

Evaluación preliminar del potencial de la biomasa algal producida en efluentes piscícolas

Lyda Marcela Chacón Figueroa

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Químico

Director

Crisóstomo Barajas Ferreira

M. Sc. Ingeniería Química

Codirector

Janet Bibiana García Martínez

Estudiante de Doctorado en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga

2019

Contenido

	Pág.
Introducción.....	11
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos	14
2. Marco Teórico	15
2.1 Microalgas	15
2.2 Biorremediación	15
2.3 Electroflotación	16
2.4 Floculación química	16
3. Metodología.....	17
3.1 Producción de microalgas en efluente	17
3.1.1 Cuantificación de la biomasa.....	19
3.2 Separación de la biomasa algal producida del medio de cultivo	19
3.2.1 Eficiencia de separación por electroflotación.....	19
3.2.2 Eficiencia de separación por floculación química.....	21
3.2.3 Biomasa microalgal no recuperada.....	23
3.3 Evaluación Económica y Energética de los métodos de separación	23
3.4 Potencial uso de la biomasa algal producida	23
4. Resultados y discusión.....	24
4.1 Crecimiento biomasa	24
4.2 Separación de la biomasa algal producida del medio de cultivo	25
4.2.1 Eficiencia de separación por electroflotación.....	25
4.2.2 Eficiencia de separación por floculación química	27
4.2.3 Biomasa microalgal no recuperada.....	30
4.3 Evaluación económica y energética	31
4.4 Potencial uso de la biomasa algal	32
5. Conclusiones.....	35
6. Recomendaciones	36

Referencias Bibliográficas.....	37
Anexos	41

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Componentes medio Bold Basal Modificado.....	18
Tabla 2 Variables para el diseño de experimentos	19
Tabla 3 Diseño experimental electroflotación.....	20
Tabla 4 Variables del diseño de experimentos para la floculación química	22
Tabla 5 Diseño de experimentos para la Floculación química	22
Tabla 6 Condiciones óptimas para electroflotación	27
Tabla 7 Condiciones óptimas Floculación química.....	30
Tabla 8 Resultados biomasa microalgal no recuperada.....	30
Tabla 9 Resultados consumo de energía.....	31
Tabla 10 Valores para el cálculo del gasto económico en cada uno de los métodos	32

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Metodología	17
Figura 2. Comportamiento del crecimiento de la biomasa durante 30 días	24
Figura 3 Eficiencia de concentración para electroflotación (a) Diagrama de Pareto (b) Superficie de respuesta.....	26
Figura 4 Eficiencia de concentración para floculación química con ajuste de pH antes de agregar el floculante (a) Diagrama de Pareto (b) Superficie de respuesta	28
Figura 5 Eficiencia de separación para floculación química con ajuste de pH luego de agregar el floculante (a) Diagrama de Pareto (b) Superficie de respuesta	29

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Datos crecimiento biomasa en los 3 reactores.....	42
Apéndice B. Condiciones a 250 ml y 2L y biomasa no recuperada para electroflotación	43
Apéndice C. Condiciones a 250 ml y 2L y biomasa microagal no recuperada para Floculación química	44
Apéndice D. Resultados evaluación económica y energética Electroflotación.....	45
Apéndice E. Resultados evaluación económica y energética Floculación química	46

Resumen

Título: EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL POTENCIAL DE LA BIOMASA ALGAL PRODUCIDA EN EFLUENTES PISCÍCOLAS*

Autor: Lyda Marcela Chacón Figueroa**

Palabras claves: Biorremediación, efluentes piscícolas, electroflotación, floculación química.

Contenido: La generación de aguas residuales provenientes de la piscicultura ha sido un problema medio ambiental debido a que es una de las actividades económicas de mayor crecimiento. Por lo anterior se han estudiado posibles soluciones para mitigar el impacto ambiental a través de procesos de biorremediación que incluyen el uso de microorganismos que consumen la materia orgánica presente en estos efluentes piscícolas y de esta manera se puede evitar la contaminación de cuerpos de agua limpio. En este trabajo se evaluó el potencial que tiene la biomasa producida por la microalga *Scenedesmus sp* en el proceso de biorremediación, para esto se dieron las condiciones necesarias de luz y nutrientes en los 3 reactores que se usaron con medio estéril, no estéril y medio de control. Además, la biomasa producida luego de 30 días se separó del medio de cultivo a través de dos métodos, el primero electroflotación con el cual se obtuvo una eficiencia de 96% y 0,08 g/L de biomasa seca recuperada en un volumen 2 L usando 11 electrodos de aluminio y 100 rpm como velocidad de agitación, el segundo floculación química usando 200 mg/L de Policloruro de aluminio (PAC) como floculante, con un valor de pH 12 en un volumen de 2 L se obtuvo un valor de eficiencia de separación de 88% con 0,01 g/L de biomasa recuperada resultados que indican que este método no es eficiente para la separación de la biomasa.

* Proyecto de grado.

** Facultad de ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química UIS.

Abstract

Title: PRELIMINARY EVALUATION OF THE POTENTIAL OF ALGAL BIOMASA PRODUCED IN FISH FARMS EFFLUENTS*

Author: Lyda Marcela Chacón Figueroa**

Key words: Bioremediation, fish effluents, electrofloatation, chemical flocculation.

Content: The generation of wastewater from fish farming has been an environmental problem because it is one of the most growing economic activities. Possible solutions to mitigate environmental impact through bioremediation processes including the use of microorganisms that consume the organic matter present in these fish effluents have therefore been studied and in this way it can be avoided contamination of clean water bodies. In this work the potential of the biomass produced by the microalgae *Scenedesmus* sp in the bioremediation process was evaluated, for this was given the necessary conditions of light and nutrients in the 3 reactors that were used with sterile, non-sterile medium. In addition, the biomass produced after 30 days was separated from the culture medium by two methods, the first electrofloatation with which an efficiency of 96% and 0.08 g/L of dry biomass recovered in a volume 2 L was obtained using 11 aluminum electrodes and 100 rpm as stirring speed, the second chemical flocculation using 200 mg/L of Aluminum Polychloride (PAC) as a flocculant, with a pH 12 value at a volume of 2 L obtained a separation efficiency value of 88% with 0.01 g/L of recovered biomass results indicating that the second method is not efficient for biomass separation.

*Proyecto de grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química UIS.

Introducción

La acuicultura es una de las actividades de cría de peces, moluscos y algas en agua dulce o salada con más rápido crecimiento, según la Organización de las Naciones Unidas (ONU) para la alimentación y la Agricultura, este sector alcanzó en el 2016 el 47% del total de la producción pesquera en el mundo; en términos de producción, fueron cerca de 80 millones de toneladas (FAO, 2018). Además, se estima que la pesca (definida como la obtención de peces, moluscos y crustáceos) y la acuicultura en Colombia, como un país tropical, agrícola, con temperaturas estables y cantidad de cuencas hidrográficas se desarrollan con un buen ritmo de crecimiento (Merino et al., 2014), siendo elevada la producción en los departamentos del Huila (46%) y Meta (13%) (“Ministerio de Agricultura y desarrollo rural,” 2018). Sin embargo, esta actividad económica tiene un impacto ambiental de alto riesgo, debido a la generación de aguas residuales que contienen contaminantes como compuestos nitrogenados, fósforo y carbono orgánico; lo cual, sin un tratamiento adecuado al verterlas a cuerpos de agua limpia, origina un proceso denominado eutrofización, caracterizado por la interrupción del equilibrio en el ecosistema acuático, impidiendo que la luz solar llegue a las capas inferiores, ocasionando muertes de fauna acuática (Ansari, Singh, Guldhe, & Bux, 2017).

En este orden de ideas, con el fin de mitigar el riesgo ambiental, se han desarrollado diferentes métodos químicos y biológicos para el tratamiento y reutilización de estas aguas residuales; algunos de ellos son desnitrificación, precipitación química y biofiltros sumergidos. Así mismo, aunque dichos métodos son efectivos, producen desechos químicos o lodos como subproductos que generalmente se consideran altamente contaminantes (S. Gao et al., 2010). Por lo tanto, surge

la necesidad de indagar otras técnicas emergentes como la biorremediación, mostrando posibilidades de ser respetuosa con el medio ambiente, rentable y sustentable (Guo, Liu, Guo, Yan, & Mu, 2013).

