

**EFFECTO DE LAS VARIABLES TIEMPO, TEMPERATURA Y RELACIÓN
BIOMASA/SOLVENTE SOBRE LA EFICIENCIA DE EXTRACCIÓN DE ACEITE
DE LA MICROALGA *Amphiprora* sp. Y EVALUACIÓN PRELIMINAR DE
COSTOS A ESCALA PILOTO.**

**MAHER JERANIA GÓNGORA TORRES
MARÍA CRISTINA MURILLO DURÁN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2013

**EFFECTO DE LAS VARIABLES TIEMPO, TEMPERATURA Y RELACIÓN
BIOMASA/SOLVENTE SOBRE LA EFICIENCIA DE EXTRACCIÓN DE ACEITE
DE LA MICROALGA *Amphiprora* s.p. Y EVALUACIÓN PRELIMINAR DE
COSTOS A ESCALA PILOTO.**

**MAHER JERANIA GÓNGORA TORRES
MARÍA CRISTINA MURILLO DURÁN**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Químico

Director:

VIATCHESLAV KAFAROV

Dr. Ingeniero Químico

Codirector:

ÁNGEL DARIO GONZÁLEZ

Ingeniero Químico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

Dedico este triunfo primeramente a Dios quien no ha soltado ni un segundo mi mano, me ha ayudado hasta aquí, ha abierto las puertas, está siempre a mi lado guiándome y guardándome y que se empeña en rodearme de personas que marcan mi vida y me ayudan a seguir caminando.

A mis padres Hispano Góngora y Dina Torres por enseñarme durante 11 años a ser una luchadora incansable con una sonrisa imborrable.

A mi Tía-Mamá Laudith Torres y a mi hermano Sear Góngora por ser ese apoyo constante en mi vida, por darme todo su amor y estar conmigo en las buenas y en las malas.

A Jesús Tinoco Romero, quien tomó el papel de hermano mayor si serlo, por ser esa columna que me soporto durante todo este tiempo, por cuidar de mí, por enseñarme a ser una líder y por hacer de mis días una fiesta.

A Eddy, Gera, Hailyn y Jacque mis primos amados por cada palabra que me dio fuerza para no tirar la toalla a mitad de camino.

A Zula, Vale, Jullis, Leidy y Angi mis hermanitas amadas que de una forma inigualable entraron a mi vida y tomaron un ladito de mi corazón, ellas quienes han puesto piedras preciosas el cuadro de mi vida y tal vez sin darse cuenta me han ayudado a crecer un poco más.

A María C. Murillo, quien es como mi hermanita, por cada momento juntas, confidencias, apoyo incondicional y por escogerme para trabajar juntas en este proyecto.

A mis hermanos de CFA, quienes se convirtieron en mi familia putativa y son mis compañeros de batallas, por sus enseñanzas de vida, consejos, cuidados y compañía.

A mi grupo de estudio Coty K., Diego C., Adriana A., Daniela A., Camilo C., Rubén C., Daniela P., Karolth E., Richard S., Giovanni A., Linney M., Ricardo C, Uriel C. y Edna M. por esos momentos de estudio arduo pero divertido y genuina amistad.

A todos mis familiares y amigos que han hecho un aporte inigualable a mi vida y me premian con su compañía.

Maher Jerania Góngora Torres

DEDICATORIA

A mi mamá **Raquel Durán** que con su apoyo incondicional y ejemplo me guío y me ha convertido en lo que soy y a mi papá **Jorge Murillo** que siempre creyó en mí.

A **Claudia Cecilia Rueda**, que ha demostrado ser una gran amiga durante prácticamente toda mi vida.

A **German Rueda**, porque con sus locuras me ha enseñado otra manera de ver el mundo.

A mis compañeros de estudio **Jorge Cabrera**, **Karolth Espinosa**, **Yeimy Martínez**, que con sus aportes han contribuido a mi formación.

A **Oscar Ojeda**, que a pesar de las eternas discusiones, estas siempre fueron constructivas y ayudaron en mi proceso de aprendizaje.

A todos mis otros amigos y familiares que me han dado tantos momentos valiosos como es posible.

María Cristina Murillo Durán

AGRADECIMIENTOS

A COLCIENCIAS por el apoyo brindado mediante el proyecto-Creación y fortalecimiento de una red de transferencia de conocimiento y tecnología entre estados unidos y Colombia mediante el desarrollo de procesos de biorefinería para la obtención de biocombustibles y productos de alto valor agregado a partir de biomasa de microalgas.

Al Instituto Colombiano del Petróleo ICP-ECOPETROL por los aportes en conocimiento y experiencia de sus profesionales.

A la Corporación Instituto Morrosquillo por suministrar la materia prima con la cual se desarrolló el proyecto.

Al Dr. Sc. Viatcheslav Kafarov por su constante colaboración durante la realización del proyecto de investigación.

Al Ing. Ángel Darío González por su dedicación y apoyo incondicional en el desarrollo del presente trabajo investigativo.

A la Universidad Industrial de Santander, los profesores de Ingeniería Química, y todas aquellas personas que hicieron parte nuestra formación profesional.

A Eduardo Carreño y Wilson Carreño técnicos del laboratorio de procesos de Ingeniería Química, por su constante colaboración, ayuda y enseñanzas durante el desarrollo de las pruebas experimentales.

RESUMEN

TÍTULO: EFECTO DE LAS VARIABLES TIEMPO, TEMPERATURA Y RELACIÓN BIOMASA/SOLVENTE SOBRE LA EFICIENCIA DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE LA MICROALGA *Amphiprora* sp. Y EVALUACIÓN PRELIMINAR DE COSTOS A ESCALA PILOTO.*

AUTORES: MARÍA CRISTINA MURILLO DURÁN, MAHER JERANIA GONGORA TORRES**

PALABRAS CLAVE: Microalgas, extracción, lípidos, análisis económico.

El aumento constante en los precios de los combustibles fósiles y el impacto ambiental producido por los mismos, ha generado la necesidad de buscar nuevas fuentes de energía renovable más amigables con el ambiente. Por esta razón, en la actualidad, se ha despertado un especial interés en los biocombustibles a partir de microalgas, ya que estos microorganismos requieren pequeñas extensiones para su cultivo, pueden crecer en diferentes tipos de aguas y pueden potencialmente competir con los combustibles fósiles, debido al alto contenido lipídico de algunas cepas.

Una etapa influyente en la eficiencia de producción de biodiesel a partir de microalgas es la extracción de aceite, cuyo mejoramiento contribuye en gran medida al mejoramiento de toda la cadena de producción. El presente trabajo muestra la influencia de las variables temperatura, tiempo y relación biomasa/solvente sobre el proceso de extracción de lípidos de microalgas a escala laboratorio. Así mismo, se expone un análisis preliminar de costos de una planta de producción a escala piloto. Se encontró que las mejores condiciones de trabajo se dan en un tiempo de extracción de 8 horas, una relación biomasa/solvente de 1/40 y 40°C. Un análisis estadístico mostró que la única variable con influencia significativa en el proceso es la relación biomasa/solvente.

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 mayor en comparación con los aceites usados convencionalmente en el proceso de producción de biodiesel.

* Proyecto de Grado

** Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de ingeniería química. Director. Dr. Sc. Viatcheslav Kafarov. Codirector Ing. Ángel Gonzalez

ABSTRACT

TITLE: INFLUENCE OF TEMPERATURE, TIME AND RELATIONSHIP BETWEEN BIOMASS/SOLVENT VARIATIONS IN *Amphiprora* sp. MICROALGAE'S LIPID EXTRACTION AND PRELIMINARY COSTS EVALUATION OF PILOT-SCALE.

AUTHORS: MARÍA CRISTINA MURILLO DURÁN, MAHER JERANIA GONGORA TORRES**

KEY WORDS: Microalgae, extraction, lipids, Profitability analysis.

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.

An important phase during the biodiesel production process from microalgae oil is the extraction, whose improvement contributes greatly to the improvement of the entire production line. This work shows the influence of temperature, time and relationship between biomass/solvent variables in the lipid microalgae extraction at laboratory scale. In the same way, a preliminary cost analysis for a pilot-scale production plant is exposed. The best work conditions were found and there is an eight-hour extraction span, 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, therefore, to avoid a higher energy expenditure, it's more convenient to work at regular temperature.

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.

