

Consorcios de microalgas-bacterias para la purificación biológica de biogás

Microalgae-bacterial consortia for the biological purification of biogas

Sheila de la Caridad Brunet-Ramos¹ <https://orcid.org/0000-0003-2154-2362>

Janet Jiménez-Hernández² <https://orcid.org/0000-0003-1631-6539>

Julio Pedraza-Gárciga² <https://orcid.org/0000-0003-1780-5297>

Lisbet Mailin López-González² <https://orcid.org/0000-0002-2362-5703>

¹Departamento de Ciencias Naturales. Universidad de Sancti Spíritus “José Martí Pérez”, Comandante Fajardo s/n. CP 60100. Sancti Spíritus. Cuba

²Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales. Universidad de Sancti Spíritus “José Martí Pérez”. Cuba

*Autor para la correspondencia. correo electrónico: sbrunet@uniss.edu.cu

RESUMEN

El biogás es un gas combustible obtenido de la digestión anaerobia de biomasa y posee un gran potencial para la producción de energía eléctrica y calor. Las impurezas que presenta resultan perjudiciales para los equipos que lo utilizan, siendo el metano el compuesto más importante. Existen diversos métodos de purificación de biogás: métodos físico-químicos, métodos biológicos y separación por membranas. Las tecnologías de tipo físico - químicos presentan altos costos respecto a los métodos biológicos. Estos últimos son generalmente de oxidación, obteniendo CO₂, agua, SO₄⁻² y NO³⁻. La tecnología simbiótica microalgas - bacterias se propone como una alternativa de eliminación del CO₂ y H₂S simultáneamente, con bajo costo energético e impacto ambiental. Las microalgas producen O₂ y favorecen la eliminación de NO₃⁻, PO₄³⁻ e iones metálicos. Tienen una rápida tasa de crecimiento duplicando su biomasa en

períodos de 3,5 h con ciclos de cosecha de 1 a 10 días. Se caracterizan por la captura eficientemente de CO₂, 1 kg de biomasa puede fijar aproximadamente 1,83 kg de CO₂. Pueden ser cultivadas en agua residual, contribuyendo a la remoción de nutrientes durante todo el año. A pesar de que las microalgas presentan una elevada capacidad de adaptación resulta indispensable controlar variables que inciden en su desarrollo, tales como: luz, temperatura, aireación, pH, concentración de CO₂, entre otros. El uso combinado de microalgas y bacterias, permite además la obtención de subproductos de alto valor agregado, por lo que en su producción es aplicable el concepto de biorrefinería.

Palabras clave: biogás; purificación; microalgas–bacterias; biomasa.

ABSTRACT

Biogas is a fuel gas obtained from the anaerobic digestion of biomass and has great potential for the production of electrical energy and heat. The impurities presents in biogas are harmful to the equipment that uses it, being methane the most important compound. There are various methods of biogas purification: physicochemical methods, biological methods and membrane separation. Physicochemical technologies have high costs compared to biological methods. The latter are generally of oxidation, obtaining CO₂, water, SO₄²⁻ and NO₃⁻. The symbiotic microalgae - bacteria technology is proposed as an alternative to eliminate CO₂ and H₂S simultaneously, with low energy cost and environmental impact. Microalgae produce O₂ and favors the elimination of NO₃⁻, PO₄³⁻ and metal ions. Microalgae have a rapid growth rate doubling their biomass in periods of 3,5 h with harvest cycles of 1 to 10 days. They are characterized by the efficient capture of CO₂, 1 kg of biomass can fix approximately 1,83 kg of CO₂. They can grow in wastewater, contributing to the removal of nutrients throughout the year. Although microalgae have a high adaptability, it is essential to control variables that affect their development, such as: light, temperature, aeration, pH, CO₂ concentration, among others. The combined use of microalgae and bacteria also allows obtaining by-products with high added value, in the biorefinery concept.

Keywords: biogas; purification; microalgae – bacteria; biomass.

Recibido: 18/09/2020

Aceptado: 10/01/2021

Introducción

El agotamiento de los combustibles fósiles y los graves efectos medioambientales que ha provocado su uso, trae consigo que las fuentes renovables de energía se hayan convertido en una de las más utilizadas a nivel mundial. Estas fuentes de energía son hoy una necesidad del desarrollo que garantizan no solo la producción de combustible, sino en numerosos casos, la eliminación del vertido de cargas contaminantes agresivas al ambiente.⁽¹⁾

En este sentido, el biogás es un gas combustible que se puede obtener de la digestión anaerobia de sustancias orgánicas.⁽²⁾ Posee un gran potencial como recurso para la producción de energía eléctrica y calor en motores de cogeneración o incluso, tras su depuración, puede ser usado como combustible para vehículos, inyectado en redes de gas natural o usado como carburante en pilas de combustible.⁽³⁾ Los compuestos diferentes al metano resultan perjudiciales para los equipos que utilizan biogás, causando problemas de corrosión o simplemente disminuyendo la eficiencia del equipo, ya que el metano es el compuesto con propiedades combustibles más importante. Además, dependiendo de la procedencia, algunos de los compuestos son nocivos para la salud humana.⁽⁴⁾

Las ventajas de utilizar biogás como combustible son varias, pues se solucionan los problemas relacionados con la contaminación de los diferentes tipos de desperdicios biológicos y se contribuye a disminuir el calentamiento global al reducir el consumo de hidrocarburos y aprovechar el metano obtenido. Por otro lado, la purificación del metano permite la captura del CO₂. A pesar del gran número de ventajas y posibilidades de empleo del biogás, este presenta como desventaja que el sistema de almacenamiento se dificulta debido a las impurezas que presenta.⁽⁵⁾

El objetivo del presente trabajo fue realizar una revisión de los principales métodos de purificación del biogás por vía biológica y la potencialidad de utilizar consorcios de microalgas – bacterias con este fin.

