

SIMULACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A TRAVÉS DE MEDIOS QUÍMICOS DE LAS MICROALGAS

**Khiscia Utria salas¹, José Sanabria Romero²,
Ricardo Noel Peñaranda³, Enrique Niebles Nuñez⁴**

¹ *Ingeniera Mecánica, Profesor Tiempo Completo, Ingeniería mecánica
Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla-Colombia . khiscia.utria@uac.edu.co*

⁴ *Magister en Ingeniería Mecánica. Profesor Tiempo Completo, Ingeniería mecánica
Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla-Colombia. eeniebles@yahoo.com .*

^{2,3} *Ingeniero Mecánica, Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla-Colombia .
ing_sanabria@hotmail.com; ricardonoe107@hotmail.com*

Palabras clave: Microalga, Biodiesel, Transesterificación.

Resumen. Se estudia la producción de biocombustibles en la ciudad de Barranquilla a través de microalgas, evaluando cuatro de ellas bajo criterios de adaptación, productividad lípida, tolerancias al pH, por esto criterios se selecciona a la microalga *Chlorella vulgaris* porque cumple con las condiciones apropiadas de producir el aceite esencial en la elaboración de biodiesel y subsistir al clima de Barranquilla. De acuerdo a la composición de los perfiles ácidos presentes en la microalga se simula el proceso de transesterificación en MATLAB para el análisis de las concentraciones de los ácidos grasos (triglicéridos, diglicéridos, monoglicéridos) y los productos (glicerina, ester) con el fin de obtener los mejores resultados de concentración de Biodiesel a temperaturas 323K, 333K y 337,65K por debajo de la ebullición del alcohol (metanol). Para visualizar si es factible la producción del biocombustible por medio de las microalgas y así implementar alternativas en procesos que tenga que ver con el crecimiento de la especie a gran escala bien sea con los sistemas abiertos o cerrados en la ciudad.

Key words: Microalgae, Biodiesel, Transesterificación.

Abstract. Biofuel production in the city of Barranquilla is studied based on microalgae, evaluating four types under the criteria of adaptation, lipid production, tolerance to pH, microalga *Chlorella vulgaris* is selected due to its production of essential oil in the biodiesel production under the appropriate conditions, as well as its adaptation to Barranquilla's Weather. The analysis of the concentrations of fatty acids (triglycerides, diglycerides and monoglycerides) and products (glycerine, ester) are carried out through a

simulation in MATLAB using the composition of the acids present in the microalga profiles with the purpose of obtain the best results of concentration of Biodiesel at 323K, 333K and 337,65K, below the boiling point of alcohol (methanol). To display if feasible the biofuel production using microalgae and so implement alternatives in processes that has to do with the growth of the species to large scale in systems either in closed or open in the city.

1. INTRODUCCIÓN

Con el transcurrir del tiempo los recursos no renovables se están escaseando a mediados del año 2040 caso es el del petróleo en el cual la Corporación Mundial Estadística de Energía afirma por medios de cálculos matemáticos y estadísticos estima que este recurso pueda agotarse [1], incluso el carbón, el gas y alimentos de la canasta familiar, por motivo al aumento de la demanda del biocombustible que se le suministra a la población e industrias, a principios en el siglo XXI los consumos fueron en Norteamérica alrededor de 0,6% entre en el 2000 al 2011 a diferencia de Asia que consumió el 82,8%, mientras para centro y sur América tiene el 37,8% y en el medio oriente es del 77,7% manteniendo una tendencia global de consumo del 31,2% [2]. Por lo que se busca con nuevas fuentes de energías disminuir el impacto ambiental y alternativas de suministro de combustibles a empresas y sector automotriz con fin a que estos recursos no desaparezcan.

Investigaciones hechas por Solazime, Energreen y el Centro de Investigación Científica de Yucatán encuentran que en las microalgas una nueva forma de producir biocombustibles (biodiesel y el biocetano) por lo que generan grandes contenidos de lípidos y el desarrollo de crecimiento en estas especies es favorable cuando se implementan los sistemas adecuados para su proceso fotosintético [3,4,5].

El autor Tzovenis et al [6] dice que estos microorganismos presentan los mejores comportamientos de desarrollo estructural cuando se implementan las condiciones adecuadas en el cultivo, por lo que exponerlas a los rayos solares y en sistemas donde el agua preferiblemente sea residual se obtienen tasas de crecimiento muy rápidas en periodos muy cortos.

En cuanto al suministro de fertilizantes químicos en los cultivos de las microalgas también son formas de acelerar su composición estructural con aplicación en bajos porcentajes porque si son alterados estos nutrientes puede ocasionar la disminución de sus propiedades o muerte de la especie [7].

El comportamiento de las especies también se debe a que tanto a temperaturas muy bajas o altas pueden provocar o limitar su crecimiento dice Renaud et al. [8] por lo que es aconsejable mantenerlas a temperaturas entre los 27° C y 30°C.

La microalga es un microorganismo que habita en cualquier parte del mundo por lo que cifra exacta no hay en lo que cada día puede aparecer un tipo de la especie, por lo que Chisti Y. [9] ha portado información que son pocos estos microorganismos son utilizados en la producción de biocombustible por lo que se conoce la *Dunaliella salina*, *Botryococcus braunii*, *Chlorella minutissima*, *Neochloris oleabundans*, *Nitzschia sp*, *Dunaliella tertiolecta*, *Chlorella vulgaris*, *Nannochloropsis sp* son productoras de aceite que cumple con las normas para la elaboración del biodiesel.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Microalgas

Son especies fotosintéticas unicelulares o pluricelulares que pueden habitar en zonas acuáticas (dulces, saladas y residuales) e incluso en las piedras, su tamaño está entre los

2 a 200 μm , su velocidad de crecimiento depende del medio donde se encuentre y las condiciones en que son tratadas [10].