La biorremediación es un proceso donde se usan microorganismos como hongos, bacterias y microalgas para la recuperación de ambientes alterados por contaminantes. Las microalgas emplean luz solar, material inorgánico y dióxido de carbono para la generación de biomasa; dichos compuestos están presentes en las aguas residuales de acuicultura, lo cual hace a las microalgas una alternativa para su tratamiento. La biomasa que resulta de este proceso puede ser utilizada como materia prima para la producción de biocombustibles como biodiesel, biohidrógeno, bioetanol y biometano, y alimento para animales (Ansari et al., 2017). Sin embargo, para obtener estos productos, la biomasa debe ser separada del medio de cultivo a través de etapas de separación como la floculación química, centrifugación, filtración o sedimentación (Xu et al., 2010), que pueden ser usados en conjunto o individualmente.

La floculación química es un proceso que se puede aplicar en el tratamiento de aguas residuales para eliminar la materia orgánica natural presente, por medio de químicos o floculantes se aglutina esta materia formando así moléculas de mayor tamaño llamadas “flóculos” que posteriormente son removidas. Sin embargo, debido a que este método no es muy usado para la producción comercial de algas, dada la toxicidad que tienen algunos de los floculantes (Chatsungnoen & Chisti, 2019), se analiza el uso de las variantes como la biofloculación, autofloculación y electrofloculación. Este último es un proceso físico/químico que usa los cationes metálicos generados in situ por un ánodo de sacrificio para aglomerar la biomasa y posteriormente recuperarla (Chatsungnoen & Chisti, 2019). Las ventajas que ofrece este método incluyen que es sencillo de operar y que, en el costo del procesamiento, incluida la energía eléctrica, la disolución

de aluminio y el costo de depreciación del capital, se estima en \$ 0.19 por kg de biomasa de micro algas recuperada y puede tener mejores resultados (Lee, Lewis, & Ashman, 2013).

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este proyecto es evaluar el potencial de los métodos de separación de la biomasa algal generada a partir de *Scenedesmus* sp, cultivada en aguas residuales de la acuicultura y obtenidas del sistema experimental de la Universidad Francisco de Paula Santander, utilizando como métodos la floculación química y la electroflotación. Igualmente, comparar la calidad de esta biomasa producida frente al método de separación, y además revisar el potencial energético y económico que estos pueden tener al definir las condiciones necesarias para que el proceso pueda ser escalado.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar preliminarmente el potencial de la biomasa algal producida en efluentes piscícolas.

1.2 Objetivos Específicos

- Comparar la eficiencia de separación por el método de electroflotación y floculación química de la biomasa de algas producidas.
- Realizar una evaluación económica y energética de los dos métodos de separación de acuerdo con los resultados obtenidos.
- Determinar el potencial/uso de la biomasa algal producción (biogás, bioetanol, biodiesel).

2. Marco Teórico

2.1 Microalgas

Son microorganismos fotosintéticos eucarióticos que utilizan la luz del sol (Bleeke, Quante, Winckelmann, & Klöck, 2015), nutrientes inorgánicos y dióxido de carbono ambiental para generar biomasa (Ansari et al., 2017). Estos microorganismos poseen clorofila y pueden ser encontrados en diferentes hábitats marinos o en corrientes de agua fresca (Brasil, de Siqueira, Salum, Zanette, & Spier, 2017), debido a que se adaptan a diferentes condiciones ambientales lo cual las hace importantes en el proceso de biorremediación (Baierle et al., 2015).

2.2 Biorremediación

Es un proceso que permite el uso de microorganismos, hongos, plantas o enzimas para descontaminar un ecosistema. Este proceso aplicado a la piscicultura, se refiere a la remoción de nutrientes como nitrógeno y fósforo de los efluentes de estas aguas residuales por medio del uso de microalgas que transforman estas sustancias inorgánicas en otras orgánicas tales como proteínas, carbohidratos y lípidos (F. Gao et al., 2016).

2.3 Electroflotación

Este método de separación se basa en el uso un ánodo de sacrificio de metal que es oxidado por medio de corrientes eléctricas aportando así los cationes metálicos necesarios para la formación de flóculos (Lee et al., 2013). Estos iones son inmediatamente hidrolizados, por lo tanto, resulta en una neutralización de cargas de los cationes metálicos; además las burbujas de oxígeno e hidrógeno producidas en el electrodo son atrapadas por los flóculos lo cual las lleva a la superficie causando la separación por flotación (Chatsungnoen & Chisti, 2019).

2.4 Floculación química

Es el proceso mediante el cual un soluto o agente floculante es disuelto en una solución y por medio de agitación forma agregados o flóculos. Este floculante debe ser económico, no tóxico y efectivo a baja concentración. En las microalgas la floculación química se da en varios mecanismos que parten de la neutralización de cargas de las células formando flóculos así hasta llegar a la precipitación masiva de los estos (Mubarak, Shaija, & Suchithra, 2019).

3. Metodología

En la Figura 1 se muestra la metodología desarrollada en este trabajo de investigación y a continuación se detalla cada una de las fases.

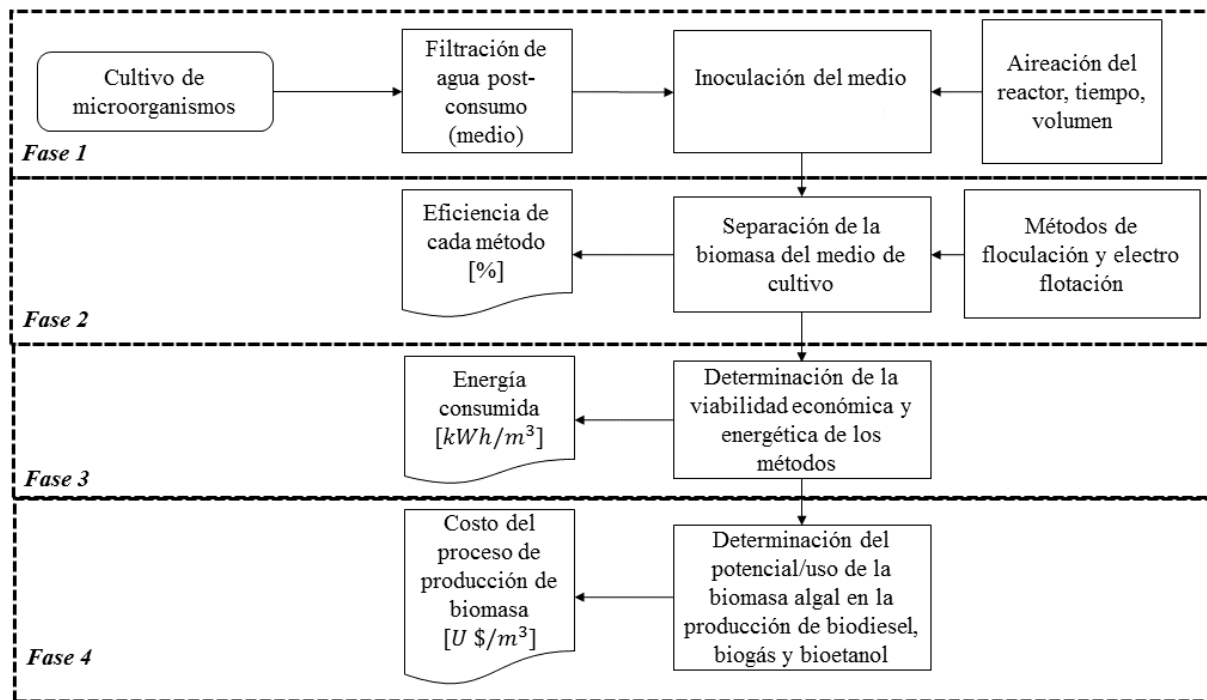


Figura 1 Metodología

3.1 Producción de microalgas en efluente

La cepa *Scenedesmus* sp se cultivó para el desarrollo de este trabajo de investigación en efluente de piscicultura obtenido del sistema experimental acuícola de la Universidad Francisco de Paula Santander localizado en el Centro experimental Campos Elíseos (Cúcuta, Norte de

