

Ajuste experimental y evaluación económica de la extracción HBE de aceite de microalgas para biocombustibles y bioproductos

Experimental adjustment and economic evaluation of HBE microalgae oil extraction for biofuels and bioproducts

Ángel Darío González-Delgado¹, Yeimmy Yolima Peralta-Ruiz², Viatcheslav Kafarov³

¹ Doctor en Ingeniería Química. Grupo de investigación en Ingeniería Aplicada para el Desarrollo Sostenible-GINDESA. Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Química. Universidad de Cartagena. Cartagena, Colombia.

² Magister en Ingeniería Química. Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería. Universidad Nacional Abierta y a Distancia CEAD Cartagena. Cartagena, Colombia.

³ Doctor Ing. Habil. Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía-CIDES. Escuela de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

E-mail: agonzalezd1@unicartagena.edu.co

Recibido 01/02/2016,
Aceptado 15/05/2016

Cite this article as A. González, Y. Peralta, V. Kafarov, "Experimental adjustment and economic evaluation of HBE microalgae oil extraction for biofuels and bioproducts", *Prospect*, Vol 14, N° 2, 45-52, 2016

RESUMEN

El aumento constante en los precios de los combustibles fósiles y el impacto ambiental que estos producen ha despertado el interés en nuevas fuentes de energía renovables como el biodiésel a partir de microalgas. Este cultivo energético puede potencialmente competir con los combustibles fósiles, debido al alto contenido lipídico de algunas cepas. El presente trabajo muestra la influencia de las variables temperatura, tiempo y relación biomasa/solvente sobre el proceso de extracción de lípidos de microalgas HBE a escala laboratorio y presenta un análisis preliminar de costos de una planta de producción a escala piloto. Se encontró que las mejores condiciones de operación para la obtención de aceite son un tiempo de extracción de 8 horas, una relación biomasa/solvente de 1/40 y una temperatura de 40°C, un análisis estadístico de los resultados muestra que la única variable estadísticamente significativa es la relación biomasa/solvente. Por su parte, el análisis preliminar de costos a escala piloto muestra que el precio del aceite para que el proceso sea rentable debe ser aproximadamente 30,5 USD/kg; un valor alto en comparación con los aceites usados convencionalmente en el proceso de producción de biodiésel.

Palabras clave: Amphiprora sp.; Lípidos; Análisis de costos; Biocombustibles.

ABSTRACT

The continual increase of fossil fuel prices, and the environmental impact caused by them, has generated the requirement for new renewable environmental-friendly sources. No wonder why, nowadays microalgae biofuels has aroused a particular interest, due to the small farming areas they need, they can grow in several kinds of water and they ensure a large biodiesel production because their high lipid content. This work shows the influence of temperature, time and relationship between biomass/solvent variables in the lipid microalgae extraction at laboratory scale and a preliminary cost analysis for a pilot-scale production plant is exposed. The best work conditions were found and there are an eight-hour extraction spam, a relevance biomass/solvent of 1/40 and 40°C. However, the statistical analysis showed that there is just one significant influence variable on the process and it is the relevance biomass/solvent. In the preliminary cost analysis, it was found that the oil price to become the process a rental one should approximately be 30.5 USD/kg, this is a higher value compared with conventionally biodiesel production used oils.

Key words: Amphiprora sp.; Lipids; Profitability analysis; Biofuels.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento constante en los precios de los combustibles a nivel mundial y el impacto ambiental producido por los mismos, debido a la emisión de dióxido de carbono (CO_2), crean la necesidad de buscar nuevas alternativas de satisfacción de nuestras necesidades energéticas mucho más amigables con el ambiente. En la actualidad se ha incrementado el interés en los biocombustibles que, por sus características, se convierten en la mejor opción de remplazo para los combustibles fósiles para el transporte [1]. Es aquí donde las microalgas cumplen un papel esencial como agente que proporciona productos ricos en energía. El interés que han despertado estos microorganismos se debe a su aporte ambiental, ya que, además de permitir el uso de tierra no arable para su cultivo en la obtención de biomasa, su crecimiento se puede dar en diferentes tipos de agua como las aguas de desechos industriales, aguas residuales domésticas, entre otras [2]. Por otra parte, si los sistemas de cultivo se acoplan a chimeneas o a grandes sistemas de emisión de CO_2 , se pueden reducir los gases de efecto invernadero, debido al uso de este gas como nutriente para su crecimiento [3]. Las microalgas pueden garantizar una gran producción de biocombustible como el biodiesel debido a su alto contenido de lípidos, que supera en algunas cepas, bajo condiciones adecuadas de cultivo, a las fuentes usadas actualmente [4].

