

OBTENCIÓN DE BIOMASA DE MICROALGAS EN AGUAS RESIDUALES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES



OBTENCIÓN DE BIOMASA DE MICROALGAS EN AGUAS RESIDUALES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

Johanna Alexandra Gómez Santos¹
Leydy Gabriela Rodríguez González²

Resumen

El estudio se planteó como objetivo estudiar la implantación un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales, tecnologías de tratamiento más sostenibles como el cultivo de microalgas, aprovechando la biomasa microalga para obtener biodiesel, alimento animal u otros usos. Se aislaron microalgas nativas de fuentes naturales del departamento de Santander, evaluando su crecimiento en medio sintético, y se escaló con la finalidad de promover la adaptación a las condiciones de cultivo. Se determinaron las condiciones y variables de crecimiento de las microalgas en aguas residuales industriales y su capacidad de depuración; considerando el fotoperiodo y esterilización o no de las aguas residuales. Encontrando que la

microalga mostró crecimiento significativo, adaptándose fácilmente a las condiciones del medio; se observó disminución de parámetros tales como DQO, fosfatos y nitratos, demostrando la posibilidad de aplicarlo como tratamientos terciarios de aguas residuales. Se separó la biomasa del medio de cultivo, realizando una extracción de los lípidos, calculando teóricamente la producción de biodiesel basado en la eficiencia de la reacción de transesterificación. Concluyendo que, este sistema de doble propósito constituye una alternativa viable, para la producción de biodiesel y el tratamiento de aguas residuales.

Palabras clave: biomasa de microalgas, aguas residuales, producción de biocombustibles, biodiesel, energía.

¹ Doctora en Química, Centro Industrial de Mantenimiento Integral (CIMI), Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). Correo: jagomez0742@misena.edu.co

² Ingeniera Biotecnológica, Instructora Tecnoparque Nodo Bucaramanga, Centro Industrial del Diseño y la Manufactura (CIDM), Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). Correo: lgrodriguez96@misena.edu.co

OBTAINING MICROALGAE BIOMASS IN WASTEWATER FOR BIOFUELS PRODUCTION

Abstract

The objective of the study was to study the implementation of an industrial wastewater treatment system, more sustainable treatment technologies such as the cultivation of microalgae, taking advantage of microalgal biomass to obtain biodiesel, animal feed or other uses. Native microalgae were isolated from natural sources in the department of Santander, evaluating their growth in a synthetic medium, and scaled in order to promote adaptation to cultivation conditions. The growth conditions and variables of the microalgae in industrial wastewater and their purification capacity were determined; considering the photoperiod and sterilization or not of the wastewater. Finding that the microalgae showed significant growth, easily adapting to the conditions of the environment; A decrease in parameters such as COD, phosphates and nitrates was observed, demonstrating the possibility of applying it as tertiary wastewater treatments. The biomass was separated from the culture medium, carrying out an extraction of the lipids, theoretically calculating the biodiesel production based on the efficiency of the transesterification reaction. Concluding that this dual-purpose system constitutes a viable alternative for the production of biodiesel and the treatment of wastewater.

Keywords: microalgae biomass, wastewater, biofuel production, biodiesel, energy.

Introducción

La creciente preocupación en las últimas décadas relacionada el agotamiento del petróleo y las emisiones de gases de efecto invernadero que provocan el calentamiento global han impulsado numerosas investigaciones relacionadas con la producción de combustibles a partir de biomasa vegetal. Así, se ha estudiado la producción de biocombustibles a partir de jatropha (Castillo et. al, 2011), remolacha (García, 2008), maíz, coco (Tejada et. al, 2009; Guarenas y Chirinos, 2007), palma (Murillo, 2004), entre muchos otros. Sin embargo, esta alternativa suscitó un escándalo mundial, debido a la crisis alimentaria, en especial en países subdesarrollados y además porque esta práctica, por ejemplo en el caso de la palma, está ligada a la deforestación acabando con los pulmones que limpian la atmosfera.

Posteriormente, se implementó el uso de residuos agrícolas, forestales, urbanos, industriales agroalimentarios, ganaderos, etc, y de cultivos energéticos; pero, se necesitan grandes extensiones de tierras para este fin, que podrían competir con las tierras fértiles, lo que sigue representando un gran problema para la seguridad alimentaria. Esto ha conllevado a

seguir buscando nuevas fuentes de energías que permitan mitigar en parte o totalmente los inconvenientes presentados hasta ahora.

Una alternativa que se ha destacado y se ha venido estudiando intensamente es el uso de microalgas; que son microorganismos fotosintéticos eucariotas y procariotas, que utilizan el dióxido de carbono, agua y energía solar para producir biomasa, que, bajo ciertas condiciones, puede tener un alto contenido de lípidos que pueden aprovecharse para la producción de biodiesel, luego se consideran muy interesantes desde este punto de vista (Farag, 2012).