* Undergraduated project

** Physical and Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering Department. Director: Viatcheslav Kafarov. Chemical Engineer Dr.Sc. Co-Director: Chemical Engineer. Ángel González

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. MARCO TEÓRICO.....	17
1.1 GENERALIDADES DE LAS MICROALGAS.....	17
1.1.1 Amphiprora sp.....	17
1.1.2 Características de los lípidos de las Microalgas.....	18
1.2 OBTENCIÓN DE ACEITE DE MICROALGAS.....	18
1.2.1 Disrupción Celular.....	18
1.2.2 Extracción.....	19
1.2.3 Método Extracción batch con solvente.....	19
1.3 ANÁLISIS DE COSTOS	19
1.3.1 Tipos y Estimación de Costos.....	20
1.3.2 Depreciación.....	22
1.3.3 Análisis del punto de equilibrio.....	23
1.3.4 Análisis de Factibilidad.....	23
2. METODOLOGÍA	25
2.1 MATERIALES, EQUIPOS Y REACTIVOS.....	25
2.1.1 Insumos.....	25
2.1.2 Reactivos.....	26
2.1.3 Equipos:	26
2.1.4 Software	26
2.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	27
2.2.1 Disrupción Celular.....	27
2.2.2 Método de Extracción: Extracción Batch con Solvente.....	27
2.2.3 Cuantificación del extracto.....	28
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO	30
3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	31

4. ESTUDIO PRELIMINAR DE COSTOS PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE MICROALGAS A ESCALA PILOTO	35
4.1 CAPACIDAD PLANTA PILOTO.....	35
4.2 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS A UTILIZAR EN LA PLANTA PILOTO	35
4.3 ESTIMACIÓN DE COSTOS	37
4.3.1 Estimación de los Costos de Capital de inversión total (TCI).....	37
4.3.2 Costos operacionales anuales (AOC).	39
4.4 ANÁLISIS DEL PUNTO DE EQUILIBRIO.....	41
4.5 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD	42
5. CONCLUSIONES	44
6. RECOMENDACIONES	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de la microalga <i>Amphiprora</i> sp.....	26
Tabla 2. Niveles y valores de las variables estudiadas	28
Tabla 3. Resultados proceso de extracción.....	30
Tabla 4. Precios y potencias nominales equipos analizados.....	37
Tabla 5. Total valor equipos con envío.....	38
Tabla 6. FCI empleando el metodo de Lang.....	38
Tabla 7. Costos Insumos	39
Tabla 8. N° Empleados por cada equipo de la planta piloto	40

LISTAS DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Componentes principales del TCI	20
Figura 2. Metodología Empleada	25
Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de disrupción celular.....	27
Figura 4. Diagrama de flujo del método Extracción Batch con Solvente	27
Figura 5. Superficies de respuesta: Variables independientes a. Temperatura y 1/R; b. Tiempo y 1/R; c. Tiempo y Temperatura	32
Figura 6. Perfiles para los valores predichos y función deseabilidad.....	33
Figura 7. Diagrama de Pareto	34
Figura 8. Diagrama del proceso planta piloto.....	36
Figura 9. Variación del punto de equilibrio con el valor de la biomasa.....	41
Figura 10. Variación del ROI y el PBP con respecto al precio del producto.....	42

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 (CO₂), crean la necesidad de buscar nuevas alternativas 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 [26,21]. 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 necesitar pequeñas extensiones para su cultivo, su crecimiento se puede realizar en diferentes fuentes de aguas como las aguas de desechos industriales, aguas residuales, entre otras [17]. También reducen los gases de efecto invernadero al usar dióxido de carbono como nutriente para su crecimiento [5]. Las microalgas pueden garantizar una gran producción de biocombustible como el biodiesel debido a su alto contenido de lípidos, que supera a las fuentes usadas actualmente [23].

El proceso para producir biodiesel a partir de microalgas consta de las siguientes etapas: cultivo, cosecha de la biomasa, secado, extracción de los lípidos, transesterificación e hidrotratamiento, donde la extracción de los lípidos es una etapa crucial para el proceso de producción [7]. 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.

1. MARCO TEÓRICO

En este apartado se presentan los aspectos generales de las microalgas y el género usado, así como las características del aceite extraído de esta materia prima, se describen las generalidades respectivas del método de extracción utilizado y finalmente se muestran las generalidades de un análisis económico.

1.1 GENERALIDADES DE LAS MICROALGAS

Las microalgas son un grupo heterogéneo de organismos unicelulares. Dependiendo de sus características nutricionales se clasifican en fotoautotróficas o heterotróficas. [16].

A medida que pasa el tiempo las microalgas se usan con mayor frecuencia como fuente de productos biotecnológicos. Su uso industrial radica en su aporte como fuente de carbohidratos, proteínas, lípidos, pigmentos y otros [28].

Por lo general la biomasa se constituye de un 20-30% de lípidos, un 40-50% de proteínas y el restante está subdividido entre los carbohidratos, que en algunas especies puede ser hasta del 55% de la biomasa [1].

1.1.1 *Amphiprora* sp.

Es una diatomea (Bacillariophyceae), que posee tallas de aproximadamente 20 micras y forma rectangular 2:3. Su crecimiento es rápido y un alto contenido de lípidos (37%). Su pared celular es de color amarillo oro y consta de dos mitades sobrepuestas que constituyen las lavas [27].

1.1.2 Características de los lípidos de las Microalgas.

La composición de ácidos grasos de las microalgas comúnmente incluye moléculas lineales de 12 a 22 átomos de carbono en número par. El número de enlaces dobles de las cadenas de ácidos grasos no excede los seis y casi todos los ácidos grasos insaturados son isómeros *cis* [19]. Los ácidos grasos de 16C a 18C son los más frecuentes, no obstante moléculas de cadena media (10C, 12C, 14C) o demasiado larga (>20C) predomina en algunas especies. La variación del perfil de ácidos grasos entre grupos algales diversos es considerable, su variabilidad también depende considerablemente de las condiciones del cultivo [10,11].

1.2 OBTENCIÓN DE ACEITE DE MICROALGAS

El proceso de obtención de los lípidos de las microalgas consta de dos partes: La disrupción celular y la extracción de los lípidos.

1.2.1 Disrupción Celular.

Este 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 [9]. 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 [18,22].

El tipo de disrupción celular empleada fue la hidrólisis ácida, ya que este método ofrece un mayor porcentaje de eficiencia en la extracción para microalgas [8]. El mecanismo consiste en poner en contacto la biomasa con una solución de ácido clorhídrico que rompe la pared celular y disuelve los componentes hidrosolubles presentes en ella, este material disuelto se conoce como masa solubilizada [15].

1.2.2 Extracción.

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 [14].

En la extracción con solvente químico se usa un solvente para extraer selectivamente los compuestos de interés que se encuentran en la muestra. Dentro estos métodos se encuentra la extracción Batch con Solvente que tiene la ventaja de ser un proceso sencillo y 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 toxico comparado con el ciclohexano [2].

1.2.3 Método Extracción batch con solvente.

En este método se agrega solvente a la biomasa pretratada, esta mezcla se somete a un agitación continuo durante un periodo de tiempo, posteriormente se separa la biomasa residual del extracto lipídico utilizando filtración al vacío y luego este se somete a una evaporación donde se retira el solvente [6].

1.3 ANÁLISIS DE COSTOS

Al momento de establecer el diseño de un proceso de producción, un aspecto importante a tener en cuenta es el económico. Por lo cual es de vital importancia realizar un análisis financiero y así determinar si la propuesta es viable o no. 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 [3].

Para realizar el análisis financiero de un proyecto se debe tener en cuenta:

- Tipos y estimación de costos
- Depreciación
- Análisis del punto de equilibrio
- Análisis de Factibilidad

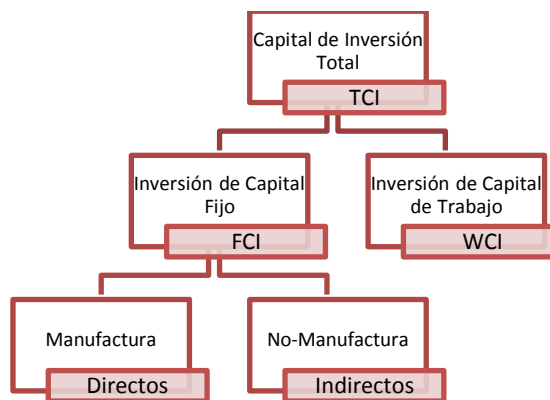
1.3.1 Tipos y Estimación de Costos.

Para realizar una estimación de los costos hay que tener 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.

1.3.1.1 Costos de capital de inversión total TCI.

Los costos de capital de inversión total se pueden dividir como se muestra la figura 1.

Figura 1. Componentes principales del TCI



Fuente: Sustainable desing throught process integration [3]

1.3.1.1.1 Inversión de Capital Fijo (FCI).

Es el dinero requerido para el pago de los equipos y unidades auxiliares, preparación de los sistemas de control e instalaciones.

- *Costos de Manufactura.*

- *Costos de No- Manufactura.*

Método de Lang. Es un método usado para la estimación de los FCI de una planta química basado en el costo de los equipos más su envío (No contempla los costos de instalación). Esta estimación se sigue por la ecuación:

$$FCI = \text{Factor de Lang} * \sum_{q=1}^N C_q^{\text{Entregado}} \quad (1)$$

Donde q el índice del equipo, N el número total de equipos y $C_q^{\text{Entregado}}$ es el costo del equipo q en la planta [13].

1.3.1.1.2 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. Generalmente equivalen al 10% de los costos totales.

Estimación de Costos para los Equipos. Es el elemento más importante al momento de evaluar la inversión para la planta. Se pueden distinguir dos tipos de costos de equipos:

- FOB (Free on Board). Es el valor del equipo en el puerto del fabricante
- Costo de Equipo más Entrega.