El proceso para producir biodiésel a partir de microalgas consta de las etapas de cultivo, el cual puede ser en sistemas abiertos o cerrados, en una o varias etapas [5], cosecha de la biomasa cultivada [6]; dependiendo del método de extracción a utilizar, puede ser necesario un secado parcial o total de la biomasa [7], extracción de los lípidos la cual puede ser húmeda o seca [8], y transesterificación o hidrotratamiento [9], donde la extracción de los lípidos es una etapa crucial para el proceso de producción [10]; otra alternativa recientemente estudiada es la utilización de tratamientos térmicos como la pirólisis o la licuefacción hidrotérmica para obtener un bio-aceite con características similares a las del petróleo crudo y con potencial para ser transformado en combustibles líquidos.

El proceso de obtención de los lípidos de las microalgas consta de dos partes: La disrupción celular y la extracción de los lípidos. La disrupción celular es un procedimiento que busca destruir la pared de las microalgas y así facilitar la recuperación de los productos intracelulares y obtener una gran cantidad de lípidos [11]. Dependiendo de la composición de la pared celular y el producto a obtener, se usa un método en particular, estos métodos se pueden basar en acción mecánica y no mecánica. En este trabajo se realizó

disrupción celular ácida empleando una solución de HCl, a nivel de laboratorio la extracción de lípidos de microalgas se ha realizado empleando solventes químicos, choque osmótico, extracción con fluidos supercríticos, extracción asistida por microondas, extracción mediante ultrasonido, extracción enzimática, destrucción mecánica, entre otros [12].

En la extracción con solvente químico se usa un solvente para extraer selectivamente los compuestos de interés que se encuentran en la muestra. Dentro de estos métodos se encuentra la extracción Batch con solvente en el cual se agrega solvente a la biomasa pretratada y se somete a agitación durante un periodo de tiempo, posteriormente la mezcla se separa utilizando filtración al vacío, este proceso tiene la ventaja de ser un proceso sencillo que puede ser llevado a cabo en diferentes escalas. A nivel de laboratorio se han probado diferentes solventes como hexano y ciclohexano, en este trabajo se eligió hexano como agente extractor debido a que ha presentado mejores eficiencias, tiene un menor costo y es mucho menos tóxico comparado con el ciclohexano [13].

Otro factor tenido en cuenta es el económico ya que es de vital importancia al momento de establecer el diseño de un proceso de producción, sin importar cuan beneficioso sea el proyecto, ambientalmente hablando, o cuan necesario sea el producto para la sociedad, si el análisis económico muestra que el proyecto no es viable, este no se realiza [14].

El objetivo del presente trabajo es analizar el efecto de las variables temperatura, tiempo y relación biomasa/solvente en el proceso de extracción Batch con solvente de lípidos de la microalga *Amphiprora* sp., con el fin de encontrar unas condiciones operativas que permitan incrementar la eficiencia de extracción de lípidos y posteriormente, de acuerdo con los resultados obtenidos, hacer una evaluación preliminar de costos de este proceso a escala piloto.

2. METODOLOGÍA

2.1 Materia prima

La microalga *Amphiprora* sp., fue suministrada por la Corporación Instituto de Morrosquillo (Punta Bolívar, Colombia) y caracterizada por el Instituto Colombiano de Petróleo, ICP-Ecopetrol. Los resultados de la caracterización se muestran en la tabla 1. Los porcentajes se encuentran normalizados con el fin de anular la interferencia de las cenizas (floculante) en la composición total de la microalga, la cual fue cultivada en medio f/2, cosechada por floculación, secada al sol y refrigerada hasta su utilización.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de la microalga *Amphiprora* sp.
Table 1. Physicochemical characterization of microalgae *Amphiprora* sp.