Las microalgas se encuentran en gran cantidad de formas, tamaños y colores, conociéndose más de 30.000 especies; pueden crecer muy rápido, incluso de 10 a 200 veces más rápido que los cultivos convencionales usados para la producción de biodiesel de primera generación (Chisti, 2007); así mismo, pueden vivir en diversas condiciones, esto es tanto en agua salada como dulce, en aguas residuales e incluso en el suelo, pueden resistir un amplio intervalo de temperatura y pH, y subsistir inclusive en condiciones limitadas de nutrientes gracias a su estructura unicelular (Hernández et. al, 2009); esto es, no necesitan suelo fértil ni agua de calidad, por lo que no competiría con actividades agrarias; de hecho, alguna

especies no necesitan un sustrato orgánico para subsistir, facilitando su cultivo en lugares que carecen de interés para otro tipo de actividades.

Estos microorganismos son altamente productivos, mucho más que los cultivos tradicionales, a los cuales supera también en producción de aceites; necesitan menos terreno que los cultivos agrícolas y no necesitan pesticidas o herbicidas, que resultan perjudiciales para el medio y con áreas pequeñas se pueden abastecer grandes demandas energéticas (Rhodes, 2009). Además de presentar todas estas ventajas energéticas por la obtención de biocombustible, aporta al medioambiente mediante la fijación de dióxido de carbono y nitrógeno, favoreciendo el control o mitigación de fenómenos tales como el efecto invernadero y la lluvia ácida.

Adicionalmente, su producción es continua, pudiéndose cultivar en cualquier época del año, es decir, no siguen un régimen de cosecha. Así mismo, su reproducción es rápida, duplicándose cada 8 horas aproximadamente, lo que permite una mayor producción de aceites para la obtención de biodiesel que los cultivos normalmente empleados. Por otro lado, gracias a su contenido de proteínas, los residuos tras la extracción del aceite, pueden ser usados en otras industrias, tales como la agrícola, alimentaria y farmacéutica.

A pesar de todas las ventajas asociadas con las microalgas para la producción de biodiesel, el cultivo de estos microorganismos requiere una enorme cantidad de nutrientes y agua a escala industrial (Murphy y Allen, 2011); el primero de estos, resulta altamente costoso desde el punto de vista económico y el segundo, siendo el agua un recurso muy valioso, debe utilizarse con prudencia. Estos dos factores, representan limitaciones críticas asociadas a la elaboración de biodiesel a partir de microalgas (Allen et al., 2018); de manera que para que esta alternativa pueda competir con los combustibles derivados del petróleo, se requiere mejorar la eficiencia del proceso y hacerlos económicamente viables a escala industrial (Gendy y El-Temtamy, 2013).

Para esto se han propuesto diversas alternativas, entre ellas el uso de aguas residuales, que constituyen un medio complejo que permitiría hacer más rentable el cultivo, ya que estas agua están cargadas de nutrientes que pueden aprovechar para su crecimiento y adicionalmente mejoran la calidad del agua; ahora bien, para que la producción comercial de biocombustibles a partir de microalgas sea posible se deben cumplir tres condiciones: alta producción de biomasa, alta productividad de lípidos y alta tolerancia a las aguas residuales

(Chen et al., 2015). Así, se requiere una selección adecuada de la cepa de microalgas como requisito para la producción exitosa de biodiesel.

En este trabajo se utilizaron aguas residuales industriales como medio de cultivo y fuente de nutrientes para las microalgas, procurando un doble objetivo, el mejoramiento de la calidad de las aguas tratadas y la obtención de biomasa microalgal con un gran potencial para la producción de biodiesel. Para esto se aislaron microalgas nativas de fuentes hídricas del departamento de Santander, se escaló su cultivo y se estudió la eficiencia de remoción de nutrientes de las aguas residuales, su producción de biomasa y lípidos y se hizo un cálculo teórico de la producción de biodiesel.

Fundamento teórico

Diversas especies de microalgas han sido usadas para la producción de biodiesel gracias a que contienen fracciones considerables de aceite que puede ser usado para este fin. El contenido de aceite de las microalgas puede alcanzar casi el 80% en peso de biomasa seca, sin embargo, es más común contenidos del 20-50%, tal como lo muestra la tabla 1 donde se indica el contenido de aceite como porcentaje de peso seco para varias especies de microalgas (Chisti, 2007). La productividad del aceite de microalgas depende de la tasa de

crecimiento y del contenido de aceite de la biomasa, luego estos dos parámetros deben ser evaluados para

considerar una microalga para la producción de biodiesel.

Tabla 1. Contenido de aceite de algunas especies de microalgas

Microalga	Contenido de aceite (% PS)
Botryococcus braunii	25-75
Chlorella sp.	28-32
Cryptocodinium cohnii	20
Cylindrotheca sp.	16-37
Dunaliella primolecta	23
Isochrysis sp.	25-33
Monallanthus salina	>20
Nannochloris sp.	20-35
Nannochloropsis sp.	31-68
Neochloris oleoabundans	35-54
Nitzschia sp.	45-47
Phaeodactylum tricornutum	20-30
Schizochytrium sp.	50-77
Tetraselmis sueica	15-23

Fuente: Chisti (2007).

