

Revisión crítica

Uso de microalgas como alternativa a las tecnologías disponibles de mitigación de emisiones antropogénicas de CO₂

González-López C.V*., Acién F.G., Fernández-Sevilla J.M. y Molina E.

Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Almería, E04120, Almería, España

*Autor de correspondencia: cynthiagonzalez@ual.es

Resumen

El cambio climático es un tema de creciente interés en los últimos años. El desarrollo industrial ha llevado a un incremento en las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero que están contribuyendo al calentamiento global. En este sentido, los combustibles fósiles son la principal fuente de CO₂ y el sector eléctrico es uno de los mayores emisores. Por este motivo, se están desarrollando tecnologías que permitan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero: desde la mejora de la eficiencia de los procesos hasta técnicas de captura y almacenamiento de CO₂. En este trabajo se revisan las principales técnicas disponibles y entre ellas el uso de microalgas como sistema de reducción de emisiones, ya que éstas necesitan CO₂ para su crecimiento por lo que es posible emplear gases de combustión valorizando así el CO₂ mediante su conversión en biomasa y, en última instancia, en biocombustibles.

Palabras clave: *CO₂, Mitigación, Microalgas, Gas de combustión, Cambio climático.*

Microalgae as an alternative to current technologies to mitigate anthropogenic CO₂ emissions

Abstract

Climate change has become an issue of increasing interest in recent years. Industrial development has led to an increase of anthropogenic greenhouse gases emissions which contribute to global warming. In this sense fossil fuel is the main CO₂ source and electricity generation is one of the major emitters. Therefore, these industries are conducting research on technologies to reduce greenhouse gases emissions: either improving the efficiency of combustion processes or by CO₂ capture and storage. This work presents a review of the main available techniques for CO₂ mitigation and among them the use of microalgae. Microalgae need CO₂ to grow, so it is possible to valorize the CO₂ of combustion gases by its conversion into biomass and as a last resort into biofuels.

Key Words: *CO₂, Mitigation, Microalgae, Combustion gas, Climate change.*

1. Introducción

Durante los últimos años, tanto la comunidad científica como la sociedad en general han mostrado una creciente preocupación en torno al cambio climático, debido principalmente a las emisiones de gases de efecto invernadero que se incrementaron un 70 % entre 1970 y 2004 (Rogner *et al.*, 2007). Según el Panel Inter-gubernamental sobre el Cambio Climático, se ha observado un aumento en la temperatura media global del aire y los océanos, y se están produciendo cambios en muchos sistemas físicos y biológicos (IPCC, 2007a). Si no se producen cambios en las políticas actuales sobre desarrollo sostenible y mitigación del cambio climático, las emisiones globales de gases de efecto invernadero continuarán aumentando durante las próximas décadas conllevando un mayor calentamiento global que afectaría a áreas tan diversas como la agricultura, los recursos hídricos, los fenómenos meteorológicos extremos, la salud humana, etc.

Los gases de efecto invernadero se generan tanto de forma natural como por la acción del hombre. Teniendo en cuenta los que son generados únicamente por el hombre, la quema de combustibles fósiles es la mayor fuente de emisiones aportando en torno al 75 % del dióxido de carbono y gran parte del metano y del óxido nitroso (IPCC, 2001; Rogner *et al.*, 2007). Parte de las emisiones son generadas por fuentes dispersas como el transporte o el sector residencial y comercial, sobre los cuales es más complejo llevar a cabo acciones. Sin embargo, el resto de las emisiones se producen en focos estacionarios donde sí es posible aplicar tecnologías que conlleven la captura de CO₂. En este sentido, el sector eléctrico es uno de los mayores emisores de CO₂. Debido a la enorme magnitud de dichas emisiones, no es posible llevar a cabo su mitigación mediante una sola tecnología, sino que es necesario aplicar una combinación de las ya existentes,

así como desarrollar nuevas alternativas que, en conjunto, permitan abordar este objetivo. Además de las técnicas relacionadas con la reducción de emisiones, como la generación de energía eléctrica a través de otras fuentes como la energía nuclear o las renovables, o el aumento en la eficiencia de los procesos, se están desarrollando nuevas técnicas relacionadas con la captura de CO₂ y el almacenamiento o valorización del mismo (Herzog *et al.*, 1997; IPCC, 2005). Entre ellas se ha propuesto el uso de microalgas o microorganismos fotosintéticos en general ya que presentan una alternativa eficiente a la transformación del CO₂ en productos valorizables e incluso como biocombustibles (Skjånes, 2007; Figueroa *et al.*, 2008; González López *et al.*, 2009).

2. Tecnologías de Mitigación de Emisiones.

2.1 Técnicas de reducción de emisiones y aumento de la eficiencia energética

En primer lugar, es necesario dejar constancia de la gran importancia que presentan, respecto a la mitigación de CO₂, ciertas técnicas que no están relacionadas con la captura y el almacenamiento del mismo. Cabe destacar los siguientes aspectos:

- **Eficiencia energética.** A menudo resulta más rentable invertir en el perfeccionamiento de la eficiencia energética de uso final, que aumentar el suministro de energía a fin de satisfacer la demanda de servicios energéticos. El perfeccionamiento de la eficiencia energética tiene un efecto positivo en la seguridad energética y en la eliminación local y regional de la contaminación del aire (IPCC, 2007b). Las centrales térmicas convencionales tienen una eficiencia energética en torno al 33 %, que se puede aumentar por encima del 50 % en las centrales de ciclo combinado. Es fundamental invertir esfuerzos en mejorar la eficiencia energética al máximo posible, ya

que así se conseguirán importantes reducciones en las emisiones de CO₂ (IPCC, 2007b).

- **Energías alternativas.** El uso de energías alternativas es fundamental. La energía nuclear representa un papel importante, ya que no produce emisiones de CO₂. Sin embargo, genera residuos nucleares causando el rechazo de gran parte de la sociedad. Ello requiere aumentar los esfuerzos en el desarrollo y mejora de energías renovables para hacerlas eficientes y más económicas. Así, la energía hidroeléctrica, la solar, la eólica y la geotérmica pueden contribuir ampliamente a la reducción de las emisiones de CO₂ a largo plazo (Herzog *et al.*, 1997).