Componente	Porcentaje [%]
Lípidos	33
Material celulósico	20
Proteínas	25
Cenizas	10
Carbohidratos	12

2.2 Solvente

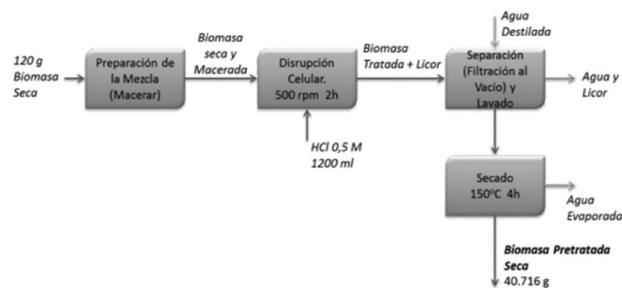
El agente extractor usado durante la experimentación fue el hexano debido a que presenta mejores resultados sobre la eficiencia de la extracción, su costo es menor y es menos tóxico al compararlo con otros agentes de extracción [13].

2.3 Procedimiento experimental

El desarrollo metodológico se dividió en tres etapas, la primera fue la elaboración de un diseño experimental 23 más un punto central, empleando el software STATISTICA 7.0, donde se busca analizar la influencia de las variables temperatura, tiempo y relación biomasa/solvente para la obtención de aceite de microalgas, la segunda etapa se subdivide en dos pasos, el pretratamiento que se realizó haciendo disrupción celular empleando una solución de ácido clorhídrico 0.5 M, y la extracción de los lípidos donde se evaluó el efecto de las variables anteriormente mencionadas con un análisis estadístico. Luego, basados en estos resultados se procede a la tercera y última etapa donde se hizo un análisis económico de los costos, punto de equilibrio y factibilidad de una planta piloto dedicada a la producción de aceite de microalgas. La disrupción celular se llevó a cabo de forma química, usando ácido clorhídrico siguiendo el procedimiento mostrado en la figura 1.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de disrupción celular.

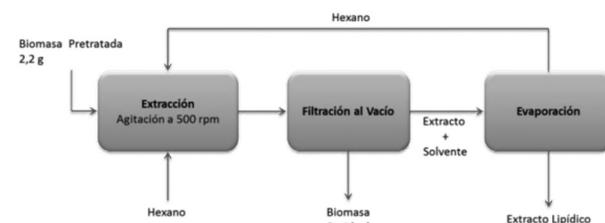
Figure 1. Flow diagram of cell disruption process.



La extracción de lípidos se realizó usando como agente extractor al hexano, tal como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Diagrama de flujo del método Extracción Batch con solvente.

Figure 2. Flow diagram of Batch extraction method with solvent.



Para evaluar el efecto de las variables anteriormente mencionadas se efectuó un diseño experimental compuesto con los niveles mostrados en la tabla 2, estos niveles fueron elegidos tomando como referencia valores de relación biomasa/solvente cercanos a los empleados en trabajos anteriores [13,15] tiempos inferiores y variando además la temperatura, teniendo cuidado de no alcanzar la temperatura normal de ebullición del solvente.

Tabla 2. Niveles y valores de las variables estudiadas.

Table 2. Levels and values of variables studied.

Factores	Niveles		
	-1	0	1
Temperatura, °C	30	40	50
Relación biomasa/solvente, g/mL	1/20	1/30	1/40
Tiempo, h	12	18	24

El extracto se cuantificó empleando un análisis gravimétrico a cada prueba, así se determinaron los rendimientos y eficiencias respectivos, siguiendo las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$m_o = \frac{m_p}{\%Rec_p} \times 100 \quad (1)$$

Donde m_o es la biomasa inicial sin pretratar, m_p es la biomasa pretratada y $\% Rec_p$ se refiere al porcentaje de recuperación luego del pretratamiento.

$$\% Rendimiento = \frac{m_e}{m_o} \times 100 \quad (2)$$

La ecuación indica el rendimiento de aceite que fue obtenido para cada prueba con relación a la biomasa usada, siendo m_e la masa de extracto lipídico obtenido luego de la aplicación del método.

$$\% \text{Eficiencia} = \frac{\% \text{Rendimiento}}{\% \text{Lípidos totales}} \quad (3)$$

