



Producción y aprovechamiento de biogás a partir de microalgas en un concepto de biorrefinería

Autor: Juan Luis Ramos Suárez

Institución: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)

Otros autores: Nely Carreras Arroyo (Ciemat)

Resumen

Las microalgas están levantando grandes expectativas como fuente de biomasa para la generación de biocombustibles así como para la producción de otros compuestos de alto valor añadido. La producción industrial de este tipo de biomasa producirá una gran cantidad de residuos orgánicos que deberán ser tratados de una forma apropiada. La digestión anaerobia se presenta como una alternativa para el tratamiento de este tipo de biomasa, generando energía en forma de metano, produciendo dióxido de carbono y reciclando los nutrientes que pueden ser utilizados para el crecimiento de nuevas microalgas.

En este trabajo se analizó la producción potencial de biogás de la biomasa de *Scenedesmus* sp., microalga muy común de agua dulce y fácil crecimiento, cuyo componente principal son las proteínas. Se estudió el proceso de digestión anaerobia aplicado a la biomasa de *Scenedesmus* sin ningún tipo de pretratamiento y a la biomasa de *Scenedesmus* a la cual se le había extraído aminoácidos de alto valor añadido mediante hidrólisis enzimática.

Los resultados muestran que la biomasa hidrolizada presenta una biodegradabilidad superior a la biomasa que no ha sufrido pretratamiento previo gracias al proceso de hidrolizado enzimático, en cuya fase inicial se realiza una ruptura por medios mecánicos de la pared celular de la microalga, y a la extracción de parte de la proteína de la microalga, que incrementa la relación C/N de la biomasa favoreciendo el crecimiento de los microorganismos responsables de la digestión anaerobia. Este aumento de biodegradabilidad se traduce en un incremento de la productividad de biogás y metano. La productividad potencial de metano para *Scenedesmus* sin procesar y para *Scenedesmus* hidrolizada fue de $140,3 \pm 29,4$ L CH₄ kgSV⁻¹ y de $272,8 \pm 7,3$ L CH₄ kgSV⁻¹ respectivamente. Mientras que la productividad potencial de biogás es de $177,4 \pm 34,2$ L biogás kgSV⁻¹ y de $401,2 \pm 17,7$ L biogás kgSV⁻¹ para *Scenedesmus* sin procesar e hidrolizada respectivamente. Estas cifras supondrían que, en el caso de la microalga hidrolizada, se podría producir en la propia planta de microalgas hasta un 41% de la electricidad total consumida durante el proceso de cultivo, cosechado y concentrado de la biomasa de microalgas. Por otro lado, el CO₂ que forma parte del biogás así como el procedente de los gases de combustión, junto con los nutrientes mineralizados durante el proceso de digestión, pueden ser suministrados al medio de cultivo para el crecimiento de nueva biomasa, lo que supone un ahorro económico significativo.

La combinación de la digestión anaerobia y la producción de microalgas destinada a la obtención de diferentes compuestos de alto valor añadido y biocombustibles puede resultar económica y medioambientalmente atractiva, reduciendo los costes directos debidos al consumo eléctrico y calorífico de la planta de producción y procesado de biomasa, así como los debidos al suministro de CO₂ y nutrientes. Además, supondría una reducción en la emisión de GEI debido a la producción de energía renovable y limpia y a la obtención de un fertilizante orgánico que reduciría el consumo de fertilizantes minerales.

Palabras claves: Digestión anaerobia; biogás; microalgas; biorrefinería.

1. Introducción

En la actualidad, las microalgas están generando un gran interés como fuente de biomasa debido principalmente a que pueden llegar a presentar productividades más elevadas que los cultivos terrestres tradicionales, gracias a una eficiencia fotosintética mayor (Williams and Laurens, 2010). Durante su crecimiento absorben grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2), fijándolo en forma de carbono orgánico y actuando como sumidero del CO_2 libre en la atmósfera. Además es posible suministrarles este compuesto a partir de los gases de escape de motores de combustión, tanto de plantas de producción eléctrica como de otras fuentes (Rodolfi et al., 2009), contribuyendo de esta forma a reducir la emisión de gases de efecto invernadero. Por tanto, las microalgas pueden contribuir significativamente a la mejora del problema que supone el calentamiento global.

Aparte de estas consideraciones, las microalgas presentan ventajas adicionales para su uso con fines bioenergéticos en comparación con los cultivos terrestres tradicionales, resolviendo gran parte de los problemas que se le achacan a los biocombustibles de primera y segunda generación. Pueden ser cultivadas en terrenos marginales, en cuyo caso no competirían con cultivos alimentarios por tierra arable, y por tanto no influirían en la producción de alimentos. Al no necesitar tierras ricas en nutrientes, no amenazarían la existencia de selvas tropicales como actualmente ocurre con los cultivos utilizados para biocombustibles de primera generación (ej. soja, palma aceitera, etc.) (Chisti, 2007; Ahmad et al., 2011). Por otra parte, al tratarse de un cultivo no alimentario, no corre el riesgo de incrementar desmesuradamente el precio de los alimentos (Singh and Gu, 2010). Además pueden ser cultivadas utilizando aguas residuales como fuente de agua y nutrientes, contribuyendo así a su depuración (Park et al., 2011). Aparte de todas estas ventajas, a partir de ciertas especies de microalgas se pueden extraer diferentes compuestos de alto valor añadido, como por ejemplo, diferentes pigmentos como los carotenoides, proteínas de alto valor nutricional para alimentación animal, ácidos grasos ω -3, otros suplementos alimenticios para humanos (Spolaore et al., 2006) y diferentes biocombustibles, como pueden ser biometano, biodiesel, bioetanol, biohidrógeno y *syngas* o gas de síntesis (Brennan and Owende, 2010).