- **Forestación.** Las plantas y los árboles secuestran CO₂ durante su crecimiento hasta que el bosque alcanza su madurez. Durante la vida de un bosque típico tropical se tiene

una productividad anual de biomasa seca entre 3 y 10 toneladas por hectárea (Herzog *et al.*, 1997). De esta manera, se puede aumentar la cantidad de CO₂ secuestrado mediante la prevención de la deforestación, la reforestación y la conversión de tierras dedicadas a otros usos en bosques, siempre que éstas sean de baja productividad para no quitar beneficios de otras prácticas que pudieran realizarse en ellas. Es importante prevenir el riesgo de incendios u otras acciones que conllevaran la liberación de grandes cantidades de CO₂ de nuevo a la atmósfera.

2.2 Técnicas de captura de CO₂

Las técnicas de captura de gases se dividen en tres grandes grupos (Figura 1): captura previa a la combustión (precombustión), posterior a la combustión (postcombustión) y combustión con oxígeno (oxicombustión).

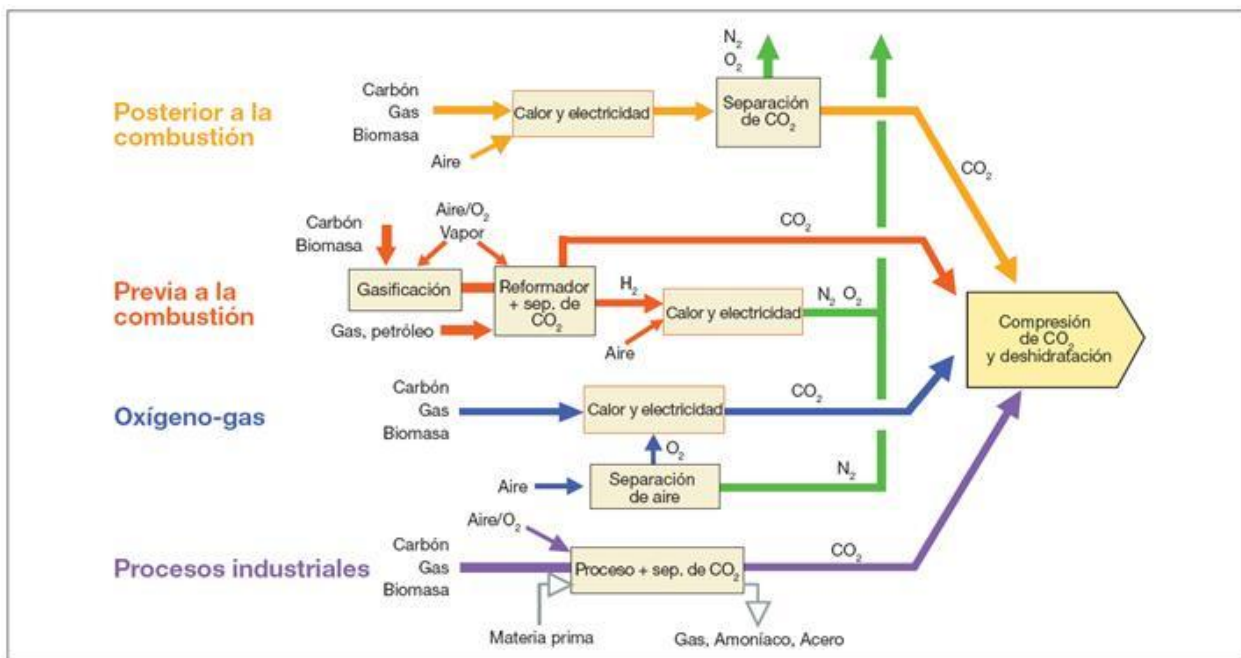


Figura 1. Técnicas de captura de dióxido de carbono (Fuente: IPCC, 2005).

- **Precombustión.** El combustible se procesa en un reactor con vapor y aire u oxígeno de manera que se obtiene lo que se conoce como "gas de síntesis" consistiendo, básicamente, en CO y H₂. La reacción del

CO con vapor en un segundo reactor produce H₂ adicional y CO₂ (15-60 % en volumen). Esta mezcla se puede separar fácilmente en una corriente concentrada de CO₂ y otra de H₂, pudiendo utilizarse este

último para generar energía eléctrica y/o calor. Esta tecnología es de aplicación en centrales eléctricas de ciclo combinado de gasificación integrada (IGCC). Actualmente, se emplea en la producción de hidrógeno para la fabricación de fertilizantes y amoníaco y en el refino de petróleo (IPCC, 2005).

- **Postcombustión.** En este caso, el combustible fósil se quema con aire y se procede a la separación del CO₂ de los gases de combustión generados (3-15 % en volumen). Para ello, existen otras opciones como la separación por membranas, el uso de sorbentes sólidos, sistemas enzimáticos, líquidos iónicos, etc. (Figuerola *et al.*, 2008), si bien lo más usual es realizar una absorción química utilizando una solución acuosa de aminas primarias, secundarias o terciarias, tecnología que se emplea desde hace varias décadas en la industria de refinamiento de gas. Para una central eléctrica convencional de carbón pulverizado, el proceso es técnicamente viable pero es muy costoso debido al enorme consumo energético de regeneración de las aminas: en torno a 4 MJ/kg CO₂ con el uso de monoetanolamina (Singh *et al.*, 2003; Abu-Zahra *et al.*, 2007), además de presentar menor estabilidad debido a la suciedad de los gases emitidos. Por ello, actualmente se trabaja para reducir los costes, ya que la mayoría de las centrales hasta hoy son de este tipo, de manera que esta tecnología es la que mayor potencial presenta a corto plazo.

- **Oxicombustión.** Esta última opción utiliza oxígeno de alto grado de pureza (95-99 %) en lugar de aire para llevar a cabo la quema del combustible. El oxígeno se mezcla previamente con parte del gas de combustión recirculado, ya que la combustión de carbón con únicamente oxígeno daría lugar a temperaturas demasiado altas. Así, se obtiene un gas de combustión compuesto por vapor de agua y CO₂ a una alta concentración (más del 80 % en volumen), lo que facilita su posterior separación (IPCC,

2005). Sin embargo, la separación previa del oxígeno del aire tiene un gran requerimiento energético. Estos sistemas se encuentran en fase de demostración, aplicándose en algunas plantas de nueva construcción (Chen *et al.*, 2012).