Por otro lado, a escala industrial se requieren grandes cantidades de nutrientes (fosforo y nitrógeno, principalmente) para cultivar microalgas con fines de producción de biodiesel para su comercialización. Con la intención de lograr mayores tasas de crecimiento y producción de biomasa, se han utilizado fertilizantes inorgánicos como fuente de nutrientes; sin embargo, los nutrientes inorgánicos se liberan fácilmente a los cuerpos de agua y causan contaminación. Alternativamente, se ha usado aguas residuales como fuente de nutrientes para el cultivo de microalgas, ya que están contienen altas concentraciones de nitrógeno y fósforo. Las investigaciones han

demostrado que efectivamente los nutrientes son absorbidos por estas de manera exitosa para su crecimiento. De manera que este constituye un método que mejoraría los aspectos económicos de producción de biodiesel y la calidad del agua.

Las descargas de aguas residuales sin tratamiento o con tratamientos ineficientes a los cuerpos de agua plantean serios problemas ambientales ya que estas contienen altos niveles de materia orgánica, nutrientes y sustancias tóxicas que requieren ser eliminados para evitar riesgos de eutrofización. En este sentido, las algas han demostrado que son un método factible y amigable con

el medio ambiente (Rawat et. al, 2011), ya que estas tienen la capacidad de eliminar nutrientes

inorgánicos en simbiosis con bacterias heterotróficas (Figura 1).

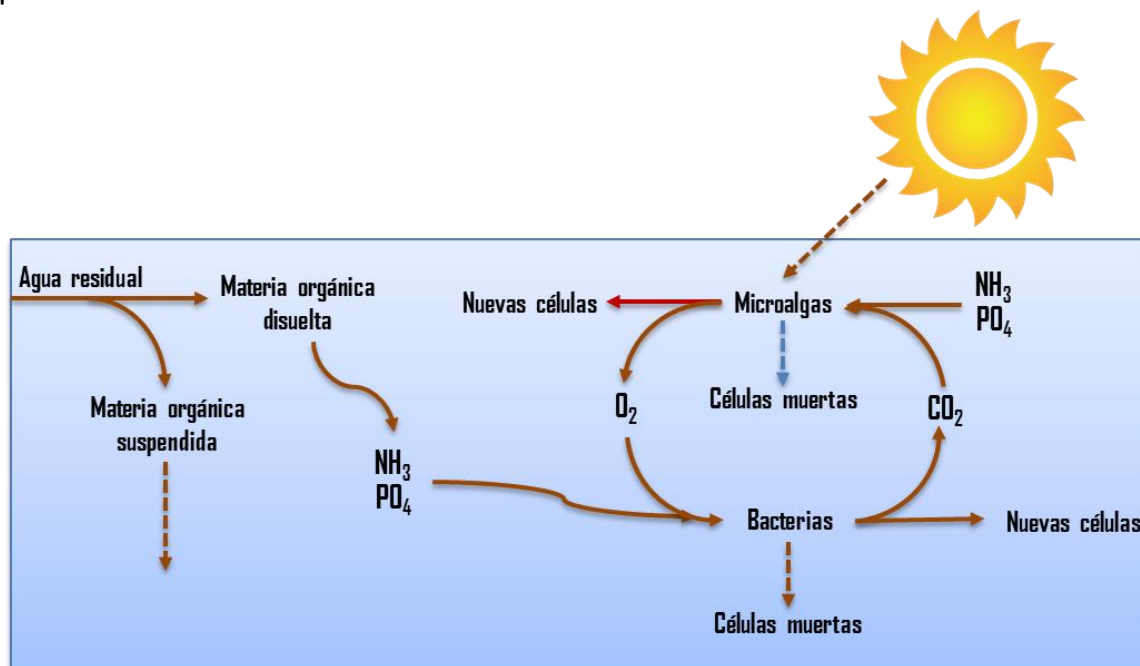


Figura 1. Simbiosis entre algas y bacterias para el tratamiento de aguas residuales
Fuente: Elaboración propia basada en Amalina et. Al (2018)

Básicamente, las microalgas proporcionan oxígeno a las bacterias, las cuales se encargan de digerir la materia orgánica disuelta en las aguas residuales, y estas a su vez liberan dióxido de carbono que es usado por las microalgas para su crecimiento (Amalina et. al, 2018). Las microalgas verdes, especialmente *Chlorella*, son ideales para ejercer el doble beneficio esperado en este estudio, es decir son aptas para el tratamiento de las aguas residuales y para la producción de biomasa mediante la conversión de nutrientes de las mismas a biomasa y lípidos (Rawat et. al, 2011).

