

**DISEÑO DE UN FOTOBIOREACTOR TIPO FACHADA PARA EL CULTIVO DE  
*Chlorella vulgaris* UTEX 1803**

**LUCERO DEL PILAR CASTRO PADILLA  
GINNA MILENA VANEGAS SÁNCHEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2016**

**DISEÑO DE UN FOTOBIOREACTOR TIPO FACHADA PARA EL CULTIVO DE  
*Chlorella vulgaris* UTEX 1803**

**LUCERO DEL PILAR CASTRO PADILLA  
GINNA MILENA VANEGAS SÁNCHEZ**

**Trabajo de grado como requisito para optar el título de:  
Ingeniero Químico**

**Director  
Crisóstomo Barajas Ferreira  
Ingeniero Químico M.sc**

**Codirector  
Andrés Fernando Barajas Solano  
Biólogo. PhD en Ingeniería Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2016**

## **DEDICATORIA**

A Dios por darme vida y sabiduría. La gloria y honra siempre para ti señor que todo lo puedes.

A mi madre Mariela, por brindarme siempre su amor, su entrega incondicional y por ser esa mujer guerrera que nunca se da por vencida en los momentos de adversidad. Te amo mamita hermosa, este logro es para ti.

A mi padre Marcolino por ser ese hombre luchador, gracias por tu apoyo. Dios te bendiga.

A mi familia por estar siempre conmigo en los momentos de felicidad y tristeza.

A mis amigos Jessica, Julian, Jeidy, Laura y David por todas las experiencias vividas, por su cariño, apoyo y consejos. Siempre los voy a llevar en mi corazón más que amigos son mis hermanos.

A Ginna Milena amiga y compañera de tesis, por el apoyo y comprensión en este arduo proceso, por tenerme paciencia y por todos los momentos compartidos.

A Manuel por aparecer en mi vida cuando más lo necesitaba, gracias por brindarme el apoyo, el amor incondicional, siempre has estado en los momentos difíciles para darme aliento y ánimos de salir adelante. Te amo, amor.

En memoria a mi abuela Elpidia, por todas las enseñanzas que infundiste en mí, por tu sencillez, que a pesar de que ya no estés a mi lado siempre te recordaré.

Y a todas las personas que han creído en mí.

**Lucero Del Pilar Castro Padilla**

## **DEDICATORIA**

*Dedico primeramente mi trabajo de grado a Dios, el que me ha dado fortaleza para continuar cuando a punto de caer he estado; por ello, agradezco este gran logro alcanzado.*

*A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificios en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Ha sido un privilegio ser su hija, son los mejores padres, los Amo Mucho.*

*De igual forma a mis hermanos que siempre han estado junto a mí, brindándome su apoyo incondicional, muchas veces poniéndose en el papel de padre. Gracias por todos esos momentos.*

*A mis grandes amigos Angela Jaime, Helmuth Martínez, Silvana Bermúdez, Paula González, Jennifer González, Natalia Castañeda, Angelica Rodríguez, Juan Pablo Peralta, Sergio Rodríguez, Oscar Gómez, Diana Jiménez, Diana Dulcey, Marisol Sánchez, Sasha Muñoz, Luz Vanegas y Daniel Panesso, que siempre estuvieron apoyándome y se convirtieron en mi segunda familia, agradezco por todos los momentos de risas y llantos, de cada uno me llevo los mejores recuerdos, enseñanzas y consejos.*

*A Lucero Castro, mi compañera de tesis y amiga, gracias por su colaboración, motivación, dedicación y sobre todo paciencia.*

*Por ultimo a todas aquellas personas que estuvieron presentes en este proceso mil gracias por su contribución.*

**Ginna Milena Vanegas Sánchez.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores del presente libro expresan sus agradecimientos a:

Al Dr. Crisóstomo Barajas Ferreira por su valioso aporte tanto en la dirección como en el apoyo incondicional en la parte investigativa, académica y sus buenos consejos durante la realización del proyecto de investigación.