Los siguientes métodos se usan para la estimación de los costos de equipos:

- Información directa del proveedor
- Herramientas computacionales
- Relación de capacidades con exponente
- Uso de Índices de costos

1.3.1.2 Costos de Operación.

- Materias Primas.
- Servicios Industriales.

- Mano de obra.
- Mantenimiento: Depende del proceso, es aproximadamente el 5% del FCI.

1.3.2 Depreciación.

Como los equipos y la instrumentación necesaria para el funcionamiento de la planta se deterioran y pierden valor al cumplir el tiempo de vida útil, anualmente se aplica un impuesto con el fin de que la compañía recupere el costo de la propiedad dentro de un periodo de tiempo. La tierra y el capital de trabajo no son depreciables.

1.3.2.1 Método de la Línea Recta (Depreciación Lineal).

Este método es uno de los más sencillos y comúnmente usado para el cálculo de la depreciación.

$$d = \frac{V_0 - V_s}{N} \quad (2)$$

Donde d es la depreciación anual, V_0 el valor inicial de la propiedad, N el periodo de recuperación sobre el cual se aplica la depreciación y V_s es el valor de salvamento.

$$AFC = \frac{FCI_0 - FCI_s}{N} \quad (3)$$

Donde FCI_0 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:

$$TAC = AFC + AOC \quad (4)$$

Donde AOC es el costo anual operativo del proceso.

1.3.3 Análisis del punto de equilibrio.

Este análisis se usa 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, para los casos donde los ingresos del proceso corresponden únicamente a los ingresos por venta del producto, estos están representados por:

$$\text{ingresos} = C^p * \text{ventas anuales} \quad (5)$$

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

$$C^p * \text{ventas anuales} = TAC \quad (6)$$

1.3.4 Análisis de Factibilidad.

Consiste en hacer un análisis de los resultados financieros, económicos y sociales de la inversión realizada. Es en este punto donde se analiza la factibilidad del proyecto diseñado.

Se puede realizar este análisis de dos formas:

- Factibilidad sin tomar en cuenta el valor del dinero en el tiempo
- Factibilidad tomando en cuenta el valor del dinero en el tiempo

Debido a que en el presente proyecto se hace un análisis preliminar de los costos y la viabilidad del diseño, se trabaja con la Factibilidad sin tomar en cuenta el valor del dinero en el tiempo.

1.3.4.1 Criterio de Factibilidad sin tener en cuenta el valor del dinero en el tiempo.

En este criterio no se incluyen los intereses del dinero al paso del tiempo.

1.3.4.1.1 ROI (Retorno de inversión).

Se define como:

$$ROI = \frac{\text{Beneficio anual Neto}}{TCI} * 100 \quad (7)$$

Donde el

$$\text{Beneficio anual Neto} = (\text{Ingresos Totales} - \text{TAC})(1 - \text{Interes}) + \text{AFC} \quad (8)$$

El retorno de la inversión 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 [3].

1.3.4.1.2 PBP (Periodo de devolución).

Se define como:

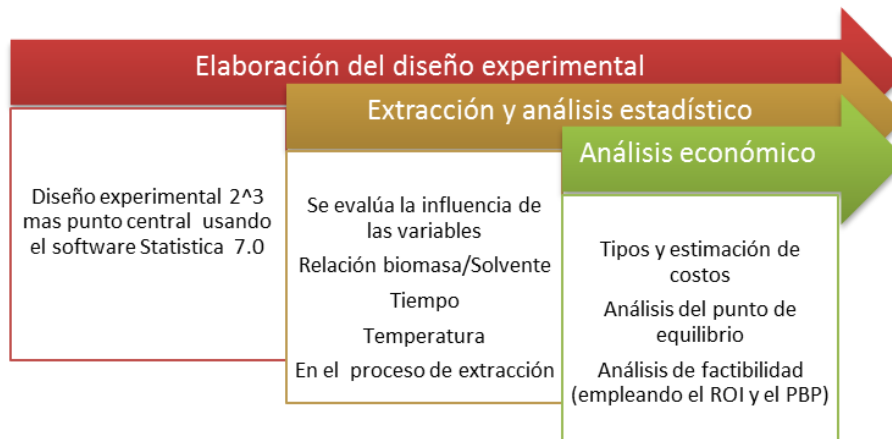
$$PBP = \frac{FCI \text{ devaluable}}{\text{Beneficio anual neto}} \quad (9)$$

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 [3].

2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada se dividió en tres etapas, la primera fue la elaboración del diseño experimental 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 una planta piloto dedicada a producir aceite de microalgas.

Figura 2. Metodología de evaluación



2.1 MATERIALES, EQUIPOS Y REACTIVOS.

2.1.1 Insumos.

La microalga *Amphiprora* sp. fue suministrada por la Corporación Instituto de Morrosquillo. (Punta Bolívar, Colombia) y caracterizada por el Instituto Colombiano de Petróleo, ICP los resultados de la caracterización se muestra 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. Esta 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.*

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

Fuente: Informe UIS-ICP Morrosquillo[25]

2.1.2 Reactivos.

Para la etapa de disrupción celular el reactivo utilizado fue ácido clorhídrico, mientras que para el método de extracción se usó hexano como solvente, conjuntamente durante el desarrollo del proceso se empleó agua destilada en la preparación de la solución de HCl y en el proceso de lavado. Las propiedades principales de los reactivos se muestran en el anexo A

2.1.3 Equipos:

- ✓ Balanza analítica, Precisa modelo XB220A
- ✓ Plancha de calentamiento con agitación. Wisestir MSH20D
- ✓ Equipo de filtración al vacío. Bomba de vacío Rockerscientific 400
- ✓ Horno digital de convección WTC Binder

2.1.4 Software

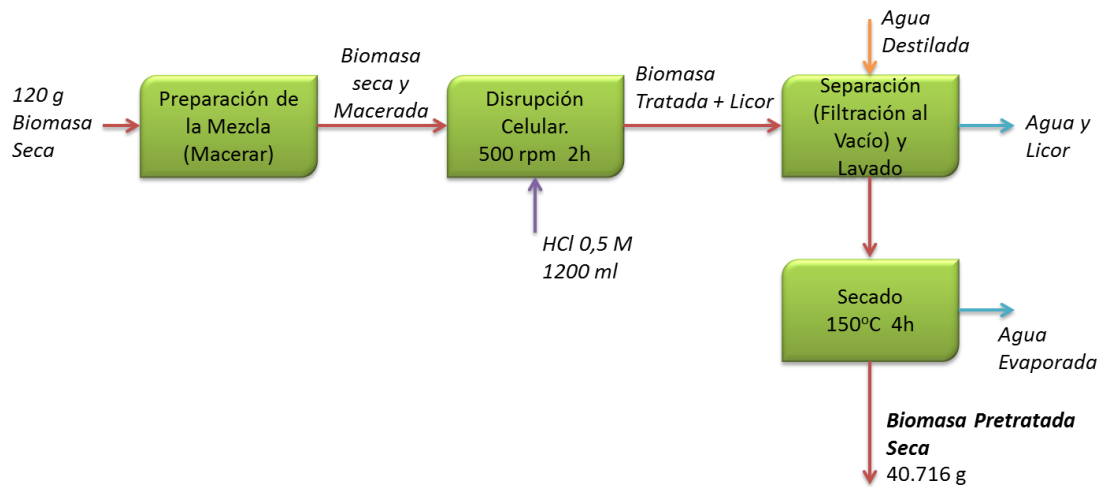
- ✓ STATISTICA 7.0

2.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.2.1 Disrupción Celular.

Se llevó a cabo una disrupción celular química con ácido clorhídrico siguiendo el procedimiento mostrado en la figura 3.

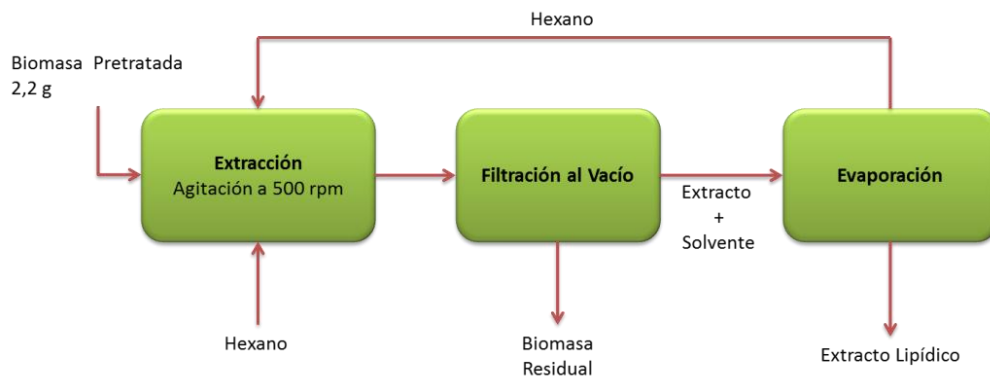
Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de disrupción celular.



2.2.2 Método de Extracción: Extracción Batch con Solvente.

La metodología se desarrolló usando como agente extractor al hexano, como se muestra en la figura 4.