El proceso de captura y compresión del gas, necesario en todas las opciones, requiere energía, por lo que las centrales tienen que producir la energía con la que abastecer al mercado más la necesaria para llevar a cabo estos procesos, lo cual hace que la eficiencia de las centrales baje aún más. Esto conlleva mayores emisiones de CO₂ y de otros contaminantes, si bien se conseguirá capturar el 80-90 % del CO₂ emitido en conjunto. El aumento del consumo de combustible por kWh para una central que capture el 90 % del CO₂ utilizando la mejor tecnología existente oscila entre el 24-40 % para las nuevas plantas hipercríticas, el 11-22 % en las plantas de ciclo combinado de gas natural (CCGN) y el 14-25 % en los sistemas de ciclo combinado con gasificación integrada (IGCC) basados en carbón (IPCC, 2005). Por ello, se está investigando para aumentar la eficiencia de los procesos y reducir el coste.

2.3 Técnicas de almacenamiento del CO₂

Tras la captura del CO₂ se puede proceder a su almacenamiento. El almacenamiento geológico a largo plazo es la tecnología más aceptada, si bien existen otras opciones que se resumen a continuación.

- **Almacenamiento geológico.** Tres tipos de formaciones geológicas son las mejores candidatas para el almacenamiento de CO₂: los yacimientos de petróleo y gas, las formaciones salinas profundas y las capas de carbón inexplotables. De esta manera, el CO₂ se inyecta en forma condensada en una formación rocosa subterránea. Si se trata de formaciones salinas o yacimientos de petróleo o gas a una profundidad mayor de 800 m, diversos mecanismos de retención físicos y geoquímicos evitarían que el CO₂

inyectado se desplazase hacia la superficie. El almacenamiento en capas de carbón puede realizarse a menos profundidad y se basa en la adsorción del CO₂ por la hulla, aunque la viabilidad técnica depende en gran medida de la permeabilidad de la capa de carbón. El almacenamiento de CO₂ en formaciones geológicas profundas utiliza tecnologías desarrolladas por la industria petrolera y del gas y ha demostrado ser económicamente viable en condiciones específicas para los yacimientos de petróleo y gas y las formaciones salinas, aunque no todavía para el almacenamiento en capas de carbón inexplorables, donde aún se encuentra en fase de demostración (IPCC, 2005). Actualmente, este método de almacenamiento es el que presenta mayor potencial.

- **Almacenamiento oceánico.** Este tipo de almacenamiento podría llevarse a cabo, bien inyectando y disolviendo el CO₂ en la columna de agua a más de 1000 m de profundidad mediante un gasoducto fijo o un buque en desplazamiento, o bien depositándolo a través de un gasoducto fijo o una plataforma marítima en el fondo oceánico a más de 3000 m de profundidad, donde formaría una especie de lago debido a su mayor densidad que el agua. Esta tecnología ofrecería el mayor potencial de almacenamiento *a priori*. Sin embargo, su uso prácticamente se ha descartado (la Convención de Londres de 1972 lo prohíbe permitiendo sólo el almacenamiento en formaciones geológicas submarinas) debido a que se espera que alterase el medio químico local y tuviera repercusiones sobre el ecosistema, además de la incertidumbre de que los depósitos se mantuvieran estables y no se produjera una nueva liberación de CO₂ (Jones y Young, 2009).

- **Carbonatación mineral.** La reacción del CO₂ con óxidos metálicos, que abundan en los minerales silicatos, produce carbonatos estables (Back *et al.*, 2011). La reacción natural es muy lenta, por lo que ha de ser

mejorada mediante el tratamiento previo de los minerales, lo que conlleva un elevado consumo energético. Por otra parte, se produciría un importante impacto ambiental derivado de la explotación mineral y la posterior eliminación necesaria de los productos resultantes que no tuvieran aplicación. Esta tecnología se encuentra en fase de demostración (IPCC, 2005).

2.4 Técnicas de reutilización de CO₂

Una vez capturado el CO₂, la alternativa al almacenamiento es el uso de éste. Sin embargo, la dificultad reside en encontrar suficientes usos del mismo para contribuir a una mitigación significativa de CO₂; a pesar de que hay diversas opciones, su contribución es pequeña.

- **Usos industriales.** Los usos industriales comprenden los procesos químicos y biológicos en los que el CO₂ actúa como reactivo, como en la producción de urea y metanol, así como diversas aplicaciones tecnológicas que usan directamente el CO₂, como en el sector hortícola, refrigeración y congelación, envasado de alimentos, soldadura, bebidas carbonatadas, como gas propelente, en limpieza industrial o como agente extintor, entre otros. En todo el mundo se utilizan unas 120 Mt/año de CO₂ (sin tener en cuenta la extracción mejorada de petróleo), de manera que éste se mantiene en un “depósito químico de carbono” (las reservas de productos manufacturados carbonatados). Sin embargo, la duración de estos almacenamientos suele ser baja, de días o meses, por lo que no es efectiva como método de mitigación. El que se almacena a largo plazo (durante siglos) está tan sólo en torno a 1 Mt/año de CO₂ (IPCC, 2005).

- **Extracción mejorada de petróleo.** La extracción de petróleo se realiza mediante una extracción primaria, en la que el petróleo es extraído mediante bombeo. Una vez que la presión en la reserva alcanza un valor tal que no hace posible la recuperación del petróleo, se puede incrementar la recupe-

ración mediante la inyección de agua o vapor. Por último, se puede realizar una extracción terciaria (mejorada) aplicando técnicas entre las que se encuentra la inyección de gases como el CO₂ que incrementan aún más la producción. Esta técnica se encuentra en uso a escala industrial (Godec *et al.*, 2011).

- **Recuperación de metano en capas de carbón.** Esta técnica se encuentra en auge en la industria extractiva del carbón. El CO₂ inyectado en la capa facilita la desorción del metano retenido en la propia matriz del carbón, además del gas original retenido en los poros. Así, es posible obtener un ciclo: el CO₂ resultante de la quema de combustibles fósiles se inyecta en capas de carbón, no explotables, favoreciendo la extracción del metano, el cual es empleado nuevamente como combustible. El requisito básico para aplicar esta técnica es que presente una considerable profundidad y continuidad (que no tenga fallas o discontinuidades).