Al biólogo. Andrés Barajas por su valiosa colaboración, enseñanzas durante todo este tiempo.

También a la UNIVERSIDAD DE SANTANDER, por brindarnos sus instalaciones, para llevar a cabo esta investigación.

A los profesores de Ingeniería Química, quienes han puesto a nuestra disposición sus conocimientos y aportes para nuestra formación profesional.

Y finalmente a todos los trabajadores de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER quien nos brindaron un espacio agradable, contribuyendo en nuestra formación profesional.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	5
1. OBJETIVOS	8
1.1 OBJETIVO GENERAL	8
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
2. METODOLOGÍA	9
2.1 MICROORGANISMO	9
2.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS	10
2.3 CUANTIFICACIÓN DE BIOMASA	11
2.4 MEDICIÓN DE pH Y TEMPERATURA DEL MEDIO	12
2.5 VOLUMEN EVAPORADO DEL CULTIVO	12
2.6 DETERMINACIÓN DEL % DE CARBONO ORGÁNICO	12
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	14
3.1 CONCENTRACIÓN DE BIOMASA	14
3.2.1 Productividad de biomasa.	16
3.2 DETERMINACIÓN DE TEMPERATURA, pH Y VOLUMEN EVAPORADO	19
3.3 % DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL	23
3.4 DISEÑO DEL FOTOBIORREACTOR TIPO FLAT – PLATE	25
4. CONCLUSIONES	27

RECOMENDACIONES	28
CITAS BIBLIOGRÁFICAS	28
BIBLIOGRAFÍA	31

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Diagrama de flujo de metodología	9
<b>Figura 2.</b> Concentración de biomasa para cada fotobiorreactor	15
<b>Figura 3.</b> Significancia estadística del efecto de las dimensiones en la producción de biomasa	18
<b>Figura 4.</b> Productividad de biomasa de acuerdo a las dimensiones de cada fotobiorreactor	19
<b>Figura 5.</b> Variación de la temperatura promedio respecto a la productividad de biomasa	20
<b>Figura 6.</b> Productividad de biomasa respecto a la variación del porcentaje de volumen evaporado	22
<b>Figura 7.</b> Variación del porcentaje de volumen evaporado respecto a la temperatura promedio	23
<b>Figura 8.</b> Porcentaje de carbono orgánico total	24
<b>Figura 9.</b> Planos del fotobiorreactor diseñado	26

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Diseño de experimentos para el cultivo de <i>C. vulgaris</i> UTEX 1803	11
<b>Tabla 2.</b> Productividad (g/L*d-1) de cada ciclo	16
<b>Tabla 3.</b> Datos de pH promedio para cada ciclo	21
<b>Tabla 4.</b> Porcentaje de carbono orgánico total para cada fotobiorreactor	24
<b>Tabla 5.</b> Condiciones del cultivo	25

## LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
<b>Imagen 1.</b> Biofachadas para el cultivo de <i>C. vulgaris</i>	17

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO DE UN FOTOBIOREACTOR TIPO FACHADA PARA EL CULTIVO DE *Chlorella vulgaris* UTEX 1803.\*

**AUTORES:** LUCERO DEL PILAR CASTRO PADILLA  
GINNA MILENA VANEGAS SÁNCHEZ.\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Fotobiorreactores, *Chlorella vulgaris*, volumen evaporado, temperatura, densidad óptica, pH.