Por abundar este microorganismo en el mundo se encuentran clasificadas por grupos según su color como es la: Bacillariophyceae (diatomeas), Chlorophyceae (algas verdes), Cyanophyceae (Verdi-azul), Chrysophyceae (Doradas) [11] en las que hay unas cuantas que son utilizadas para la elaboración del biodiesel por tener grandes cantidades lípidas.

Cabe resaltar que para el aceite de la microalga contiene una composición en su perfil de ácidos grasos del 87 % en mol de triglicéridos en los cuales se dividen en el 39% de triglicérido de tripalmitina, el 28% de trioleína, el 20% en trilinoelina la Tabla. 1 se presentan su composición.

Tabla 1. Características del aceite de microalga [12].

Composiciones	Fración molar	Peso molecular
Saturados(palmítico)	0,13	256,42 g/mol
Mono-glicéridos	0,20	358,55 g/mol
di-glicéridos	0,28	620,986 g/mol
Triglicéridos	0,39	884 g/mol

El desarrollo de nuevas tecnologías para el crecimiento de las microalgas es una ventaja, cuanto se refiere a incremento y producción de lípido de la especie en poco tiempo por lo que implementan sistemas cerrados como los fotobiorreactores y los sistemas abiertos como los estanques pero trae sus desventajas en cuanto a la disposición de ellos y sostenibilidad económicamente [9].

2.2 Biodiesel

Es un biocombustible líquido sintético hecho por recursos renovables a partir de aceite vegetal y animal que a través de una serie de procesos se puede obtener como es el de la esterificación, pirólisis y transesterificación [13,14]. Es biodegradable, no es tóxico, no produce gases por lo que no afecta el medio ambiente.

El biodiesel es una opción de energía sostenible que contar con ella en estos momentos reduciría el agotamiento de los recursos no renovables, el inconvenientes de este biocombustible es que debe ser hecho por bajo las normas de calidad o estandarización como se ve en la Tabla 2 por que suele ser muy viscoso este biocombustible cuando es realizado por aceites vegetales o animales.

Tabla 2. Normas para la transesterificación.

Implementación de norma en la transesterificación.	Estándares o Normas
Índice de saponificación	ASTM D-1387
Índice de acidez	NTC218
Índice de yodo	ASTM D-5554
Composición de ácidos	ASTM D-6584

2.3 Descripción del proceso de transesterificación.

La transesterificación es proceso químico que por reaccionar con compuestos aditivos bien sea ácidos o base que producen el intercambio del éster por otro alcohol [15].

Para este proceso se necesita de sustancias químicas como alcohol (CH_4O), catalizador, aceite vegetal ($\text{C}_{57}\text{H}_{104}\text{O}_6$) para formar el biodiesel ($\text{C}_{19}\text{H}_{36}\text{O}_2$) y la glicerina ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$), en la siguiente Tabla 3 se observa estos compuestos con sus pesos moleculares.

En cuanto a catalizadores se utilizan con frecuencia para la transesterificación los básicos, ácidos y los enzimáticos el cual se emplea con el simple hecho de acelerar la reacción durante el proceso.

Tabla 3. Compuestos moleculares en el proceso de transesterificación [16].

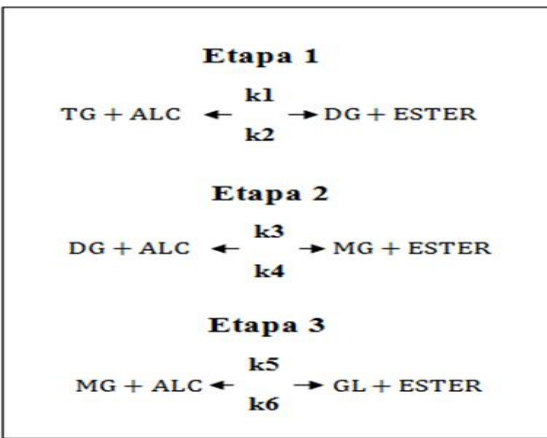
Estructura moleculares	Pesos moleculares
$\text{C}_{57}\text{H}_{104}\text{O}_6$	884 g/mol
CH_4O	32 g/mol
$\text{C}_{19}\text{H}_{36}\text{O}_2$	296 g/mol
$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	92 g/mol

En la investigación se asume que se realiza el proceso de transesterificación con volúmenes de aceite de 100 lts y alcohol (metanol) con 20 lts para determinar las concentraciones iniciales del triglicéridos y el alcohol, se trabaja con temperaturas de 323K, 333K y 337,65K.

2.4 Modelo cinemático del proceso de transesterificación en las microalgas.

El modelo cinemático que se realiza durante la reacción consta de 3 fases, donde el aceite graso debe ser transformado en las que sus cadenas van cambiando desde triglicéridos a diglicéridos hasta llegar a monoglicéridos en el cual se produce los esteres del Biodiesel y la glicerina en la última fase así como se puede apreciar en la Figura. 1.