- **Conversión química a combustibles.** El CO₂ se puede utilizar como sustituto de otros compuestos con una única molécula de carbono, como el monóxido de carbono, el metano y el metanol. La producción de metanol es un ejemplo de la síntesis de combustibles líquidos utilizando CO₂ y H₂: $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$. Sin embargo, el proceso requiere el desarrollo de sistemas de catalizadores que aumenten la eficiencia. Además, la producción de hidrógeno requiere mucha energía y, en caso de tener hidrógeno disponible, resultaría más provechoso su uso directo que su conversión a metanol. Por otro lado, se puede emplear el CO₂ para la producción de hidrocarburos. Es posible aprovechar el carbono contenido en el CO₂ mediante catalizadores especiales que rompen estos enlaces químicos y crean moléculas de carbono de cadena larga que pueden convertirse fácilmente en combustibles (Centi *et al.*, 2007). Esta tecnología también requiere mayor investigación.

- **Conversión biológica en combustibles.**

Los organismos fotosintéticos son aquellos que utilizando la energía solar transforman el CO₂ en biomasa y oxígeno. Los árboles y plantas se pueden cultivar con el objetivo de reemplazar en parte a los combustibles fósiles, de forma que se produzca una reducción neta de las emisiones de CO₂. Sin embargo, esta aplicación queda reducida a pequeñas áreas en el entorno de fábricas de tamaño medio para realizar una co-combustión con carbón, ya que aunque existen amplias extensiones a lo largo del mundo donde se podrían instalar estas plantaciones, el transporte de la biomasa a distancias mayores de 50-75 km supondría un gasto energético equivalente a la mayor parte del CO₂ fijado en la biomasa. Además, es necesario conseguir mejoras en la eficiencia energética del proceso, ya que ésta se reduce debido a la pulverización necesaria de la biomasa y a la vaporización de la mezcla asociada. En este sentido, la gasificación termoquímica podría tener potencial, pero aún requiere mayor investigación. Por otro lado, la biomasa se puede procesar para convertirla en biocombustibles como bioetanol, biodiésel, metano o hidrógeno en función de la composición de la misma (Pulz y Gross, 2004; Skjånes *et al.*, 2007). Sampson (1992) estimó que a lo largo de este siglo se podrían mitigar entre 4 y 16 billones de toneladas de CO₂ anualmente. En este sentido, la biotecnología de microalgas presenta gran potencial, ya que estos microorganismos crecen a una velocidad mucho mayor que las plantas superiores pudiendo llegar a ser, bajo ciertas condiciones de crecimiento, hasta 10 veces superior (Herzog *et al.*, 1997). Los esfuerzos han de centrarse en mejorar la eficiencia de conversión de la energía solar en biomasa y en reducir el coste económico del proceso.

3. Depuración de CO₂ Mediante Microorganismos Fotosintéticos

3.1 Fundamento del proceso

La utilización de microorganismos fotosintéticos para la fijación de CO₂ se basa en el proceso natural de fotosíntesis. Los microorganismos fotosintéticos más importantes son las cianobacterias y las microalgas, los cuales son los mayores fijadores naturales de dióxido de carbono del planeta. Así, la productividad media de una masa forestal puede alcanzar las 10 toneladas anuales de biomasa por hectárea, lo que supone una fijación de CO₂ de 17 t/Ha·año. Sin embargo, la utilización de microorganismos fotosintéticos puede alcanzar una productividad de 75 t/Ha·año en reactores abiertos con una superficie de 10 Ha (Benemann, 1987), por lo que demuestran ser una alternativa mucho más eficaz. Además, estos sistemas presentan la ventaja de que no requieren terrenos ni aguas de buena calidad, por lo que no compiten por los recursos propios de la agricultura (Hall y House, 1993). Para que este sistema funcione adecuadamente hay que: (i) elegir un microorganismo con elevada velocidad de crecimiento y robustez, (ii) optimizar los sistemas y las condiciones de cultivo para conseguir la mayor fijación de CO₂ posible y (iii) definir las vías de utilización de la biomasa generada.

El esquema más simple de fijación fotosintética de CO₂ con microalgas o cianobacterias consiste en inyectar directamente el gas de combustión en el cultivo. Esto provoca la acidificación y el calentamiento del mismo, por lo que se han llevado a cabo numerosos trabajos encaminados a aislar y evaluar estirpes capaces de soportar estas condiciones, como las estirpes *Chlorella* sp. UK001 (Hirata *et al.*, 1996) o *Chlorella* sp. T-1 (Maeda *et al.*, 1995). También han sido ensayadas *Synechocystis aquatilis* (Murakami e

Ikenouchi, 1997), *Tetraselmis* sp. Tt-1 (Hon-nami y Kunito, 1998) o *Chlorococcum littorale* (Murakami e Ikenouchi, 1997; Kurano *et al.*, 1995).

Respecto a los sistemas de cultivo, hasta hace pocos años se basaban en reactores abiertos tipo “raceway”, de 0.10-0.20 m de profundidad y gran superficie, sin apenas control de las condiciones de operación, en los que las productividades máximas eran de 0.1 g/L·día (Pulz, 2001). Hoy en día, debido a la mejora en los diseños y el abaratamiento de las materias primas, existen en operación reactores cerrados de cientos de metros cúbicos con productividades más de 15 veces superiores (Molina *et al.*, 1994; Acién *et al.*, 1998; Pulz, 2001). Así, Molina *et al.* (2001) alcanzaron una productividad de biomasa de 1.9 g/L·día con *Phaeodactylum tricornutum* en un fotobiorreactor tubular de 0.2 m³. Se han diseñado y operado reactores cerrados, tubulares y planos a escala de planta piloto con productividades de hasta 75 g/m²·día, equivalente (considerando que la biomasa contiene un 45 % de carbono) a una tasa de fijación de CO₂ de 129 g/m²·día (Benemann, 1989). Los fenómenos que reducen la productividad de los sistemas basados en microorganismos fotosintéticos son la ineficiente conversión de la energía luminosa en biomasa, la acumulación de oxígeno en el cultivo, el consumo de biomasa por respiración en las zonas oscuras del reactor, y la insuficiente mezcla, que provoca un defectuoso suministro de CO₂ y nutrientes, así como fotoinhibición en las zonas externas del reactor intensamente iluminadas (Alías *et al.*, 2004). De esta manera, para el diseño de un fotobiorreactor para la producción de microalgas o cianobacterias es necesario tener en cuenta la relación existente entre los diferentes factores que gobiernan estos fenómenos.