Figura 4. Diagrama de flujo del método Extracción Batch con Solvente



Con el fin de disminuir el número de experimentos (disminuyendo el consumo de biomasa, solvente y energía), y cumplir con uno de los objetivos del presente trabajo que fue determinar la influencia de las variables temperatura, tiempo y relación biomasa/solvente se efectuó un diseño experimental 2^3 más punto central 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 [2,6] 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

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

2.2.3 Cuantificación del extracto.

Haciendo un análisis gravimétrico a cada prueba, se determinaron los rendimientos y eficiencias respectivos, siguiendo las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$m_o = \frac{m_p}{\%Rec_p} * 100 \quad (10)$$

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.

$$\%Rendimiento = \frac{m_e}{m_o} * 100 \quad (11)$$

La ecuación indica el rendimiento de acetite 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.

$$\%Eficiencia = \frac{\%Rendimiento}{\%Lipidos\ totales} \quad (12)$$

El termino %Lípidos totales corresponde al valor de lípidos de la especie en estudio reportado en el informe UIS-ICP-Morrosquillo [12]

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados del diseño experimental realizado en el software STATISTICA 7.0 para el estudio de variables que afectan la extracción de lípidos, se encuentran en la tabla 3, los datos sombreados son aquellos en los cuales se vio una eficiencia superior.

Tabla 3. Resultados proceso de extracción

Prueba	1/Relación Bio/Site [ml/g]	T [°C]	Tiempo [h]	% rendimiento	% eficiencia
1	20	30	24	20,10	63,63
2	20	50	24	18,62	56,42
3	40	50	24	23,71	71,83
4	20	50	12	19,69	59,66
5	40	50	12	24,12	73,08
6	40	30	12	31,33	94,95
7	30	40	18	23,95	72,58
8	30	57	18	26,74	81,03
9	20	30	12	14,19	43,00
10	40	30	24	18,13	54,93
11	30	40	28	27,72	84,02
12	30	40	18	29,53	89,48
13	30	40	18	27,23	82,52
14	46,7	40	18	18,78	56,92
15	13,3	40	18	19,36	58,66
16	30	40	8	29,78	90,23
17	30	21	18	17,31	52,45

Como se observa en la tabla 3 la prueba número 6 fue la que obtuvo mejor resultado en el proceso de extracción de lípidos con una eficiencia de 94.95% y la prueba 9 fue la de menor resultado con una eficiencia de 43%.

3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Usando los datos obtenidos, empleando la ecuación 12 y el software STATISTICA 7.0 se realizaron los diagramas de Pareto y las superficies de respuesta que nos permiten observar 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.

En las superficies de respuesta se grafica la eficiencia como función de dos de las variables estudiadas manteniendo la otra constante en su punto medio. Los perfiles para valores predichos muestran el cambio de la variable respuesta “eficiencia” para las variaciones de cada una de las variables estudiadas, además se establece la función deseabilidad que asigna un valor de cero a los valores completamente indeseables de eficiencia (menor valor obtenido en la experimentación) y de uno a la mayor eficiencia o ideal (máximo valor obtenido). El diagrama de Pareto muestra qué variables tienen una influencia significativa sobre el proceso de extracción.

Observando la figura 5 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 5. Superficies de respuesta: Variables independientes a. Temperatura y 1/R; b. Tiempo y 1/R; c. Tiempo y Temperatura

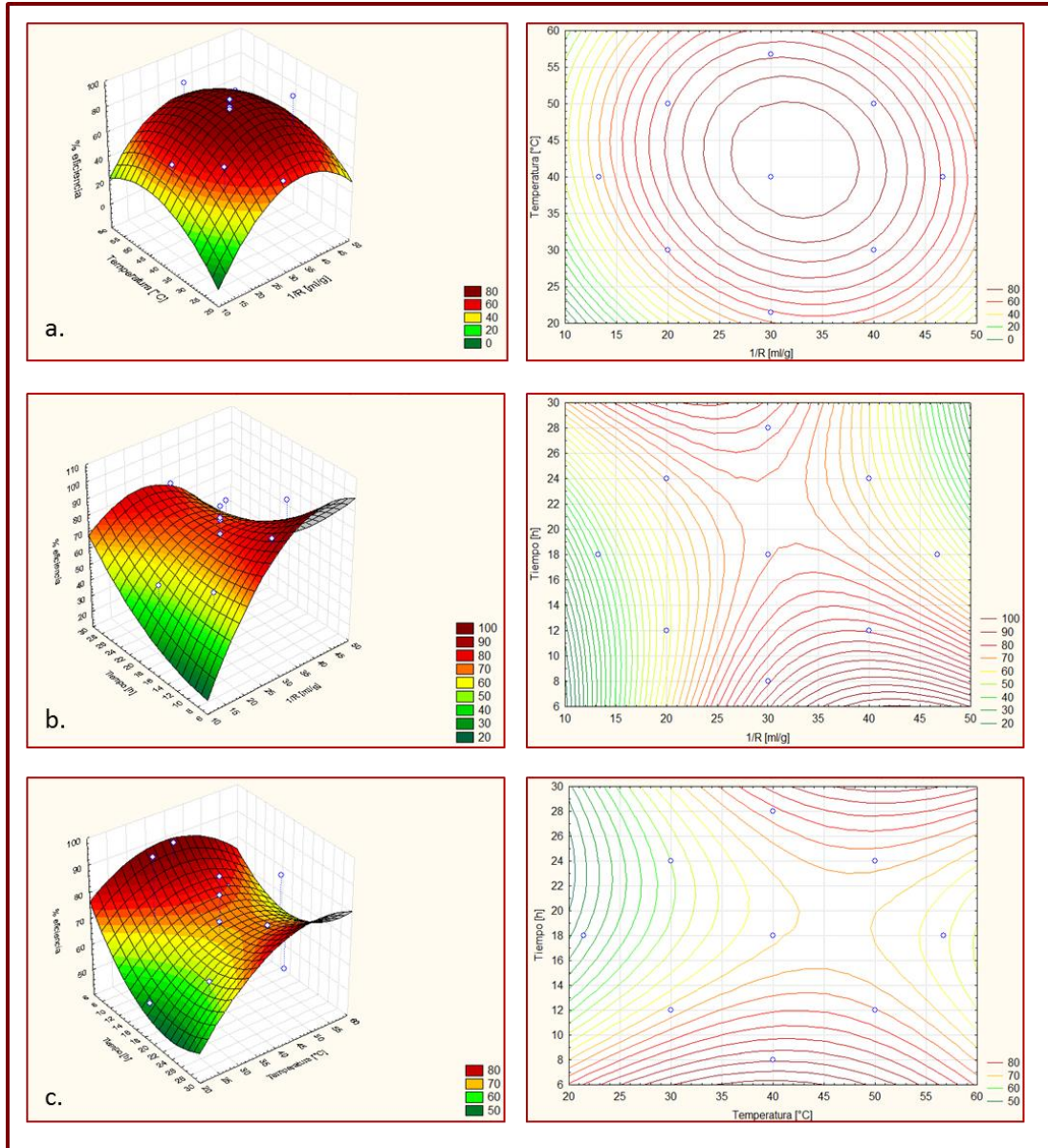
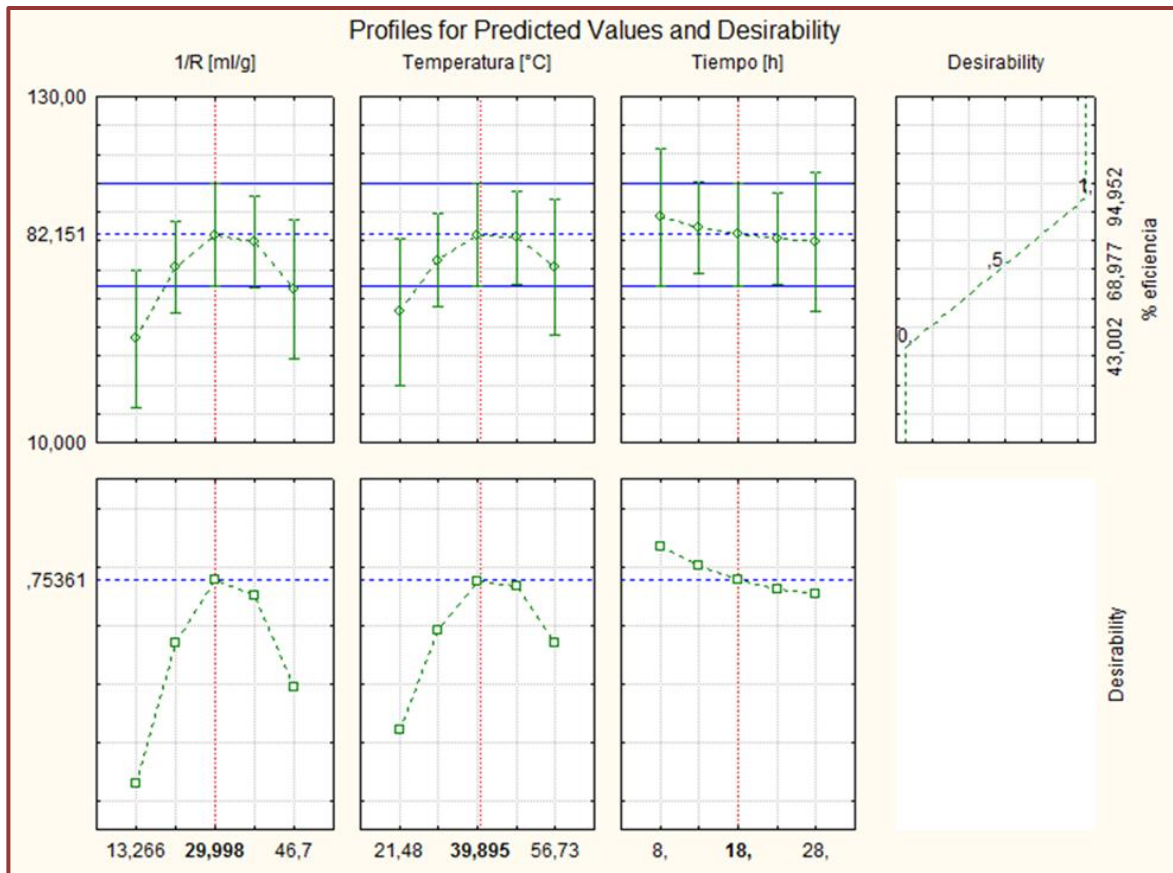
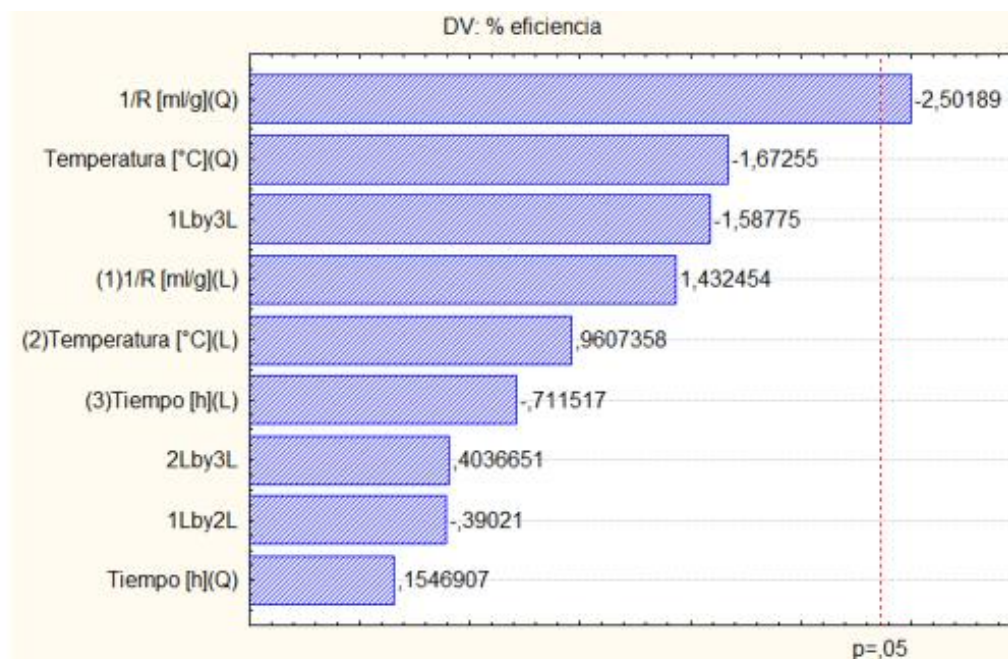