Figura 1. Diagrama en el proceso de transesterificación [17].



Donde el modelo cinemático del proceso de transesterificación para las microalgas se expresa por ecuaciones en las que se determinan las concentraciones representando de la siguiente manera en las ecuaciones desde el (1-6) [18].

Ecuación. (1)

$$\frac{dC_{\text{TRIG}}}{dt} = -k_1 C_{\text{TG}} C_{\text{ALC}} + k_2 C_{\text{DG}} C_{\text{ESTER}}$$

Ecuación. (2)

$$\frac{dC_{\text{DIG}}}{dt} = k_1 C_{\text{TG}} C_{\text{ALC}} - k_2 C_{\text{DG}} C_{\text{ESTER}} - k_3 C_{\text{DG}} C_{\text{ALC}} + k_4 C_{\text{MG}} C_{\text{ESTER}}$$

Ecuación. (3)

$$\frac{dC_{\text{MONO}}}{dt} = k_3 C_{\text{DG}} C_{\text{ALC}} - k_4 C_{\text{MG}} C_{\text{ESTER}} - k_5 C_{\text{MG}} C_{\text{ALC}} + k_6 C_{\text{GL}} C_{\text{ESTER}}$$

Ecuación. (4)

$$\frac{dC_{\text{ALC}}}{dt} = -k_1 C_{\text{TG}} C_{\text{ALC}} + k_2 C_{\text{DG}} C_{\text{ESTER}} - k_3 C_{\text{DG}} C_{\text{ALC}} + k_4 C_{\text{MG}} C_{\text{ESTER}} - k_5 C_{\text{MG}} C_{\text{ALC}} + k_6 C_{\text{GL}} C_{\text{ESTER}}$$

Ecuación. (5)

$$\frac{dC_{\text{GLICER}}}{dt} = k_5 C_{\text{MG}} C_{\text{ALC}} - k_6 C_{\text{GL}} C_{\text{ESTER}}$$

Ecuación. (6)

$$\frac{dC_{\text{ESTER}}}{dt} = k_1 C_{\text{TG}} C_{\text{ALC}} - k_2 C_{\text{DG}} C_{\text{ESTER}} + k_3 C_{\text{DG}} C_{\text{ALC}} - k_4 C_{\text{MG}} C_{\text{ESTER}} + k_5 C_{\text{MG}} C_{\text{ALC}} - k_6 C_{\text{GL}} C_{\text{ESTER}}$$

Cada ecuación representan las concentraciones con respecto al tiempo donde:

C_{TRIG} es la concentración de triglicerido;

C_{ALC} es la Concentración de alcohol;

C_{DIG} es la Concentración de digliceridos;

C_{ESTER} es la concentración de biodiesel;

C_{MONO} es la concentración de monogliceridos;

C_{GLICER} es la concentración de glicerina;

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ son las constantes cinéticas.

Este sistema de ecuaciones representa la dinámica de la reacción durante el proceso de la transesterificación donde se simula bajo ciertos parámetros iniciales para la concentración de triglicérido con un valor de 0,844 mol/litros y una concentración de alcohol de 2,533 mol/litros considerando que el volumen es constantes en un reactor STR.

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

El objetivo principal de esta investigación es caracterizar la microalga para la producción de biodiesel a través de medios químicos dando como resultado la selección de la microalga adecuada en Barranquilla y la determinación de las concentraciones de los compuestos ácidos en MATLAB en colaboración de la herramienta Simulink para corroborar si es factible la elaboración del biodiesel en la ciudad para así implementar sistemas de crecimiento como los fotobioreactores o estanques.

3.1 Criterio de selección

La selección de la especie tiene que basarse bajo ciertos parámetros los cuales no perturben el desarrollo de la especie como suele ser las bajas o altas temperaturas, intensidades luminosas por parte de los rayos solares, adecuación al medio acuático con nutrientes para el desarrollo de la microalga.

Comúnmente por investigaciones se conoce que la generación de biodiesel por medio del aceite de microalgas son pocas las que se destacan cuatro de ellas como son las siguientes: *Dunaliella salina*, *Botryococcus braunii*, *Chlorella minutissima* y la *Chlorella vulgaris*. Donde se puede observar en la Tabla. 4 ciertos de criterio para tener en cuenta su selección [9, 19].

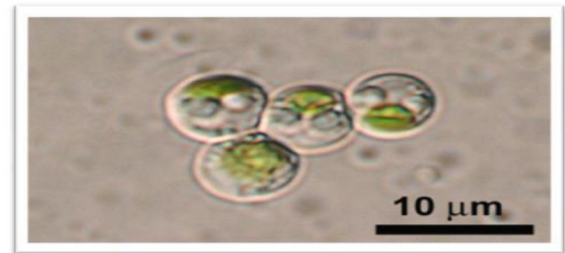
Tabla 4. Microalgas adecuada para la región.