Durante muchas décadas ha surgido una creciente demanda mundial de energía y el medio ambiente se ve afectado por el uso inadecuado que el hombre ha hecho de los combustibles fósiles, dando como resultado emisiones de gases. Esto ha motivado el aumento en las investigaciones en los últimos años en la producción de microalgas para generar biocombustibles y capturar CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera. En el presente trabajo se evaluó la influencia de las variables de diseño de un fotobiorreactor tipo flat-plate (ancho y profundidad) en la productividad de biomasa y el volumen evaporado por un periodo de 74 días para el cultivo de *Chlorella vulgaris* UTEX 1803 bajo las condiciones ambientales de la ciudad de Bucaramanga, además se analizó el comportamiento de nueve fotobiorreactores de acuerdo con las variables de operación (temperatura y pH) con el fin de encontrar la máxima productividad. Según los resultados obtenidos se requiere el diseño de un fotobiorreactor con dimensiones: ancho superior a 15 cm y profundidad 3 cm para obtener una productividad de 0,35 g/L\*d<sup>-1</sup>. Se comprobó que la temperatura promedio para todos los fotobiorreactores de 29,719 °C no es una variable influyente en la productividad de biomasa. De igual manera los resultados obtenidos de pH con un rango de 9-10 evidenciaron que el CO<sub>2</sub> se disuelve más rápido. El porcentaje de carbono orgánico total medido en los fotobiorreactores fue del 50 %.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Crisóstomo Barajas Ferreira Ingeniero Químico M.sc Codirector Andrés Fernando Barajas Solano Biólogo. PhD en Ingeniería Química.

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN A TYPE FACADE PHOTOBIOREACTOR GROWING CHLORELLA VULGARIS UTEX 1803\*.

**AUTHORS:** LUCERO DEL PILAR CASTRO PADILLA  
GINNA MILENA VANEGAS SÁNCHEZ\*\*

**KEY WORDS:** Photobioreactor, microalgae, evaporated volume, *Chlorella vulgaris*, temperature, optical density, pH.

For many decades there has been a growing global demand for energy and environmental problems are affected by inappropriate use that mankind has made of fossil fuels, resulting in greenhouse gas emissions. This has motivated the increase in the investigations over recent years in the production of microalgae to generate biofuels and capture CO<sub>2</sub> in the atmosphere. This work assessed the influence of design variables of a photobioreactor type flat-plate (width and depth) in biomass productivity and volume evaporated for a period of 74 days for the cultivation of *Chlorella Vulgaris* UTEX 1803 under the environmental conditions in the Bucaramanga city. In addition, nine behavior photobioreactor according to the operating variables (temperature and pH) in order to find the maximum productivity were analyzed. According to the results, the design of a photobioreactor is required with dimensions: greater than 15 cm in width and 3 cm in depth to obtain a productivity of 0,35 g/L\*d<sup>-1</sup>. Was found that the average temperature for all photobioreactors 29,719 ° C is not an influential variable in biomass productivity. Same manner the results obtained with a range of pH 9-10 evidenced that the CO<sub>2</sub> dissolves faster. The percentage of total organic carbon in photobioreactors measured was 50%.

---

\* Graduation work

\*\*Industrial University of Santander. School of Physics-Chemistry Engineering-School of Chemical Engineering. Director: Crisóstomo Barajas Ferreira M.sc Chemical Engineer. Co-director: Andres Fernando Barajas Solano Co Biologist. PhD in Chemical Engineering

## INTRODUCCIÓN

En un mundo donde los requerimientos para la expansión económica y social cambian rápidamente, el uso eficiente de la energía se encuentra en el centro de estos cambios aun teniendo en cuenta que en los últimos 20 años las reservas de petróleo se encuentran en su nivel más alto, la producción de combustibles alternativos y la obtención de fuentes energéticamente sostenibles poseen gran atención [1, 2, 3, 4, 5].

El desarrollo sostenible del nivel urbano ha de ser considerado como un proceso integrante del desarrollo rural global, tendente a mejorar las condiciones de vida y la productividad de grandes grupos de población, sin embargo el desarrollo urbano requiere de fuentes de energía sostenibles y de bajo costo, que permitan además de un uso racional, una baja huella ambiental, dentro de estos los más aplicados han sido la eólica, solar y biomasa [1].