Figura 6. Perfiles para los valores predichos y función deseabilidad



En la figura 6 se puede ver el perfil de los valores de eficiencia predichos para cada una de las variables estudiadas, y la función deseabilidad para las mismas; para el caso del tiempo vemos que a pesar de que la eficiencia tiende a disminuir a medida aumenta el tiempo las barras de error son muy amplias y se mantienen en un mismo rango de valores, por lo cual no se ve una influencia real del tiempo en la eficiencia del proceso. En esta figura también se pueden apreciar los valores recomendados para las tres variables estudiadas (donde se observa una mayor deseabilidad y por lo tanto una eficiencia mayor) siendo estos una relación biomasa/solvente de 1/30 una temperatura cercana a los 40°C y un tiempo de extracción de 8 horas.

Figura 7. Diagrama de Pareto



En la figura 7 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 que influye negativamente, el tiempo y la temperatura no muestran significancia dentro del rango de valores estudiados, por esta razón se decide trabajar a temperatura ambiente, una relación biomasa/solvente de 1/30 y un tiempo de extracción de 8 horas.

4. ESTUDIO PRELIMINAR DE COSTOS PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE MICROALGAS A ESCALA PILOTO

4.1 CAPACIDAD PLANTA 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 7500h/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.

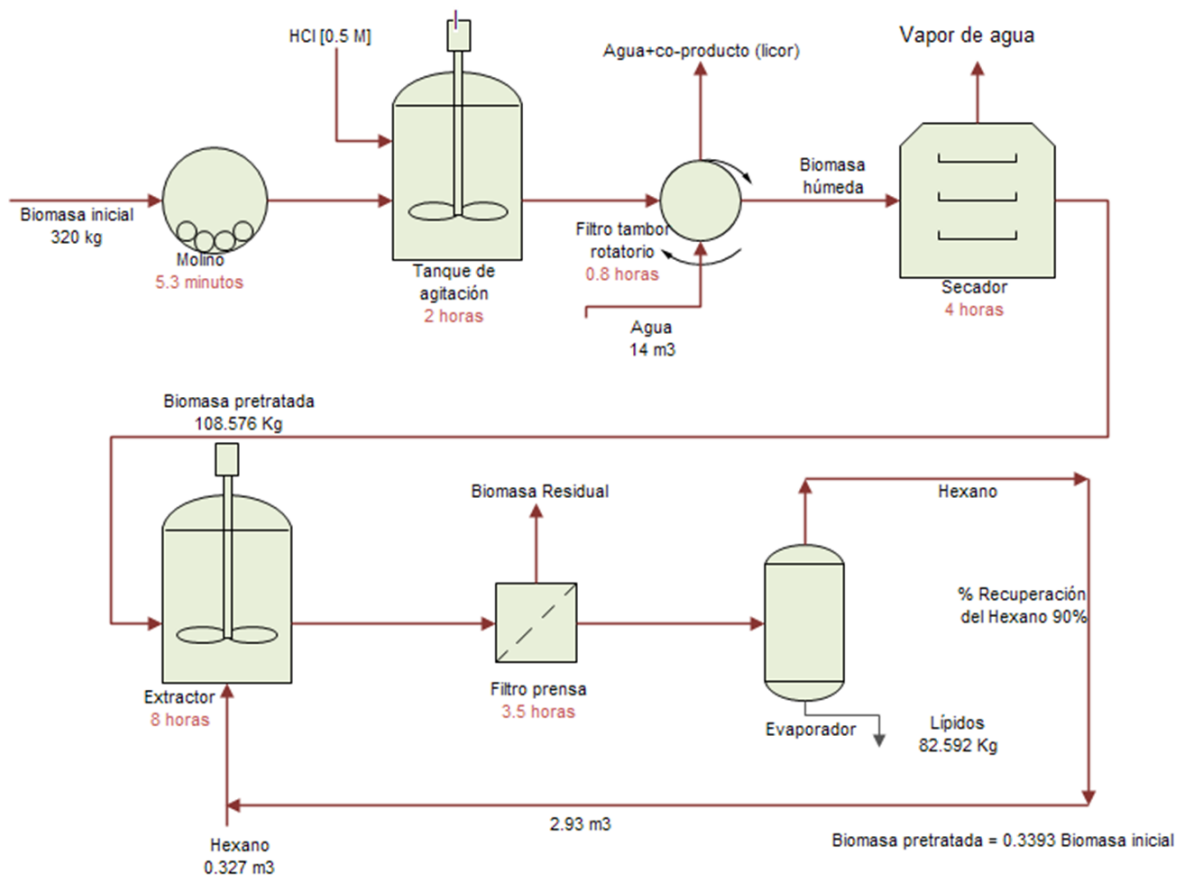
4.2 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS A UTILIZAR EN LA PLANTA PILOTO

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 8.

En el pretratamiento de la Biomasa se emplea un molino de bolas de 1 mm de diámetro con una capacidad de carga de 1kg/s que se encarga de homogenizar la materia prima. Posteriormente 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 periodo de tiempo de 2h. 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 [6]. Finalmente la biomasa pretratada se pasa a un secador durante 4h para retirar el exceso de humedad, una vez seca se procede al proceso de extracción en un tanque de acero inoxidable de 4,2m³ a temperatura ambiente (Para efectos de seguridad y evitar derrames, los tanques de agitación tienen un sobre diseño de aproximadamente un 20%); es importante realizar la recuperación del hexano usado en el proceso

de extracción, el sistema planteado consiste en someter la mezcla (Lípidos+Hexano) a una evaporación para luego condensar el Hexano y recuperar gran parte de este (90%) aunque se genera un aumento en costos energéticos se contribuye a la disminución de los costos relacionados con la adquisición del solvente y los efectos ambientales de la emisión del mismo a la atmósfera.