El principal desafío del uso de aguas residuales como fuente de nutrientes para el cultivo de microalgas es el alto nivel de contaminación y las variaciones en la composición de nutrientes de las mismas (Lam y Lee, 2012). En el caso de las aguas industriales, la gran cantidad de compuestos tóxicos podría tener efectos adversos para el cultivo de microalgas (Zhou et. al, 2014). En general, las características de las aguas residuales industriales dependen de la naturaleza de los productos fabricados, adicionalmente, estas pueden contener impurezas disueltas que hacen que tengan olores desagradables (Rawat et. al, 2011).

Hasta el momento, las investigaciones que usan microalgas y aguas residuales industriales están enfocadas a la eliminación de metales pesados principalmente y no en la producción de biodiesel, debido a que se considera que estas aguas no son adecuadas debido al desequilibrio en la composición de nutrientes y a la presencia de sustancias desconocidas que podrían poner en peligro el cultivo; sin embargo, se han reportado estudios en donde se han usado con éxito, aunque dependen del tipo de industria.

Por ejemplo, se ha reportado el uso de aguas residuales producidas por una fábrica de alfombras como fuente de nutrientes; estas aguas contenían bajas concentraciones de toxinas y una adecuada concentración de nitrógeno y fósforo que permitió el crecimiento de *B. braunii*, *Chlorella saccharophilla* y *Pleurochrysis cataractae*. La biomasa y contenido de lípidos producidos por *Chlorella saccharophilla* fue de 23 mg/Ld y 18,10% respectivamente, mientras que para *Scenedesmus* sp fue 126.54 mg/Ld y 12,80% respectivamente (Zhou et. al, 2014).

La misma observación fue reportada por Chinnasamy y col. (2010), en el que microalgas nativas se cultivaron con éxito en aguas residuales de efluentes de industrias de alfombras con productividades de 9.2 a 17.8 toneladas/hectárea*año,

con contenido de lípidos del 6.82%. También se ha demostrado que algunas especies de microalgas sirven para el tratamiento de aguas residuales de pozos petroleros, así, teniendo en cuenta la cantidad de agua residual generada durante las perforaciones, esto es, aproximadamente 3 barriles de agua residual por cada barril de petróleo generado, se podría producir 0.7 millones de galones de aceite de microalgas diariamente, asumiendo un rendimiento de biomasa de 1g/L con 30% de contenido de lípidos (Zhou et. al, 2014).

En pocas palabras, el agua residual puede suministrar los nutrientes necesarios para el crecimiento de las microalgas, al igual que los medios sintéticos comerciales. Sin embargo, debe tenerse en cuenta las variaciones en la concentración de nutrientes en las aguas, ya que esto afecta la productividad de la biomasa y el rendimiento de lípidos. Por lo tanto, se deben analizar fisicoquímicamente las aguas residuales antes de utilizarse como fuentes de nutrientes para el cultivo de microalgas.

Métodos

En este trabajo se realizó un estudio experimental de enfoque cuantitativo cuya metodología se describe a continuación:

Aislamiento de microalgas

Se aisló la microalga *Chlorella* sp. del río de Oro ubicado en el departamento de Santander mediante la técnica de dilución en serie en cultivo selectivo líquido y sólido. Ambos enriquecidos con medio de cultivo Bristol. La ubicación taxonómica de la microalga se determinó mediante el uso de bibliografía especializada.

Medios de cultivo

Para el crecimiento de las microalgas se emplearon tres medios de cultivo. En primer lugar, se usó agua residual recolectada de una

planta de tratamiento de aguas de una industria agroalimentaria de la región (AR); en segundo lugar, agua enriquecida con nutrientes usando un fertilizante comercial (AE) y finalmente un medio de cultivo sintético (MC), para este caso se utilizó el medio Bristol, cuya composición y concentraciones se pueden observar en la tabla 2. Por otro lado, el agua enriquecida se preparó en agua destilada a la que se le agregó fertilizante comercial en proporciones tales que se obtuvieran 300 mg/L de nitrógeno, 120 mg/L de fosfatos y trazas de elementos menores, siguiendo las recomendaciones de Trainor y Wilmes (1994).

Tabla 2. Composición del medio Bristol

Reactivos	Soluciones Stock	Cantidad (mL/L)
NaNO ₃	10g/400 mL agua	10
CaCl ₂ ·2H ₂ O	1g/400 mL agua	10
MgSO ₄ ·7H ₂ O	3g/400 mL agua	10
K ₂ HPO ₄	3g/400 mL agua	10
KH ₂ PO ₄	7g/400 mL agua	10
NaCl	1g/400 mL agua	10
FeCl ₃	---	0.031

Fuente: Elaboración propia basada en Jaramillo (2019).