Parámetros de selección	<i>Botryococcus braunii</i>	<i>Dunaliella salina</i>	<i>Chlorella minutissima</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>
Temperatura óptima de crecimiento	23°C	21°C	25°C	25°C
Tasa de crecimiento rápida (vel.maxima).	0.18(1/d)	0.22(1/d)	0.75(1/d)	0.75(1/d)
Biomasa seca	25.0-75.0	6.0-25.0	65	5.0-58.0
Productividad lípida	30-40	116.0	10,3 a 50,0	11.2-40.0
Tolerancia de pH	7 a 8,5	1 a 11	7 a 7,5	9 a 11
Radiación o iluminación	60 W/m ²	72W/m ²	40W/m ²	40W/m ²
Disponibilidad de la cepa	(Escocia, Sudáfrica)	(Nueva Zelanda)	(Japón, Cuba México e Israel)	(Cuba, México y Chile)
Factores de crecimientos nutrientes	Alta cantidad Fosforo inorgánico disuelto	Cloruro de sodio, Nitrato de potasio, Bicarbonato de sodio, Sulfato de magnesio	Concentración de carbono, nitrógeno y fosforo.	Nitrato, nitrógeno, dióxido de carbono, sales (Fe, Zn, Mn, B, Br, Si)

La microalga que se selecciona es la *Chlorella vulgaris* (figura.2) por lo que se puede adaptar a las condiciones de Barranquilla, que por su resistencia a sobrevivir a la alta temperatura que presenta la ciudad en las que pueden ser alrededor de los 27 a 30 °C, por su capacidad de producir contenidos de lípidos de 11,2 a 40,0 mg/Litros día, un 45 % de proteína en base seca, 20% de grasa e igual en carbohidratos, 10% de minerales y vitaminas, además soporta valores de pH entre 9 a 11 y la disposición de hábitat en los suelos, agua dulces y residuales [20], [21].

Lo cual cumple con las condiciones necesarias para la adaptación en el medio ambiente y la de generar el aceite para el biodiesel en la ciudad de Barranquilla.

Figura 2. Microalga *Chlorella vulgaris*.



3.2 Análisis de la simulación del proceso de transesterificación.

La cinemática durante el proceso de transesterificación dan como resultado la formación de concentraciones esto sucede cuando la cadena de los ácidos grasos del aceite se descomponen de tal manera que dan origen a través del alcohol al biodiesel y la glicerina.

En la simulación de las concentraciones se realiza bajo una relación estequiométrica de 3:1 por lo que se determina la concentración inicial de triglicérido y alcohol de la siguiente manera: en la ecuación (7) se expresa el volumen de la mezcla que entra al reactor que es igual al volumen del aceite (AC) más el volumen del alcohol (A).

$$VOL_{MEZCLA} = VOL_{AC} + VOL_A \quad \text{Ecuación.(7)}$$

Por lo que se determina el volumen del aceite y el alcohol por la ecuación.(8)

$$vol = \frac{\text{masa}}{\text{densidad}} \quad \text{Ecuación.(8)}$$

Donde la masa del aceite y el alcohol es igual a:

$$\text{masa}_{AC} = N_{AC} * PM_{AC} \quad \text{Ecuación.(9)}$$

$$\text{masa}_A = N_A * PM_A \quad \text{Ecuación.(10)}$$

N: numero de mol y PM: peso molecular.

Entonces se reemplaza la ecuación (9) y (10) en la ecuación (7):

$$VOL_{MEZCLA} = \frac{N_{AC} \cdot PM_{AC}}{\rho_{AC}} + \frac{N_A \cdot PM_A}{\rho_A} \quad \text{Ecuacion. (11)}$$

Para el número de moles del aceite es igual :

$$N_{AC} = \frac{N_{TRIG}}{fm_{TRIG}} \quad \text{Ecuacion. (12)}$$

Y para el alcohol es :

$$N_A = 3N_{AC} \quad \text{Ecuacion. (13)}$$

fm: fraccion molar de trigliceridos.

N_{TRIG} : numeros de moles total del triglicerido.

N_A : Numero de moles del alcohol.

Estos terminos de los números de moles reemplazando en la ecuacion (11) se expresa el volumen de la mezcla por la ecuación (15):

$$VOL_{MEZCLA} = \frac{N_{TRIG} \cdot PM_{AC}}{fm_{TRIG} \cdot \rho_{AC}} + \frac{3N_{TRIG} \cdot PM_A}{\rho_A} \quad \text{Ecuacion. (14)}$$

$$VOL_{MEZCLA} = N_{TRIG} \left(\frac{PM_{AC}}{fm_{TRIG} \cdot \rho_{AC}} + \frac{3PM_A}{\rho_A} \right) \quad \text{Ecuacion. (15)}$$

Por lo que la concentracion inicial del triglicerido se calcula por la ecuación (16):

$$C_{TG}(0) = \frac{N_{TG}}{VOL_{MEZCLA}} \quad \text{Ecuacion. (16)}$$

Entonces se expresa de tal manera que al despejar de la ecuación (15) el volumen de la mezcla :

$$\frac{N_{TG}}{VOL_{MEZCLA}} = \frac{1}{\left(\frac{PM_{AC}}{fm_{TRIG} \cdot \rho_{AC}} + \frac{3PM_A}{\rho_A} \right)} \quad \text{Ecuacion. (17)}$$

La concentración de triglicerido se determina por la ecuación (18):

$$C_{TG}(0) = \frac{1}{\left(\frac{PM_{AC}}{fm_{TRIG} \cdot \rho_{AC}} + \frac{3PM_A}{\rho_A} \right)} \quad \text{Ecuacion. (18)}$$

Ademas para la concentración del alcohol se obtiene por 3 veces a la concentración de triglicerido.

$$C_A(0) = 3C_{TG}(0) \quad \text{Ecuacion. (19)}$$

Cabe mencionar que para las demás concentraciones surgen a medida que se realice las transformaciones de los perfiles ácidos en la reacción.