Fundamentación teórica

Purificación de biogás

El biogás, a pesar de su bajo poder calorífico, puede ser quemado directamente y convertido en energía eléctrica, mientras que el biogás purificado puede ser inyectado en la red de gas natural, utilizado como combustible para vehículos, como materia prima para la industria química o bien como combustible con un mayor poder calorífico para generar electricidad.⁽⁶⁾ Normalmente, el biogás crudo se compone de metano (CH_4) (40-75%), dióxido de carbono (CO_2) (15-60%), y trazas (5-10%), oxígeno (O_2) (0-1%) y sulfuro de hidrógeno (0,005-2%). Debido a esta composición, el biogás crudo tiene muy bajo poder calorífico y solo el biogás con una concentración CH_4 del 90% cumple con los requisitos de combustión de alta eficiencia en quemadores y calderas.⁽⁷⁾

La mejora o purificación del biogás consiste en la remoción de gases no combustibles considerados contaminantes, tales como el dióxido de carbono (CO_2) y el sulfuro de hidrógeno (H_2S), los cuales reducen el valor calorífico del biogás y hacen poco rentable su proceso de compresión. De esta manera se logra la obtención de un alto porcentaje de CH_4 , el cual se caracteriza por ser incoloro, insípido e inodoro, además de ser efectivo energéticamente para su aplicación como combustible.⁽⁸⁾

El principal compuesto minoritario que dificulta la mayoría de las aplicaciones del biogás es el H_2S , un gas inflamable, incoloro y corrosivo, el cual se caracteriza por tener un fuerte olor a huevo podrido, cuando se encuentra en concentraciones por debajo de los 0,45 partes por billón volumétrico (ppbv). Por encima de las 100 partes por millón volumétrico (ppmv), el H_2S tiene efectos narcóticos sobre las células sensibles al olfato, impidiendo su detección y pudiendo dejar a las personas inconscientes, puede causar la muerte a partir

de 600 ppmv. Su presencia es perjudicial por sus efectos nocivos para la salud, además, provoca corrosión en compresores, tanques de almacenamiento de gas y motores. Su combustión genera óxidos de azufre (SO_x), altamente tóxicos y nocivos para el medio ambiente, puesto que es uno de los principales responsables de la lluvia ácida.^(2, 3)

El CO₂ constituye el contaminante mayoritario por lo que su eliminación aumenta el valor calorífico del biogás y lo lleva a una calidad consistente, similar al gas natural. Al usar técnicas de remoción de CO₂, es importante mantener bajas pérdidas de CH₄ por razones económicas y ambientales, puesto que el CH₄ es un gas de efecto invernadero 21 veces más que el CO₂.⁽¹⁾ En la actualidad existen diversos métodos de purificación de biogás, los cuales se agrupan de la siguiente manera: métodos físico-químicos, métodos biotecnológicos y separación por membranas. Cada tipo de tecnología tiene sus ventajas y desventajas y poseen una factibilidad técnica y económica demostrada. La selección de uno u otro método depende de la investigación y de los resultados del análisis técnico-económico que se realice.⁽⁹⁾

Métodos físico-químicos

Los métodos físico-químicos se clasifican en métodos de adsorción y absorción utilizando compuestos químicos inorgánicos y orgánicos. Las primeras tecnologías aplicadas para la desulfuración del biogás fueron de origen físico-químico, tales como la precipitación *in situ* y la adsorción de H₂S, la separación mediante membranas y la absorción. La mayoría de las tecnologías físico-químicas de mejora del biogás conllevan un elevado consumo energético o de productos químicos.⁽³⁾

La aplicación de los métodos de absorción química tiene como limitantes que requieren del empleo de sustancias reactivas, de las cuales muchas son corrosivas, demandan el empleo de agentes inhibidores y antiespumantes. Estas sustancias tienen elevados costos en el mercado internacional, lo cual limita su aplicación en Cuba. A lo anterior se añade que estas tecnologías generan grandes volúmenes de residuos líquidos contaminados y que el clima

cubano es muy húmedo, provocando la rápida oxidación y deterioro de los compuestos de hierro, haciendo ineficaz esta metodología de purificación.⁽¹⁰⁾

Los métodos de purificación por adsorción son muy efectivos y reducen las cantidades de contaminantes hasta los niveles requeridos, pero, el empleo de cualquiera de los cuatro adsorbentes: alúminas, carbón activado, sílicagel y tamices moleculares, tiene como limitante fundamental para Cuba su elevado costo en los mercados especializados. Además, presentan costos de operación altos, por lo que su aplicación en países en vías de desarrollo se encuentra limitada.⁽⁶⁾