Cultivo de microalgas

Los cultivos se llevaron a cabo usando frascos de vidrio de 5 litros de capacidad, en los cuales se adicionó cada uno de los medio de cultivo (AR, AE y MC), los cuales fueron inoculados por separado con la cepa de microalga aislada. Cada tratamiento se realizó por triplicado. Los cultivos se mantuvieron a temperatura ambiente, aireación constante proporcionada por una bomba y un fotoperiodo de 18 horas de luz y 6 de oscuridad utilizando para

ello lámparas fluorescentes laterales. El cultivo se realizó durante 15 días donde las microalgas alcanzaron una fase estacionaria.

Se realizaron conteos diariamente y por triplicado de forma manual para conocer el crecimiento en la concentración celular en los bioensayos, por medio de la cámara de Neubauer y utilizando un microscopio binocular con un aumento de 40X. El cálculo de la concentración celular se realizó con ecuación 1.

$$\text{Concentración}(\text{cel/mL}) = \frac{\# \text{ Numero de células contadas}}{(\text{Superficie}[\text{mm}^2] * \text{Profundidad}[\text{mm}] * \text{Inv. Dilución})}$$

Ecuación 1. Cálculo de la concentración celular

Transcurridos los 15 días de los bioensayos se centrifugó a 5000 rpm durante 15 minutos y se filtraron usando filtros wathman de 2 μm de diámetro. Así mismo, se determinó el crecimiento de la biomasa por gravimetría, homogeneizando las muestras y tomando alícuotas de 10 mL que fueron filtradas y secadas en estufa a 60°C para determinar el peso seco.

Se realizó un análisis de aguas antes y después de los tratamientos para evaluar la capacidad de remoción de nutrientes de la microalga aislada. Se analizó el pH, contenido de nitratos y fosfatos y la demanda química de oxígeno (DQO). Para este último se utilizó el método SM 5220 C (Standars Methods). Para el cálculo del porcentaje de remoción se utilizó la ecuación 2.

Eficiencia de remoción de nutrientes

$$\% \text{ Remoción} = \frac{(\text{Cantidad inicial} - \text{Cantidad final})}{\text{Cantidad inicial}} * 100$$

Ecuación 2. Porcentaje de remoción de nutrientes

Extracción de los lípidos de la biomasa y cálculo teórico de la producción de biodiesel

Los lípidos fueron extraídos en un equipo Soxhlet usando la biomasa seca obtenida por centrifugación, filtración y secado, utilizando como solvente cloroformo al 98% y temperatura de 65°C.

La producción del biodiésel fue calculada teóricamente con base en la eficiencia de la reacción de transesterificación (transformación de los lípidos en biodiésel) equivalente a 87.7%, multiplicada por la

concentración de lípidos extraída de la biomasa de cada microorganismo (Sacristán et al., 2014).

Resultados y discusión

Crecimiento de las microalgas en aguas residuales industriales

El aislamiento de las microalgas para este trabajo se llevó a cabo de manera exitosa; la figura 2 muestra los resultados de la microscopia a 100X realizada al cultivo de la microalga nativa *Chlorella vulgaris*. Con esta cepa, se realizaron cultivos en los diferentes medios seleccionados para este estudio (AR, AE y MC).

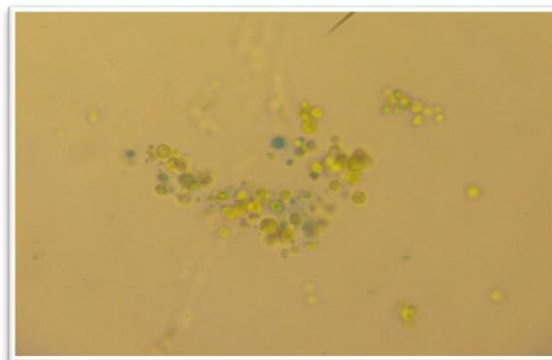


Figura 2. Microalga *Chlorella vulgaris* aislada. Microscopia a 100x.

Fuente: *Elaboración propia*

El crecimiento algal depende de diferentes factores (iluminación, pH, temperatura, nutrientes, etc), así el monitoreo de este parámetro resulta crucial durante el bioensayo. Los resultados del crecimiento de las microalgas en los diferentes medios

de cultivo estudiados se muestran en la figura 3, donde puede observarse que el cultivo de *Chlorella vulgaris* en aguas residuales presentó una mayor cantidad de biomasa de microalgas que en el medio enriquecido o utilizando un medio sintético.