La producción en masa de microalgas para los usos anteriormente mencionados producirá una gran cantidad de residuos orgánicos, por lo tanto, la digestión anaerobia aparece como una opción ideal para su tratamiento, generando energía en forma de metano y permitiendo la reutilización de nutrientes para cultivar nueva biomasa, ya que durante la digestión anaerobia los nutrientes en forma orgánica pasan a forma mineral, siendo éstos aprovechables directamente por las microalgas para su crecimiento (Chisti, 2007; Sialve et al., 2009; Singh and Gu, 2010; Ehimen et al., 2011). De esta forma, se llegaría al concepto de biorrefinería, donde a partir de la biomasa de microalgas se podrían obtener diferentes productos de alto valor añadido, que harían sostenible la producción de nuevas microalgas y de biocombustibles (Ver Figura 1).

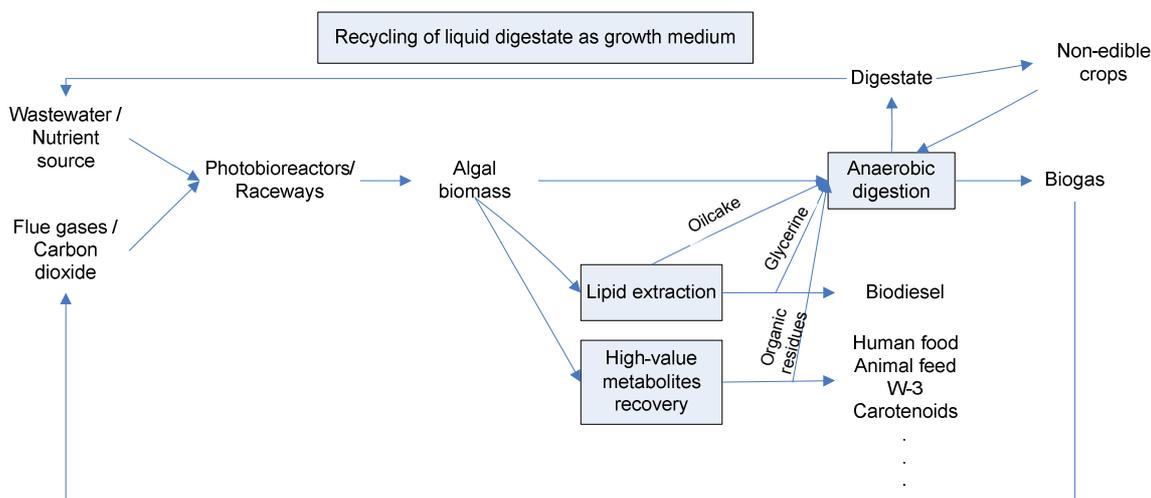


Figura 1. Concepto de biorrefinería aplicado a la producción de microalgas

Sin embargo, varios estudios realizados sobre la digestión anaerobia de este tipo de biomasa han concluido que ésta puede presentar algunos inconvenientes. Dependiendo de la especie de microalga objeto de estudio, se pueden presentar problemas por la baja biodegradabilidad de sus células (Chen and Oswald, 1998; Mussnug et al., 2010) y el elevado contenido en nitrógeno lo que implica una baja relación C/N (Samson and Leduy, 1983; Yen and Brune, 2007).

La baja biodegradabilidad de las células de las microalgas es consecuencia de la composición de su pared celular, lo que obliga a aplicar largos tiempos de retención hidráulicos (TRH) si se quiere llevar a cabo su digestión con un alto grado de degradación. Existen diferentes pretratamientos para aumentar la biodegradabilidad que se pueden aplicar a esta biomasa y que han sido probados a escala de laboratorio con resultados satisfactorios, como por ejemplo los ultrasonidos (González-Fernández et al., 2012), la exposición de la biomasa a elevadas temperaturas durante cierto tiempo (Chen and Oswald, 1998; González-Fernández, 2012) o la hidrólisis térmica (Alzate et al., 2011) entre otros.

Por otro lado, la baja relación C/N puede causar problemas de toxicidad al liberarse una cantidad excesiva de amonio, que podría producir la inhibición del crecimiento de los microorganismos encargados de la digestión, impidiendo el correcto desarrollo del proceso y disminuyendo la biodegradabilidad de la biomasa (McCarty, 1964). La relación C/N de un determinado sustrato puede incrementarse mediante la co-digestión (mezcla de dos o más sustratos), con el fin de aprovechar posibles sinergias entre ellos, como en este caso podría ser el contenido en nutrientes. En el caso de las microalgas, esta técnica ha sido utilizada con anterioridad en diferentes ensayos de laboratorio, evitando la toxicidad producida por amonio e incrementando la biodegradabilidad y, por tanto, la producción de biogás (Samson and Leduy, 1983; Yen and Brune, 2007; Ehimen et al., 2009).

En los estudios realizados en el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat) se han llevado a cabo diferentes ensayos de biodegradabilidad de microalgas. Se han utilizado microalgas sin ningún tipo de

pretratamiento para su alimentación directa al digestor y residuos de microalgas a las cuales se les había extraído parte de la proteína para su utilización con fines alimenticios. La cepa de microalga utilizada en estos ensayos ha sido *Scenedesmus* sp., microalga muy común en agua dulce, de fácil crecimiento y cuya característica más importante para su uso en digestión anaerobia es la dificultad que encuentran los microorganismos facultativos y anaerobios responsables de estos procesos para degradar su pared celular (Mussgnug et al., 2010), debido a que está compuesta principalmente por hidratos de carbono complejos (Takeda, 1996).