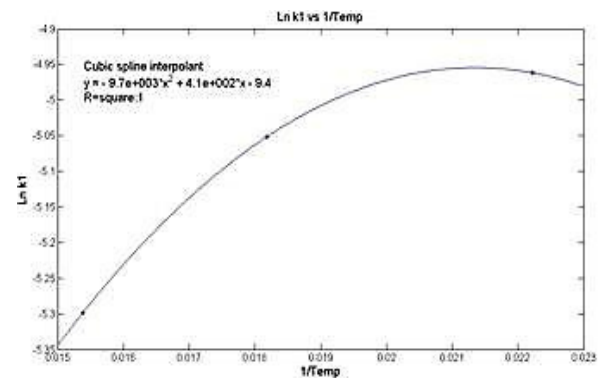
La Tabla. 5 se observan los valores a los cuales se determinaron las concentraciones iniciales para la simulación.

Tabla 5. Valores para las concentraciones iniciales.

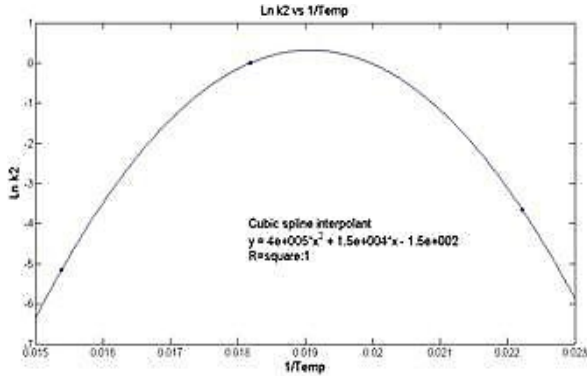
Peso molecular del aceite	PM_{AC}	881 g/mol
Peso molecular del alcohol	PM_A	32,04 g/mol
fraccion molar de trigliceridos	fm_{TRIG}	0,87 g/mol
Densidad del aceite	ρ_{AC}	864 g/lts
Densidad del alcohol	ρ_A	7918 g/lts

En las gráficas a continuación se observa el comportamiento de las constantes cineticas K1, K2, K3, K4, K5 y K6 en las que fueron calculadas por medio de ajuste de curvas de datos experimentales del aceite de la microalga [22].

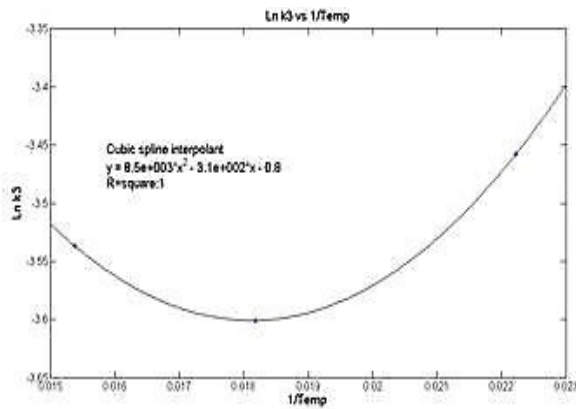
Gráfica 1. Constantes cinéticas K1 vs temperatura.



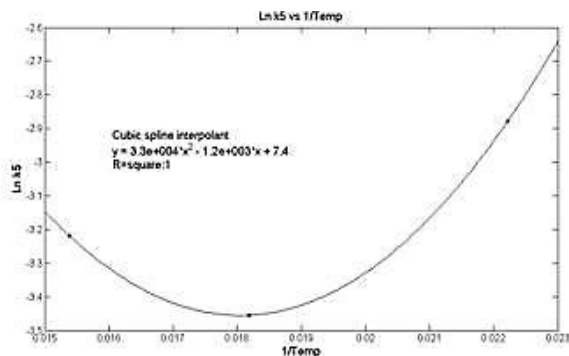
Gráfica 2. Constantes cinéticas K2 vs temperatura.



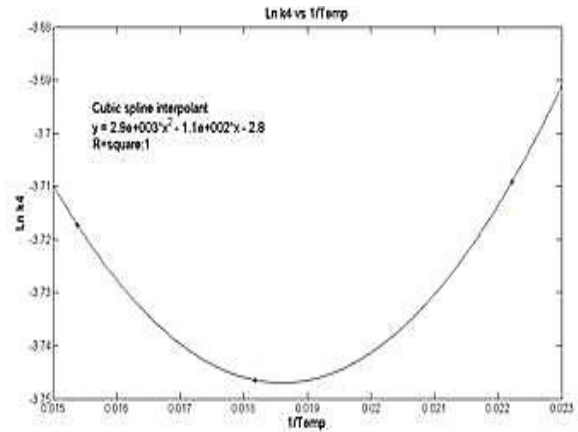
Gráfica 3. Constantes cinéticas K3 vs temperatura.



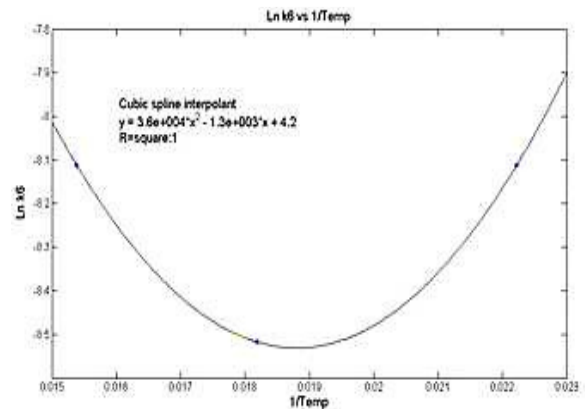
Gráfica 4. Constantes cinéticas K5 vs temperatura.