Para el caso del sistema actual de construcción de edificios: construcción y operación; contribuye significativamente a la generación de gases de efecto invernadero. De acuerdo con el DOE/EIA “Annual Energy Outlook” las edificaciones pueden llegar a consumir hasta 40% del total de la energía nacional mientras produce cerca del 39% del total de las emisiones de CO<sub>2</sub> [6]. En el caso Colombiano el consumo de energía en cierto tipo de construcciones (como torres de apartamentos, universidades y otros) pueden ser cubiertos por la implementación de fuentes de energías alternativas como la solar (fotovoltaica) o la eólica; más recientemente se ha propuesto que una mezcla de estos dos sistemas con una adición de biomasa podría ser una solución más sostenible, por lo anterior se planteó la implementación de biofachadas, las cuales son placas transparentes en

vidrio (acrílico o policarbonato) que por dentro poseen cultivos de microalgas que actúan como un sumidero biológico para el CO<sub>2</sub> atmosférico.

La fijación del CO<sub>2</sub> por medio de microalgas es ecológicamente sostenible cuando se combina con otros procesos de protección ambiental tales como el tratamiento de aguas residuales [7] o la remoción de metales pesados [8]. Petrobras, la compañía de petróleo más grande de Brasil, reportó emisiones para el 2004 por un total de 44,4 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, 98,8 % son emisiones de CO<sub>2</sub> [10]. Varios autores han estudiado la fijación de CO<sub>2</sub> en la biomasa [11,12, 13], mientras otros han determinado tasas globales de secuestro de CO<sub>2</sub> mediante balance de masa de los componentes en la fase líquida o gaseosa del sistema; estos autores no establecieron qué fracción del global del CO<sub>2</sub> secuestrado fue efectivamente fijado en la biomasa de la microalga [13,14]. Mientras cambia la composición de la biomasa producida, cambia la tasa específica de consumo de un sustrato y la formación de producto, en el caso de autótrofos, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> son el sustrato y producto más importantes. La relación entre la tasa de producción de O<sub>2</sub> y consumo de CO<sub>2</sub> (coeficiente fotosintético) depende de la composición de la biomasa producida y de los sustratos utilizados [15].

En 2011 en la competencia IDEAS mostraron el diseño conceptual de un primer tipo de biofachadas en GSA federal building, Los Angeles (Estados Unidos), sin embargo no es sino hasta 2013 en el marco de la Exposición Internacional de Edificaciones, IBA en Hamburgo (Alemania) la firma Arup en conjunto con el consultorio estratégico de ciencia de Alemania SSC y la firma austriaca Splitterwerk Architects presentaron al mundo el primer edificio eco-eficiente BIQ HOUSE, el cual se componía de 192 fotobioreactores dispuestos como fachada, este sistema se le conoce como biofachada, el cual posee cultivos de microalgas en placas de vidrio que permiten producir energía a partir de la metanogénesis de la biomasa, reducir el impacto ambiental de la ciudad mediante el secuestro de CO<sub>2</sub> y proveer al edificio

con un sistema bio-climático, por otro lado ese mismo año el centro de investigaciones GEPEA de la universidad de Nantes (Francia) mostraba al público su primer tipo de biofachada eficiente. Gracias a lo anterior, la investigación en este campo se ha ido expandiendo, sin embargo este tipo de fotobiorreactores planos dependen de varios factores ambientales que pueden reducir sustancialmente la eficiencia fotosintética [16], debido a estos inconvenientes se considera que no existe un fotobiorreactor “mejor” que los demás, sino ajustado a las necesidades ambientales del lugar de trabajo; sin embargo las condiciones que permiten optimizar la producción de biomasa (y en este caso, optimizar la producción de energía) siempre serán las mismas sin importar su posición geográfica [16,17].