Figura 8. Diagrama del proceso planta piloto



4.3 ESTIMACIÓN DE COSTOS

4.3.1 Estimación de los Costos de Capital de inversión total (TCI).

4.3.1.1 Estimación de costos de los equipos.

Para hacer un estimativo de los costos de los equipos y sus características, se recurrió a la información técnica suministrada por diferentes proveedores, de esta se analizaron las diferentes opciones disponibles en el mercado y se eligieron las más adecuadas para el proceso, posteriormente con estos datos y empleando la herramienta de cálculo equipment cost, incluida con el libro Plant Design and Economics for Chemical Engineers, 5th edition, Peters, Timmerhaus and West [26]; se obtuvo el valor de cada equipo para el año 2002, valor que fue trasladado al año 2013 usando la siguiente expresión:

$$FOB_{2013} = \left(\frac{M\&S_{2013}}{M\&S_{2002}} \right) * FOB_{2002} \quad (13)$$

Donde: $M\&S_{2002}=1104.2$ $M\&S_{2013}= 1536$)

Tabla 4. Precios y potencias nominales equipos analizados

Equipo	Valor FOB 2013 (USD)	Potencia (kW)	tiempo de operación (h)	Energía equipo (kW*h)
Tanque de Agitación 1	29.639,152	2,2	8	17,6
Tanque de Agitación 2	28.892,157	2,2	2	4,4
Molino	68.623,394	57,69	0,09	5,1921
Filtro 1	4.480,580	0,25	0,8	0,2
Filtro 2	24.102,764	2,2	3,5	7,7
Evaporador	412.236,971			111,6
Secador	37.794,892	1,32	4	5,28

Para encontrar la inversión de costos fijos FCI se usó el método de Lang de la siguiente manera:

Tabla 5. Total valor equipos con envío

Valor equipos sin envío USD	605.769,9112
valor envío USD	59.911,3099
VALOR TOTAL EQUIPOS CON ENVÍO USD	665.681,2212

Tabla 6. FCI empleando el método de Lang

	Factor de Lang	COSTO (USD)
COSTOS DIRECTOS		
Equipo más envío	1	665.681,2
Instalación del equipo	0,47	312.870,2
Instrumentación y controles	0,36	239.645,2
Tuberías	0,68	452.663,2
Sistemas eléctricos	0,11	73.224,9
Edificios	0,18	119.822,6
Mejoras del sitio	0,1	66.568,1
Servicios Auxiliares	0,7	465.976,9
Terreno	0,06	39.940,9
Total costos directos		2.436.393,3
COSTOS INDIRECTOS		
Ingeniería y supervisión	0,33	219.674,8
Gastos de construcción	0,41	272.929,3
Cuestiones legales	0,04	26.627,2
Honorarios de contratistas	0,22	146.449,9
contingencias	0,44	292.899,7
Total costos indirectos		958.581,0
TOTAL INVERSIÓN DE CAPITAL FIJO (FCI)		3'394.974,2

4.3.1.2 Inversión de Capital de Trabajo (WCI).

Se tomó como el 15% de la inversión de capital fijo, es decir 509.246,1 USD.

Sabiendo que los Costos de Capital de inversión total (TCI) son equivalentes a la suma de la inversión de capital fijo (FCI) con la inversión de capital de trabajo (WCI), se encontró que el TCI es equivalente a 3'904.220,4 USD.

4.3.2 Costos operacionales anuales (AOC).

4.3.2.1 Insumos.

Para estimar los costos de los insumos, se consultó a diferentes proveedores en Colombia, los resultados se muestran en la tabla 6. 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 7. Costos Insumos

	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

Los costos por materias primas en el piloto equivalen a 1'448.036,052 USD/año.

4.3.2.2 Servicios Industriales.

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. Empleando un costo promedio de 0,1 USD/kW*h se conoce que el costo total de los servicios industriales equivale a 14.239,78577 USD/año.

4.3.2.3 Mano de Obra.

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 [4] como se muestra en la tabla 7, al final el número de empleados es igual a 3.2 por lo que se aproxima a 3.

Tabla 8. Número de empleados por cada equipo de la planta piloto

	N° de operarios
Tanque de Agitación	1
Tanque de Agitación	1
Molino	0,2
Filtro	0,1
Filtro	0,1
Evaporador	0,3
horno	0,5
Total empleados turnos 8 horas	3,2

Asumiendo un salario anual por operario de 7.200 USD los costos por mano de obra son 21.600 USD/año.

4.3.2.4 Mantenimiento.

Es aproximadamente el 5% del FCI, en este caso: 169.748,7114 USD/año.

Los costos operacionales anuales (AOC) corresponden a la suma de los costos por materias primas, servicios industriales, mano de obra y manteamiento, por lo cual equivale a 1'653.624,549 USD/año.

4.3.2.5 Costo fijo anualizado.

Para este proyecto se estimó una vida útil de 10 años y un valor de salvamento igual a cero, por lo cual el costo fijo anualizado es de 335.503,336 USD.

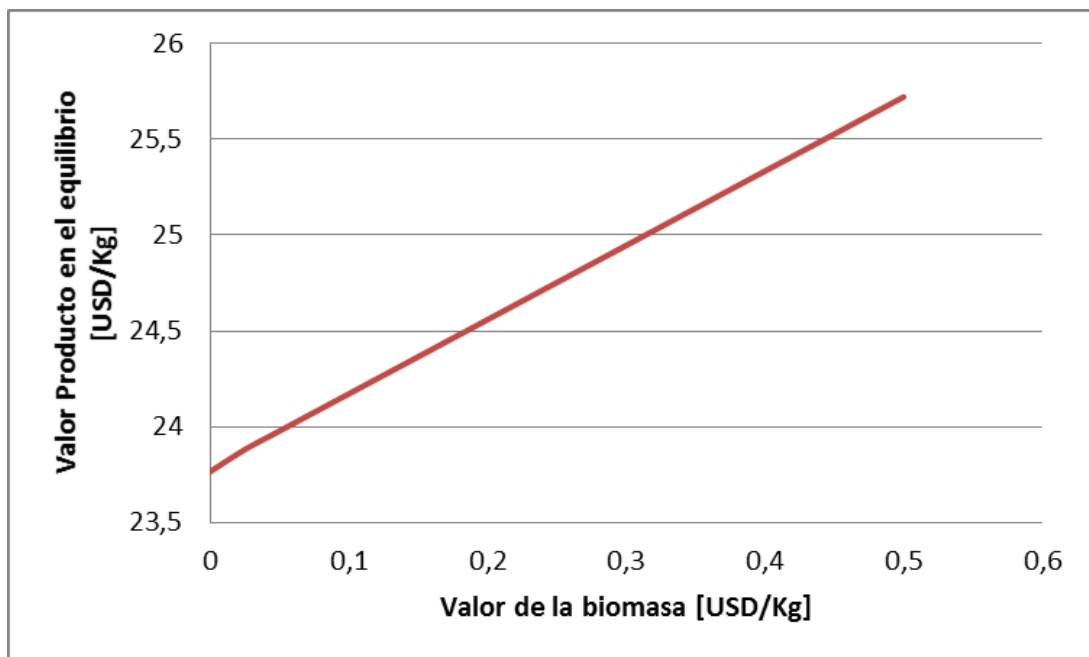
4.3.2.6 Costo total anualizado (TAC).

En este proyecto equivale a 1'989.127,885 USD.

4.4 ANÁLISIS DEL PUNTO DE EQUILIBRIO

Como en este caso los ingresos del proceso corresponden únicamente a los ingresos por venta del producto, se hizo un análisis del punto de equilibrio donde se encontró el valor mínimo de venta del producto variando el valor de la biomasa seca como se muestra en la figura 9.

Figura 9. Variación del punto de equilibrio con el valor de la biomasa

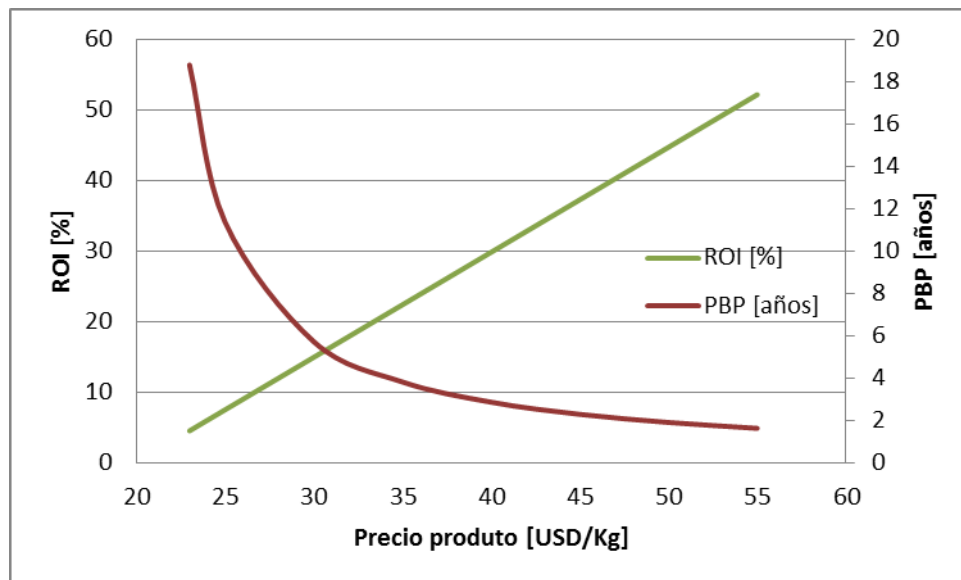


Como se puede observar, aun cuando la biomasa no tenga valor, el valor mínimo del producto equivale a 23.77 USD/kg, y este valor aumenta linealmente, aun así este cambio es poco comparado con la variación de la materia prima. Vemos cómo un cambio de cinco veces en el precio de la biomasa no genera un gran cambio en el precio mínimo del producto, 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 25,703 USD/kg.