Las tecnologías de purificación de biogás de tipo físico-químico, aunque eficientes, presentan altos costos de adquisición y de operación, y sólo en los últimos años se ha dado importancia a posibles métodos biológicos de purificación. Mediante estos últimos, distintos tipos de microorganismos pueden utilizarse como agentes de transformación, conformando biofiltros con potencialidad de separar mezclas gaseosas, y de esta manera poder disminuir los altos costos presentados por los sistemas de purificación que emplean métodos físico-químicos.⁽¹¹⁾

Métodos biológicos

Además de los métodos físicos químicos para la purificación de biogás, existen métodos biológicos o de biofiltración, que han sido probados a escala de laboratorio y piloto. El tratamiento biológico o purificación biológica en términos generales es un proceso en el cual los gases contaminados son tratados al hacerlos entrar en contacto con un medio biológicamente activo. Los procesos biológicos enfocados a la purificación de gases son generalmente de oxidación, dando como resultado CO_2 , agua, sulfato (SO_4^{2-}) y nitrato (NO_3^-).⁽¹²⁾

Estos métodos utilizan la capacidad metabólica de algunos microorganismos que degradan sustancias contaminantes. El uso de microorganismos en la remoción de H_2S presente en el biogás, se basa en la oxidación microbiológica de este a compuestos de azufre de fácil eliminación, como azufre elemental (S^0) o SO_4^{2-} , fijando CO_2 simultáneamente como función estequiométrica de la oxidación del sulfuro. De esta forma, se puede lograr un enriquecimiento en

CH₄, al remover CO₂ y eliminar el H₂S, elemento más corrosivo y limitante respecto a usos posteriores del gas purificado.⁽¹³⁾

Los procesos biológicos basados en el uso de arqueas para la bioconversión del CO₂ del biogás a CH₄, mediante inyección de H₂ presentan una limitada aplicación (a escenarios en los que el H₂ es generado por exceso de electricidad renovable), riesgos de operación asociados a la alta explosividad del H₂ y no son capaces de eliminar el H₂S. Por su parte, los procesos biológicos de eliminación de H₂S (basados en la inyección de aire, O₂ o NO₃⁻ en el digester o en biofiltros percoladores externos) todavía presentan problemas operacionales por acumulación de S^o y por contaminación del biometano con O₂ y/o N₂.⁽¹⁴⁾

Las ventajas que presentan estas técnicas biológicas respecto de los sistemas físico-químicos son: carencia de contaminantes secundarios, menores costos de inversión y operación por el bajo consumo de reactivos, menor consumo energético al poder trabajar a temperatura ambiente, altas eficiencias de degradación y biomasa inmovilizada en el sistema. Sin embargo, el procedimiento es lento, siendo necesario buscar nuevos microorganismos que reduzcan los tiempos de residencia y hagan más competitivo el proceso a nivel industrial. Estos sistemas biológicos utilizan biorreactores o biofiltros de amplio uso para degradar contaminantes orgánicos e inorgánicos de una corriente gaseosa. En estos biofiltros se ubican los cultivos puros o mixtos de microorganismos.⁽¹⁵⁾

Actualmente la purificación de biogás sigue siendo un proceso limitado por lo que la búsqueda y aplicación de nuevas tecnologías continúa. En la tabla 1 se muestran las ventajas y desventajas de los principales métodos de purificación de biogás.

Tabla 1- Ventajas y desventajas de los principales métodos de purificación de biogás

Métodos de purificación		Ventajas	Desventajas
Físico-químicos ^(3, 10)	Adsorción	Diseño simple Efectivos aún a bajos caudales Desarrollo en condiciones ambientales	Altos costos de operación Altos costos de reactivos Genera residuos
	Absorción	Efectivos Diseño simple Fácil de operar Remueve CO ₂ y H ₂ S	Altas temperaturas y presión Altos costos Origina contaminantes
	Separación por membranas	Logra hasta 98% de pureza	Sistemas caros No adecuados a pequeña escala Fragilidad de la membrana Requiere altas presiones
Biológicos ^(14, 15)		Carencia de contaminantes secundarios Menores costos de inversión y operación Altas eficiencias Mantiene el carácter anaeróbico del gas	Procedimiento lento en cultivo puro Alto control de parámetros

Interacción microalgas - bacterias en procesos de purificación de gases

Las técnicas físico-químicas, como separación por membranas o absorción química, pueden aplicarse para eliminar simultáneamente el CO₂ y H₂S de la corriente de biogás, pero presentan altos costos de operación. Por otro lado, no se han desarrollado tecnologías biológicas para la eliminación simultánea de estos componentes del biogás. De esta manera, la tecnología simbiótica microalgas - bacterias se propone como una alternativa de eliminación simultánea del CO₂ y H₂S, alcanzando remociones del 96% y 100% respectivamente, con bajo costo energético e impacto ambiental.⁽¹⁶⁾

Las primeras aplicaciones de la tecnología microalgas - bacterias nacieron a mediados de 1950 en California para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Los llamados “High Rate Algal Ponds” (HRAPs), son estanques abiertos poco profundos, con una paleta giratoria mezcladora.⁽¹⁷⁾