Hasta ahora el desarrollo e investigación en microalgas en el país ha sido enfocado fuertemente en la obtención de cepas para la producción de biocombustibles (biodiesel principalmente) y el diseño, construcción y prueba de diferentes fotobiorreactores ha sido relegado fuertemente, por lo cual no existen experimentos a escala “solar” en Colombia con este tipo de fotobiorreactores planos, y menos información sobre la productividad de biomasa, capacidad energética y otras consideraciones de tipo arquitectónica y mecánicas que puedan afectar negativamente la estabilidad de la fachada de los edificios. Teniendo en cuenta todo lo anterior, el presente proyecto se enfoca en diseñar un fotobiorreactor tipo fachada como piedra angular para la evaluación de construcciones sostenibles, se evaluó el efecto de las dimensiones del fotobiorreactor (ancho y largo), se consideraron aspectos como la selección del material, montaje, análisis de variables que influyen en el comportamiento de la cepa (temperatura y pH), importancia del suministro de nutrientes para el crecimiento celular, densidad óptica, volumen de cultivo y la utilización de la luz solar como fuente de energía.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un fotobiorreactor tipo fachada, que sea eficiente para la producción de biomasa de *Chlorella vulgaris*.

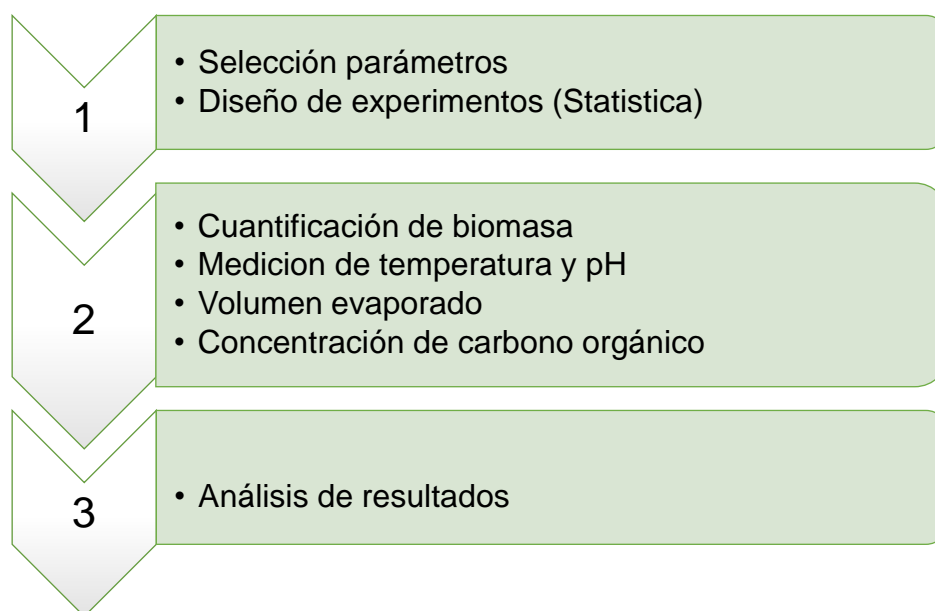
### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el efecto de las dimensiones (profundidad y ancho) de los fotobiorreactores en la producción de biomasa.
- Determinar la influencia de las variables de operación (pH y temperatura) en cada fotobiorreactor.
- Analizar el efecto del volumen promedio evaporado respecto a la productividad de biomasa en el cultivo de *C. vulgaris*.

## 2. METODOLOGÍA

En la figura 1 se presenta el esquema de la metodología que se realizó en este proyecto de investigación.