Actualmente, la producción de microalgas a nivel industrial sólo se lleva a cabo en reactores abiertos con una productividad de biomasa en torno a 50 t/Ha·año. La

eficiencia energética de los sistemas actuales de producción de biomasa supone que alrededor del 2 % de la energía solar recibida es fijada en forma de energía bioquímica, es decir, alrededor de 200 MJ/m²·año. Sin embargo, la eficiencia de la fotosíntesis puede llegar al 10 % de la radiación global, lo que permitiría incrementar dicho valor traduciéndose en tasas máximas de fijación de CO₂ de hasta 600 t/Ha·año.

3.2 Experiencias previas

Los cultivos de microalgas han sido propuestos desde hace más de cincuenta años como fuente de combustibles renovables para reducir el efecto del calentamiento global (Oswald y Golueke, 1960). La mayor ventaja del uso de microalgas para la eliminación de gases de efecto invernadero es que necesitan fuentes de CO₂, como los gases de combustión de centrales térmicas, y presentan altas productividades consumiendo pocos recursos. Esto motivó que desde mediados de los años 70 el Departamento de Energía de los Estados Unidos de América (DOE) financiase proyectos de investigación como el “Aquatic Species Program” (ASP) centrados en la producción de combustibles a partir de microalgas, comenzando con la producción de microalgas y su posterior transformación en biogás y biodiésel (Benemann *et al.*, 1977; Sheehan *et al.*, 1998). En Japón se llevó a cabo el proyecto “Research Innovative Technologies of the Earth” (RITE) sobre la biofijación de CO₂ con microalgas (Usui y Ikenouchi, 1996, Ikuta *et al.*, 2000).

En la última década se siguen impulsando proyectos dirigidos a utilizar microalgas para la eliminación de CO₂ de gases de combustión, aunque actualmente la atención se centra en maximizar la velocidad de fijación de CO₂ mediante selección de estirpes adecuadas y modificación genética y mediante la optimización de los sistema de cultivo, más que en la producción de

combustibles como el biodiésel. En Japón, la “Mitsubishi Heavy Industries” ha financiado proyectos en este sentido (Nakajima y Ueda, 2000). En los E.E.U.U. ha sido el DOE-NETL (Laboratorio Nacional de Tecnología Energética) el que ha financiado proyectos basados en el empleo de fotobiorreactores cerrados (Nakamura *et al.*, 2001) incluyendo el empleo de fibra óptica (Bayless *et al.*, 2001), así como un macroproyecto en el “Pacific Northwest National Laboratory” (Benemann, 2003). El DOE también ha financiado una red internacional sobre biofijación de CO₂ con microalgas en la que participan empresas como EniTechnologie, Rio Tinto, ENEL Produzione Ricerca o ExxonMobil, entre otras. El objetivo del “DOE-NETL Carbon Sequestration Program” era el de desarrollar tecnologías de secuestro de CO₂ con un coste de 2.7 \$ por tonelada de CO₂. Sin embargo, actualmente, la tecnología de eliminación de CO₂ con microalgas para su transformación en biocombustibles no puede alcanzar este objetivo si no es mediante la mejora de la economía del proceso por valorización de los co-productos y/o servicios adicionales obtenidos (Benemann, 2003). En cuanto a Europa, también se están financiando proyectos de investigación como el “Aquafuels” o el “Enerbioalgae”. Mediante el primero se ha elaborado informes de las diversas iniciativas europeas llevadas a cabo en materia de producción de biocombustibles de algas y se ha tenido en cuenta el análisis de ciclo de vida considerando aspectos medioambientales, económicos y de sostenibilidad (2010). El proyecto “Enerbioalgae” tiene como finalidad el aprovechamiento y depuración de aguas residuales, urbanas e industriales a la vez que la depuración de gases de combustión mediante microalgas. En Europa se ha aprobado recientemente la construcción de 3 plantas demostrativas a escala de 10 Ha para la producción de biocombustibles con microalgas, dos de las

cuales se van a ubicar en España. Una de ellas, la gestionada dentro del proyecto "ALL-GAS" coordinado por Aqualia S.A. implica precisamente el acoplamiento entre el tratamiento de aguas residuales, la captura de CO₂ de gases de combustión y la producción de biomasa de microalgas con fines energéticos, suponiendo uno de los mayores retos tecnológicos actuales en este campo.

3.3 Líneas de investigación

Se han realizado diversas experiencias a pequeña y media escala sobre el uso real de gas de combustión como fuente carbonada para la producción de microalgas. En el caso más sencillo, el gas de combustión se inyecta directamente en reactores abiertos. Así, Negoro *et al.* (1992) introdujeron gas de combustión con un 5-15 % de CO₂ en reactores abiertos de 0.10-0.20 m de profundidad donde el CO₂ era fijado por microalgas como *Nannochloropsis* sp. y *Phaeodactylum* sp. Los resultados mostraron que la productividad no se veía influenciada por la presencia de otros contaminantes como NO_x y SO_x (Negoro *et al.*, 1993). Hauck *et al.* (1996) observaron que los bajos niveles de NO_x presentes en los gases de combustión no inhibían el crecimiento de *Chlorella*. Sin embargo, en ambos casos la productividad de biomasa fue inferior a 0.1 t/Ha·día (0.16 tCO₂/Ha·día) debido a la baja eficiencia del sistema de cultivo.

El empleo de reactores más eficaces permite aumentar dicho valor. Así, Doucha *et al.* (2005) utilizaron gas de combustión generado por una caldera de calefacción de gas natural para la producción en externo de *Chlorella* sp. en un fotobiorreactor de 55 m² de capa delgada. Éste consistía en una superficie ligeramente inclinada de 50 m de longitud por la que se hace descender el cultivo, con una altura de líquido de 6 mm y una velocidad de 0.5 m/s, expuesto a la luz solar directa. Los resultados mostraron un 50 % de reducción en la concentración de CO₂

del gas de combustión después de su paso por el reactor. Las concentraciones de NO_x (45 mg/m³) y CO (3 mg/m³) presentes en el gas de combustión no mostraron efecto adverso alguno. La eficiencia fotosintética de estos cultivos varió entre 5.6 % y 6.9 %, mientras que la productividad de biomasa fue de 19.4-22.8 g/m²·día. Además, se produce una desnitrificación de los gases de combustión con una reducción del 10 % del contenido en NO_x original. La tasa máxima de fijación neta de CO₂ en el sistema fue de 0.4 t/Ha·día.