2. Materiales y métodos

2.1. Biomasa

La microalga *Scenedesmus* sp., suministrada por la Fundación Cajamar y la Universidad de Almería, fue cultivada de forma fotoautótrofa en fotobiorreactores tubulares localizados en Almería. Parte de estas microalgas fueron liofilizadas y almacenadas en un lugar de baja humedad e irradiación para asegurar su correcta conservación, y otra parte fue sometida a un proceso de hidrólisis enzimática con el fin de extraer aminoácidos de alto valor añadido que pueden tener diferentes usos, como por ejemplo alimentación humana o animal, fertilizante, antioxidantes, etc. El proceso de extracción de aminoácidos libres mediante hidrólisis enzimática incluye un pretratamiento que permite la lisis de la pared celular de la microalga para obtener la mayor eficiencia en la extracción de su contenido en aminoácidos (Romero García et al., 2012).

El inóculo utilizado como fuente de microorganismos fue un digestato proveniente del tratamiento anaerobio de lodos de la depuradora `Viveros de la Villa´ (Madrid). Este inóculo fue mezclado con un inóculo del mismo origen pero que había sido adaptado previamente a la codigestión de *Scenedesmus* sp. y *Opuntia maxima* en ensayos de laboratorio realizados en las instalaciones del Ciemat.

2.2. Ensayos de producción potencial de biogás

Los ensayos de producción potencial de biogás fueron llevados a cabo según la norma VDI 4630 de la Asociación Alemana de Ingenieros (Verein Deutscher Ingenieure, 2006). La biomasa de *Scenedesmus* sin procesar y la biomasa de *Scenedesmus* hidrolizada se introdujeron en sendos reactores de 1L de volumen con la cantidad correspondiente de inóculo según la norma VDI 4630. Cada ensayo se realizó por duplicado. En paralelo se realizaron ensayos control, reactores que únicamente contenían inóculo, con el fin de determinar la producción endógena de metano de éste, y así poder restarla de las cantidades obtenidas en los ensayos con microalgas. Todos los reactores se introdujeron en un baño termostático a 37°C durante aproximadamente 40 días y con agitación constante mediante agitadores magnéticos. Antes de cerrarse herméticamente para impedir la fuga de gas y la entrada de oxígeno en su interior y para prevenir la fermentación aerobia que disminuiría el potencial de biogás, los reactores fueron purgados con nitrógeno gaseoso para asegurar condiciones anaerobias en su interior

Se realizaron análisis elementales de los sustratos a digerir para conocer su composición. Antes de comenzar la experimentación, también se realizaron análisis de sólidos totales y

volátiles (ST y SV), demanda química de oxígeno total y soluble (DQO_t y DQO_s), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), alcalinidad parcial y total (AP y AT) y pH del contenido de los reactores (inóculo más sustrato a digerir). Al finalizar la experimentación se realizaron los mismos análisis con el objetivo de evaluar el proceso de digestión.

La composición y producción de biogás se monitorizaron mediante el respirómetro Micro-Oxymax (Columbus Instrument; Columbus, OH 43204 U.S.A.), cuyo esquema se muestra en la Figura 2. El biogás producido en los reactores anaerobios se acumula en las cámaras de medición, cuyo volumen es perfectamente calculado por el respirómetro. El porcentaje de oxígeno (O₂), metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) de las cámaras de medición es analizado periódicamente y los cambios en su porcentaje son utilizados para calcular el consumo de O₂ y la producción de biogás (CO₂ y CH₄) a lo largo del tiempo. El respirómetro posee una unidad de expansión que permite la monitorización de hasta 10 reactores durante el mismo ensayo. Entre análisis consecutivos del biogás de diferentes reactores, los sensores son purgados con aire atmosférico para evitar contaminaciones cruzadas en los análisis, por lo que se deben instalar unas válvulas de un solo sentido en la salida de biogás de los reactores para evitar que entre oxígeno en su interior que pueda perjudicar el proceso de digestión.

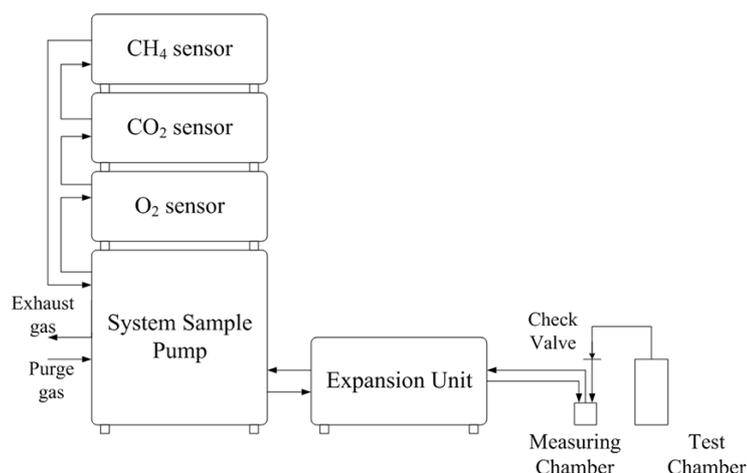


Figura 2. Esquema del respirómetro Micro-Oxymax en funcionamiento con un solo reactor

2.3. Métodos analíticos

El análisis elemental se realizó por combustión utilizando un macroanalizador LECO Truspec CHNS. Para el análisis de pH se utilizó una sonda de pH Crison, que se sumergió directamente en el interior de las muestras. Los análisis de ST y SV se realizaron según la APHA (1992). La AP y AT se determinaron según Ripley et al. (1986) por valoración hasta pH 5,75 y 4,3, respectivamente. La demanda química de oxígeno (total y soluble) se analizó mediante una adaptación del método 410.4 de la EPA (U.S. EPA, 1993). El NTK se determinó mediante digestión y posterior destilación de la muestra en medio alcalino y subsiguiente valoración. Todos los análisis fueron realizados por triplicado.

El análisis de gases se realizó por medio de sensores que forman parte del respirómetro Micro-Oxymax: sensor paramagnético de O₂ (0-21%) y sensores infrarrojos de CO₂ y CH₄ (0-100% ambos).

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados previos

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en el análisis de la composición físico-química de la biomasa sin procesar y la biomasa hidrolizada. Además se incluyen los resultados obtenidos de los análisis iniciales y finales del ensayo de degradación anaerobia para cada reactor.