Gráfica 5. Constantes cinéticas K4 vs temperatura.



Gráfica 6. Constantes cinéticas K6 vs temperatura.



Al ser evaluada la temperatura de 323K, 333K y 337,65K en las ecuaciones (20-25) las constantes cinéticas para la simulación se representan en la Tabla 6.

Ecuación. (20)

$$\ln k_1 = -9,7 * 10^3 * \frac{1}{Temp}^2 + 4,1 * 10^2 * \frac{1}{Temp} - 9,4$$

Ecuación. (21)

$$\ln k_2 = 4 * 10^5 * \frac{1}{Temp}^2 + 1,5 * 10^4 * \frac{1}{Temp} - 1,5 * 10^2$$

Ecuación. (22)

$$\ln k_3 = 8,5 * 10^2 * \frac{1}{Temp}^2 - 3,1 * 10^2 * \frac{1}{Temp} - 0,8$$

Ecuación. (23)

$$\ln k_4 = 2,9 * 10^3 * \frac{1}{Temp}^2 - 1,1 * 10^3 * \frac{1}{Temp} - 2,8$$

Ecuación. (24)

$$\ln k_5 = 3,3 * 10^4 * \frac{1}{Temp}^2 - 1,2 * 10^3 * \frac{1}{Temp} - 7,4$$

Ecuación. (25)

$$\ln k_6 = 3,6 * 10^4 * \frac{1}{Temp}^2 - 1,3 * 10^3 * \frac{1}{Temp} - 4,2$$

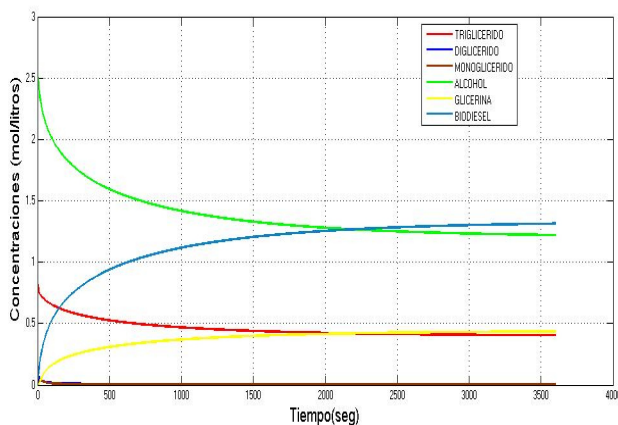
Tabla 6. Constantes cinéticas bajo ajuste de curvas.

Constantes cinéticas (mol/litros)						
Temperatura	K1	K2	K3	K4	K5	K6
323K	0.0069	0.9772	0.02815	0.0237	0.0357	0.00020
333K	0.00568	0.1339	0.02787	0.02375	0.0337	0.00023
337.65K	0.00504	0.0073	0.02901	0.02423	0.0395	0.00029

De acuerdo a los parametros como son las concentraciones iniciales y las constantes cineticas, se realiza en simulink por medio de diagramas de bloques el modelo cinemático de transesterificación para el analisis de las concentraciones.

En la Figura 3 se muestra que los trigliceridos tiene un comportamiento decreciente que empieza con una concentracion inicial de 0,844 mol/litros que al transcurrir el proceso se producen nuevos compuestos caso es el de diglicéridos y monoglicéridos, después llega a mantenerse constante esta concentración a los 757 segundos durante la reacción.

Figura 3. Concentraciones a temperatura 323K.



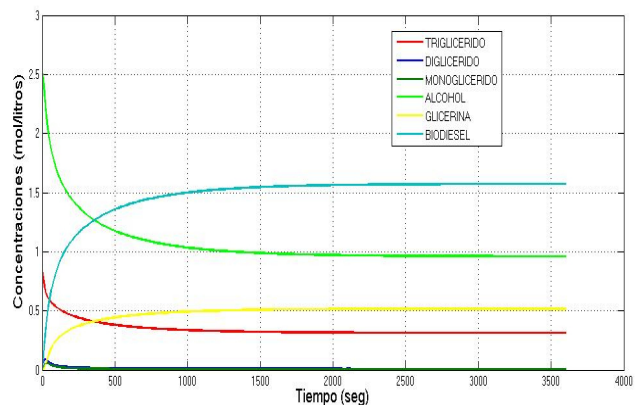
Para el componente de los diglicéridos se forma a partir que el proceso empieza a reaccionar debido a que los ataques químicos tanto del catalizador y del alcohol empiezan a tener su función en el proceso de la transesterificación, los diglicéridos poseen valores de concentraciones de 0,06 mol/litros y después

desciende tal punto que su comportamiento es constante a los 1.500 segundos e igual sucede con los monoglicéridos que tiene un pico debido al cambio de fase de los compuestos que empieza con concentraciones de 0,03mol/litros y se descomponen hasta que permanece constante a los 1.762 segundos.

Al empezar el proceso el alcohol posee una concentración molar de 2,533 mol/litros que a medida que este compuesto reaccione con los ácidos grasos para formar los demás componentes en la transesterificación, esta concentración decrece manteniéndose con valores de concentración de 1,2 mol/litros en periodo de tiempo de los 1.760 hasta los 3.600 segundos.