Santander). Para el cultivo se extrajo 1 L de agua del sistema experimental, el cual se filtró empleando papel de filtro cuantitativo con el fin de remover partículas suspendidas. Posteriormente 225 mL de medio se inocularon con 25 mL de la cepa y se mantuvieron en 3 reactores de vidrio de 500 mL acoplados a un sistema de aireación de 0,6 vvm y en un ciclo de luz:oscuridad de 12:12 horas. Para evaluar el crecimiento del alga, de los reactores usados uno de ellos contenía medio de cultivo estéril, otro no estéril y el tercer reactor fue usado como medio control con medio Bold Basal Modificado (BBM) según lo descrito por (Andersen, 2005) en la Tabla 1. La esterilización del medio se realizó a 120 psi durante 30 minutos. Luego para obtener mayor concentración de microalgas el proceso se llevó a reactores de vidrio con un volumen de cultivo de 2200 mL de los cuales 200 mL correspondía al inóculo y 2000 mL a medio de cultivo.

Tabla 1

Componentes medio Bold Basal Modificado

Componente	Solución Stock (g*L ⁻¹ dH ₂ O)	Cantidad Utilizada (mL*L de medio)	Concentración final en el medio (M)
<i>Macronutrientes</i>			
<i>NaNO₃</i>	25.0 g	10 mL	2.94 X 10 ⁻³
<i>MgSO₄.7H₂O</i>	7.50 g	10 mL	3.04 X10 ⁻⁴
<i>NaCl</i>	2.50 g	10 mL	4.28 X 10 ⁻⁴
<i>K₂HPO₄</i>	7.50 g	10 mL	4.31 X 10 ⁻⁴
<i>KH₂PO₄</i>	17.50 g	10 mL	1.29 X 10 ⁻³
<i>CaCl₂.2H₂O</i>	2.50 g	10 mL	1.70 X 10 ⁻⁴
<i>Micronutrientes</i>			
<i>Solución de metales</i>		1 mL	
<i>ZnSO₄.7H₂O</i>	8.82 g		3.07 X 10 ⁻⁵
<i>MnCl₂.4H₂O</i>	1.44 g		7.28 X 10 ⁻⁶
<i>MoO₃</i>	0.71 g		4.93 X 10 ⁻⁶
<i>CuSO₄.5H₂O</i>	1.57 g		6.29 X 10 ⁻⁶
<i>Co(NO₃)₂.6H₂O</i>	0.49 g		1.68 X 10 ⁻⁶
<i>Solución de Boro</i>		1 mL	
<i>H₃BO₃</i>	11.42 g		1.85 X 10 ⁻⁴
<i>Solución alcalina</i>		1 mL	
<i>EDTA</i>	50.0 g		1.71 X 10 ⁻⁴
<i>KOH</i>	31.0 g		5.53 X 10 ⁻⁴
<i>Solución de Hierro</i>		1 mL	
<i>FeSO₄.7H₂O</i>	4.98 g		1.79 X 10 ⁻⁵
<i>H₂SO₄ (conc)</i>	1.0 mL		

3.1.1 Cuantificación de la biomasa. Para controlar el crecimiento de la biomasa, se tomaron una vez cada 10 días durante 30 días dos muestras de 3 mL de medio de cultivo, los cuales se filtraron utilizando filtros Whatman GF/C pre-combustionados durante 1 hora a 100°C. Una vez terminado el proceso los filtros fueron llevados a horno durante 12 hora a 100°C seguido por 12 horas en desecador hasta alcanzar peso constante (Borowitzka & Moheimani, 2013).

3.2 Separación de la biomasa algal producida del medio de cultivo

3.2.1 Eficiencia de separación por electroflotación. Para determinar la interacción entre la cantidad de electrodos y la velocidad de agitación se empleó un diseño de experimentos de tipo Central no factorial 2^3 (2 factores, 3 niveles) con superficie de respuesta empleando el software STATISTICA 7.0 (statsoft, 2004), En las tabla 2, se muestran los factores anteriormente mencionados.

Tabla 2
Variables para el diseño de experimentos

	Factor	
	Número de electrodos sumergidos	Agitación [rpm]
Nivel	2	100
	4	150
	6	200

Tabla 3*Diseño experimental electroflotación*

Número de experimento	Número de Electrodos	Agitación [rpm]
4	6	200
1	2	100
7	7	150
8	4	80
10 (c)	4	150
2	2	200
9	4	220
6	1	150
3	6	100
5 (c)	4	150

Cada uno de los experimentos se realizó empleando 200 ml de alga cultivada previamente, empleando Erlenmeyer de 300 ml. Los electrodos eran de aluminio con dimensiones de 15 cm de largo y 4 cm de ancho y se usaron una sola vez por experimento. La agitación del medio se logró empleando un agitador magnético construido a la medida del proyecto a partir de código libre Arduino®. Los electrodos fueron conectados a una fuente de corriente directa a 20 V y cada experimento tuvo una duración de 10 minutos. Una vez finalizado cada experimento, se tomaron 5 ml de muestra y se midió la densidad óptica en un espectrofotómetro UV-1800 de la marca MAPADA a una absorbancia de 550 nm, este procedimiento se realizó por triplicado. La eficiencia de cada experimento se obtuvo al reemplazar los valores obtenidos con la siguiente ecuación:

$$\%Eficiencia\ de\ concentración = \frac{DO_{inicial} - DO_{final}}{DO_{inicial}} * 100 \quad \text{Ecuación (1)}$$

Una vez obtenidas las condiciones que permiten mejorar la concentración de biomasa se escaló el proceso, pasando de 200 ml a 2000 ml. Para esto se utilizó un electro flotador con capacidad de 2 L en el cual se acoplaron los electrodos con dimensiones de 25 cm de largo por 13 cm de ancho

y así se concentró la biomasa. Al terminar el experimento se tomaron tres muestras para determinar la eficiencia mediante la densidad óptica a través de la ecuación (1).

3.2.2 Eficiencia de separación por floculación química. Se realizaron dos diseños de experimentos tipo Central no factorial 2^3 (2 factores, 3 niveles) con superficie de respuesta empleando el software STATISTICA 7.0 (statsoft, 2004) en los cuales se tomó como factores el pH (4, 7 y 10) y concentración de floculante (50, 100 y 150 mg/L) como se muestra en las tablas 4 y 5 con los cuales se determinaron las mejores condiciones para la concentración de la biomasa al estabilizar el pH antes o después de agregar el floculante.

Se empleó Cloruro de Polialuminio como agente floculante adicionando alícuotas en mg/L de acuerdo con el diseño experimental, a muestras de 200 mL. Los dos experimentos fueron realizados al mismo tiempo. Se utilizó ácido clorhídrico (HCl) 1M e hidróxido de sodio (NaOH) 1M para ajustar el pH del medio que oscila entre 6,22 y 7,25. El pH se midió con el equipo pH Tester HI98100 Checker®Plus de la marca HANNA Instruments.

Para asegurar la hidrólisis del floculante y formación de agregados cada uno de los experimentos se agitó durante 2 minutos a 500 rpm seguido por un mezclado más lento durante 15 minutos a 100 rpm, (Garzon-Sanabria, Davis, & Nikolov, 2012). Terminada la etapa anterior, se tomaron muestras de 5ml para medir densidad óptica a 550nm en un espectrofotómetro UV-1800 de la marca MAPADA en intervalos de 1 hora. Para determinar la eficiencia de concentración se siguió la ecuación (1).