4.5 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

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 10. Variación del ROI y el PBP con respecto al precio del producto



En esta gráfica se aprecia que el valor del Retorno de la inversión (ROI) aumenta linealmente con el precio del producto, mientras el periodo de devolución disminuye con el mismo, como se explicó anteriormente, se puede decir que un proyecto es viable para valores del ROI alrededor del 15% y un periodo de devolución inferior a 5 años, es decir, para que este proyecto sea viable, el precio del aceite de microalgas debe ser mínimo de 30.5 USD/kg, un precio demasiado alto si se compara con los aceites usados convencionalmente en la producción de biodiesel, sin embargo se han realizado estudios que indican que los aceites de algunas microalgas contienen altos porcentajes de DHA (Ácido

docosahexaenoico), EPA (Ácido eicosapentaenoico), entre otros[24]. DHA y EPA son ácidos grasos esenciales de la serie ω_3 usados en diferentes industrias como la farmacéutica y alimenticia en las cuales su costo oscila entre 65-126 USD/kg dependiendo del grado de pureza de los mismos, por lo cual si la utilización final de este aceite fuese para la obtención de ácidos grasos valiosos, el empleo de una unidad piloto de extracción de aceite de microalgas sería económicamente atractivo.

5. 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.

6. RECOMENDACIONES

- Hacer uso de la biomasa residual para próximos estudios, con el objetivo de convertir lo que en este proceso es tratado como desecho en una nueva materia prima de otros productos de alto valor agregado.
- Hacer un estudio del diseño a escala industrial ya que el alto precio del producto se debe en gran parte a los costos fijos y es posible que al aumentar la escala la factibilidad del proyecto aumente.
- Analizar en uso del aceite obtenido como una fuente de ácidos grasos valiosos de la serie ω_3 u ω_6 como EPA y DHA.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALBARRACÍN, I. La producción de Biocombustibles con eficiencia, estabilidad y equidad. Microalgas: Potenciales Productoras de Biodiesel. XV Simposio Electrónico Internacional. Centro de Estudios internacionales para el Desarrollo, 2007.
- [2] ALVAREZ, D Y MOLANO, D. Estudio comparativo de métodos de disrupción celular/extracción para la obtención de aceite de microalgas de bioprospección nacional a escala laboratorio. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-químicas. Escuela de Ingeniería Química. 2011. 51p.
- [3] EL HALWAGI sustainable desing throught process integration: Fundamentals and applicatios to industrial pollution prevention, resourse conservation, and profitability enhancement. Oxford UK butterworth-Heinemann/Elsevier 2012. p. 15-61.
- [4] ESQUIVEL, J. Evaluación económica preliminar de plantas químicas usando Aspen IcarusProcessEvaluator , Tesis profesional, Choula, Puebla, México Universidad de las Américas Puebla Escuela de Ingeniería y Ciencias. 2007.
- [5] FLORES, P; LOPEZ, J. Las microalgas, fuente de aceite para la producción de biodiesel.
- [6] GARCÍA, J; MIRANDA, J. Comparación de métodos de extracción de aceite de microalgas a escala laboratorio para la producción de biodiesel. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-químicas. Escuela de Ingeniería Química. 2011. 63p.

[7] GARIBAY, A; VÁSQUEZ, R; SANCHEZ, Ma; SERRANA, L; MARTÍNEZ, A. Biodiesel a partir de microalgas: Producción de microalgas. En: BioTecnología.2009. vol 13, no.3, p. 38-61.

[8] GONZÁLEZ, A. Desarrollo de una metodología para la extracción de aceites de microalgas empleando disrupción celular térmica y química. En: CONGRESO LATINOAMERICANO DE QUÍMICA CLAQ 2010 (49: 2010: Cartagena de Indias). Memorias del XXIX Congreso latinoamericano de Química. Cartagena de Indias, 2010. p. 31.

[9] GONZÁLEZ, A; KAFAROV, V; GUZMÁN, A. Desarrollo de métodos de extracción de aceite en la cadena de producción de biodiesel a partir de microalgas. En: Prospect. Julio-diciembre, 2009.vol. 7, no.2, p.53-60.

[10] HALIM, R; DANQUAH, M; WEBLEY, P. Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: A review, En: Biotechnology Advances. 2012. Vol.30, no. p. 709-732.

[11] HU, Q; SOMMERFELD, M; JARVIS, E; GHIRARDI, M; POSEWITZ, M; SEIBERT, M; DARZINS, A. Microalgal triacylglycerols as feedstock for biofuel production: Perspectives and advances. En: PlantJournal. Mayo, 2008. vol. 54, no. 4, p. 621-639.

[12] Informe UIS-ICP-Morrosquillo, Bioprospección de las microalgas colombianas para la producción de biodiesel. Informe final: Bucaramanga 2011.

[13] LANG, H. Simplified approach to preliminary cost estimates, En: ChemEng June, 1948.p. 112-113.

- [14] LEE, JY; YOO, C; JUN, SY; AHN, CY; OH, HM. Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae. En: BioresourceTechnology. 2010. vol. 101, no, p. S75-S77.
- [15] LÓPEZ, L; CÓDOBA, L S. Obtención de aceite de microalgas nativas mediante la combinación de disrupción celular y método de extracción soxhlet para la producción de biodiesel. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-químicas. Escuela de Ingeniería Química, 2010. 67p.
- [16] LÓPEZ, S ; CATZIM, L . Microalgas Dulceacuícolas. Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán.
- [17] MAJER, S; MUELLER-LANGER, F; ZELLER, V; KALTSCHMITT, M; Implications of biodiesel production and utilization on global climate – a literature review. En: EuropeanJournal of lipidScienceTechnology. Agosto, 2009.vol. 111,no. 8, p. 747-762.
- [18] MATA, T; MANTIS, A; CAETANO, N. Microalgae for biodieselproduction and other applications: A review: processing and components extraction. En: Elsevier: Renewable and sustainable energy reviews. 2010.vol. 14, no, p. 217-232.
- [19] MEDINA, AR; GRIMA, EM; GIMENEZ, AG; IBANEZ, MJ. Downstreamprocessing of algalpolyunsaturatedfattyacids. En: Biotechnology Advances. Mayo,1998. vol.16, no. 3, p. 517-580.
- [20] MERCK CHEMICALS. Fichas de seguridad [en línea] http://www.merckmillipore.com/is-bin/INTERSHOP.enfinity/WFS/Merck-International-Site/es_ES/-/USD/ViewSearch-SearchMSDS[vitado el 31 de julio de 2013].

[21] Mohan, N. Rajaram, M.G. Baskara Boopathy, A. Rengasamy, R. Biomass and lipid production of marine diatom *Amphiproropaludosa* W. Smith at different nutrient concentrations. En: *Journal of Algal Biomass Utilization*. 2012. vol. 4, no, p. 52-59.

[22] MOLINA, E. ACIÉN, F. ROBLES, A. Downstream processing of cell-mass and products. En: RICHMOND Amos et al. *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. Oxford: BlackwellScience Ltd., 2004. p. 215-251.

[23] MOLINA, E; ACIÉN FERNÁNDEZ, F; GARCÍA, F; CAMACHO, F; CHISTI, Y. Scale up of tubular photobioreactor. En: *Journal of applied Phycology*. 2000. vol. 12, no, p. 355-368.

[24] MOLINA, E; BELARBI, E; ACIEN, F; ROBLES, A; CHISTY, Y. Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. En: *Biotechnology advances*. 2003. Vol. 20, no, p. 491-515

[25] PALOMINO, M. LÓPEZ, J. ESTRADA, C. *Microalgas: Potencial para la producción de biodiesel*. Cali, Colombia. I Simposio internacional de Oleaginosas Energéticas. Universidad de Valle. Facultad de Ingenierías, 2010.

[26] PETERS, M; TIMMERHAUS, K; WEST, R. *Plant design and economics for chemicals engineers*. 5 ed. 2009. Editorial Mc Graw Hill. Herramienta de cálculo para costos de equipos.