La interacción simbiótica microalgas - bacterias aplicada al tratamiento de aguas residuales y purificación de biogás se caracteriza por la oxidación bacteriana del carbono orgánico y nitrógeno (principalmente N-NH⁴⁺), contenido

en los efluentes de agua residual, y por la oxidación del H_2S del biogás. A su vez, estos productos de oxidación (CO_2 , N-NO_3^- y SO_4^{2-} , respectivamente), junto con el P-PO_4^{3-} presente inicialmente en las aguas residuales y el CO_2 , transferido desde la fase biogás a la líquida (agua residual), son asimilados en forma de biomasa por las microalgas durante la fotosíntesis, produciendo a su vez, el oxígeno (O_2) necesario para que las bacterias lleven a cabo las oxidaciones arriba mencionadas (figura 1).⁽⁵⁾

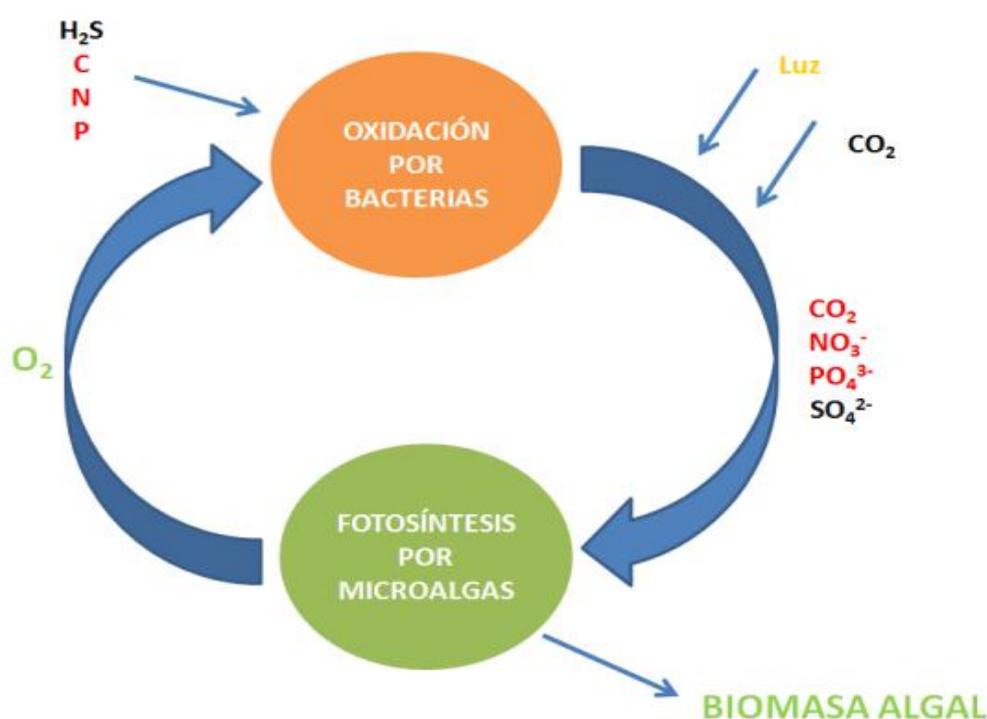


Fig. 1- Interacción simbiótica microalgas - bacterias para la purificación de biogás y tratamiento de aguas residuales simultáneamente; Negro: Purificación de biogás. Rojo: Tratamiento de aguas residuales. Verde: Productos de la fotosíntesis. Fuente: ⁽¹⁸⁾

La purificación de biogás en sistemas microalgas - bacterias se ve beneficiada a altos pH (usando bacterias alcalófilas oxidantes del sulfuro y microalgas basófilas), ya que se aumenta el transporte másico de H_2S y CO_2 (gases ácidos) desde el biogás al caldo de cultivo. Por otro lado, el aporte extra de carbono inorgánico del biogás en estas aguas residuales previamente digeridas supone una ventaja para su tratamiento, ya que aporta el déficit de carbono previamente reportado para su depuración mediante sistemas de microalgas -

bacterias. Así, la razón óptima C/N/P del agua residual en base a la composición molecular de las microalgas es 106/16/1 (g/g/g).⁽¹⁹⁾

De manera tradicional, el O₂ se suministra por sopladores con un importante costo energético. El O₂ producido por los cultivos de microalgas como resultado de la fotosíntesis supone una clara mejora en el proceso. Así mismo, las microalgas favorecen la retirada de NO₃⁻, fosfato (PO₄³⁻) e iones metálicos. Para dar salida a esta biomasa de microalgas se plantea la instalación de plantas de biogás para generación de calor o electricidad, basadas en el concepto de biorrefinería.⁽²⁰⁾

Al igual que en los procesos de depuración del biogás usando microalgas, también se pueden utilizar bacterias con este fin, pues a menudo estos procesos son baratos y amigables con el ambiente. En este sentido se ha trabajado en el uso de especies bacterianas quimiotróficas (del género *Thiobacillus*) para acondicionar el biogás, una de las metodologías analizadas ha sido el uso de bacterias anaerobias fototróficas (*Cholorobium limicola*) capaces de oxidar el H₂S en presencia de luz y CO₂. Por otra parte también se emplean bacterianas quimiotróficas, pues éstas pueden purificar el H₂S, en condiciones aerobias o anaerobias, consumiendo CO₂ y generando energía química a partir de la oxidación de compuestos inorgánicos reducidos tales como el H₂S. Estos procesos comúnmente producen SO₄²⁻ y S₀ como productos residuales.⁽²¹⁾