**Figura 1.** Diagrama de flujo de metodología



### 2.1 MICROORGANISMO

*Chlorella vulgaris* UTEX 1803, fue adquirida de la colección de cepas proveniente de la Universidad de Texas (Austin, Texas, USA). El alga se mantuvo en el medio de cultivo Bold Basal modificado [18], donde cada litro de medio de cultivo está compuesto por macronutrientes (g/L):  $\text{NaNO}_3$  (1,5), (Moles)  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

( $3,04 \times 10^{-4}$ ) NaCl ( $4,28 \times 10^{-4}$ ),  $K_2HPO_4$  ( $4,31 \times 10^{-4}$ ),  $KH_2PO_4$  ( $1,29 \times 10^{-3}$ ),  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  ( $1,70 \times 10^{-4}$ ) y micronutrientes (g/L):  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  ( $3,07 \times 10^{-5}$ ),  $MnCl_2 \cdot 4H_2O$  ( $7,28 \times 10^{-6}$ ),  $MoO_3$  ( $4,93 \times 10^{-6}$ ),  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  ( $6,29 \times 10^{-6}$ ),  $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  ( $1,68 \times 10^{-6}$ ),  $H_3BO_3$  ( $1,85 \times 10^{-4}$ ), EDTA ( $1,71 \times 10^{-4}$ ), KOH ( $5,53 \times 10^{-4}$ ),  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  ( $1,79 \times 10^{-5}$ ), utilizando reactores cilíndricos de diámetro interno de 14 cm y 35 cm altura con un volumen del cultivo de 8 L. Los reactores se acoplaron a un sistema de aireación por burbujeo para la inyección de aire con un flujo de 1,5 L/min.

## 2.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para determinar el efecto que poseen las dimensiones sobre la producción de biomasa se evaluó el ancho y la profundidad de cada fotobiorreactor, para esto primero se desarrolló un diseño de experimentos central no factorial  $2^3$  (2 factores y 3 niveles) usando como variables el ancho (10, 15 y 20 cm) y profundidad (5, 7 y 11 cm) de los reactores sin modificar la altura (40 cm). Cada uno de los reactores se construyó en vidrio de 4 líneas reforzado con láminas de aluminio estructural. El diseño de experimentos se desarrolló empleando el software STATISTICA 7.0 [19].

Los fotobiorreactores se limpiaron a fondo con chorro de agua, se llenaron con 0,03% solución de hipoclorito de sodio (NaClO) de tiempo de contacto de 3 días y se lavaron 3 veces con agua para eliminar los niveles de cloro residual y así evitar que cualquier clase de microorganismo o suciedad pudiera afectar el crecimiento de las microalgas. Posteriormente, se llenaron con 10 L de medio de cultivo y se ubicaron en el edificio de ingenierías (MUISCA, Universidad de Santander), por último, se acoplaron a un sistema de agitación mediante la adición de aire por burbujeo a  $0,6 \text{ L}_{\text{aire}}/\text{L}_{\text{medio}}$ . El diseño de experimentos que se llevó a cabo en esta investigación se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1.** Diseño de experimentos para el cultivo de *C. vulgaris* UTEX 1803

<b>Reactor</b>	<b>Ancho (cm)</b>	<b>profundidad (cm)</b>
<b>1</b>	10	5
<b>2</b>	20	5
<b>3</b>	10	11
<b>4</b>	20	11
<b>5 (c)</b>	15	7
<b>6</b>	15	3
<b>7</b>	15	12
<b>8</b>	8	7
<b>9</b>	22	7

### **2.3 CUANTIFICACIÓN DE BIOMASA**

Para las mediciones de concentración de biomasa se tomó una muestra de 1 mL de cultivo cada tres días. Posteriormente se diluyó a una relación muestra/agua destilada de 1:9. Luego se midió la densidad óptica de cada muestra a 550 nm (los valores típicos de medición están entre 0,1 - 0,9) usando un espectrofotómetro (DR 1900, HACH). La densidad óptica ( $DO_{550}$ ) se relacionó con la cantidad de biomasa (g/L) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$CB = (DO_{550} - 0,1734)/1,3161 \quad (1)$$

## 2.4 MEDICIÓN DE pH Y TEMPERATURA DEL MEDIO

La temperatura y el pH de los cultivos se midieron utilizando un medidor portátil multiparamétrico (IQ 160, HACH), usando un sensor que se calibró con soluciones buffer de pH estándar de 4, 7, y 10 para ajustar la señal durante las mediciones.