3.1.1. Composición físico-química de la biomasa de microalgas e inóculo

En la Tabla 1 se presenta la composición físico-química de la biomasa de *Scenedesmus* sin procesar y la biomasa de *Scenedesmus* hidrolizada, ambas liofilizadas previamente.

Tabla 1. Propiedades físico químicas de *Scenedesmus* y *Scenedesmus* hidrolizada

Parámetros	<i>Scenedesmus</i> sp.	<i>Scenedesmus</i> sp. hidrolizada
ST (%)	93,6	96,2
SV (%ST)	71,7	61,7
pH	7,2	6,6
C (% m.s.)	41.6	35.8
H (% m.s.)	5.9	4.8
N (% m.s.)	7.0	5.0
S (% m.s.)	0.5	0.5
C/N	6.0	7.2

%m.s.=porcentaje expresado sobre materia seca

Como se puede observar, la relación C/N es baja en ambos casos para su uso como sustrato de digestión anaerobia, ya que el óptimo para este proceso se encuentra entre 20 y 30 (Anderson et al., 2003). Por lo tanto, en futuros ensayos sería aconsejable analizar las posibilidades de co-digestión de ambos sustratos con otros sustratos con alto contenido en carbono. Aún así, se aprecia un ligero incremento de la relación C/N para la microalga hidrolizada, ya que parte de la proteína ha sido extraída y por tanto su contenido en nitrógeno ha disminuido.

Las características del inóculo utilizado como fuente de microorganismos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición físico-química del inóculo utilizado

Parámetros	
ST (%)	3,7
SV (%)	2,1
pH	8,60
DQO _t (mgO ₂ /L)	34.094
DQO _s (mgO ₂ /L)	1.822
NTK (% m.h.)	0.25
N-NH ₄ ⁺ (% m.h.)	0.09

3.1.2. Condiciones iniciales y finales del ensayo

Las condiciones iniciales y finales del ensayo de biodegradabilidad y producción potencial de biogás se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Condiciones iniciales y finales del ensayo

	<i>Scenedesmus</i>		<i>Scenedesmus</i> hidrolizada	
	Inicial	Final	Inicial	Final
ST (%)	4,66	4,35	5,27	4,69
SV (%)	2,76	2,33	3,15	2,35
DQO _t (mgO ₂ L ⁻¹)	43.355	38.205	52.496	34.131
DQO _s (mgO ₂ L ⁻¹)	11.084	5.424	7.556	3.729
pH	8,6	7,6	7,6	7,6
NTK (%m.h.)	0,32	0,32	0,30	0,32
AT (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	N.A.	7.828	5.265	7.977
AP (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	N.A.	6.342	3.972	6.433

N.A.= no se realizaron análisis

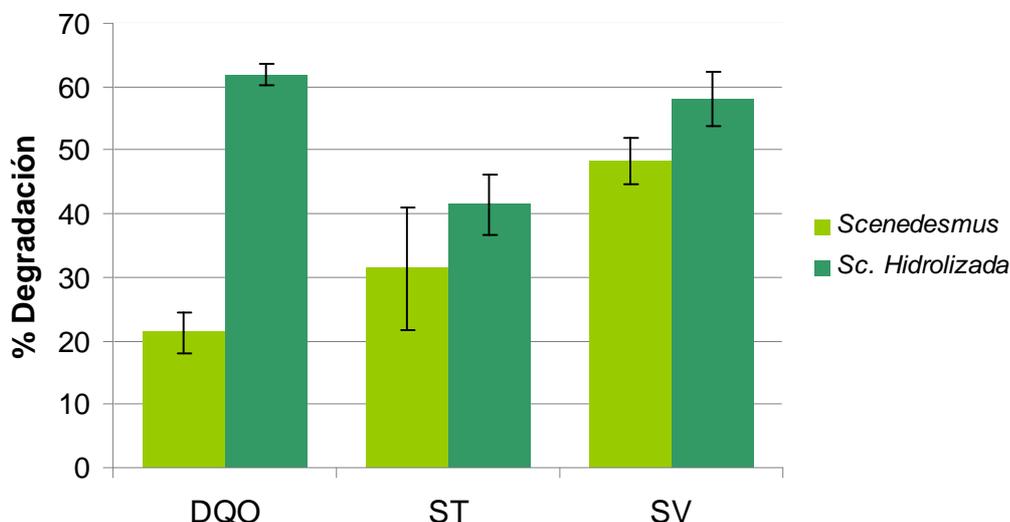
Utilizando los resultados de estos análisis se realiza en la sección 3.2 el estudio de degradación de la materia orgánica (degradación de ST, SV y DQO_t).

Como se puede observar, la DQO_s disminuye drásticamente en ambos casos al final del proceso de digestión, indicando que el proceso de digestión estaba finalizado tras un periodo de 40 días. El pH en el caso de la microalga sin procesar se establece en el rango óptimo al final de la digestión, habiendo sido en un inicio ligeramente superior (8,6). La AP es lo suficientemente alta en ambos casos como para haber mantenido el pH neutro durante el desarrollo de la experimentación evitando así procesos de acidificación que hubieran significado la parada del proceso de digestión.

3.2. Degradación de materia orgánica

En esta sección se evaluará la degradación de materia orgánica, en términos de eliminación de DQO_t, ST y SV, que ha tenido lugar durante el proceso de digestión de ambos sustratos.

Como se puede observar en la Figura 3, la degradación de materia orgánica en todos los términos estudiados fue baja para la microalga sin procesar. Sin embargo en el caso de la microalga hidrolizada, la degradación de materia orgánica aumentó considerablemente, indicando que los microorganismos pueden degradar mejor esta biomasa. El aumento de degradación en términos de DQO_t fue de prácticamente el triple, mientras que para los ST y SV el aumento fue del 31% y del 20% respectivamente.