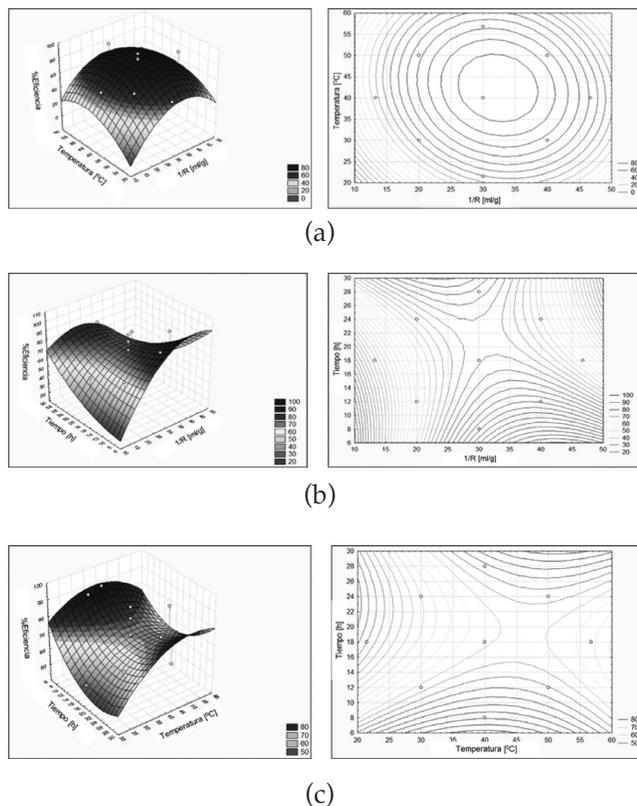
El termino % Lípidos totales corresponde al valor de lípidos de la especie en estudio reportado en el informe de bioprospección de las microalgas colombianas para la producción de biodiesel informe UIS-ICP-Morrosquillo [18].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Usando los resultados de la experimentación y el software STATISTICA 7.0 se realizaron el diagrama de Pareto y las superficies de respuesta donde se observa el efecto que tienen las variables temperatura, tiempo y relación biomasa/solvente sobre el proceso de extracción Batch con solvente de lípidos usando como solvente hexano.

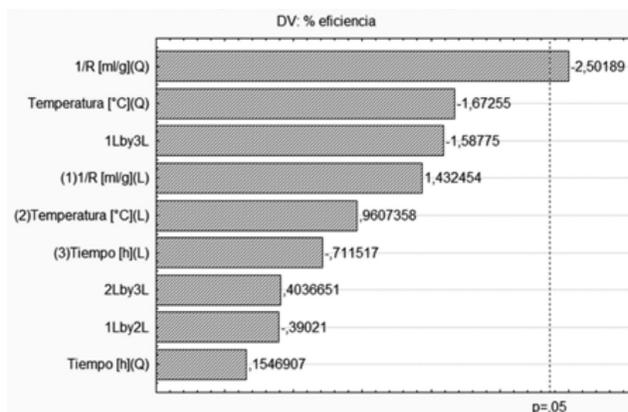
Figura 3. Superficies de respuesta: Variables independientes a) Temperatura y 1/R; b) Tiempo y 1/R; c) Tiempo y Temperatura.

Figure 3. Surfaces response: Independent variables a) Temperature and 1/R; b) Time and 1 / R; c) Time and Temperature.



Observando la figura 3 en la superficie de respuesta a tiempo constante se ve que la eficiencia de la extracción aumenta con la relación biomasa/solvente, llegando a un máximo que se encuentra aproximadamente en 33 y luego comienza a disminuir, un efecto similar se observa en la temperatura para un máximo cercano a los 40 °C. Para la superficie de respuesta a temperatura constante se puede observar que esta toma una forma de silla, viendo nuevamente el máximo para la relación biomasa/solvente; con respecto al tiempo se puede ver que aparentemente a tiempos cortos la eficiencia aumenta, esta tendencia se hace más marcada cuando se trabaja a temperaturas o relación biomasa/solvente bajas. En la superficie de respuesta c, se observa que el máximo para la temperatura es el mismo mostrado en las gráficas anteriores.

Figura 4. Diagrama de Pareto.
Figure 4. Pareto Diagram.



En la figura 4 el diagrama de Pareto muestra que la única variable que influye en el proceso de extracción con una significancia del 95 % fue la relación biomasa/solvente, el tiempo y la temperatura no muestran significancia dentro del rango de valores estudiados, por esta razón y por lo observado en las superficies de respuesta se decide trabajar a temperatura ambiente, una relación biomasa/solvente de 1/30 y un tiempo de extracción de 8 horas.