## 2.5 VOLUMEN EVAPORADO DEL CULTIVO

Para determinar la tasa de evaporación, se registraron los cambios de altura en todos los fotobiorreactores, teniendo como base la altura inicial del cultivo y su volumen de cultivo, luego de esto con las dimensiones de cada fotobiorreactor (ancho y profundidad) se determinó el volumen evaporado cada 3 días. El volumen evaporado fue obtenido usando las siguientes ecuaciones:

$$\text{Volumen evaporado} = \text{Volumen del cultivo inicial} - \text{volumen de cultivo final} \quad (2)$$

$$\text{Volumen de cultivo final} = \text{Ancho} * \text{profundidad} * (\text{altura Inicial} - \text{altura final}) \quad (3)$$

## 2.6 DETERMINACIÓN DEL % DE CARBONO ORGÁNICO

Para determinar el porcentaje de carbono orgánico en los fotobiorreactores se aplicó el método COT de HACH (10173) con un medio rango de (15-150 mg/L°C) que consistió en precalentar un reactor tipo DR/200 a una temperatura de 105 °C, luego se tomaron 10 mL de muestra de cada fotobiorreactor y se agregaron a una matraz y se adicionaron 0,4 mL de solución Buffer de pH 2. Seguidamente se colocó el matraz en una placa de calentamiento por 10 minutos y se etiquetaron dos reactores una para la muestra y el otro para el reactivo blanco; a cada reactor se le agregó un sobre de persulfato. Para el reactivo blanco se agregó 1 mL de agua destilada y para el otro reactor una muestra de 1 mL de cultivo. Posteriormente se utilizaron

dos ampollitas previamente lavadas como indicadores de color azul, se rompieron y se introdujeron en los dos reactivos dejándolos por un tiempo 2 horas en el reactor a 105 °C, por último se realizaron las respectivas mediciones de carbono orgánico arrojadas por el colorímetro manual (DR/890 HACH).