Por otro lado, algunas *Thiobacterias* (por ejemplo, *Thiobacillus novellus* y *Thiothrix nivea*) pueden crecer en condiciones heterotróficas o autotróficas, teniendo la capacidad de utilizar la materia orgánica disponible como fuente de carbono (por ejemplo, glucosa, aminoácidos). El biogás es una buena fuente de carbono inorgánico, siendo más adecuado para bacterias autotróficas. Bajo condiciones limitadas de O₂ la bacteria *Thiobacillus* evoca una reacción redox que produce S₀, recíprocamente, en presencia de un exceso de O₂ conducirá a la formación de SO₄²⁻ y a la acidificación.⁽²²⁾

La bacteria *Thiobacillus thioparus* se ha aislado a partir de residuales porcinos, y en experimentos a escala de laboratorio se ha logrado la remoción de más del 98% de H₂S, bajo condiciones facultativas autotróficas y heterotróficas. Además, se han realizado estudios con otras bacterias tales como *Thiobacillus*

ferrooxidans y *Acidithiobacillus thiooxidans* y a escala de laboratorio se han alcanzado eficiencias en la remoción del H₂S entre el 94 y el 99,9%, dependiendo de los tiempos de residencia del biogás.⁽²³⁾

El O₂ generado durante la fotosíntesis puede ser utilizado por bacterias aerobias para la oxidación de otros compuestos contaminantes. Por esta razón los sistemas microalgas - bacterias resultan de gran interés en la purificación de biogás y gases de combustión. El biogás debe ser purificado para remover el CO₂ y H₂S, ya que estos le restan poder calorífico y son contaminantes. La presencia de altas concentraciones de CO₂ diluye el CH₄, lo cual provoca una reducción de su capacidad calorífica, además, si el CH₄ no es quemado y sólo es venteado a la atmósfera, se contribuiría al efecto del calentamiento global. Por otro lado, el H₂S es inflamable, corrosivo, poco soluble en agua y produce malos olores.⁽⁵⁾

Microalgas en procesos de purificación de gases

El término microalgas define a organismos microscópicos, con clorofila a, que realizan fotosíntesis y no presentan diferenciación en raíces, tallos y hojas. Incluyen microorganismos eucariotas (clasificados tradicionalmente según sus pigmentos fotosintéticos) y procariotas (cianobacterias). Se localizan en diversos hábitats (aguas marinas, dulces, salobres y residuales), bajo un amplio rango de temperaturas, pH y disponibilidad de nutrientes.⁽²⁴⁾ Las microalgas pueden crecer en medio acuoso, en tierras áridas, no necesitan herbicidas y permiten utilizar aguas subterráneas. Se destacan por su alta eficiencia fotosintética, rápido crecimiento, posibilidades de ser cultivadas a gran escala y fijar grandes cantidades de CO₂, lo que facilita su reducción en la atmósfera.⁽²⁵⁾

El CO₂ que necesitan para su crecimiento lo pueden obtener del aire, de carbonatos solubles y de emisiones industriales. Éstas últimas son las que proporcionan mayores rendimientos por su mayor contenido en CO₂, el problema es que estas emisiones pueden incluir contaminantes inhibidores de la fijación del CO₂, de manera que es deseable seleccionar especies de algas

que toleren elevadas temperaturas, altas concentraciones de CO₂ y contaminantes como SO_x y NO_x, en dependencia del estudio que se desee realizar.⁽¹¹⁾

A las microalgas se les considera responsables de la producción del 50% del O₂ y de la fijación del 50% del CO₂ en el planeta. Los principales componentes de las microalgas son los lípidos, carbohidratos y proteínas, cada uno de estos compuestos tiene una función dentro del metabolismo de las microalgas y pueden variar según las condiciones ambientales y nutrientes que hayan sido aplicadas en su cultivo. El conjunto de características únicas de las microalgas unido a su extraordinaria capacidad de fijar CO₂, las convierten en microorganismos esenciales en procesos de biorremediación, tales como purificación de gases de plantas industriales, tratamientos de aguas residuales o remoción de metales pesados provenientes de efluentes contaminados.⁽²⁶⁾

Las microalgas tienen una rápida tasa de crecimiento ya que pueden duplicar su biomasa en períodos tan cortos como 3,5 h con ciclos de cosecha de 1 a 10 días. Se caracterizan por la captura eficientemente de CO₂, 1 kg de biomasa puede fijar aproximadamente 1,83 kg de CO₂, mitigando las emisiones de gases de efecto invernadero. No requieren de un suelo fértil para su cultivo y pueden ser cultivadas en agua residual, contribuyendo a la remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo) durante todo el año. Además, pueden obtenerse subproductos de valor agregado (proteínas, pigmentos y biopolímeros) por lo que su producción es aplicable al concepto de biorrefinería.^(19, 27)

Metabolismo de microalgas

La fotosíntesis representa un proceso único en la conversión de compuestos inorgánicos en compuestos orgánicos usando energía solar. Virtualmente todas las formas de vida en el planeta Tierra dependen directa o indirectamente de la fotosíntesis como fuente de energía. Este proceso se lleva a cabo en el estroma de los cloroplastos y consiste en procesos biológicos y químicos, del cual se derivan dos etapas principalmente. En una primera etapa de la fotosíntesis la luz del sol se convierte en energía química, actuando el agua como donador de electrones, liberando O₂ y generando Nicotinamida Adenina