Las mayores velocidades de fijación de CO₂ verificadas en condiciones externas reales fueron obtenidas mediante fotobiorreactores planos verticales. Otsuki (2001) utilizó un sistema de paneles verticales de cristal con 580 paneles de 2.3x2.3x0.2 m, ocupando un total de 3068 m² y con un volumen de cultivo total de 497 m³, instalados en el terrado de una central térmica de gas natural de 1000 MW. El sistema de cultivo se operó en continuo a concentraciones de biomasa de 3.0 g/L con inyección directa de los gases de combustión a demanda, previo enfriamiento en una torre de enfriamiento y soplado. La biomasa se recuperó mediante filtración y secado por pulverización obteniendo 30 t/año. En estas condiciones, la velocidad de fijación de CO₂ alcanzó las 0.5 t/Ha·día. El estudio demostró que, aunque el consumo de energía del proceso fue de 125 kWh/día, la fijación de energía bioquímica en la biomasa fue de 460 kWh/día, lo que refleja una producción neta de 335 kWh/día. Así, el balance neto resulta en que de los 153 kg CO₂/día fijados, el autoconsumo de energía implica una emisión de 64 kg CO₂/día (0.51 kg CO₂/kWh), por lo que la fijación neta de CO₂ fue de 89 kg/día.

Por otra parte, también es posible llevar a cabo una captura previa de CO₂ en una fase líquida mediante una absorción gas-líquido. Posteriormente, esta fase líquida rica en carbono inorgánico es suministrada a los cultivos de microalgas para su conversión en

materia orgánica. Acién *et al.* (2009) han patentado recientemente un proceso de captura de CO₂ mediante fases acuosas carbonatadas con este fin en el marco del proyecto de investigación “CENIT CO₂” (España), fruto del cual además se ha instalado una planta de demostración para la fijación de CO₂ y producción de biocombustibles en una central térmica convencional. La absorción previa del CO₂ en una fase acuosa reduce drásticamente las pérdidas de CO₂ a nivel de suelo que se producen en los sistemas de inyección directa de gases de combustión. También existe una planta de producción de microalgas con gas de combustión procedente de una unidad de cogeneración en Hawaii (Pedroni *et al.*, 2001). El gas de combustión es previamente depurado en una unidad de absorción, donde el CO₂ es transferido a un medio acuoso que, posteriormente, es suministrado al cultivo de microalgas.

Además, se han llevado a cabo experiencias relacionadas con la generación y depuración de biogás procedente de procesos de digestión anaerobia empleando microalgas. Así, Balloni *et al.* (1983) evaluaron un sistema en el que el biogás generado por digestión anaerobia de residuos orgánicos era quemado y el gas de combustión

resultante era utilizado como fuente de carbono para la producción de microalgas. La biomasa generada era posteriormente separada y reutilizada en el proceso de digestión anaerobia para la obtención de energía. Por otro lado, Traviesco *et al.* (1993) operaron un proceso en el que el biogás procedente de un digestor anaerobio era directamente burbujeado en un reactor de microalgas para su depuración. El contenido en CO₂ del gas se redujo desde un 44-48 % en volumen a la entrada hasta un 2-11 % en volumen a la salida, resultando un gas depurado con un contenido del 88-97 % en volumen de metano.

3.4 Proceso de absorción de CO₂ en fases acuosas carbonatadas y depuración biológica

Acién *et al.* han propuesto un proceso de absorción de CO₂ en fase líquida carbonatada acoplado a una posterior depuración del mismo mediante microorganismos fotosintéticos (Acién *et al.*, 2009; González López *et al.*, 2009). El esquema del proceso se resume en la Figura 2. Los gases de combustión pasan por una etapa de captura, donde el CO₂ es absorbido en una fase acuosa con bicarbonato/carbonato.

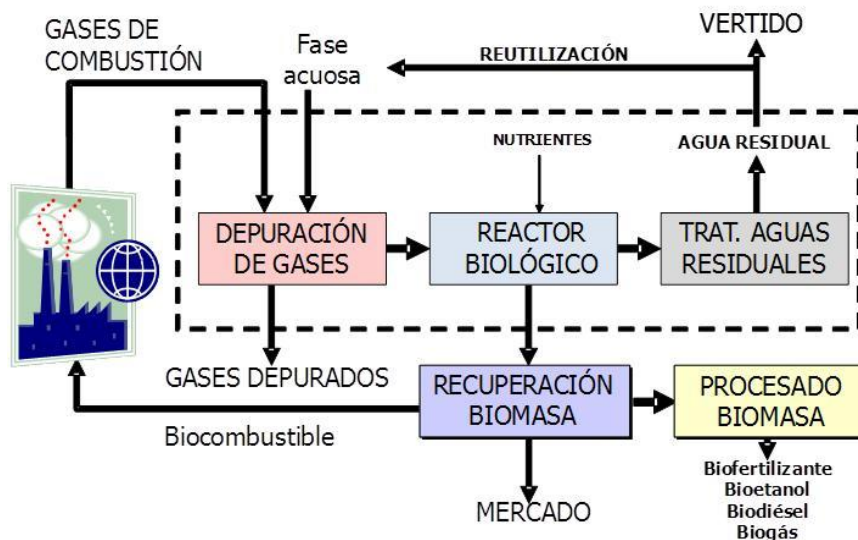


Figura 2. Proceso de depuración biológica de CO₂ propuesto por Ación *et al.*

El tipo de contactor empleado puede ser columna de relleno o columna de burbujeo, resultando más útil el uso de ésta última, pues el control del tiempo de residencia en el interior de la columna permite incrementar la concentración de carbono inorgánico absorbido en la fase líquida (Tabla 1). El efluente de dicha columna de absorción es suministrado a un fotobiorreactor, donde los microorganismos fotosintéticos transforman

el carbono inorgánico en materia orgánica. A continuación, tiene lugar una etapa de separación, de la cual se obtiene por un lado la materia orgánica y, por otro, un sobrenadante que será recirculado a la etapa de captura de CO₂. Por último, la materia orgánica generada podrá ser procesada para su conversión en biocombustibles, tales como el bioetanol, el biodiésel, etc.