Tabla 4

Variables del diseño de experimentos para la floculación química

	Factor	
	pH	Concentración de Floculante [mg/L]
Nivel	4	50
	7	100
	10	150

Tabla 5

Diseño de experimentos para la Floculación química

Número de experimento	pH	Concentración de Floculante [mg/L]
9	7	170
1	4	50
6	3	100
10 (c)	7	100
5 (c)	7	100
8	7	30
3	10	50
2	4	150
7	11	100
4	10	150

Después de encontrar las mejores condiciones para la concentración de biomasa se escaló el proceso pasando de 200 ml a 2000 ml para esto se usaron las mejores condiciones que el diseño de experimentos, discutidas en la sección 4.2.2 Eficiencia de separación por floculación química.

3.2.3 Biomasa microalgal no recuperada. Para cada método luego llevar proceso a un volumen de 2000 mL, se tomaron 3 muestras de 10 mL, las cuales se filtraron usando filtros Whatman GF/C pre-combustionados durante 1 hora a 100°C. Luego, con el fin de obtener el peso de la biomasa seca, los filtros fueron llevados a un horno durante 1 hora a 100°C seguido por 12 horas en desecador. (Borowitzka & Moheimani, 2013). Por último, los filtros secos con la biomasa se pesaron y se obtuvo el valor de la biomasa recuperada usando la ecuación (2):

$$Biomasa\ no\ recuperada\left[\frac{g}{L}\right] = Biomasa\ inicial - Biomasa\ final \quad \text{Ecuación (2)}$$

3.3 Evaluación Económica y Energética de los métodos de separación

El cálculo del gasto energético se hizo solamente para el experimento a 2 L para ambos métodos se utilizó la potencia de cada uno de los equipos y el tiempo de cada experimento, para el caso del electro flotador la potencia fue de 150 W/h con un tiempo de 10 min y para la placa de agitación la potencia fue de 625W/h con un tiempo de 17 min. Para el gasto económico se tuvo en cuenta el costo de 1 W/h, más los costos de los equipos y reactivos usados para cada uno de los métodos.

3.4 Potencial uso de la biomasa algal producida

Igual que en la fase anterior, se realizó una búsqueda bibliográfica para encontrar las características que la biomasa algal producida debía tener para ser usada en la producción de biocombustibles como biogás, biodiesel y bioetanol.

4. Resultados y discusión

4.1 Crecimiento biomasa

Para el crecimiento de la biomasa se dieron las condiciones necesarias de luz y nutrientes, las cuales permitieron mayor concentración de microalgas. En la Figura 2 se muestra el crecimiento de la biomasa en medio de piscicultura durante 30 días dentro de los reactores. Se evidencia que al día 30 el reactor con más biomasa fue el no estéril con un valor de 0,772 g/L comparado con el estéril que tuvo un valor de 0,383 g/L. Este hecho implica que la cepa consumió nutrientes como Nitrógeno, Carbono orgánico y Fósforo contenidos en efluente de piscicultura sin necesidad de agregar una fuente externa de estos macronutrientes, algo que reduce costos al momento de escalar el proceso.

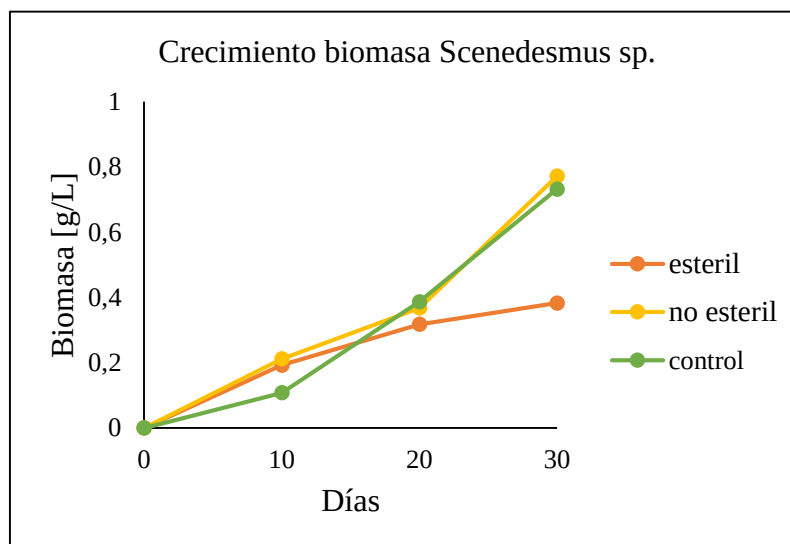


Figura 2. Comportamiento del crecimiento de la biomasa durante 30 días

4.2 Separación de la biomasa algal producida del medio de cultivo

4.2.1 Eficiencia de separación por electroflotación. De acuerdo con los resultados obtenidos Figura 3 (a)) el diagrama de Pareto representa las variables que interactúan en el proceso de electroflotación en función de la eficiencia de concentración. Este diagrama muestra una línea de referencia ($p=0,05$) la cual separa las variables y de esta forma determinar su significancia estadística; teniendo en cuenta lo anterior, los electrodos son la variable que más afecta el proceso de concentración de la biomasa algal.

De otro lado en la Figura 3 (b) se muestra la superficie de respuesta del diseño experimental, en esta es evidente que número de electrodos influyen en el proceso de electroflotación, para este caso la superficie arroja que pueden ser usados un número de 11 electrodos. Esta influencia se debe al tipo de material usado para los electrodos que puede ser hierro, aluminio, zinc y magnesio, sin embargo los ánodos de aluminio son los más eléctricamente eficientes en la desestabilización de la suspensión algal (Chatsungnoen & Chisti, 2019) y este material fue usado para la experimentación por lo tanto se comprobaría que los electrodos son la variable incidente en el proceso de electroflotación.

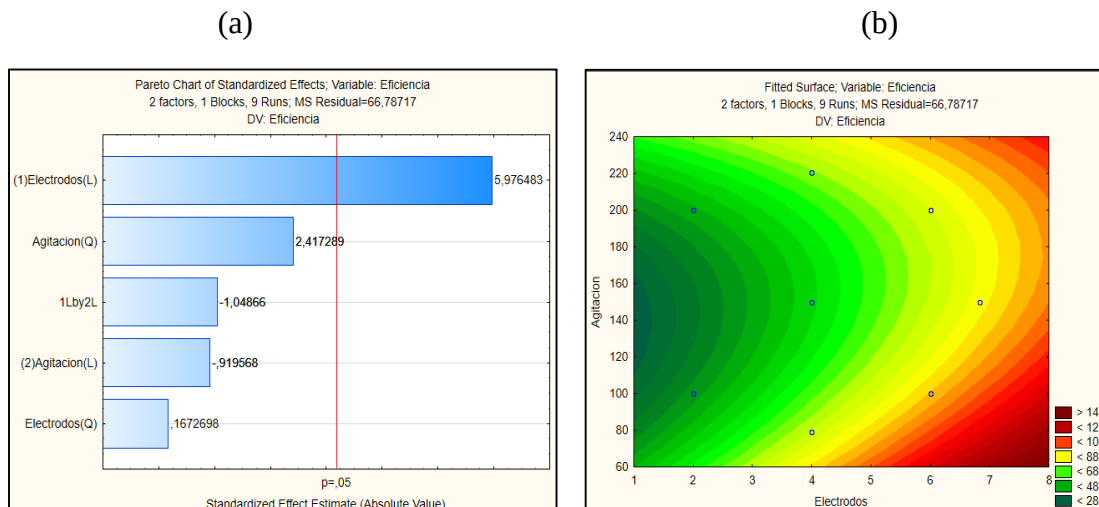


Figura 3 Eficiencia de concentración para electroflotación (a) Diagrama de Pareto (b) Superficie de respuesta

En cuanto a la agitación los resultados evidencian que esta es otra variable positivamente significativa en el proceso y concuerdan con lo dicho por (Lee et al., 2013) donde se manifiesta que la agitación genera el contacto entre las partículas cargadas para la formación de flóculos. Sin embargo, una agitación intensa es posible que genere la desagregación de los flóculos formados, obteniéndose un efecto contrario al deseado. Lo anterior es congruente con los resultados obtenidos donde se evidencia que cuando la agitación está por encima de 140 rpm es decir una agitación intensa, la eficiencia decae a valores entre 68 y 88% por lo tanto, la biomasa quede suspendida en el medio y se generan pérdidas.