Dinucleótido Fosfato (NADPH_2) y Adenosín Trifosfato (ATP) que servirán para diferentes propósitos metabólicos, uno de los más relevantes, la fijación de CO_2 . En la segunda etapa el NADPH_2 y el ATP se utilizan para la síntesis reductora de los carbohidratos a partir de CO_2 y agua.⁽²⁸⁾

Por otra parte, la absorción de nitrógeno en las microalgas inicia en la membrana plasmática con la reducción de NO_3^- a nitrito (NO_2^-), donde una fracción producida de NO_2^- se libera al medio acuoso y otra fracción de NO_2^- se reduce en el cloroplasto formando amonio (NH_4^+), que posteriormente se integra en la formación de aminoácidos.⁽²⁹⁾

Durante el metabolismo, el PO_4^{3-} es asimilado de las formas H_2PO_4^- y HPO_4^- e incorporado dentro de compuestos orgánicos a través del proceso de fosforilación, en la cual gran parte del PO_4^{3-} es captado para la generación de ATP a partir de Adenosin Difosfato (ADP), obteniendo así el suministro de energía celular.⁽³⁰⁾

Los compuestos reducidos de carbono se utilizan como estructura básica para la incorporación de elementos primordiales como nitrógeno, fósforo y azufre, generando monómeros orgánicos simples como aminoácidos, nucleótidos, ácidos grasos y otros carbohidratos más complejos que se ensamblan para formar proteínas, ácidos nucleicos, lípidos y polisacáridos que constituyen la biomasa de cualquier organismo vivo.⁽³¹⁾

Las microalgas se han considerado buenos organismos modelos para el estudio de complejos procesos biológicos como la morfogénesis y diferenciación, el reconocimiento celular, los ritmos biológicos, la evolución de procesos y rutas metabólicas y la fisiología y bioquímica de la fotosíntesis. Por otro lado, en las microalgas se combinan propiedades metabólicas típicamente vegetales con características propias de células microbianas, tales como la capacidad de crecimiento rápido en cultivo líquido, simplicidad de requerimientos nutritivos, plasticidad metabólica, tolerancia a condiciones extremas, capacidad de sintetizar y secretar algunos metabolitos y potencialidad de manipulación genética, que les confiere interés biotecnológico.⁽³²⁾

Microalgas más empleadas en procesos de purificación

Las microalgas son capaces de soportar y fijar elevadas concentraciones de CO₂ presentes en el medio, teniendo un rendimiento de 10 y hasta 50 veces mayor al de las plantas terrestres. Algunas de las microalgas más estudiadas en el campo de la fijación de carbono y que muestran resultados favorables son: *Nannochloro psisocolata* con capacidad de fijar 0,017 g L⁻¹ d⁻¹ de CO₂, *Tetraselmis* sp. con 0,0241 g L⁻¹ d⁻¹, *Chlorella vulgaris* con 0,09 g L⁻¹ d⁻¹, *Dunaliella tertiolecta* con 0,12 g L⁻¹ d⁻¹ y *Scenedesmus obliquus* con 0,150 g L⁻¹ d⁻¹.⁽³³⁾

A pesar de que las microalgas son microorganismos que presentan una elevada capacidad de adaptación a diferentes condiciones experimentales, resulta indispensable controlar ciertas variables que inciden de manera directa en el desarrollo de las mismas y por tanto en un proceso eficiente de captación de carbono. Las variables que se deben controlar son: luz, temperatura, aireación, pH, concentración de CO₂, entre otros.⁽¹⁴⁾

Valorización de la biomasa de microalgas

La biomasa de microalgas como materia prima alternativa para la producción de biodiesel ha cobrado importancia en los últimos años, debido a la alta tasa de crecimiento de las microalgas en comparación con plantas superiores y a su habilidad para acumular altas cantidades de lípidos. Además, el cultivo de microalgas no suponen una competición por los terrenos cultivables como la producción de biodiesel de primera y segunda.⁽¹¹⁾ El contenido oleaginoso de las microalgas puede ser controlado en función de las condiciones de cultivo, principalmente, mediante la limitación de nutrientes. Además, esta tecnología puede ser acoplada al reciclaje del CO₂ liberado en las emisiones industriales y presenta una ventaja adicional, la posibilidad de obtención de otros subproductos (proteína, carbohidratos, biopolímeros, pigmentos, etc.) a partir de la biomasa residual. Resulta factible el empleo de algunos de estos residuos en la alimentación humana o animal y en la producción de fertilizantes o de otros biocombustibles.⁽³⁴⁾ Finalmente, la ventaja competitiva más importante del

biodiesel de microalgas, consiste en los rendimientos lipídicos por unidad de área, considerablemente superiores a los obtenidos con plantas oleaginosas. Por otra parte, el alto contenido de carbohidratos de las paredes celulares y el citoplasma de almidón, han hecho de la biomasa de algas una materia prima muy adecuada para la producción de bioetanol mediante fermentación alcohólica, la producción de hidrógeno o el desarrollo de biocrudo mediante licuefacción hidrotermal.⁽²⁷⁾ La producción de biogás tiene lugar por digestión anaerobia de la biomasa completa o los residuos obtenidos tras la obtención de diversos componentes. La producción de hidrógeno a partir de biomasa puede realizarse mediante procesos físico-químicos energéticamente costosos, como la gasificación, pirólisis y licuefacción o mediante procesos biológicos como la fotólisis del agua y foto-descomposición de la materia orgánica de microalgas.⁽²⁵⁾