Tabla 1. Absorción gas-líquido en columnas de relleno y burbujeo.

	Columna de relleno	Columna de burbujeo
Capacidad absorción líquido	0.24 gC/L 0.90 gCO ₂ /L	2.0 gC/L 7.3 gCO ₂ /L
Caudal gas/líquido	4 v/v	110 v/v
Volumen unitario	0.064 m ³ /(kgCO ₂ /h)	0.043 m ³ /(kgCO ₂ /h)
Consumo energía	51 kJ/kgCO ₂	57 kJ/kgCO ₂
Consumo energía proceso MEA-DEA		4000 KJ/kgCO ₂

4. Conclusiones

El desarrollo de los países industrializados ha conducido a un creciente aumento de la concentración de gases de efecto invernadero que está contribuyendo al calentamiento global. Por ello, es necesario desarrollar tecnologías que permitan reducir las emisiones de dichos gases a la atmósfera. En este sentido, la biotecnología de microalgas presenta un elevado potencial para la valorización de CO₂ mediante su transformación en biocombustibles, tales como el biodiésel, bioetanol, biogás, etc. Los procesos que se están desarrollando suponen un ahorro energético para la industria eléctrica al eliminar la necesidad de modificar sus procesos de producción y permitir a la vez reducir sus emisiones y transformarlas en productos valorizables.

5. Reconocimientos

Este trabajo ha sido financiado por ENDESA Generación y el Centro para el Desarrollo

Tecnológico Industrial (CENIT-CO2), Ministerio de Educación y Ciencia (CTQ2004-07628-C02-01/PPQ) y Junta de Andalucía, Plan Andaluz de Investigación (BIO 173).

6. Referencias

- Abu-Zahra M.R.M., Schneiders L.H.J., Niederer J.P.M., Feron P.H.M. y Versteeg G.F. 2007. CO₂ capture from power plants. Part I. A parametric study of the technical performance based on monoethanolamine. *Int J Greenh Gas Con* 1 (1): 37-46.
- Ación F.G., García F., Sánchez J.A., Fernández J.M. y Molina E. 1998. Modelling of biomass productivity in tubular photobioreactors for microalgal cultures: effects of dilution rate, tube diameter and solar irradiance. *Biotechnol Bioeng* 58: 605-616.
- Ación F.G., Molina E., Fernández-Sevilla J.M., González C.V., Llamas B. and Ballesteros J.C. 2009. Liquid-phase gas collection.

- Patent WO/2009/112624. Endesa Generación S.A. to long carbon-chain hydrocarbons. *Green Chem* 9 (6): 671-678.
- Alías C.B., García-Malea M.C., Acién F.G., Fernández J.M., García J.L., Molina E. 2004. Influence of power supply in the feasibility of *Phaeodactylum tricor-nutum* cultures. *Biotech Bioeng* 87 (6):723-733.
- Back M., Bauer M., Stanjek H., Peiffer S. 2011. Sequestration of CO₂ after reaction with alkaline earth metal oxides CaO and MgO. *Appl. Geochem.* 26 (7):1097-1107.
- Balloni W., Florenzano G., Materrassi R., Tredici M., Soeder C.J., Wagner K. 1983. Mass cultures of algae for energy farming in coastal deserts. 2nd E.C. Conference on Energy from Biomass: 291-295.
- Bayless D.J., Kremer G.G., Prudich M.E., Stuart D.J., Vis-Chiasson M.L., Cooksey K., Muhs J. 2001. Enhanced practical photosynthetic CO₂ mitigation. In: Proceedings of the First National Conference on Carbon Sequestration, Department of Energy, USA.
- Benemann J.R., Weisman J.C., Koopman B.L., Oswald W.J. 1979. Energy production by microbial photosynthesis. *Nature* 268:19-23.
- Benemann J.R., Koopman B.L., Weisman J.C., Eisenberg D.M., Goebel P. 1980. Development of microalgae harvesting and high rate pond technologies in California. In: Shelef G. y Soeder C.J. (Eds.). *Algae biomass: production and use*. Elsevier North Holland, Amsterdam. Pp.457-496.
- Benemann J.R., Tillett D.M., Weissman J.C. 1987. Microalgae Biotechnology. *Trends Biotechnol* 5(2):47-53.
- Benemann J.R. 2003. Biofixation of CO₂ and greenhouse gas abatement with microalgae - Technology roadmap. Report submitted to the U.S. Department of Energy and the National Energy Technology Laboratory, USA.
- Centi G., Perathoner S., Winè G., Gangeri M. 2007. Electrocatalytic conversion of CO₂ to long carbon-chain hydrocarbons. *Green Chem* 9 (6): 671-678.
- Chen L., Yong S.Z., Ghoniem A.F. 2012. Oxy-fuel combustion of pulverized coal: Characterization, fundamentals, stabilization and CFD modeling. *Prog Energy Combust Sci* 38(2):156-214.
- Doucha J., Straka F., Lívanský K. 2005. Utilization of flue gas for cultivation of microalgae (*Chlorella* sp.) in an outdoor open thin-layer photobioreactor. *J Appl Phycol* 17(5):403-412.
- Figueroa J.D., Fout T., Plasynski S., McIlvried H., Srivastava R.D. 2008. Advances in CO₂ capture technology - The U.S. Department of Energy's Carbon Sequestration Program. *Int J Greenh Gas Con* 2:9-20.
- Godec M., Kuuskraa V., Van Leeuwen T., Melzer L.S., Wildgust N. 2011. CO₂ storage in depleted oil fields: The worldwide potential for carbon dioxide enhanced oil recovery. *Energy Procedia* 4:2162-2169.
- González López C.V., Acién F.G., Fernández J.M., Sánchez J.F., Cerón M.C., Molina E. 2009. Utilization of the cyanobacteria *Anabaena* sp. ATCC 33047 in CO₂ removal processes. *Bioresource Technol* 100(23):5904-5910.
- Hall D.O. & House J.I. 1993. Reducing atmospheric CO₂ using biomass energy and photobiology. *Energ Convers Manage* 34(9-11):889-896.
- Hauck J.T., Olson G.J., Scierka S.J., Perry M.B, Atai M.M. 1996. Effects of simulated flue gas on growth of microalgae. In: Proceedings of 212 American Chemical Society National Meeting, Orlando, USA. 1391-1396.
- Herzog H., Drake E., Adams E. 1997. CO₂ capture, reuse and storage technologies for mitigating global climate change. A White Paper. Report of the U.S. Department of Energy. Energy Laboratory. Massachusetts Institute of Technology, USA.