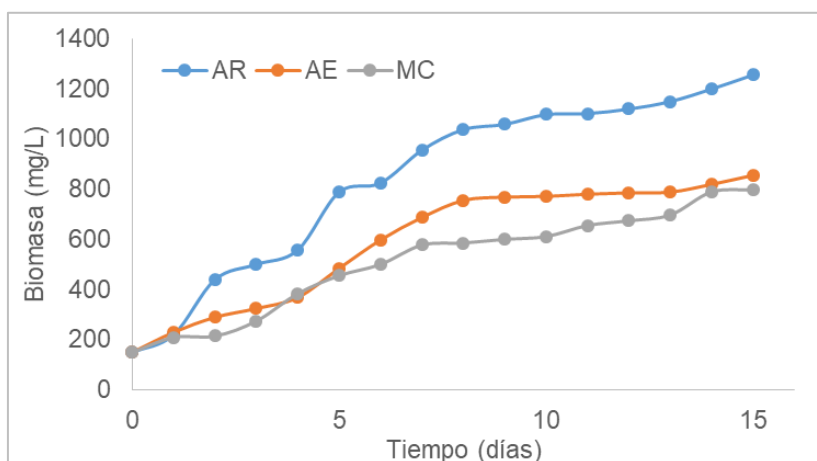


Figura 3. Curvas de crecimiento de las microalgas en los diferentes medios de cultivo.

Fuente: Elaboración propia

Esta mayor productividad de las microalgas en aguas residuales puede atribuirse a que las microalgas en AR crecen de forma heterótrofa, mientras que en AE y MC crecen de manera autótrofa; es decir, en estas últimas, la única fuente de carbono fue su CO_2 , mientras que en el primer caso la

abundancia de carbono orgánico que contenía el cultivo, incentivó el estrés nutricional. Por otro lado, la productividad de biomasa obtenida para los tres bioensayos es menor que la reportada por otros autores bajo condiciones similares. Por ejemplo, Rodolfi y colaboradores (2009) reportaron productividades de entre 170 y 200 $\text{mg/L}\cdot\text{d}$ en cultivos enriquecidos, esto es casi 4 veces mayor que la que hemos obtenido.

Eficiencia de remoción de nutrientes

En los cultivos de microalgas, tanto en aguas residuales como en medios

enriquecidos o sintéticos, la remoción de nutrientes se debe a la actividad de las microalgas directa e indirectamente. De forma directa se refiere a la asimilación de los nutrientes por las células para su incorporación a los procesos metabólicos, mientras que indirectamente está relacionado con los procesos abióticos (García-Gozalbes, 2015).

En este trabajo, al igual que en el de García-Gozalbes (2015) los periodos de crecimiento exponencial de la biomasa coinciden con aquellos en los que hay mayor eliminación de nutrientes (nitratos y fosfatos), tal como se puede apreciar en las figuras 3 y 4, así estos resultados corroboran la eficiencia en remoción de nutrientes que poseen las microalgas. Para el caso de los cultivos en AE y MC el porcentaje de remoción de nitratos fue de 43.5% y 40.3%, respectivamente, mientras que para AR fue del 87.1%,

una situación similar se encontró para los fosfatos en donde el porcentaje de

remoción en AR fue aproximadamente el doble que en AE y MC.

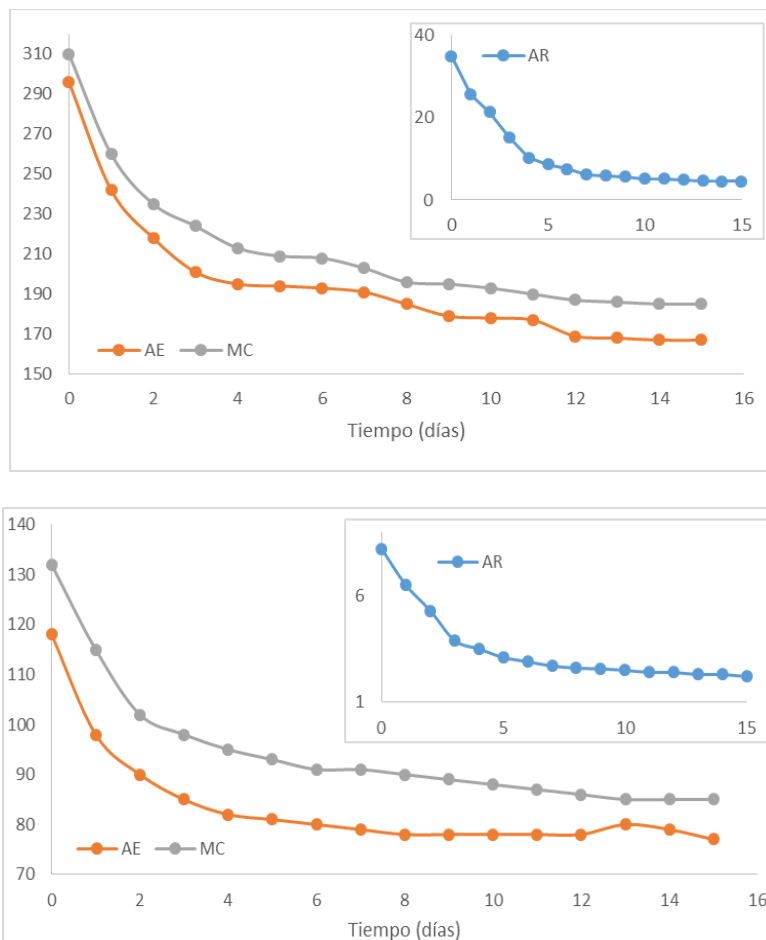


Figura 4. Eliminación de nitratos (A), fosfatos (B) y DQO (C) por microalgas en los diferentes medios de cultivo

.Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en los cultivos con aguas residuales industriales se observó una alta remoción de compuestos químicamente oxidables medidos como DQO (87%) y un aumento del pH (tabla 3), lo que confirma el crecimiento de las microalgas en condiciones

heterótrofas. En el caso del medio enriquecido y sintético, estos no contenían carbono orgánico, por lo que el valor de DQO probablemente se deba a otro tipo de compuestos oxidables, como los nitrogenados (Sacristán-de Alva et. al, 2014).

Tabla 3. Cambios en el pH y DQO en los diferentes tratamientos.

	AR		AE		MC	
	AC	DC	AC	DC	AC	DC
pH	5.38	7.10	6.9	7.0	6.3	7.0
DQO (mg O ₂ /L)	439	56.6	221	109	256	142

Fuente: Elaboración propia (2019). AC: antes del cultivo, DC: después del cultivo

Acumulación de lípidos y cálculo teórico de la producción de biodiesel

El metabolismo fotosintético de las microalgas transforma el nitrógeno, luz solar y dióxido de carbono en azúcares, lípidos y proteínas (Meng et al., 2009). Sin embargo, la acumulación de lípidos es mayor cuando se agota el nitrógeno del medio y se encuentra carbono en

exceso, situación que probablemente ocurrió en los bioensayos con agua residual donde se obtuvo el mayor porcentaje de acumulación de lípidos (18.24%), mientras que el menor fue para el medio de cultivo sintético Bristol (5.74%). En el primero, las condiciones heterotróficas pudieron provocar el aumento de ácidos grasos y biomasa en relación con el autotrófico.

Tabla 4. Márgenes para presentar su artículo de investigación.

	Lípidos (mg/L)	Biodiesel (mg/L)	Productividad de biodiesel (mg/L*d)
Aguas residuales (AR)	178.24	156.31	10.42
Agua enriquecida (AE)	97.15	85.20	5.68
Medio de cultivo (MC)	56.12	49.21	3.28

Fuente: Elaboración propia (2019).

Para terminar, la tabla 4 presenta el cálculo de la producción teórica de biodiesel a partir del contenido de lípidos teniendo en cuenta la eficiencia de la reacción de transesterificación para los tres bioensayos. Bajo esta hipótesis, se encontró que la mayor cantidad de

biodiesel se obtendría al realizar el cultivo con aguas residuales industriales agroalimentarias, donde las condiciones del cultivo (heterótrofo) promueven la acumulación de lípidos. Para los cultivos en aguas enriquecidas y medios de cultivo, la cantidad de biodiesel sería de

85,20 y 49,21 mg/L, cantidad considerablemente menos en AR, esto debido probablemente a que las microalgas crecen en ausencia de estrés y esto trae como consecuencia una menor acumulación de lípidos.

Conclusiones

Se aislaron microalgas nativas de fuentes naturales del departamento de Santander que resultaron viables para el cultivo en aguas residuales industriales agroalimentarias. Así mismo, se evaluaron las condiciones y variables de crecimiento de la microalga *Chlorella Vulgaris* tanto en las aguas residuales industriales como en aguas enriquecidas con fertilizantes comerciales y usando un medio de cultivo sintético. Los resultados de este trabajo indican que las microalgas que crecieron en aguas residuales (heterotróficamente) muestran mejor productiva en biomasa y porcentaje de lípidos que aquellas que crecieron en aguas enriquecidas o en medios de cultivo sintéticos.

En cuanto a la acumulación de lípidos que puedan usarse para la obtención de biodiesel, los experimentos con AR, fueron los que mostraron un mayor porcentaje, por encima del obtenido para AE y MC. Finalmente, el cálculo teórico de producción de biodiesel señala que la mayor producción se puede alcanzar en los cultivos con aguas residuales.

Referencias bibliográficas

Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. y Ibraheem, I. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19, 257–275.

Allen, J., Unlu, S., Demirel, Y., Black, P. y Riekhof, W. (2018). Integration of biology, ecology and engineering for sustainable algal-based biofuel and bioproduct biorefinery. *Bioresour. Bioprocess*, 5, 47.

Castillo, A.M., Velásquez, J.A. y Cuartas, P.A. (2011). Obtención de biodiesel a partir de aceite de *Jatropha curcas* l por transesterificación etanólica. *Revista Investigaciones Aplicadas*, 5 (1), 34-41.

Chen, G., Zhao, L. y Qi, Y. (2015). Enhancing the productivity of microalgae cultivated in wastewater toward biofuel production: a critical review. *Appl. Energy*, 137, 282–291.