Conclusiones

1. Se puede constatar que el consorcio microalgas - bacterias se presenta como una opción viable para la purificación de biogás al eliminar de forma simultánea CO_2 y H_2S . Dicha interacción resulta beneficiosa tanto para microalgas como para bacterias, ya que estas últimas utilizan el O_2 resultante de la fotosíntesis, con el fin de oxidar compuestos necesarios para la formación de biomasa por parte de las microalgas.
2. La biomasa obtenida puede ser empleada para la obtención de productos de alto valor agregado o biocombustibles.
3. Los métodos de purificación biológicos, específicamente la interacción microalgas - bacterias se presenta como una opción muy prometedora frente a los métodos físico - químicos empleados tradicionalmente, que además, presentan altos costos de inversión y operación y originan contaminantes secundarios.

Referencias bibliográficas

1. ORTEGA VIERA, L., CRESPO ARTIGAS, A., *et al.* Modelo fenomenológico que describe el proceso de purificación de biogás empleando membranas de zeolita natural. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* [en línea]. 2017, **16**(2). pp. 531-539. [Consultado: 18/05/2020]. ISSN 1665-2738
2. TILAHUN, E., SAHINKAYA, E., *et al.* A hybrid membrane gas absorption and bio-oxidation process for the removal of hydrogen sulfide from biogas. *International Biodeterioration & Biodegradation* [en línea]. 2018, **127**. pp. 69-76. [Consultado: 10/04/2020]. ISSN 0964-8305
3. PASCUAL CENTENO, C. *Optimización de biofiltración anóxica de biogás para su desulfuración*. Tesis de maestría inédita. Universidad de Valladolid, 2017
4. ORTEGA VIERA, L., FERNÁNDEZ SANTANA, E., *et al.* Evaluación de los procesos de transferencia de masa que ocurren durante la purificación de biogás empleando membranas. *Revista de Tecnología Química* [en línea]. 2018, **38**(3). pp. 473-485. [Consultado: 18/05/2020]. ISSN 2224-6185
5. RODERO, M. R., POSADAS, E., *et al.* Influence of alkalinity and temperature on photosynthetic biogas upgrading efficiency in high rate algal ponds. *Algal Research* [en línea]. 2018, **33**. pp. 284-290. [Consultado: 20/05/2020]. ISSN 2211-9264
6. LINARES RIVERA, W. E., LÓPEZ VARGAS, F. G., *et al.* *Fundamentos teóricos y propuesta de un proceso para la práctica del envasado de biogás libre de CO₂ y H₂S en El Salvador*. Tesis de grado. Universidad de El Salvador, 2017.
7. ZHANG, Y., BAO, K., *et al.* Performance of mixed LED light wavelengths on nutrient removal and biogas upgrading by different microalgal-based treatment technologies. *Energy* [en línea]. 2017, **130**. pp. 392-401. [Consultado: 20/04/2020]. ISSN 0360-5442
8. TILAHUN, E., BAYRAKDAR, A., *et al.* Performance of polydimethylsiloxane membrane contactor process for selective hydrogen sulfide removal from biogas. *Waste Management* [en línea]. 2017, **61**. pp. 250-257. [Consultado: 12/05/2020]. ISSN 0956-053X
9. BARRERA CARDOSO, E. L., CARABEO PÉREZ, A., *et al.* Sistematización de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala industrial. *Tecnología Química* [en línea]. 2018, **38**(1). pp. 44-46. [Consultado: 20/04/2020]. ISSN 2224-6185
10. VALDÉS PARADA, F. J., OCHOA, J. A., *et al.* Upscaled model for dispersive mass transfer in a tubular porous membrane separator. *Revista Mexicana de Ingeniería*

Química [en línea]. 2014, **13**(1). pp. 237-257. [Consultado: 20/05/2020]. ISSN 1665-2738

11. CHEN, H., WANG, J., *et al.* Algal biofuel production coupled bioremediation of biomass power plant wastes based on *Chlorella sp.* C₂ cultivation. *Applied Energy* [en línea]. 2018, **211**. pp. 296-305. [Consultado: 15/05/2020]. ISSN 0306-2619.

12. MARIN MARIN, M. L. *Purificación biológica de biogás*. Tesis de grado. Universidad de Chile, 2011

13. TORNERO ARAUJO, A. G. y RAMÍREZ VÁZQUEZ, J. A. Técnicas para la disminución en la concentración de ácido sulfhídrico en el biogás. *Jóvenes en la Ciencia* [en línea]. 2015, **1**(2). pp. 1450-1451. [Consultado: 12/05/2020]. ISSN 2395-9797

14. MORALES BLANCO, T. *Estudio del potencial de fotobiorreactores tubulares para la captura de CO₂ de gases de combustión y conversión de biogás a biometano*. Tesis de grado. Universidad de Valladolid, 2017

15. ORTEGA VIERA, L., RODRÍGUEZ MUÑOZ, S., *et al.* Principales métodos para la desulfuración del biogás. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* [en línea]. 2015, **36**(1). pp. 45-56. [Consultado: 18/05/2020]. ISSN 1815-591X.

16. ÁNGELES, R., ARNIZ, E., *et al.* Optimization of photosynthetic biogas upgrading in closed photobioreactors combined with algal biomass production. *Journal of Water Process Engineering* [en línea]. 2020, **38**. pp. 101554. [Consultado: 12/04/2020]. ISSN 2214-7144.