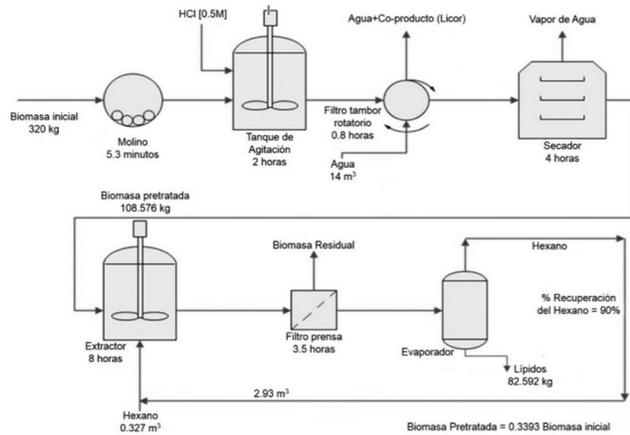
3.1 Estudio preliminar de costos para el diseño de una planta de extracción de aceite de microalgas a escala piloto

La planta piloto fue diseñada para trabajar 300 toneladas/año como un proceso Batch, para este tipo de proceso se considera que la planta opera 7500 h/año es decir en el año se trabajarán 937 ciclos de 8 horas donde en cada uno se procesará 320 kg de materia prima produciendo aproximadamente 82,592 kg de aceite.

Para la extracción de aceites de microalga, se parte desde el pretratamiento de la biomasa seca hasta la obtención del producto el esquema de este proceso se muestra en la figura 5. En el pretratamiento de la biomasa se emplea un molino de bolas de 1 mm de diámetro con una capacidad de carga de 1 kg/s que se encarga de homogenizar la

materia prima la cual pasa a un tanque de agitación de acero inoxidable de 4,4 m³ de donde se mezcla con HCl al 0,5 M durante un período de tiempo de 2 h. Luego se pasa a un filtro de tambor donde se hace un lavado adicional, empleando un volumen de agua igual a cuatro veces el volumen de la solución a filtrar, con el fin de retirar por completo el licor [15]. Finalmente se pasa a un secador durante 4h para retirar el exceso de humedad, una vez se procede al proceso de extracción en un tanque de acero inoxidable de 4,2 m³ a temperatura ambiente (para efectos de seguridad y evitar derrames, los tanques de agitación tienen un sobre diseño de aproximadamente un 20 %); para recuperar el hexano se somete la mezcla (Lípidos + Hexano) a una evaporación para luego condensar el hexano y recuperar gran parte de este (90 %).

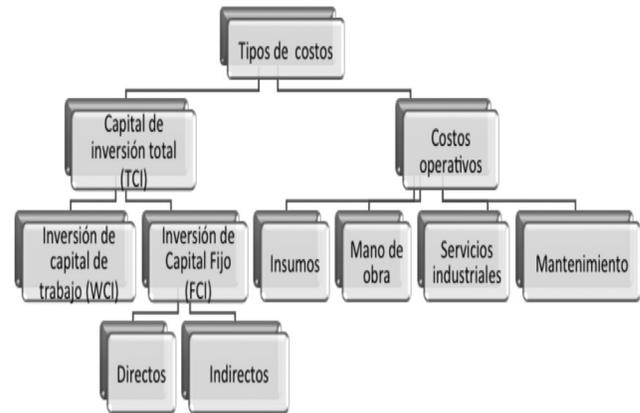
Figura 5. Diagrama de proceso de planta piloto.
Figure 5. Process diagram of pilot plant.



Para realizar una estimación de los costos se tuvo en cuenta que estos se dividen en dos grupos principales que son: Capital de inversión y Costos operacionales. El capital de inversión total (TCI) o costos de capital es el dinero necesario para la compra e instalación de la planta. Los costos operacionales se refieren a los gastos necesarios para poner en funcionamiento la planta.

Figura 6. Clasificación de costos de procesos (modificado de [14])

Figure 6. Classification of costs of processes (modified from [14])



Para hacer un estimativo de los costos capital de inversión (TCI), que incluyen los equipos y sus características, se recurrió a la información técnica suministrada por diferentes proveedores.

Tabla 3. Precios y potencias nominales de los equipos analizados.
Table 3. Prices and rated power of equipment analysed.

EQUIPO	Valor 2013 (MUSD)	Potencia (kW)	Tiempo de operación (h)	Energía equipo (kW×h)
Tanque 1	29,639	2,2	8	17,6
Tanque 2	28,892	2,2	2	4,4
Molino	68,623	57,69	0,09	5,1921
Filtro 1	4,480	0,25	0,8	0,2
Filtro 2	24,102	2,2	3,5	7,7
Evaporador	412,236	-	-	111,6
Secador	37,794	1,32	4	5,28

La inversión de costos fijos FCI Es el dinero requerido para el pago de los equipos y unidades auxiliares, preparación de los sistemas de control e instalaciones, existen diferentes métodos para estimarlos y su complejidad varía dependiendo del grado de precisión que se desee, en este trabajo se empleó el método de Lang [16] el cual está basado en el valor de los equipos más su envío obteniendo un total de 3,395 MMUSD.

