications of Microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering,* 101 (2), 87–96.

71. Tredici, M.R.; Carlozzi, P.; Chini, G. & Materassi, R. (1991). A vertical alveolar panel for outdoor mass cultivation of microalgae and cyanobacteria, *Biores.Technol.* 38, 153–159.

72. Tredici, M.R. (1999). Bioreactors, photo. In Encyclopedia of Bioprocess Technology: Fermentation, Biocatalysis and Bioseparation (Vol. 1) (Flickinger, M.C. and Drew, S.W., eds). In pp. 395–419, Wiley.

73. Ugwu, C.U.; Aoyagi, H. & Uchiyama, H. (2008). Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology,* 99, (10), 4021-4028.

74. UPME, Unidad de Planeación Minero Energética del Ministerio de Minas y Energía -UPME- & IDEAM, Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Medio Ambiente (1993). Atlas de radiación solar de Colombia. Colombia. Recuperado de: *http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21129/.../2a207e33-fe43-4aa3-930d-70ba60b10d57*

75. Urgate, D.G.; Walsh, M.E.; Shapouri, H. & Slinky, P. (2003). The economical impacts of bioenergy crop production in the US agriculture. *USDA Agricultural Economic Report, 816, (*41).

76. Weissman, J.C. & Goebel, R.P. (1987). Design and analysis of microalgal open pond systems for the purpose of producing fuels: a subcontract report. US Doeseri. USA. Recuperado de: *https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/2840.pdf*

77. Yuan, J.S., Tiller, K.H., Al-Ahmad, H., Stewart, N.R. & Stewart, C.N. Jr (2008). Plants to power: bioenergy to fuel the future. *Trends Plant Science,* 13, 421-429.

Conflicto de Intereses
Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses

Recibido: Marzo 17 de 2017
Aceptado: Mayo 02 de 2017