* Las barras de error representan el error estándar de los duplicados.

Figura 3. Degradación de materia orgánica (DQO, ST y SV)

La baja biodegradabilidad de las microalgas sin procesar puede deberse a la composición de la pared celular de *Scenedesmus* sp., que, como ya se ha comentado anteriormente, está formada por hidratos de carbono complejos, tipo hemicelulósicos y esporopoleninos, que son difícilmente biodegradables por los microorganismos responsables de la digestión anaerobia.

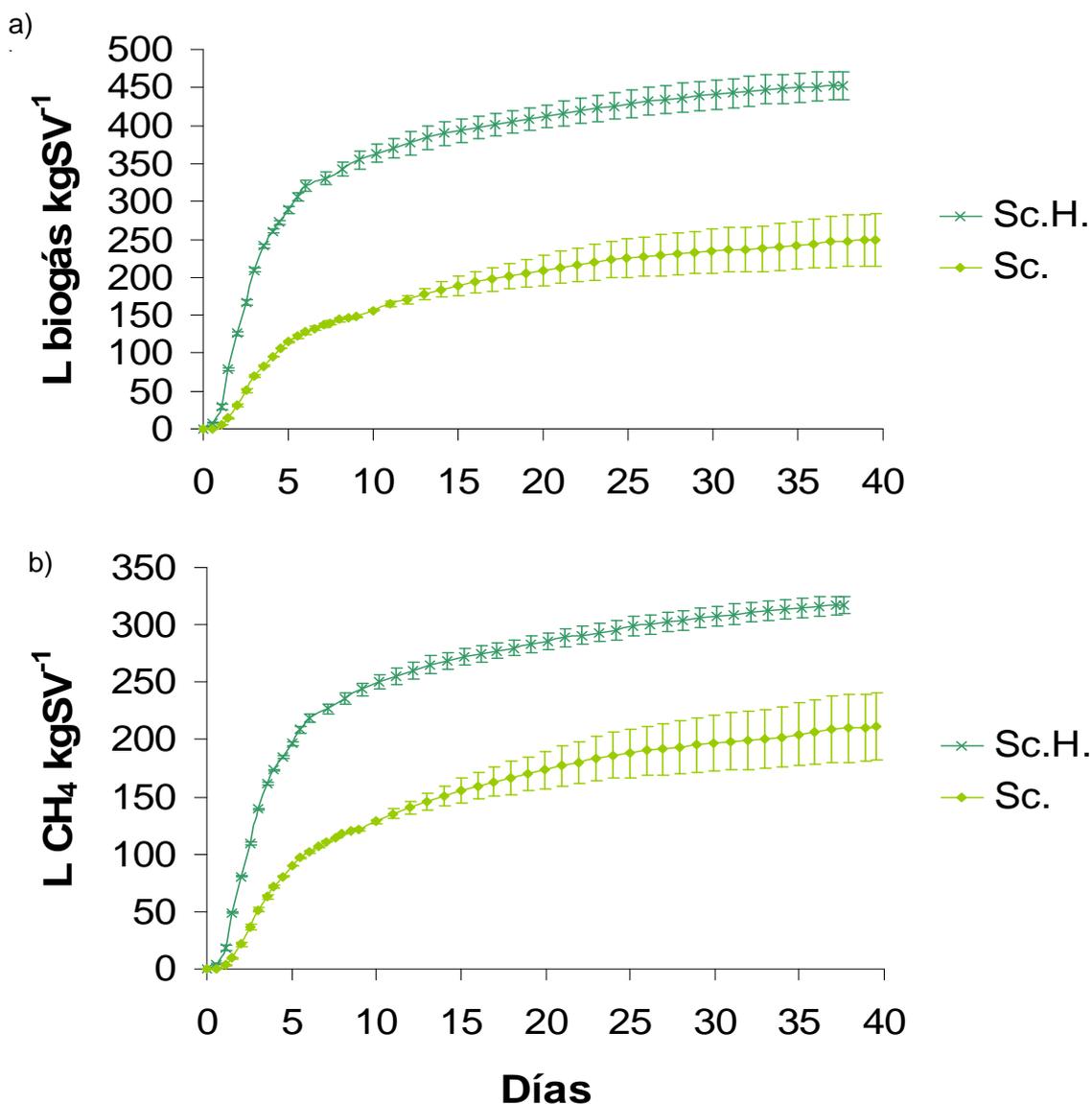
En el caso de las microalgas hidrolizadas, la degradación de la materia orgánica aumenta considerablemente debido a que en el pretratamiento previo al hidrolizado enzimático para la extracción de los aminoácidos tiene lugar una molturación mecánica en un molino de bolas que favorece la lisis de la pared celular de la microalga. Esta lisis permite un mayor grado de recuperación de los aminoácidos durante la hidrólisis enzimática y al mismo tiempo, facilita posteriormente el acceso de los microorganismos que llevan a cabo la degradación anaerobia al interior de la célula, aumentando la biodegradabilidad de ésta. Además, hay que añadir que la relación C/N aumenta ligeramente, beneficiando el desarrollo de los microorganismos que producen la degradación anaerobia.

La biodegradabilidad es el parámetro más importante en el proceso de digestión, ya que será el que determine la producción de biogás que tendrá lugar a partir de la materia orgánica degradada.

3.3. Producción de biogás

La productividad acumulada de biogás y metano de la microalga sin procesar y la microalga hidrolizada se muestra en las figuras 4a) y 4b) respectivamente. Como se puede observar, y a falta de descontar la influencia del inóculo en la producción de biogás y metano que es similar para los dos tipos de biomasa, la producción de biogás y metano es significativamente superior para la microalga hidrolizada que para la microalga que no ha sufrido ningún tipo de pretratamiento. Esto es consecuencia del aumento de

biodegradabilidad descrito en la sección 3.2. La materia orgánica, al ser más fácilmente accesible, es degradada con mayor eficiencia por parte de los microorganismos y por tanto una mayor cantidad de esta materia orgánica será transformada en biogás.