Chinnasamy, S., Bhatnagar, A., Hunt, R.W. y Das, K. (2010). Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biofuel applications. *Bioresour. Technol.*, 101(9), 3097-3105.

Chisti, Yusuf. (2007). Biodiesel From Microalgae. *Biotechnology advances*, 25, 294-306

Farag, Ihab. (2012). Tubular Photobioreactor for Microalgae Biodiesel Production. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 4, 703-709.

García, M. C. (2008). Producción de biodiesel mediante fermentación en estado sólido de compuestos lignocelulósicos derivados del bagazo de remolacha. *Ciencia Y Tecnología Agropecuaria*, 9(1), 66-72.

García-Gozalbes, C.C., Arbib, Z. y Perales-Vargas-Machuca, J.A. (2015). Cinéticas de crecimiento y consumo de

- nutrientes de microalgas en aguas residuales urbanas con diferentes niveles de tratamiento. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1), 49-68.
- Gendy, T.S. y El-Temtamy, S.A. (2013). Commercialization potential aspects of microalgae for biofuel production: an overview. *Egypt. J. Pet*, 22, 43-51.
- Guarenas, F.A. y Chirinos, A. (2007). Producción de Biodiesel de aceite de coco artesanal de una población del Estado Falcón. *Prospectiva*, 5(2), 16-23.
- Hernandez, A.G., Vázquez-Duhalt, R., Sanchez, M. P., Serrano, L., Martínez, A. (2009). Biodiesel a partir de microalgas. *Biotechnología*, 13(3), 38-61.
- Kadir, W., Lam, M., Uemura, Y., Lim, J. y Lee, K. (2018). Harvesting and pre-treatment of microalgae cultivated in wastewater for biodiesel production: A review. *Energy Conversion and Management.*, 171, 1416-1429.
- Lam, M.K., y Lee, K.T. (2012). Microalgae biofuels: A critical review of issues, problems and the way forward. *Biotechnol. Adv.*, 30(3), 673-690.
- Lam, M.K., y Lee, K.T. (2012). Potential of using organic fertilizer to cultivate *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. *Appl. Energy.*, 94, 303-308.
- Meng, X., Yang, J., Xu, X., Zhang, L., Nie, Q. y Xian, M. (2009). Biodiesel production from oleaginous microorganisms. *Renewable Energy*, 34, 1-5.
- Murillo, J.E. (2004). Producción de biodiesel a partir de aceite de palma. *Palmas*, 25(4), 31-42.
- Murphy, C.F. y Allen, D.T. (2011). Energy-water nexus for mass cultivation of algae. *Environ. Sci. Technol.*, 45, 5861-5868.
- Ortiz Tapia, María del Consuelo, García Alamilla, Pedro, Lagunes Gálvez, Laura Mercedes, Arregoitia Quezada, María Isabel, García Alamilla, Ricardo, & León Chávez, María Alejandra. (2016). Obtención de biodiesel a partir de aceite crudo de palma (*Elaeis guineensis* Jacq.). Aplicación del método de ruta ascendente. *Acta universitaria*, 26(5), 3-10.
- Pittman, J.K., Dean, A.P. y Osundeko, O. (2011). The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. *Bioresour. Technol.*, 102(1), 17-25.
- Rawat, I., Kumar, R.R., Mutanda, T. y Bux, F. (2011). Dual role of microalgae: phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Appl Energy*, 88, 3411-24.
- Rhodes, Christopher. (2009). Oil from algae; salvation from peak oil?. *Science progress*, 92. 39-90.
- Rodolfi, L., G. Chini Z., N. Bassi, G. Padovani, N. Biondi, G. Bonini, y M. R. Tredici. (2009). Microalgae for oil: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor. *Biotechnol. Bioeng.*, 102, 100-112.
- Sacristán-de Alva, M., Luna-Pabello, V.M., Cadena-Martínez, E. y Alva-Martínez, A.F. (2014). Producción de biodiésel a partir de microalgas y una cianobacteria cultivada en diferentes calidades de agua. *Agrociencia*, 48, 271-284.

Tejada, C.N., Tejada, C.P., Villabona, A. y Monroy, L. (2009). Alternativas para la obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales - coco, almendras, ajonjolí y marañón (*Cocus nucifera*, *Prunus amigdalus*, *sesamum indicum* L y *Anacardium occidentale*). En Kaloustian, J.A. (Presidencia). IV Simposio de Química Aplicada – SIQUIA. Congreso llevado a cabo en Armenia, Colombia.

Trainor, F. R. y G. M. Wilmes. (1994). Using commercial fertilizers as algal media. *The Am. Biol. Teacher*, 56, 361-363.

Zhou, W., Chen, P., Min, M., Ma, X., Wang, J., Griffith, R., Hussain, F., Peng, P., Xie, Q. y Li, Y. (2014) Environment-enhancing algal biofuel production using wastewaters. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 36, 256-269