Por otro lado, al analizar los resultados de la Figura 3 se pudo obtener la ecuación (3), que representa la relación entre la eficiencia de separación y las variables que la afectan (número de electrodos y agitación) con esta ecuación fue posible realizar los cálculos para las condiciones necesarias para escalar el proceso a un volumen de 2 L; la Tabla 6 muestra estas condiciones. Para este proceso se mantuvieron constantes las condiciones de tiempo y voltaje 10 min y 20V respectivamente. La eficiencia de separación obtenida bajo estos parámetros fue de 96% lo que

significa que la mayor parte de la biomasa inicial puede ser recuperada además este resultado concuerda con lo descrito por (Valero, Álvarez, Cancela, & Sánchez, 2015) donde se muestra que valores de eficiencia superiores a 90% se alcanzan cuando se usa un voltaje entre el rango de 10-20 V.

$$z = 81,359 + 15,350 * x + 0,191 * x^2 - 1,001 * y + 0,00378 * y - 0,04285 * x * y$$

Ecuación (3)

Tabla 6

Condiciones óptimas para electroflotación

Etiqueta	Variable	Valor
x	Número de electrodos	11
y	Agitación [rpm]	100
z	Eficiencia [%]	>100

4.2.2 Eficiencia de separación por floculación química. Para este método se evaluó el comportamiento de la eficiencia al ajustar el pH antes de agregar el agente floculante y luego de agregarlo. Para el primer caso, se muestra en la Figura 4 (a) el diagrama de Pareto, en donde se evidencia que el pH es la variable más influyente en el proceso de concentración de la biomasa.

En la Figura 4 (b) la superficie de respuesta muestra que el pH en rangos ácido o básico genera mayor eficiencia, aunque el pH es función del tipo de floculante usado lo cual implica que se puede afectar la carga superficial de las células. El pH también influye en la unión entre el floculante y las células lo cual es importante al momento de eliminar la materia orgánica (Yang et al., 2019).

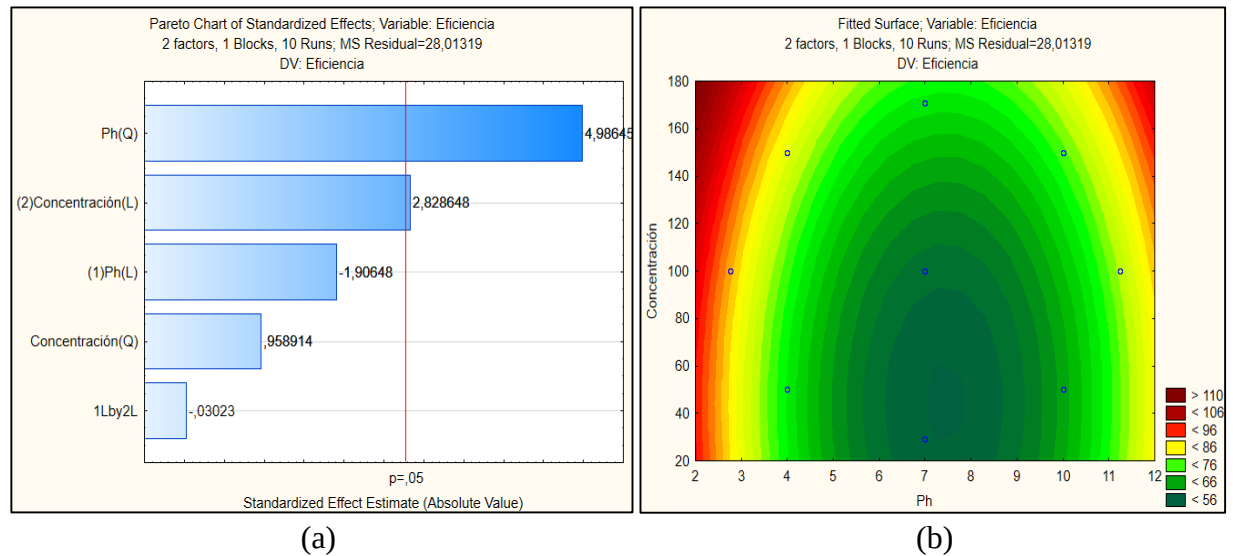


Figura 4 Eficiencia de concentración para floculación química con ajuste de pH antes de agregar el floculante (a) Diagrama de Pareto (b) Superficie de respuesta

Para el ajuste del pH luego de agregar el floculante se tiene por el diagrama de Pareto mostrado en la Figura 5 (a), que la concentración del floculante y el pH no son variables estadísticamente significativas, sin embargo la concentración es una variable de mayor importancia respecto al pH, algo que se confirma en la superficie de respuesta mostrada en la Figura 6 (b) esto es debido a que el pH afecta la estabilidad de la suspensión y esto interfiere con la floculación si se agrega después el floculante, es decir, se invierte la carga de las células dando como resultado flóculos con tamaños muy pequeños difíciles de sedimentar por lo tanto la cantidad de floculante resultante en el medio es elevada y se generan pérdidas de biomasa (Baskar Gurunathan, 2018).

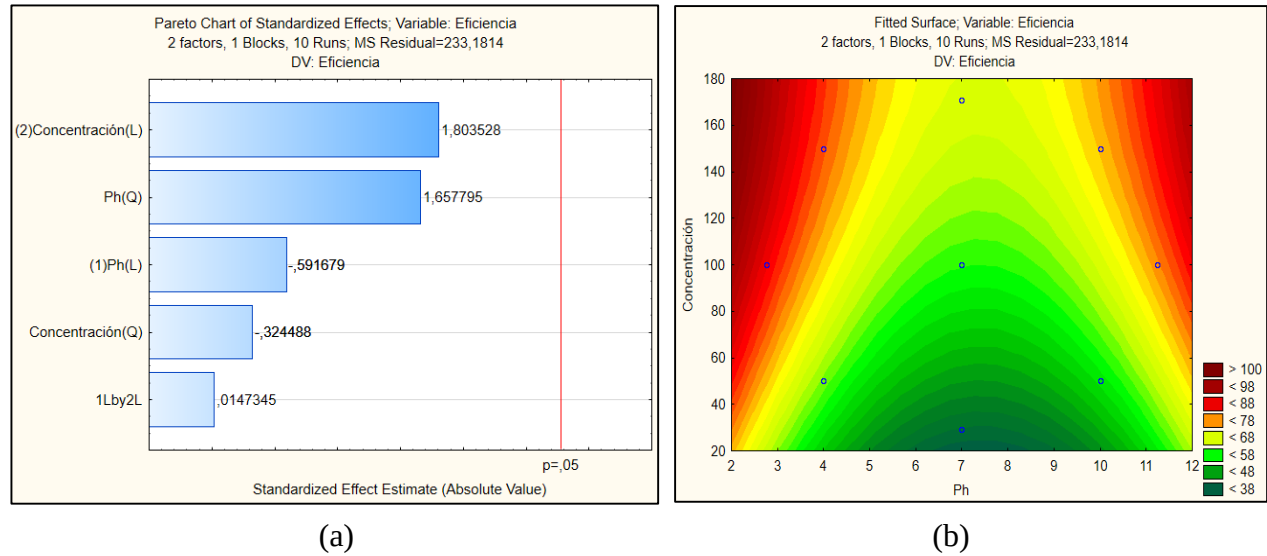


Figura 5 Eficiencia de separación para floculación química con ajuste de pH luego de agregar el floculante
 (a) Diagrama de Pareto (b) Superficie de respuesta

Por otro lado, en el análisis de los resultados obtenidos se tuvo en cuenta las ecuaciones (4) y (5) que representan las superficies de respuesta como un modelo matemático y estadístico cuadrático y junto con lo mostrado en las Figura 4 y Figura 5 se encontraron las condiciones óptimas de pH y concentración de floculante las cuales se resumen en la Tabla 7. Estos valores se encuentran dentro del rango óptimo propuesto por (Pilca, 2012) el cual menciona que la concentración de (PAC) puede agregarse entre 50-500 mg/L y su efectividad se logra en un amplio rango de pH.

$$z = 132,954 - 20,337x + 1,371x^2 - 0,0803y + 0,000949y^2 - 0,000533xy \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$z = 101,856 - 19,557x + 1,315x^2 + 0,374y - 0,000926y^2 + 0,00075xy \quad \text{Ecuación (5)}$$

Tabla 7
Condiciones óptimas Floculación química

Etiqueta	Variable	Valor
x	pH	12
y	Concentración de floculante[mg/L]	200
z	Eficiencia [%]	>100

4.2.3 Biomasa microalgal no recuperada. El análisis de este parámetro se realiza para ambos métodos con el fin de cuantificar la biomasa seca obtenida luego del proceso de separación del medio de cultivo. En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos y se puede decir que en el medio después de la separación, para la floculación química queda cerca del 95% de la biomasa respecto a la electroflotación en la cual queda cerca del 53% este resultado comprueba que la electroflotación es más eficiente pues retira la mayor parte de la biomasa algal producida.