* Influencia de los blancos no descontada de los resultados. Las barras de error representan el error estándar de los duplicados. Sc.=*Scenedesmus* sin procesar / Sc.H.= *Scenedesmus* hidrolizada.

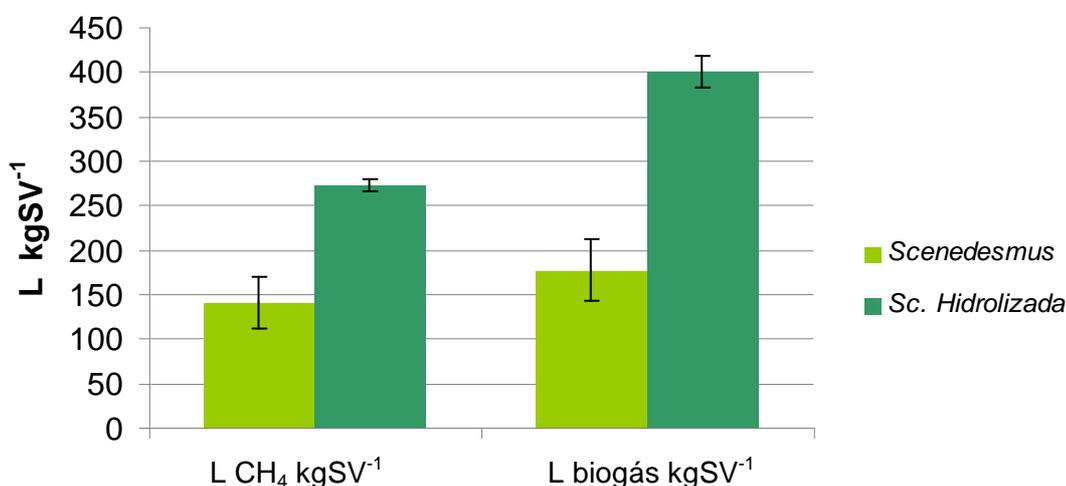
Figura 4. Productividades acumuladas de biogás (a) y metano (b)

También puede observarse en las figuras 4a) y 4b) como en el caso de la microalga hidrolizada la mayor parte de la producción de biogás y metano se concentra en los primeros diez días. La producción acumulada de biogás hasta el día 10 se corresponde con el 80% de la producción total de biogás al cabo de los 38 días que duró la experimentación, y en el caso del metano este porcentaje es muy similar (79% aproximadamente). Sin embargo, en el caso de la microalga sin procesar, la producción de biogás al cabo de 10 días se corresponde con el 63% del total al cabo de 40 días,

mientras que para el metano el porcentaje es ligeramente inferior, llegando prácticamente al 61%. Esto indica que la microalga sin procesar requiere de tiempos de retención largos para ser completamente degradada y convertida en biogás. Incluso pasando 40 días gran parte de la biomasa aún no ha podido ser digerida. Este hecho corrobora que la microalga hidrolizada, gracias al pretratamiento previo al hidrolizado enzimático, aumenta considerablemente su biodegradabilidad, reduciéndose los tiempos de retención necesarios para su correcto aprovechamiento y mejorando la eficiencia del proceso, ya que en definitiva, tiempos de retención más cortos permiten que el tamaño de los digestores sea menor y por tanto, un importante ahorro económico.

En la Figura 5 se muestra la productividad de metano y biogás una vez descontada la producción endógena de éstos en el inóculo. La productividad potencial de metano para *Scenedesmus* sin procesar y para *Scenedesmus* hidrolizada es de $140,3 \pm 29,4$ L CH₄ kgSV⁻¹ y de $272,8 \pm 7,3$ L CH₄ kgSV⁻¹ respectivamente. Mientras que la productividad potencial de biogás es de $177,4 \pm 34,2$ L biogás kgSV⁻¹ y de $401,2 \pm 17,7$ L biogás kgSV⁻¹. Estas productividades aquí presentadas pueden ser ligeramente superiores en caso de disponer de un inóculo totalmente adaptado a la digestión de estos sustratos

La productividad de metano aumenta un 94,4% para la microalga hidrolizada respecto a la microalga sin procesar, lo que da una idea del potencial metanogénico que queda sin aprovechar en la microalga sin procesar y que podría ser liberado con un pretratamiento que rompiese la pared celular. En el caso del biogás, el incremento que se produce al digerir la microalga hidrolizada es del 126% respecto a la microalga sin hidrolizar.



* Influencia de los blancos descontada de los resultados. Las barras de error representan el error estándar de los duplicados.

Figura 5. Productividad de biogás y metano

3.4. Beneficios de la digestión anaerobia asociada a la producción de microalgas

3.4.1. Uso del biogás

El biogás generado por medio de la digestión anaerobia de las microalgas o de sus residuos podría tener los usos comunes de cualquier biogás independientemente de su origen. Entre ellos cabe destacar:

- Generación de calor en calderas.
- Cogeneración de electricidad y calor mediante motores de combustión interna.
- Purificación del biogás y uso del biometano obtenido, que puede incluir:
 - o Combustible para automoción.
 - o Inyección en la red de gas natural.
 - o Combustible en pilas de combustible o microturbinas.

Sin embargo, en caso de asociar el tratamiento de digestión anaerobia a la producción de microalgas, el uso del biogás debería estar normalmente dirigido a la producción de electricidad (que podrá ser consumida o vertida a la red dependiendo de lo que resulte más rentable) y calor para su uso en la propia planta de producción y procesado de microalgas. La producción de electricidad y calor en la propia biorrefinería supondría un ahorro de costes importante en el proceso de producción de microalgas y posterior uso de éstas para diversos fines.