La Inversión de Capital de Trabajo (WCI) es el dinero necesario para pagar los gastos de funcionamiento de la planta hasta el momento de la venta del producto. Estos costos son recuperables al final del proyecto y en este caso se aproximó al 15% de la inversión de capital fijo, que junto con la inversión de capital fijo se conoce que el TCI, es equivalente a 3.905 MMUSD.

Para estimar los costos operacionales anuales (AOC), que incluye los insumos, se consultó a diferentes proveedores en Colombia, los resultados se muestran en la tabla 4. Debido a que en la actualidad el costo de producción de biomasa a partir de microalgas es bastante alto por su utilización en el sector energético, para el presente trabajo se hace una consideración especial fijando el costo de esta en 0,5 USD/kg.

Tabla 4. Costos de los insumos.

Table 4. Input costs.

Insumo	Unidad de medida	Valor (USD)
Hexano industrial	Litro	3,268
HCl (37 % p/p)	Litro	18,2
Biomasa	Kilogramo	0,5
Agua	Litro	0,0015

Para este proyecto los servicios industriales equivalen a los requerimientos energéticos del piloto, los cuales se calcularon usando la potencia nominal del equipo por el tiempo de uso del mismo, se empleó un valor promedio de energía de 0,1 USD/kW×h.

Para saber a cuanto equivale la mano de obra se emplearon datos normalizados que relacionan el número de empleados necesarios por equipo en un turno de 8 horas [17] y un salario anual promedio por empleado de 7,2 MUSD; el mantenimiento se aproximó al 5% del FCI. Los costos operacionales anuales (AOC) corresponden a la suma de los costos por materias primas, servicios industriales, mano de obra y mantenimiento encontrando que equivale a 1,654 MMUSD/año.

Debido a que el capital de inversión total se realiza al inicio del proyecto pero los equipos y la instrumentación necesaria para el funcionamiento de la planta se deterioran y pierden valor al cumplir el tiempo de vida útil, se emplea el concepto de depreciación, existen diferentes métodos para estimar la depreciación, en

este trabajo se empleó el método de la línea recta ya que es el método más sencillo y comúnmente usado con resultados confiables. El concepto de depreciación se emplea para encontrar un costo fijo anualizado AFC, definido en la ecuación 4:

$$AFC = \frac{FCI_0 - FCI_s}{N} \quad (4)$$

Donde FCI₀ es el valor inicial depreciable del FCI, FCI_s es el valor de salvamento del FCI al final del tiempo de servicio, y N el tiempo de servicio en años. Por consiguiente, el costo de producción o costo total anualizado (TAC) está dado por:

$$TAC = AFC + AOC \quad (5)$$

Donde AOC es el costo anual operativo del proceso. Para estimar el costo fijo anualizado estimó una vida útil de 10 años y un valor de salvamento igual a cero, que sumados a los costos operacionales anuales se obtiene un costo total anualizado de 1,990 MMUSD.

Se realizó un análisis del punto de equilibrio con el fin de determinar las condiciones bajo las cuales el total de costos de producción es igual a los ingresos generados por unidad de producción, es decir, es el punto en el cual no se gana ni se pierde nada como en este caso los ingresos del proceso corresponden únicamente a los ingresos por venta del producto, estos están representados por:

$$ingresos = C^p \times ventas \text{ anuales} \quad (6)$$

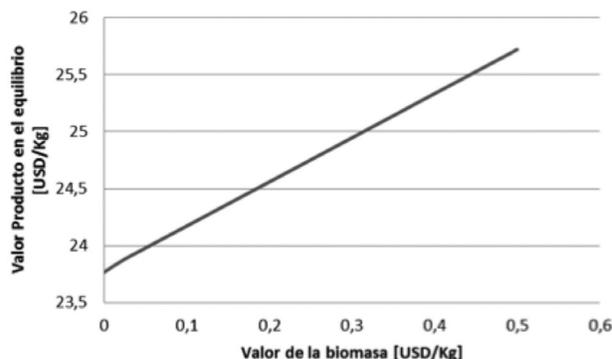
Donde C^p es el costo del producto, entonces en el equilibrio ocurre que:

$$C^p \times ventas \text{ anuales} = TAC \quad (7)$$

Empleando este análisis se encontró el valor mínimo de venta del producto variando el valor de la biomasa seca como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Variación del punto de equilibrio con el valor de la biomasa.