Tabla 8
Resultados biomasa microalgal no recuperada

Electroflotación		Floculación química	
Biomasa seca inicial	0,15	Biomasa seca inicial	0,23
[g/L]		[g/L]	
Biomasa seca final	0,07	Biomasa seca final	0,01
[g/L]		[g/L]	
Biomasa no recuperada [g/L]	0,08	Biomasa no recuperada [g/L]	0,22

4.3 Evaluación económica y energética

En cuanto al gasto energético los resultados obtenidos se relacionan para ambos métodos en la Tabla 9. De los cuales se puede decir que la floculación química demanda menor consumo de energía algo que contrasta con la investigación de (Fasaei, Bitter, Slegers, & van Boxtel, 2018) donde describe la floculación química como un método con bajo consumo energético y bajo costo de equipos, sin embargo presenta dificultades recuperar el floculante. De otro lado, la electroflotación requiere de un alto consumo energético debido a que es necesario incrementar la tasa de oxidación del ánodo de sacrificio, por lo tanto, se debe realizar el proceso a valores elevados de voltaje (Chatsungnoen & Chisti, 2019). Sin embargo, esta relación permite reducir el tiempo de operación y logra mayor eficiencia de separación.

Tabla 9

Resultados consumo de energía

Método	Potencia equipo [kW/h]	Tiempo experimentación [min]	Consumo de energía [kW/h]	Eficiencia de separación [%]
Electroflotación	0,15	10	1,5	96
Floculación Química	0,625	17	0,177	89

Para el gasto económico, se resumen en la Tabla 10 los parámetros tenidos en cuenta para cada método de separación. Se evidencia que la floculación química en un análisis económico aproximado es viable respecto a la electroflotación, sin embargo, para obtener una biomasa de mejor calidad no es recomendada porque contamina la biomasa, además tomando el valor de eficiencia obtenida es 10% menor en comparación con la electroflotación, añadiendo que la

biomasa no recuperada en la floculación química es mayor lo cual confirma que el proceso aunque es viable económica y energéticamente es ineficiente para la separación de biomasa.

Tabla 10

Valores para el cálculo del gasto económico en cada uno de los métodos

Electroflotación		Floculación química	
Costo aluminio [\$/m ²]	26812, 5	Costo reactivos usados [\$/L]	32,510
Costo energético [\$ kW/h]	792,27	Costo energético [\$ kW/h]	93,503
Salario personal calificado [\$ /h]	20702	Salario personal calificado [\$ /h]	20702
Total \$	48307	Total \$	20702

4.4 Potencial uso de la biomasa algal

La biomasa producida por microalgas contiene compuestos como carbohidratos, proteínas y lípidos (Lara & Graciano, 2019) además elementos menores como ácidos grasos, minerales, sales y pigmentos (Wang, Xiong, Hui, & Zeng, 2012) los cuales son producidos a través de las diferentes vías metabólicas de las microalgas; estas vías pueden ser cambiadas bajo ciertas condiciones de luz y nutrientes permitiendo el control de la producción de biomasa (Shandilya & Pattarkine, 2019). Esta biomasa puede ser usada en la fabricación de suplementos de alimentación animal, formulaciones cosméticas, en la restitución de suelos como abono orgánico, en la producción de enzimas y principalmente como materia prima en la producción de biocombustibles tales como biodiesel, biohidrógeno, biogás, bioetanol entre otros (Brasil et al., 2017). Esta última es una alternativa económica y ecológica debido a que la biomasa para la obtención de estos productos se recupera del tratamiento de aguas residuales, medio del cual las microalgas obtienen

los macronutrientes que necesitan para su crecimiento (Nitrógeno, Carbono y Fósforo), descontaminando así fuentes hídricas. Además, en esta industria las microalgas ofrecen ventajas como mantener valores de calentamiento y un contenido de aceite entre 20-50 % (Ansari et al., 2019). Los procesos que se destacan en la elaboración de biocombustibles son el cultivo, la cosecha y la extracción de aceite de las microalgas; entre estos para la obtención del biodiesel la cosecha y la extracción de aceite requiere de altos niveles de energía involucrando el 60% del costo de producción total (Mubarak et al., 2019), aunque es de resaltar que este biocombustible conserva un impacto ambiental menor que la producción de diésel por medio de combustibles fósiles (Ansari et al., 2019). En lo que respecta a la generación de bioetanol es el biocombustible más producido a nivel mundial con un 70% de la producción mundial entre Estados Unidos y Brasil (Abud & Silva, 2019) y se divide en cuatro generaciones diferentes para su obtención, siendo la tercera (la biomasa de micro/macro algas) superior a las demás dada su capacidad de crecimiento rápido, menor necesidad de agua y la no disposición de tierras para su cultivo (De Farias Silva, Grisa, Sforza, Rocca, & Bertucco, 2016). En cuanto a la producción de biogás puede darse por la simbiosis entre microalgas y bacterias, esto permite la eliminación de materia orgánica y nutrientes de los efluentes de aguas residuales dado que las microalgas liberan oxígeno de la fotosíntesis y este es captado por las bacterias heterotróficas para biodegradar la materia orgánica. De esta manera, las microalgas pueden co-digerirse con lodos primarios provenientes del tratamiento de aguas y así aumentar la relación C/N reduciendo el riesgo de toxicidad por amoníaco, estrategia que equilibra el contenido de humedad y produce además del biogás un digestato estabilizado que puede utilizarse como biofertilizante (Solé-bundó, Garfí, Matamoros, & Ferrer, 2019). Ahora bien, como se mencionó anteriormente para la producción de biocombustibles es necesario cosechar o recuperar la biomasa del medio de cultivo en el que se

encuentra, para esto se han usado diferentes métodos de separación y en este trabajo de investigación se trataron dos, floculación química y electroflotación usando la cepa *Scenedesmus* sp. Para el primer caso las principales características son su bajo costo de operación y tamaños de partícula más grande que permiten una mayor sedimentación por gravedad, sin embargo según (Mubarak et al., 2019) el tipo de floculante usado afecta la calidad de los lípidos extraídos generando así un biocombustible menos estable; en el caso de los floculantes inorgánicos como el PAC aunque forma flóculos rápidamente contamina la biomasa recuperada, y eliminar el exceso de productos químicos resulta costoso para fines comerciales (Show, Yan, & Lee, 2019); el caso contrario ocurre en la electroflotación en donde no se introducen iones innecesarios como SO_4 o Cl^- a la biomasa por lo tanto no se presenta contaminación, además el agua residual después de la separación de biomasa queda con menos olor, color y libre partículas suspendidas contaminantes (Darío et al., 2008). Sin embargo adicional a las ventajas y desventajas que ofrecen los diferentes métodos de separación de la biomasa producida por microalgas, es de tener en cuenta las características de la especie usada para la producción de biocombustibles, en esta investigación la cepa *Scenedesmus* sp no es la adecuada para este proceso debido a que según (Javed, Fahed Aslam et al., 2019) su productividad de lípidos es de 27,3 mg/L día comparado con otras especies como *Chlorella Vulgaris* CCAP 211/11b que producen 170 mg/L día, sin embargo, *Scenedesmus* sp contiene mayor cantidad de carbohidratos y proteínas lo cual permite que pueda ser usada como suplemento de la alimentación animal.