Según Williams and Laurens (2010), en una planta tipo de producción de microalgas, donde se utiliza una combinación de fotobiorreactores y *raceways* y con una productividad de 103 toneladas de materia seca por hectárea y año, el consumo eléctrico considerando únicamente las operaciones de cultivo, cosechado y procesos de concentrado de las microalgas se dividiría en lo que se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Estimación del consumo eléctrico en una planta de producción de microalgas

Operaciones	Consumo eléctrico	
	kWh ha ⁻¹ a ⁻¹	kWh ton _{m.s.} ⁻¹
Cultivo	100.286	973.6
Cosechado	38.000	368.9
Concentrado	1.500	14.6
Consumo total	139.786	1357.1

*Calculado a partir de Williams and Laurens, 2010.

En nuestro caso, según la cantidad de metano que se produciría a partir de la biomasa de microalgas hidrolizada ($273 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ tonSV}^{-1} = 168,4 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ ton m.s.}^{-1}$), se podría obtener hasta $554 \text{ kWh}_e \text{ ton}_{\text{m.s.}}^{-1}$ (considerando un 10% de pérdidas de biomasa, que el PCI del metano es 9.000 kcal/Nm^3 y que el motor de generación eléctrica tiene un 35% de eficiencia). Esto supondría que se podría producir en la propia planta de microalgas hasta un 41% de la electricidad total consumida durante el proceso de cultivo, cosechado y concentrado de la biomasa de microalgas, lo que resulta ser una cifra bastante significativa. Además, el 65% restante de la energía contenida en el metano se transformaría en calor, que de ser aprovechado aportaría un importante ahorro energético para la misma planta. Este calor residual sería del orden de $382.369 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, parte de

él debería ser utilizado en el calentamiento del propio digestor anaerobio.

Estas cifras pueden variar de manera significativa dependiendo del grado de aprovechamiento de los componentes orgánicos de la microalga, ya que, por ejemplo, en el caso de que se produzca una extracción de lípidos posterior a la extracción proteica, el potencial de producción de biogás de la microalga disminuirá considerablemente. También hay que considerar que este potencial es intrínseco de cada especie de microalga, como se ha demostrado en otros estudios (Mussnug et al., 2010), y por tanto puede variar significativamente dependiendo de la especie que se esté cultivando. Sin embargo, estos cálculos realizados de forma aproximada en este trabajo dan una idea del potencial de la digestión anaerobia asociada a la producción de microalgas.

Para conseguir que las microalgas se desarrollen rápidamente, es necesario añadir CO₂ de alguna manera, ya que el intercambio natural con la atmósfera es demasiado lento (Williams and Laurens, 2010). Por tanto, además del ahorro energético que supone la utilización de la elevada proporción de metano del biogás, existe la posibilidad de separar y utilizar el CO₂ que forma parte del mismo o aprovechar los gases de combustión del biogás directamente. La utilización de este CO₂ para el crecimiento de nueva biomasa de microalgas supone un importante ahorro económico, ya que de otra forma debería ser comprado o separado de la atmósfera y añadido al medio de cultivo como CO₂ puro. Otra posibilidad es utilizar CO₂ proveniente de plantas convencionales de producción eléctrica, pero ello supone limitar la producción de microalgas a zonas colindantes con estas plantas. Por tanto, la utilización de la digestión anaerobia para la producción de microalgas no solo proporciona un importante ahorro energético y por tanto mejora de los costes de producción, si no que además permite el suministro de CO₂ al medio de cultivo y brinda libertad de posicionamiento para evitar la dependencia de plantas convencionales de producción eléctrica.

El coste estimado debido al suministro de CO₂ para el crecimiento de microalgas dependerá del tipo de planta de producción, de la microalga en cuestión y otros muchos factores. Molina Grima et al. (2003) estimaron que el coste de CO₂ equivale al 41,3% de los costes directos anuales para la producción de biomasa de *P. tricornutum*. En los costes directos se incluían el medio de cultivo, sus filtros y los filtros de aire y otros consumibles. Por tanto, el ahorro económico que se puede conseguir suministrando el CO₂ de forma gratuita es muy importante.

3.4.2. Uso del digestato

Durante la digestión anaerobia, los nutrientes que se encuentran en forma orgánica como parte del sustrato pasan a forma mineral quedando en el digerido, mientras que el carbono orgánico se transforma en biogás (esto sin tener en cuenta los nutrientes que utilizan los microorganismos para su propio crecimiento). Por lo tanto, durante el uso de cualquier cultivo en digestión anaerobia, los nutrientes que éste ha absorbido durante su crecimiento y que forman parte de él pueden ser aprovechados para el crecimiento de nueva biomasa al quedar en forma mineral al final del proceso.

La digestión anaerobia de microalgas puede reportar los mismos beneficios, mineralizando los nutrientes que se encontraban de forma orgánica en la biomasa para ser utilizados de nuevo como medio de cultivo. De esta forma se reduciría la necesidad

de fertilizantes minerales (medio de cultivo), y se conseguiría un menor impacto ambiental al consumir menor cantidad de estos fertilizantes en cuyo proceso de fabricación se emiten grandes cantidades de gases de efecto invernadero (GEI).

Al igual que para el suministro de CO₂, Molina Grima et al. (2003) estimaron los costes que supone el medio de cultivo durante la producción de la microalga *P. tricornutum*. Éste puede llegar a ascender al 34,9% de los costes directos para la producción de biomasa, por lo que cualquier disminución de costes en este aspecto supondría un ahorro muy significativo contribuyendo a hacer económicamente viable la producción de microalgas.