Figure 7. Changes of the equilibrium point with the value of biomass.



Como se puede observar aun si la biomasa no tuviera valor, el valor mínimo del producto equivale a 23,77 USD/kg, y este valor aumenta linealmente, aun así este cambio es poco comparado con la variación de la materia prima, esto se debe principalmente a la gran influencia de los costos fijos del proceso, cuando la biomasa tiene un valor de 0,5 USD/kg el precio de equilibrio del producto es igual a 25,7 USD/kg.

En este trabajo se emplearon como criterios de factibilidad el retorno de inversión y el período de devolución que se caracterizan por que no tienen en cuenta el valor del dinero en el tiempo. El Retorno de inversión ROI tiene unidades de porcentaje por año y es análogo a las tasas de intereses de los bancos y al retorno de la inversión de los mercados financieros; naturalmente, entre más alto sea este valor más deseable es el proyecto, se dice que un proyecto es factible cuando el ROI es mayor al 10%, aunque este porcentaje puede variar dependiendo del riesgo del mismo, definido como:

$$ROI = \frac{\text{Beneficio anual Neto}}{TCI} \times 100 \quad (8)$$

Donde:

$$\text{Beneficio anual Neto} = (\text{Ingresos Totales} - \text{TAC}) (1 - \text{Interes}) + \text{AFC} \quad (9)$$

El período de devolución PBP es una indicación de qué tan rápido se puede recuperar la FCI devaluable, por lo tanto, entre más corto el PBP más atractivo el proyecto, se dice que un proyecto es factible si el PBP es inferior a 5 años [14].

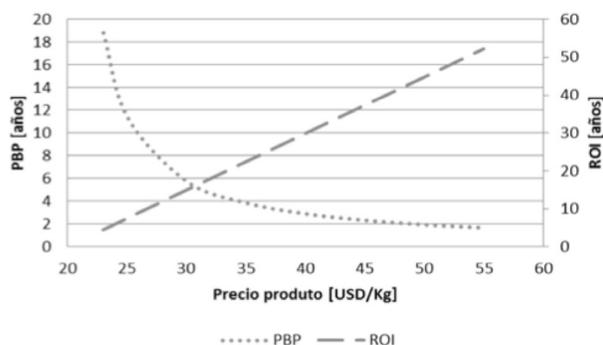
Se define como:

$$PBP = \frac{\text{FCI devaluable}}{\text{Beneficio anual neto}} \quad (10)$$

Para hacer este análisis se varió el valor del precio del producto, teniendo en cuenta que la tasa de impuestos es del 25% obteniendo así diferentes valores para ROI y para PBP, con estos datos se hizo una gráfica para analizar la tendencia y poder establecer a partir de qué valor del producto el proyecto es económicamente viable.

Figura 8. Variación del ROI y PBP con respecto al precio del producto.

Figure 8. Changes of ROI and PBP respect to the product price.



4. CONCLUSIONES

Se estudió el efecto de las variables tiempo, relación biomasa/solvente y temperatura, sobre el incremento de la eficiencia de extracción de aceite crudo de la microalga *Amphiprora* sp., obteniendo el valor más alto de eficiencia al utilizar un tiempo de ocho horas, relación biomasa/solvente de 1/30 y temperatura de 40°C, por su parte, el análisis estadístico de los resultados mostró que la única variable estadísticamente significativa es la relación biomasa solvente por lo que se decide trabajar a temperatura ambiente.

El análisis preliminar de costos para una planta a escala piloto de producción de aceite de microalgas, empleando el retorno de la inversión (ROI) y el periodo de devolución (PBP), mostró que el valor mínimo de venta del aceite es de 30.5 USD/kg un valor muy alto si se compara con los aceites usados convencionalmente en la producción de biodiesel. Variaciones en el precio de la biomasa usada como materia prima no ocasionan grandes cambios en el precio del producto debido a la fuerte influencia de los costos fijos en el proceso de producción.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural por su apoyo con el proyecto 2008D32006-6710 "Bioprospección de las microalgas colombianas para la producción de biodiesel" al Instituto Colombiano de Petróleos ICP-Ecopetrol, a la Universidad de Cartagena, y al Instituto de Morrosquillo, por proveer la biomasa.