5. Conclusiones

- La mayor producción de biomasa microalgal en efluentes de aguas residuales de piscicultura se logra cuando se utiliza un reactor no estéril algo que elimina costos significativos en equipos como la autoclave que se usa para la esterilización, además significa que este proceso puede ser llevado a escala comercial.
- En la electroflotación se evidencia que es un método de separación de la biomasa eficiente porque recupera mayor porcentaje de la biomasa, cerca del 57% comparado con la floculación química en la cual se recupera el 5%; además la biomasa obtenida de este método puede ser usado en la producción de biocombustibles y suplementos para animales al no introducir iones contaminantes a la biomasa.
- La floculación química es un método que separa el 88% de la biomasa microalgal, con valores en el pH de 11, con una concentración de floculante de 200 mg/L parámetros importantes al momento de la separación puesto que el pH por ejemplo afecta el potencial eléctrico que hay entre las células cargadas negativamente lo cual induce la floculación por lo tanto se debe tener cuidado al momento de elegir el floculante pues este se mezcla rápidamente con las células desestabilizando la suspensión.
- Dentro de los potenciales usos de la biomasa se evidencia que para el tipo de cepa usada en la investigación no es viable el uso en la industria de biocombustibles dado que no contiene la cantidad de lípidos necesaria para la producción de estos. Por otra parte, se encontró que puede ser usada en la producción de alimento para animales.

6. Recomendaciones

- Se recomienda realizar un estudio que permita analizar más variables que influyen en los métodos de separación como la temperatura, voltaje y tipo de floculante.
- Para realizar una aproximación a escala industrial de los procesos de separación, se recomienda realizar un estudio técnico-económico que incluya variables no tenidas en cuenta en esta investigación.
- Realizar la evaluación con biofloculantes que registran buenos resultados de recuperación y disminuyen los efectos de la contaminación de la biomasa generados por los floculantes químicos.

Referencias Bibliográficas

- Abud, A. K. D. S., & Silva, C. E. D. F. (2019). Bioethanol in Brazil: Status, Challenges and Perspectives to Improve the Production. In *Bioethanol Production from Food Crops*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813766-6/00021-7>
- Andersen, R. A. (2005). *Algal Culturing Techniques* (First edit; R. A. Andersen, Ed.). Retrieved from <https://www.elsevier.com/books/algal-culturing-techniques/andersen/978-0-12-088426-1>
- Ansari, F. A., Ravindran, B., Gupta, S. K., Nasr, M., Rawat, I., & Bux, F. (2019). Techno-economic estimation of wastewater phycoremediation and environmental benefits using *Scenedesmus obliquus* microalgae. *Journal of Environmental Management*, 240(March), 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.123>
- Ansari, F. A., Singh, P., Guldhe, A., & Bux, F. (2017). Microalgal cultivation using aquaculture wastewater: integrated biomass generation and nutrient remediation. *Algal Research*, 21, 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.11.015>
- Baierle, F., John, D. K., Souza, M. P., Bjerk, T. R., Moraes, M. S. A., Hoeltz, M., ... Schneider, R. C. S. (2015). Biomass from microalgae separation by electroflotation with iron and aluminum spiral electrodes. *Chemical Engineering Journal*, 267, 274–281. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.01.031>
- Baskar Gurunathan, A. E. S. (2018). *Kinetic Modeling and Evaluation of Optimal Growth , Lipid Enhancement and Kinetic Modeling and Evaluation of Optimal Growth , Lipid Enhancement and Harvesting Techniques of Green Microalgae Scenedesmus species*. (February 2019).

- Bleeke, F., Quante, G., Winckelmann, D., & Klöck, G. (2015). Effect of voltage and electrode material on electroflocculation of *Scenedesmus acuminatus*. *Bioresources and Bioprocessing*, 2(1), 6–13. <https://doi.org/10.1186/s40643-015-0064-6>
- Borowitzka, M. A., & Moheimani, N. R. (2013). Algae for biofuels and energy. In *Algae for Biofuels and Energy*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5479-9>
- Brasil, B. dos S. A. F., de Siqueira, F. G., Salum, T. F. C., Zanette, C. M., & Spier, M. R. (2017). Microalgae and cyanobacteria as enzyme biofactories. *Algal Research*, 25(May), 76–89. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.04.035>
- Chatsungnoen, T., & Chisti, Y. (2019). Flocculation and electroflocculation for algal biomass recovery. In *Biofuels from Algae* (Second Edi). <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64192-2.00011-1>
- Darío, E., Luz, A., Sierra, M., White, C., Catalina, L., & Amézquita, O. (2008). *Aplicacion de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales*. EAFIT.
- De Farias Silva, C. E., Grisa, B., Sforza, E., Rocca, N. La, & Bertucco, A. (2016). Effects of sodium bicarbonate on biomass and carbohydrate production in *synechococcus* PCC 7002. *Chemical Engineering Transactions*, 49, 241–246. <https://doi.org/10.3303/CET1649041>
- FAO. (2018). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura*.
- Fasaei, F., Bitter, J. H., Slegers, P. M., & van Boxtel, A. J. B. (2018). Techno-economic evaluation of microalgae harvesting and dewatering systems. *Algal Research*, 31(April), 347–362. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.11.038>
- Gao, F., Li, C., Yang, Z. H., Zeng, G. M., Feng, L. J., Liu, J. zhi, ... Cai, H. wen. (2016). Continuous microalgae cultivation in aquaculture wastewater by a membrane photobioreactor for biomass production and nutrients removal. *Ecological Engineering*, 92,

- 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.03.046>
- Gao, S., Yang, J., Tian, J., Ma, F., Tu, G., & Du, M. (2010). Electro-coagulation-flotation process for algae removal. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1–3), 336–343. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.037>
- Garzon-Sanabria, A. J., Davis, R. T., & Nikolov, Z. L. (2012). Harvesting *Nannochloris oculata* by inorganic electrolyte flocculation: Effect of initial cell density, ionic strength, coagulant dosage, and media pH. *Bioresource Technology*, 118, 418–424. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.057>
- Guo, Z., Liu, Y., Guo, H., Yan, S., & Mu, J. (2013). Microalgae cultivation using an aquaculture wastewater as growth medium for biomass and biofuel production. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 25(S1), S85–S88. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(14\)60632-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(14)60632-X)
- Javed, Fahed Aslam, M., Rashid, N., Shamair, Z., Khan, A. L., Yasin, M., Fazal, T., ... Bazmi, A. A. (2019). *Microalgae-based biofuels, resource recovery and wastewater treatment: A pathway towards sustainable biorefinery*. 255. Retrieved from 10.1016/j.fuel.2019.115826
- Lara, M., & Graciano, G. (2019). Biomass recovery and lipid extraction processes for microalgae biofuels production : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107(January), 87–107. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.064>
- Lee, A. K., Lewis, D. M., & Ashman, P. J. (2013). Harvesting of marine microalgae by electroflocculation: The energetics, plant design, and economics. *Applied Energy*, 108, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.003>
- Merino, M. C., Bonilla, S. P., Bages, F., Martha Lucía de la Pava A., Nadezhdy Ginova Hortúa C., Guerrero, I., ... Alejandro Flores Nava. (2014). Plan Nacional para el Desarrollo de la Acuicultura Sostenible en Colombia - PlaNDAS. In *Informe Técnico y de Gestión 2011*.