4. Conclusiones

Las conclusiones que se pueden extraer de este trabajo son las siguientes:

- El uso de la microalga *Scenedesmus* sp. para digestión anaerobia no resulta rentable debido a su baja productividad de biogás (177,4±34,2 L biogás kgSV⁻¹) y metano (140,3±29,4 L CH₄ kgSV⁻¹) en el caso de que la microalga no sufra ningún pretratamiento previo.
- Los residuos de *Scenedesmus* sp. tras sufrir un proceso de hidrolizado enzimático para la extracción de la parte proteica aumentan la biodegradabilidad considerablemente, incrementando la producción de biogás y metano (401,2±17.7 L biogás kgSV⁻¹ y 272,8±7,3 L CH₄ kgSV⁻¹ respectivamente) hasta tal punto que el uso de la digestión anaerobia podría resultar económicamente viable.
- La causa del incremento de la biodegradabilidad se debe principalmente al pretratamiento que incluye el proceso de hidrolizado enzimático que permite la lisis de la pared celular de la microalga, y también a la extracción de parte de la proteína de la microalga que permite incrementar la relación C/N.
- La utilización de la digestión anaerobia combinada con la producción de microalgas destinada a la obtención de diferentes compuestos de alto valor añadido y biocombustibles puede resultar económica y medioambientalmente atractiva, reduciendo los costes directos atribuidos al consumo eléctrico y calorífico de la planta de producción y procesado de biomasa, así como al suministro de CO₂ y nutrientes. Además, supondría una reducción en la emisión de GEI debido a la producción de energía renovable y limpia y a la obtención de un fertilizante orgánico que reduciría el consumo de fertilizantes minerales.

5. Objetivos a futuro

Los próximos estudios que se van a desarrollar en el Grupo de Residuos del Departamento de Medio Ambiente del Ciemat relacionados con esta línea de investigación incluyen ensayos de codigestión de *Scenedesmus* sp. tras haber sufrido distintos tipos de procesamiento con otros sustratos de elevado contenido en carbono, para así aumentar la relación C/N con el fin de estudiar su influencia en la digestión anaerobia de este tipo de sustratos.

Además se pretende realizar ensayos de producción potencial de biogás, así como

ensayos en reactores en continuo de la biomasa de *Scenedesmus* sp. tras habersele extraído los lípidos para la producción de biodiesel y estudiar su co-digestión con glicerina, residuo procedente de la producción de biodiesel que añadido en pequeñas cantidades aumenta notablemente la producción de biogás y metano.

6. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Fundación Cajamar (Almería) y a la Universidad de Almería, especialmente al Dr. F. Gabriel Ación, su colaboración con el Ciemat y el suministro de la biomasa de microalgas utilizada en este trabajo.

7. Referencias

A.L. Ahmad et al., Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 15, (2011), 584–593.

APHA. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, Ed. Díaz de Santos S.A., Madrid, pp.278-286. (1992).

B. Sialve et al., Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. *Biotechnol. Adv.*, 27, (2009), pag. 409-416.

C. González-Fernández et al., Comparison of ultrasound and thermal pretreatment of *Scenedesmus* biomass on methane production, *Biores. Technol.*, 110, (2012), pag. 610-616.

E. Molina Grima et al., Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotech. Adv.*, 20, (2003), 491-515.

E.A. Ehimen et al. Anaerobic digestion of microalgae residues from the biodiesel production process, *Appl. Energ.*, 88, (2011), pag. 3454–3463.

E.A. Ehimen et al., Energy recovery from lipid extracted, transesterified and glycerol codigested microalgae biomass. *GCB Bioen.*, 1, (2009), 371–381.

H. Takeda, Cell wall sugars of some *Scenedesmus* species. *Phytochemistry*, 42, (1996), 673-675.

H.W. Yen and D.E. Brune, Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane, *Biores. Technol.*, 98, (2007), pag. 130-134.

J. Singh and S. Gu, Commercialization potential of microalgae for biofuels production, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 14, (2010), pag. 2596-2619.

J.H. Mussnug et al., Microalgae as substrates for fermentative biogas production in a combined biorefinery concept, *J. Biotechnol.*, 150, (2010), pag. 51-56.

J.M. Romero Garcia et al., Development of a process for the production of L-amino-acids concentrates from microalgae by enzymatic hydrolysis. *Biores. Tech.*, 112, (2012), 164-170.

L. Brennan and P. Owende, Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing and extractions of biofuels and co-products. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 14, (2010), pag. 557-577.

L. E. Ripley et al. Improved Alkalimetric Monitoring for Anaerobic Digestion of High-Strength Wastes, *J. Wat. Poll. Cont. Fed.*, 58, (1986), 406-411.

L. Rodolfi et al., Microalgae for Oil: Strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor, *Biotechnol. Bioeng.*, 102, (2009), pag. 100-112.

M. Alzate et al. Influence of thermal hydrolysis pretreatment on the anaerobic digestion of microalgae, X Latin American Workshop and Symposium on Anaerobic Digestion (2011).

P. Spolaore et al., Commercial applications of microalgae, *J. Biosci. Bioeng.*, 101, (2006), 87-96.

P.H. Chen and W.J. Oswald, Thermochemical treatment for algal fermentation, *Environ. Int.*, 24. (1998), pag. 889-897.

P.J.B. Williams and L.M.L. Laurens, Microalgae as biodiesel & biomass feedstocks: Review & analysis of the biochemistry, energetics & economics, *Energy Environ. Sci.*, 3, (2010), pag. 554-590.

P.L. McCarty, Anaerobic Waste Treatment Fundamentals III. Chemistry and Microbiology. *Public Works*, 95, (1964), pag. 107-112.

J.B.K. Park et al., Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production, *Biores. Tech.*, (2011), pag. 102, 35-42.

R. Samson and A. LeDuy, Improved performance of anaerobic digestion of *Spirulina maxima* algal biomass by addition of carbon-rich wastes, *Biotechnol. Lett.*, 5, (1983), pag. 677-682.

Verein Deutscher Ingenieure, VDI Guideline 4630, Fermentation of organic materials. Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data and fermentation tests.. Düsseldorf. (2006).

Y. Chisti., Biodiesel from microalgae. *Biotechnol. Adv.*, 25, (2007), 294-306.