REFERENCIAS

- [1] J. Bergthorson, M. Thomson, "A review of the combustion and emissions properties of advanced transportation biofuels and their impact on existing and future engines", *Renewable and sustainable energy reviews*, 42, 1393-1417, 2015.
- [2] C. González-Fernández, A. Mahdy, I. Ballesteros, M. Ballesteros, "Impact of temperature and photoperiod on anaerobic biodegradability of microalgae grown in urban wastewater", *International Biodeterioration & Biodegradation*, 106, 16-23, 2016.
- [3] C. Monari, S. Righi, S. Irving, "Greenhouse gas emissions and energy balance of biodiesel production from microalgae cultivated in photobioreactors in Denmark: a life-cycle modelling", *Journal of Cleaner Production*. In press, 2015.
- [4] D.-Y. Kim, D. Vijayan, R. Praveenkumar, J.-I. Han, K. Lee, J.-K. Park, Y.-K. Oh, "Cell-wall disruption and lipid/astaxanthin extraction from microalgae: *Chlorella* and *Haematococcus*", *Bioresource Technology*, 199, 300-310, 2015.

- [5] C. A. Santos, B. Nobre, T. Lopes da Silva, H.M. Pinheiro, A. Reis, "Dual-mode cultivation of *Chlorella protothecoides* applying inter-reactors gas transfer improves microalgae biodiesel production", *Journal of Biotechnology*, 184, 74-83, 2014.
- [6] A.L. Ahmad, N.H.M. Yasin, C.J.C. Derek, J.K. Lim, "Comparison of harvesting methods for microalgae *Chlorella* sp. and its potential use as a biodiesel feedstock", *Environmental Technology*, 35, 2244-2253, 2014.
- [7] A. Guldhe, B. Singh, I. Rawat, K. Ramluckan, F. Bux, "Efficacy of drying and cell disruption techniques on lipid recovery from microalgae for biodiesel production", *Fuel*, 128, 46-52, 2014.
- [8] R. Halim, T.W.T. Rupasinghe, D.L. Tull, P.A. Webley, "Modelling the kinetics of lipid extraction from wet microalgal concentrate: A novel perspective on a classical process", *Chemical Engineering Journal*, 242, 234-253, 2014.
- [9] J.J. Milledge, S. Heaven, "Methods of energy extraction from microalgal biomass: A review", *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. In press, 2014.
- [10] A.E.-F. Abomohra, W. Jin, M. El-Sheekh, "Enhancement of lipid extraction for improved biodiesel recovery from the biodiesel promising microalga *Scenedesmus obliquus*", *Energy Conversion and Management*, 108, 23-29, 2016.
- [11] A. González, V. Kafarov, A. Guzmán, "Desarrollo de métodos de extracción de aceite en la cadena de producción de biodiesel a partir de microalgas", *Prospectiva*, 7, 53-60, 2009.
- [12] J.Y. Lee, C. Yoo, S.Y. Jun, C.Y. Ahn, H.M. Oh, "Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae", *Bioresource Technology*, 101, S75-S77, 2010.
- [13] A. González, V. Kafarov, "Microalgae based biorefinery: evaluation of oil extraction methods in terms of efficiency, costs, toxicity and energy in lab-scale", *Revista ION*, 26, 29-37, 2013.
- [14] El Halwagi, "Overview of Process Economics". En: *Sustainable design through process integration: Fundamentals and applications to industrial pollution prevention, resource conservation, and profitability enhancement*. USA: Elsevier: 2012. p. 15-61.
- [15] J. García, J. Miranda, (2011) *Comparación de métodos de extracción de aceite de microalgas a escala laboratorio para la producción de biodiesel*. Trabajo de grado Ingeniero Químico, Universidad Industrial de Santander.
- [16] H. Lang, "Simplified approach to preliminary cost estimates", *Chemical Engineering*, 112-113, 1948.
- [17] J. Esquivel (2007) *Evaluación económica preliminar de plantas químicas usando Aspen Icarus Process Evaluator*. Tesis profesional, Universidad de las Américas Puebla.
- [18] Informe UIS-ICP-Morrosquillo (2011), *Bioprospección de las microalgas colombianas para la producción de biodiesel*. Informe final, Bucaramanga.