Lo que se aprecia en la figura 3 es que tanto para las concentraciones de glicerina y biodiesel se produce una curva típica de crecimiento, obteniéndose de esta manera concentraciones de los 0,4350 mol/litros a los 2.915 segundos en la glicerina y para el biodiesel resultan ser de los 1,572 mol/litros al finalizar el proceso con valores máximos de formación del éster a los 2.671 segundos.

Figura 4. Concentraciones a temperatura 333K.



El comportamiento de los triglicéridos como se observa en la Figura 4 decrece a diferencia que los valores de concentración disminuyen por consecuencia al incremento de la temperatura en la reacción donde se logra apreciar concentraciones de 0,312 mol/litros.

Para las concentraciones de diglicéridos y monoglicéridos tienden a comportándose de igual manera que la Figura 3 pero en esta se

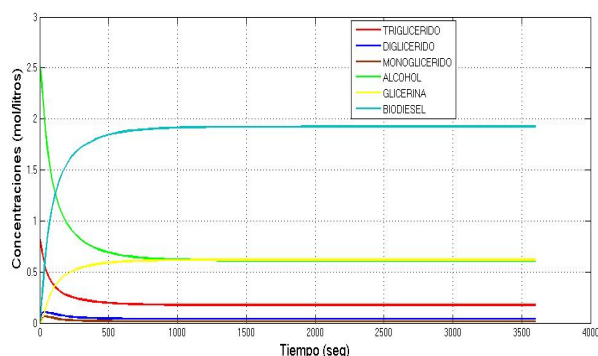
presenta que las concentración aumento un poco en el pico en lo que decrece hasta mantenerse constante y obtener una concentración mayor de 0,0081 mol/litros a los 1333 segundos similar en su comportamiento del transcurrir del tiempo durante el proceso pero con valores de concentración de 0,05592 mol/litros conun pico máximo en los monoglicéridos.

En la concentración del alcohol disminuye muy rápido, debido a la temperatura que se maneja tiende a formar los componentes como la glicerina y los esteres a tiempo muy cortos, el comportamiento del alcohol tiende a decrecer y ser uniforme a lo largo de los 1700 segundos. Las concentraciones a esta temperatura resultado positiva en el proceso de transesterificación donde se refleja que el comportamiento del éster posee resultados de concentración más elevada a la figura 3 debido a que a esta temperatura el proceso de la reacción actúa muy rápida donde se obtienen valores de concentraciones de biodiesel de 1,57 mol/litros a los 1745, segundos.

En la figura 5 se aprecia que las concentraciones de triglicérido a esta temperatura llegan a degradarse durante los cambios de fases para la formación de los demás compuestos porque la velocidad cinética para la transformación en la transesterificación actúa de manera muy rápida.

En cambio a los diglicéridos y monoglicéridos se presentan las concentraciones más elevadas por lo que el alcohol como atacante químico a esta temperatura se tiende a evaporar pero se comprueba que no se consume el compuesto.

Figura 5. Concentraciones a temperaturas 337,65K.



Lo que se puede apreciar es que los valores de concentraciones de la glicerina y el biodiesel fueron los más elevados en esta temperatura con concentraciones de 0,619 mol/litros para la glicerina y el biodiesel con 1,923 mol/litros.

3.3 Validación y factibilidad de producción de biodiesel por medio de microalgas

La producción de biodiesel por medio del aceite de microalga resulta factible por que se presentan las concentraciones máximas de éster durante el proceso de transesterificación por lo que es una opción viable elaborar el biocombustible en Barranquilla. La simulación realizada por la herramienta Simulink en Matlab tiene comportamientos similares a la experimentación de los autores H. Nouredini y D. Zhu y Freedman B [23, 24].

Por eso la utilización de la microalga tiene como ventaja que sus cultivos producen grandes cantidades de aceite por hectáreas como se puede observar en la Tabla 6 a diferencia de otras materias de producción de aceite.

Tabla 6. Validación para la producción de biodiesel por medio de microalgas [7].

Cultivos	Rendimiento de aceite (litros/hectárea)
Maíz	172
Coco	2689
Palma	5950
Jatropha curcas	1892
Microalga (70% materia seca)	136.900
Microalga (30% materia seca)	58.700

En Colombia se realiza el biocombustible a través del aceite de la palma africana pero comparando ese cultivo con las microalgas marinas, tiene una gran relación lo hace muy rentable la elaboración del biodiesel por microalgas.

4. CONCLUSIONES

Esta investigación tiene como objetivo de caracterizar la microalga adecuada para la producción de biodiesel en lo que se cumplió con lo acordado dando así:

- La selección de la microalga que cumple con las condiciones en el proceso de la elaboración del biocombustible en Barranquilla es la *Chlorella vulgaris* porque contiene los perfiles de ácidos grasos necesarios para la elaboración del biodiesel, aporte de gran contenido de lípidos esencial para extraer el aceite, en la ciudad tiene la capacidad de adaptarse a las condiciones climatológicas.
- La Simulación del modelo dio como resultado que la velocidad con que se forma el biodiesel es muy rápida más o menos tantos segundos partiendo de reactivos en la proporción estequiométrica.
- De acuerdo a las concentraciones en la transesterificación se obtienen que para los triglicéridos y el alcohol estas disminuyen en el transcurso de la reacción, caso contrario ocurre en los monoglicéridos, diglicéridos biodiesel, glicerina que tienen comportamientos crecientes pero luego estas se tornan constantes en la reacción.
- En cuanto a los componentes que tienen las más altas tasas de concentración son las del biodiesel alrededor de 1,92 mol/litros y la glicerina con 0,619 mol/litros ocurriendo estos resultados a temperatura de 337,65 K.
- La producción de biodiesel a través de la microalga seleccionada resulta factible porque los rendimientos de aceite son los más altos para los cultivos, que al emplear los sistemas cerrados en la ciudad se obtienen resultados a corto plazo para la elaboración del biocombustible, debido a que su crecimiento es ascendente en comparación con la palma africana que se utiliza en el país. Además que la formación de la estructura de la especie microalgal en el sistema cerrado es entre periodos de 4 a

7 días beneficioso porque se obtiene la materia energética en tiempos muy cortos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Erica Hidalgo Lopez. El mundo, economía & negocios. (citado: 15 septiembre 2013) [en línea]. <http://www.elmundo.com.ve/noticias/economia/energia/en-2040-el-carbon-seguira-como-segundo-combustible.aspx>.
- [2] Unidad de Planeamiento Minero Energético "Cadena del petróleo 2013" República de Colombia. (citado: 23 marzo 2014) [en línea] http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/news/3086/files/cadena_del_petroleo_2013.pdf.
- [3] Ecopetrol (citado .23 de marzo 2014), [en línea], <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/R-evistaInnova5ed/capsulas.htm>
- [4] Asociación de parques científicos y tecnología de España (citado .23 de marzo 2014), [en línea] <http://www.apte.org/es/noticia-innovacion136.cfm>
- [5] Informador (citado .23 de marzo 2014), [en línea], <http://www.informador.com.mx/tecnologia/2013/448040/6/centro-conacyt-produce-biodiesel-con-microalgas.htm>
- [6] Tzovenis y col, Optimization of T-ISO biomass rich in essential fatty acids: I. Effects of different light regimes on growth and biomass production., 2000-2003, pp.203-222.
- [7] A. Richmond, "Algal Nutrition. In: Handbook on microalgal culture, biotechnology and applied phycology," *Blackwell Sci*, vol. 1, pp. 97-115, 2004.
- [8] Luong-van T, Lambrinidis G, Parry, D. Renaud S, "Effect of temperature on growth, chemical composition and fatty acid composition of tropical Australian microalgae grown in batch cultures.," *Aquaculture*, pp. 195-214, 2002.
- [9] Chisti Y, "Biodiesel from microalgae," *Biotechnol Advances*, vol. 25, no. 3, pp. 294-306, 2007.
- [10] T, Caetano, N. y Martins, A. Mata, "Microalgae for biodiesel production and other

applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 217-232, 2010.

[11] A. Richmond, "Algal Nutrition. In: Handbook on microalgal culture, biotechnology and applied phycology," *blackWellSci*, vol. 1, pp. 97-115, 2004.

[12] A. Garzón, L. Gonzalez, A. Guzmán, A. Kafarov, V. Moreno. Núñez, V. Plata, G. Velásquez Barajas, *Bioprospección de microalgas colombianas para la producción de biodiesel*, ISBN 9789588536144, pp. 44, Ed. Bogota, 2010.

[13] D. Y. C., Wu, X., Leung, M. K. H., Leung, "A review on biodiesel production using catalyzed transesterificación." *Applied Energy*. vol. 87, no. 4, pp. 1083-1095, 2010.

[14] J. Zhang, S. Chen, R. Yang, Y. Yan, Biodiesel production from vegetable oil using heterogenous acid and alkali catalyst, *Fuel*, vol. 89 pp 2939-2944, 2010.

[15] *Gran enciclopedia ilustrada edit. Círculo de lectores*, vol. 12, pp. 3930. ISBN 958-28-0634-6.

[16] Royal Society of Chemistry. (Citado: 6 de Octubre 2013) [En línea] www.chemspider.com/.

[17] András Erdőhelyi László Guzzi, "Catalysis for alternative energy generation." Springer, pp. 241 -242, Abril 2012.

[18] Adrián. Bula, Antonio y Sanjuán, Homero. Ávila, "Cinética de la transesterificación de la oleína de palma africana con etanol." *Interciencia*, vol. 33, no. 3, pp. 232-236, 2008.

[19] T, Caetano, N. y Martins, A. Mata, "Microalgae for biodiesel production and other applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 217-232, 2010.

[20] Falk S, Trick CG, Huner NPA Maxwell DP, "Growth at low temperature mimics high-light acclimation in *Chlorella vulgaris*." *Plant Physiol*, vol. 105, pp. 535–543, 1994.

[21] Zelitch Israel, "photosynthesis, photorespiration and plant productivity,"

Academic press, vol. 177, no. 4050, pp. 348, 1971.

[22] Juan Correa , Karen Villamizar "Modelamiento de la cinetica de la transesterificación en fase homogénea del aceite de microalga" *Universidad Industrial de Santander* 2011.

[23] Zhu D Nouredini H, "Kinetics of transesterification of soybean oil," *Oil Chemistry Society*, vol. 74, pp. 1457-1463, 1997.

[24] Pryde E, Mounts T Freedman B, "Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils," *Chemistry Society*, vol. 61, pp. 1638-1643, 1984.