[27] PRIETO, M; MOGOLLON, M; CASTRO, A;. Efecto del medio y condiciones de cultivo en la productividad de tres diatomeas marinas con potencial acuícola. En: *Revista MVZ Córdoba*, 2005, vol. 10, no. 001, p. 544-554.

[28] SERRA,J. Biotecnología con Microalgas. España: Universidad del País Vasco. Facultad de Ciencia y Tecnología. Departamento de Bioquímica y Biología Molecular. Grupo de Tecnología Enzimática y Celular, 2009.

ANEXOS

ANEXO A. Ficha técnica de los reactivos

Ficha de seguridad Ácido Clorhídrico	
Propiedad	
Formula Química	HCl
Masa Molar	36,45
Apariencia, Olor y estado físico	El ácido clorhídrico es un líquido humeante incoloro o amarillo claro con olor permanente e irritante
Gravedad específica (Agua=1)	1,184
Punto de ebullición (°C)	50 a 760 mm Hg
Punto de fusión (°C)	-66
Densidad relativa del vapor (Aire=1)	1,27
Presión de Vapor (mm Hg)	158 a 20°C
Viscosidad (cp)	0,48 a -155°C
pH	0,1 (1N); 2,01 (0,01N)
Solubilidad	Soluble en agua, Alcoholes, éter y benceno. Insoluble en Hidrocarburos
Información toxicológica	
DL50 (oral, conejo)	900 mg/Kg
LC50 (inhalación en ratas)	3124 ppm/1H
Frases R	R23: Tóxico por inhalación; R35: Provoca quemaduras graves, R34: Provoca quemaduras, R37: irrita las vías respiratorias,
Frases S	S1/2: Consérvese bajo llave y manténgase fuera del alcance de los niños; S26: en caso de contacto con los ojos, lávese inmediata y abundantemente con agua y acúdase a un médico; S36/37/39: Úsese indumentaria y guantes adecuados y protección para los ojos/la cara; S45: En caso de accidente o malestar, acúdase inmediatamente al médico.

Fuente: fichas de seguridad Merck [26]

Ficha de seguridad Hexano	
Propiedad	
Formula Química	C6H14
Masa Molar	86,2
Apariencia, Olor y estado físico	Líquido incoloro volátil, de olor característico
Gravedad especifica (Agua=1)	0,7
Punto de ebullición (°C)	69
Punto de fusión (°C)	-95
Densidad relativa del vapor (Aire=1)	3
Presión de Vapor (KPa)	17 a 20°C
Viscosidad (cp)	0,294 a 25°C
Solubilidad en agua (g/100ml)	0,0013 a 20°C
límite de explosividad (% en volumen en el aire)	1,1 -7,5
Información toxicológica	
DL50 (oral, conejo)	28710 mg/Kg
Frases R	R11: Fácilmente inflamable; R38: irrita la piel, R48/20: Nocivo; riesgo de efectos graves para la salud en caso de exposición prolongada por inhalación; R51/53: Tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático; R62: Posible riesgo de perjudicar la fertilidad; R65: Nocivo, si se ingiere puede causar daño pulmonar; R67: La inhalación de vapores puede provocar somnolencia y vértigo.
Frases S	S2: Manténgase fuera del alcance de los niños, S9 Consérvese el recipiente en lugar bien ventilado; S16: Conservar alejado de toda llama o fuente de chispas-no fumar; S29: No tirar los residuos por el desagüe; S33: evítese la acumulación de cargas electrostáticas; S36/37: Úsese indumentaria y guantes de protección adecuados; S61: Evítese su liberación al medio ambiente; S62: en caso de ingestión no provocar vómito: acúdase inmediatamente al médico.

Fuente: fichas de seguridad Merck [26]

ANEXO B: PRETRATAMIENTO HIDRÓLISIS ÁCIDA

Materiales y reactivos

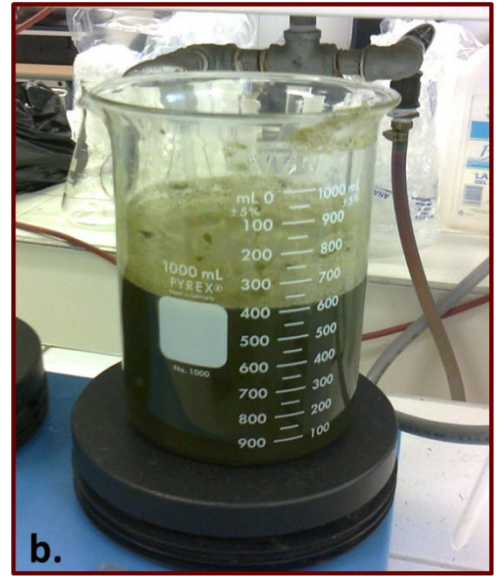
- Mortero
- Balanza analítica
- Equipo de filtración al vacío (Bomba de vacío, Kitasato y Embudo Büchner)
- Ácido clorhídrico HCl [0.5 M]
- Espátula
- Horno de convección forzada.
- Plancha de agitación
- Cámara de extracción de vapores

Procedimiento.

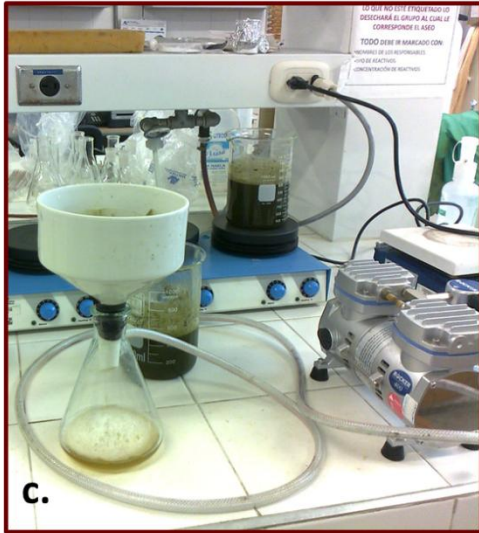
- Pesar la Biomasa
- Macerar la biomasa
- Mezclar la biomasa macerada con la solución de HCl [0.5 M]
- Agitar a 500rpm por 2h
- Filtrar al vacío
- Realizar un lavado hasta neutralizar
- Secar a 105°C durante 4 horas



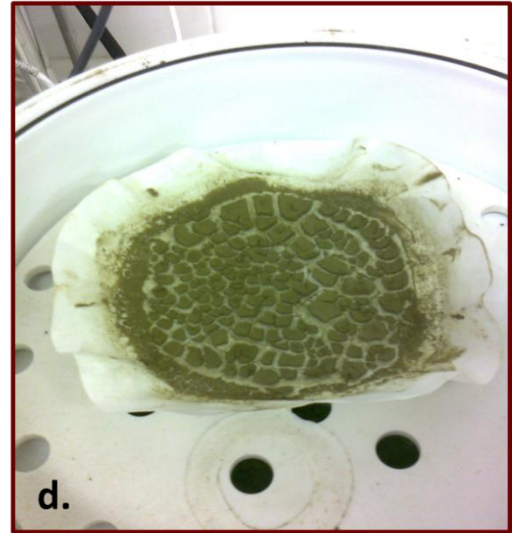
a.
Biomasa macerada



b.
Agitación



c.
Filtración al vacío



d.
Biomasa pretratada seca.

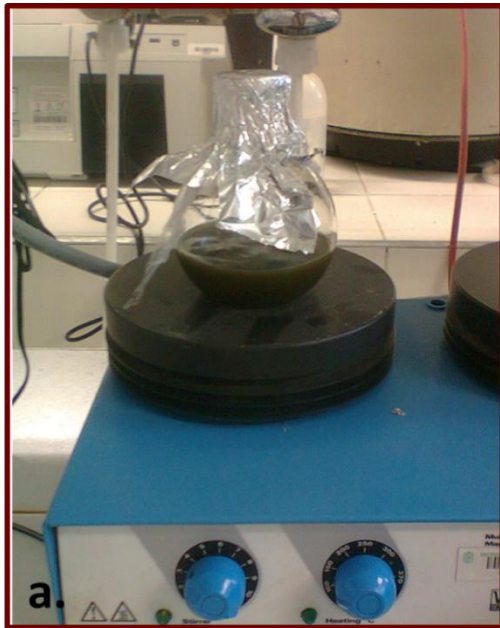
ANEXO C. EXTRACCIÓN BATCH CON SOLVENTE

Materiales y reactivos

- Balanza analítica
- Equipo de filtración al vacío (Bomba de vacío, Kitasato y Embudo Büchner)
- Hexano
- Espátula
- Balón
- Plancha de agitación
- Cámara de extracción de vapores
- Biomasa pretratada seca
- Probeta
- Vaso de precipitado

Procedimiento

- Pesar 2.2 g de biomasa pretratada
- Mezclar la biomasa con la cantidad de hexano necesaria según la relación biomasa solvente.
- Agitación a 500 rpm, controlando la temperatura durante el tiempo necesario según el experimento.
- Filtrar al vacío
- Evaporar el solvente
- Cuantificación del extracto por diferencia de masa



a.
Agitación y calentamiento



b.
Filtración al vacío



c.
Extracto mas solvente



d.
Extracto