- Hirata S., Hayashitani M., Taya M., Tone S. 1996. Carbon dioxide fixation in batch culture of *Chlorella* sp. using a photobioreactor with a sunlight-collection device. *J Ferment Bioeng* 81(5):470-472.
- Hon-nami K & Kunito S. 1998. Microalgae cultivation in a tubular bioreactor and utilization of their cells. *Chin J Oceanol Limn* 16(1): 75-83.
- Ikuta Y., Weissman J.C., Benemann J.R. 2000. Carbon dioxide utilization - Microalgae biofixation. *Technology* 7S:137-145.
- IPCC. 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A. (Eds.). *Climate Change 2001*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- IPCC. 2005. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz B., Davidson O.R., de Coninck H. C., Loos M., Meyer L.A. (Eds.). Cambridge University Press, U.K. & U.S.A.
- IPCC 2007a. Summary for Policymakers: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E. (Eds.). *Climate Change 2007*. Cambridge University Press, U.K.
- IPCC. 2007b. Summary for Policymakers: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Metz B., Davidson O.R., Bosch P.R., Dave R., Meyer L.A. (Eds.). *Climate Change 2007*. Cambridge University Press, U.K. & U.S.A.
- Jones I.S.F. & Young H.E. 2009. The potential of the ocean for the management of global warming. *Int J Global Warming* 1(1-3):43-56.
- Kurano N., Ikemoto H., Miyashita H., Hasegawa T., Hata H., Miyachi S. 1995. Fixation and utilization of carbon dioxide by microalgal photosynthesis. *Energ Convers Manage* 36(6-9):689-692.
- Maeda K., Owada M., Kimura N., Omata K., Karube I. 1995. CO₂ fixation from the flue gas on coal-fired thermal power plant by microalgae. *Energ Convers Manage* 36(6-9):717-720.
- Mazzotti M., Pini R., Storti G. 2009. Enhanced coalbed methane recovery. *J Supercrit Fluid* 47(3):619-627.
- Molina E., Sánchez J.A., García F., García J.L., Acién F.G., López D. 1994. Outdoor culture of *Isochrysis galbana* ALII-4 in a closed tubular photo-bioreactor. *J Biotechnol* 37(2):159-166.
- Molina E., Fernández J., Acién F., Chisti Y. 2001. Tubular photobioreactor design for algal cultures. *I Biotechnol* 92:113-131.
- Murakami M. & Ikenouchi M. 1997. The biological CO₂ fixation and utilization project by RITE (2) - Screening and breeding of microalgae with high capability in fixing CO₂. *Energ Convers Manage* 38:S493-S497.
- Nakajima Y. & Ueda R. 2000. The effect of reducing light-harvesting pigment on marine microalgal productivity. *J Appl Phycol* 12(3-5):285-290.
- Nakamura T., Olaizola M., Cushman M., Masutani S. 2001. Capture and sequestration of CO₂ from stationary combustion systems by photosynthesis of microalgae. In: *Proceedings of the First National Conference on Carbon Sequestration*, Department of Energy, U.S.A.
- Negoro M., Shioji N., Ikuta Y., Makita T., Uchiumi M. 1992. Growth characteristics of microalgae in high-concentration CO₂ gas, effects of culture medium trace components, and impurities thereon. *Appl Biochem Biotech* 34-35(1):681-692.

- Negoro M., Hamasaki A., Ikuta Y., Makita T., Hirayama K., Suzuki S. 1993. Carbon dioxide fixation by microalgae photosynthesis using actual flue gas discharged from a boiler. *Appl Biochem Biotech* 39-40(1):643-653.
- Oswald W.J. & Golueke C.G. (1960). Biological transformation of solar energy. *Adv Appl Microbiol* 11:223-242.
- Otsuki T. 2001. A study for the biological CO₂ fixation and utilization system. *Sci Total Environ* 277(1-3):21-25.
- Pulz O. 2001. Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Appl Microbiol Biotechnol* 57(3):287-293.
- Pulz O. & Gross W. 2004. Valuable products from biotechnology of microalgae. *Appl Microbiol Biotechnol* 65:635-648.
- Rogner H.H., Zhou D., Bradley R., Crabbé P., Edenhofer O., Hare B., Kuijpers L., Yamaguchi M. 2007. Introduction. Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *In: Metz B., Davidson O.R., Bosch P.R., Dave R., Meyer L.A. (Eds.). Climate Change 2007. Cambridge University Press, U.K. & U.S.A.*
- Sampson R.N., Moll G.A., Kielbaso J.J. 1992. Opportunities to increase urban forests and the potential impacts of carbon storage and conservation. *In: Hair D. y Sampson R.N. (Eds.). Forests and global change 1 (5), American Forests, Washington, USA. 51-72.*
- Singh D., Croiset E., Douglas P.L., Douglas, M.A. 2003. Techno-economic study of CO₂ capture from an existing coal-fired power plant: MEA scrubbing vs. O₂/CO₂ recycle combustion. *Energy Convers Manage* 44(19):3073-3091.
- Sheehan J., Dunahay T., Benemann J.R., Roessler P. (1998). A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program- Biodiesel from Algae. Close-out Report. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA. Report NREL/TP-580-24190.
- Skjånes K., Lindblad P., Muller J. 2007. BioCO₂ - A multidisciplinary, biological approach using solar energy to capture CO₂ while producing H₂ and high value products. *Biomol Eng* 24(4):405-413.
- Traviesco L., Sánchez E.P., Benitez F., Conde J.L. 1993. *Arthrospira* sp. intensive cultures for food and biogas purification. *Biotechnol Lett* 15:1091-1094.
- Usui N. & Ikenouchi M. 1996. The biological CO₂ fixation and utilization project by RITE (1) - Highly-effective photobioreactor system. *Energ Convers Manage* 38:S487-492.