- Retrieved from http://www.racua.org/uploads/media/Plan_Nac_Desar_Acuic_Sost_CO.pdf
- Ministerio de Agricultura y desarrollo rural. (2018). Retrieved from <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/Con-crecimiento-de-24,-la-piscicultura-jalona-exportaciones-agropecuarias-MinAgricultura.aspx>
- Mubarak, M., Shaija, A., & Suchithra, T. . (2019). Flocculation: An effective way to harvest microalgae for biodiesel production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(4), 103221. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103221>
- Pilca, D. (2012). *Tecnología para Aplicación del Policloruro de Aluminio en Procesamiento de Aguas*.
- Shandilya, K. K., & Pattarkine, V. M. (2019). Using Microalgae for Treating Wastewater. In *Advances in Feedstock Conversion Technologies for Alternative Fuels and Bioproducts*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817937-6.00007-2>
- Show, K.-Y., Yan, Y.-G., & Lee, D.-J. (2019). Algal biomass harvesting and drying. In *Biofuels from Algae* (Second Edi). <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64192-2.00007-x>
- Solé-bundó, M., Garfí, M., Matamoros, V., & Ferrer, I. (2019). Co-digestion of microalgae and primary sludge : Effect on biogas production and microcontaminants removal. *Science of the Total Environment*, 660, 974–981. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.011>
- statsoft. (2004). *INC. STATISTICA (data analysisi software system)*. Retrieved from www.statsoft.com
- Valero, E., Álvarez, X., Cancela, Á., & Sánchez, Á. (2015). Harvesting green algae from eutrophic reservoir by electroflocculation and post-use for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 187, 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.138>
- Wang, H., Xiong, H., Hui, Z., & Zeng, X. (2012). Mixotrophic cultivation of *Chlorella*

pyrenoidosa with diluted primary piggery wastewater to produce lipids. *Bioresource Technology*, 104, 215–220. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.020>

Xu, L., Wang, F., Li, H. Z., Hu, Z. M., Guo, C., & Liu, C. Z. (2010). Development of an efficient electroflocculation technology integrated with dispersed-air flotation for harvesting microalgae. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 85(11), 1504–1507. <https://doi.org/10.1002/jctb.2457>

Yang, Z., Hou, J., Miao, L., Yang, Y., You, G., Jia, D., & Gao, M. (2019). Removing specific extracellular organic matter from algal bloom water by Tanfloc flocculation: Performance and mechanisms. *Separation and Purification Technology*, 212(September 2018), 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.008>

Apéndices

Apéndice A. Datos crecimiento biomasa en los 3 reactores

Reactor Esteril						
Día	Volumen de muestra [L]	Peso filtro [g]	Peso filtro con muestra [g]	Biomasa [g]	Biomasa [g/L]	Biomasa promedio [g/L]
0	-	-	-	-	-	0
10	0,030	0,126	0,131	0,0057	0,190	0,193
	0,030	0,130	0,136	0,0059	0,197	
20	0,030	0,131	0,140	0,009	0,313	0,318
	0,030	0,129	0,138	0,010	0,323	
30	0,030	0,125	0,137	0,012	0,383	0,383
	0,030	0,125	0,137	0,012	0,383	
Reactor No Esteril						
Día	Volumen de muestra [L]	Peso filtro [g]	Peso filtro con muestra [g]	Biomasa [g]	Biomasa [g/L]	Biomasa promedio [g/L]
0	-	-	-	-	-	0
10	0,030	0,126	0,132	0,006	0,203	0,212
	0,030	0,126	0,133	0,007	0,220	
20	0,030	0,126	0,136	0,010	0,337	0,368
	0,030	0,124	0,136	0,012	0,400	
30	0,030	0,127	0,155	0,028	0,917	0,772
	0,030	0,129	0,148	0,019	0,627	
Reactor medio de control						
Día	Volumen de muestra [L]	Peso filtro [g]	Peso filtro con muestra [g]	Biomasa [g]	Biomasa [g/L]	Biomasa promedio [g/L]
0	-	-	-	-	-	0
10	0,030	0,128	0,131	0,003	0,113	0,108
	0,030	0,125	0,128	0,003	0,103	
20	0,030	0,127	0,139	0,012	0,397	0,387
	0,030	0,130	0,141	0,011	0,377	
30	0,030	0,125	0,148	0,022	0,743	0,732
	0,030	0,128	0,149	0,022	0,720	

Apéndice B. Condiciones a 250 ml y 2L y biomasa no recuperada para electroflotación

Condiciones iniciales	
volumen [ml]	200
agitación [rpm]	100
Electrodos	7
tiempo agitación [min]	10
Voltaje [W]	40

Cálculo Eficiencia [%]	
Absorbancia inicial	0,534
Absorbancia 1	0,072
Absorbancia 2	0,052
Absorbancia final	0,062
Eficiencia [%]	88,3895131

Condiciones de escalamiento			
Condiciones iniciales		Cálculo Eficiencia [%]	
volumen [ml]	2000	Absorbancia inicial	0,579
agitación [rpm]	100	Absorbancia 1	0,025
Electrodos	11	Absorbancia 2	0,02
tiempo agitación [min]	10	Absorbancia final	0,0225
Voltaje [W]	40	Eficiencia [%]	96,1139896

	Número de filtro	Volumen de muestra [L]	Peso filtro [g]	Peso filtro con muestra [g]	Biomasa [g]	Biomasa [g/L]	Biomasa promedio [g/L]
Muestra inicial	1	0,01	0,1246	0,1261	0,0015	0,15	0,15
Muestra 1	2	0,01	0,1233	0,1241	0,0008	0,08	0,07
Muestra 2	3	0,01	0,1266	0,1272	0,0006	0,06	

Biomasa no recuperada [g/L]	0,08
------------------------------------	-------------

**Apéndice C. Condiciones a 250 ml y 2L y biomasa microagal no recuperada para
Floculación química**

Condiciones iniciales	
volumen [ml]	200
concentración [mg/L]	200
pH	12
tiempo agitación rápida[min]	2
tiempo agitación lenta[min]	15

Cálculo Eficiencia [%]	
Absorbancia inicial	0,49
Absorbancia 1	0,107
Absorbancia 2	0,103
Absorbancia final	0,105
Eficiencia [%]	78,57142857

Condiciones iniciales		Condiciones de escalamiento	
		Cálculo Eficiencia [%]	
volumen [ml]	2000	Absorbancia inicial	0,597
Concentración [mg/L]	200	Absorbancia 1	0,065
pH	12	Absorbancia 2	0,067
tiempo agitación rápida [min]	2	Absorbancia final	0,066
Tiempo de agitación lenta [min]	15	Eficiencia [%]	88,9447236

	Número de filtro	Volumen de muestra [L]	Peso filtro [g]	Peso filtro con muestra [g]	Biomasa [g]	Biomasa [g/L]	Biomasa promedio [g/L]
Muestra inicial	4	0,01	0,1274	0,1297	0,0023	0,23	0,23
Muestra 1	5	0,01	0,1259	0,126	1E-04	0,01	
Muestra 2	6	0,01	0,1284	0,1285	0,0001	0,01	0,01

**Biomasa no
recuperada
[g/L]** 0,22

Anexo D. Resultados evaluación económica y energética Electroflotación

Costo [\$kw/h]	\$ 528,27
Consumo energía [kw/h]	1,5
Gasto energético [\$kw/h]	\$ 792,41

Costo aluminio [\$m^2]	\$ 75.000,00
Área electrodo [m^2]	0,0325
Número electrodos	11
Costo aluminio experimento [\$m^2]	\$ 26.812,50

Salario joven investigador COLCIENCIAS [\$hora]	\$ 10.351,45
Horas trabajadas en el laboratorio	2
Salario personal calificado [\$h]	\$ 20.702,90

Total [\$]	\$ 48.307,81
-------------------	---------------------

Apéndice E. Resultados evaluación económica y energética Floculación química

Costo [\$kw/h]	\$ 528,27
Consumo energía [kw/h]	0,177
Gasto energético [\$kw/h]	\$ 93,50

Costo floculante [\$/L]	\$ 7.000,00
Floculante utilizado [L]	0,0036
Costo floculante experimento [\$/L]	\$ 25,20

Salario joven investigador COLCIENCIAS [\$/hora]	\$ 10.351,45
Horas trabajadas en el laboratorio	2
Salario personal calificado [\$/h]	\$ 20.702,90

NaOH utilizado [L]	0,005
Costo de NaOH [\$/L]	\$ 7,310

Total [\$]	\$ 20.828,91
-------------------	---------------------