17. SUTHERLAND, D. L., TURNBULL, M. H., *et al.* Increased pond depth improves algal productivity and nutrient removal in wastewater treatment high rate algal ponds. *Water Research* [en línea]. 2014, **53**. pp. 271-281. [Consultado: 5/05/2020]. ISSN 0043-1354.

18. FERNÁNDEZ LORENZO, J. *Depuración de vinazas digeridas y purificación de biogás mediante sistemas de algas-bacterias*. Tesis de maestría. Universidad de Valladolid, 2014.

19. WANG, Z., WEN, X., *et al.* Maximizing CO₂ biofixation and lipid productivity of oleaginous microalga *Graesiella sp.* WBG-1 via CO₂-regulated pH in indoor and outdoor open reactors. *Science of the Total Environment* [en línea]. 2018, **619-620**. pp. 827-833. [Consultado: 10/04/2020]. ISSN 0048-9697. 10.1016/j.scitotenv.2017.10.127.

20. GARCÍA CUBERO, R. *Producción de biomasa de microalgas rica en carbohidratos acoplada a la eliminación fotosintética de CO₂*. Tesis doctoral inédita. Universidad de Sevilla, 2014.

21. DUAN, H. Q. Biological treatment of H₂S using pellet activated carbon as a carrier of microorganisms in a biofilter. *Water Research* [en línea]. 2006, **40**. pp. 2629-2636. [Consultado: 13/05/2020]. ISSN 0043-1354
22. BENAVENTE VALDÉS, J. R. Strategies to enhance the production of photosynthetic pigments and lipids in chlorophyceae species. *Biotechnol Reports* [en línea]. 2016, 10. pp. 117-125. [Consultado: 20/03/2020]. ISSN 2215-017X
23. LEE, E. Y. Removal of hydrogen sulfide by sulfate-resistant *Acidithiobacillus thiooxidans* AZ11. *Journal of Bioscience and Bioengineering* [en línea]. 2006, 101. pp. 309-314. [Consultado: 10/03/2020]. ISSN 1347-4421.
24. GÓMEZ ESPINOZA, O., GUERRERO BARRANTES, M., et al. Identificación de una colección de microalgas aisladas de Costa Rica mediante secuenciación de ADN r 18s. *Acta Biológica Colombiana* [en línea]. 2018, 23(2). pp. 199-204. [Consultado: 13/04/2020]. ISSN 1900-1649.
25. JANKOWSKAA, E., SAHUB, A. K., et al. Biogas from microalgae: Review on microalgae's cultivation, harvesting and pretreatment for anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea]. 2017, **75**. pp. 692–709. [Consultado: 13/04/2020]. ISSN 1364-0321.
26. ABREU HERNÁNDEZ, L. *Crecimiento de Cryptophyta empleando vinazas cubanas como medio de cultivo*. Tesis de grado. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2017.
27. LATORRE HERNÁNDEZ, C. C. *Evaluación del efecto de la fuente carbono sobre el crecimiento y la composición bioquímica de la microalga Parachlorella kessleri*. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, 2020.
28. PEDRAZA CUESTA, M. C. y PRADA GARAVITO, M. C. *Evaluación de la biofijación de CO₂ y producción de biomasa a partir de las microalgas bajo condiciones de fotobiorreactor a escala laboratorio*. Tesis de grado. Fundación Universidad de América, 2018.
29. UMAMAHESWARI, J. y SHANTHAKUMAR, S. Efficacy of microalgae for industrial wastewater treatment: a review on operating conditions, treatment efficiency and biomass productivity. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* [en línea]. 2016, **15**(2). pp. 265-284. [Consultado: 13/04/2020]. ISSN 1572-9826.
30. BELTRÁN ROCHA, J. C., GUAJARDO BARBOSA, C., et al. Biotratamiento de efluentes secundarios municipales utilizando microalgas: Efecto del pH, nutrientes (C, N y P) y enriquecimiento con CO₂. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* [en línea]. 2017, 52(3). pp. 417-427. [Consultado: 13/04/2020]. ISSN 0718-1957.

31. LEHNINGER, A. L., NELSON, D. L., *et. al.* *Principios de Bioquímica*. Segunda Edición. New York. USA, 1995. ISBN 978-848209243.
32. BOROWITZKA, M. A. High-value products from microalgae-their development and commercialisation. *Journal of Applied Phycology* [en línea]. 2013, 25(3). pp. 743-756. [Consultado: 20/04/2020]. ISSN 1939-1854.
33. LEIVA FERNÁNDEZ, C. M. *Reducción de la emisión de CO₂ proveniente de la descomposición de estiércol porcino mediante el uso de microalgas*. Tesis de grado. Universidad de Las Américas, 2017.
34. HERRERA SANCHEZ, S. E. *Cultivo de microalga Chlorella sp en un fotobiorreactor para la obtención de biodiesel*. Tesis de grado. Universidad Nacional del Callao, 2020.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Sheila de la Caridad Brunet Ramos: escritura del artículo.

Janet Jiménez Hernández: idea inicial, revisora del informe y colaboradora.

Julio Pedraza Garciga: asesoría, revisión y corrección del informe final.

Lisbet Mailin López González: idea inicial, revisora del informe y colaboradora.