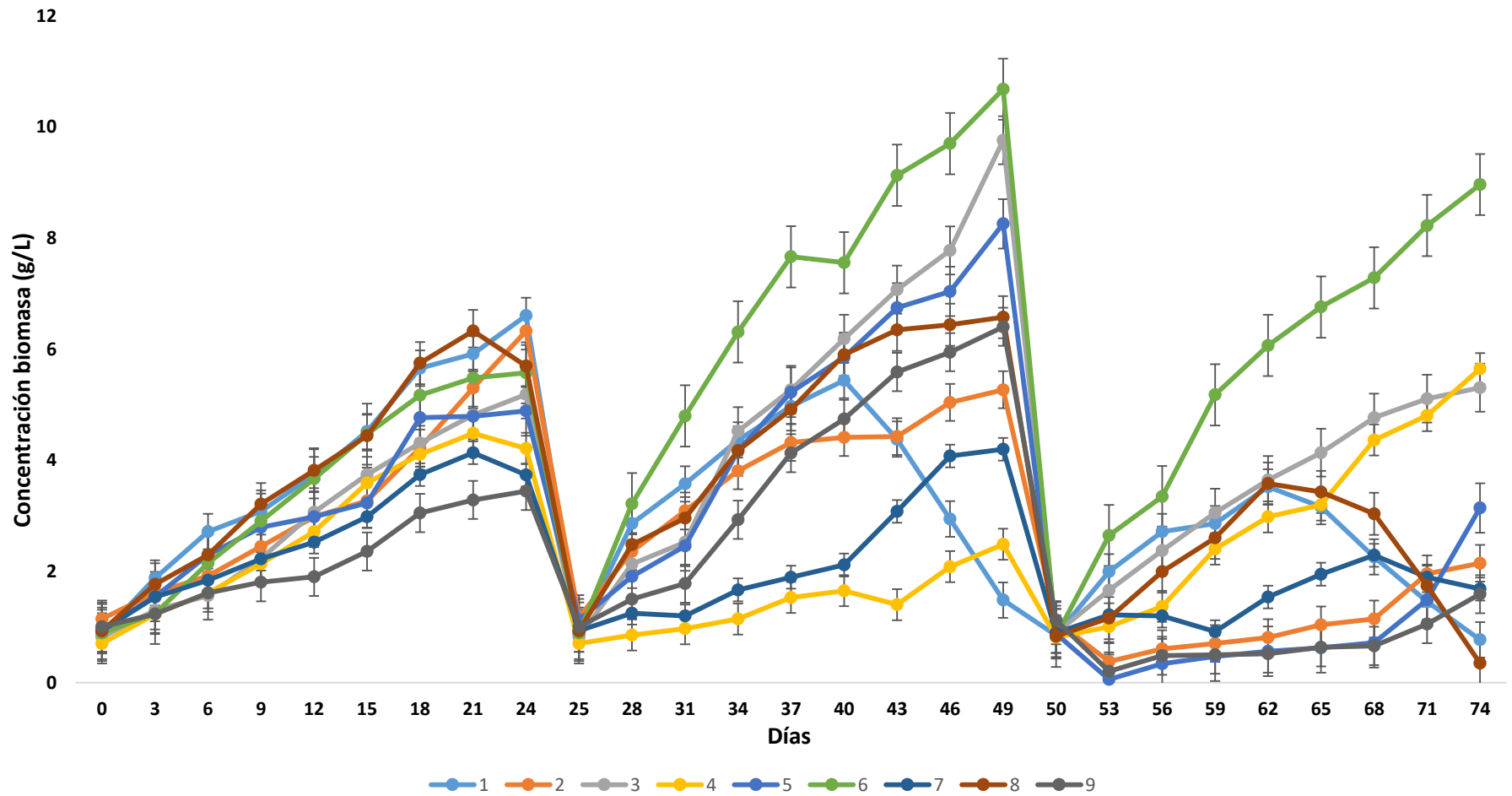
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 CONCENTRACIÓN DE BIOMASA

En la figura 2 se puede observar que *C. vulgaris* se mantuvo en crecimiento durante 74 días divididos en tres ciclos (cultivo batch), los cuales fueron expuestos a la radiación solar. El primer ciclo empezó desde el día cero hasta el día 24; las concentraciones máximas de biomasa alcanzadas en este ciclo corresponden a los fotobiorreactores 1 y 2 con valores de 6,61 y 6,33 g/L respectivamente; es necesario recalcar que el comportamiento de los fotobiorreactores durante este ciclo fue parecido. Para el segundo ciclo que empezó a partir del día 25 hasta el día 49 el máximo valor de concentración de biomasa fue de 10,68 g/L que corresponde al fotobiorreactor 6, además se observó que el fotobiorreactor 1 disminuyó desde el día 40 hasta finalizar el ciclo, esto pudo ser debido a diversos factores a los que son expuestos los cultivos entre ellos el estrés celular y los cambios climáticos (valores altos de radiación), en este punto con respecto a la tendencia se observaron cambios en las concentraciones en cada fotobiorreactor.

Por último, el ciclo 3 que comprendió desde el día 50 hasta finalizar el día 74 se analizó la tendencia y el comportamiento destacándose el fotobiorreactor 6 con un máximo valor de 8,96 g/L de biomasa, para este ciclo las concentraciones fueron más pequeñas respecto a los dos primeros, debido a la disminución de nutrientes y al posible taponamiento de los difusores impidiendo un flujo de aire constante afectando la productividad y la concentración de biomasa.

Figura 2. Concentración de biomasa para cada fotobiorreactor



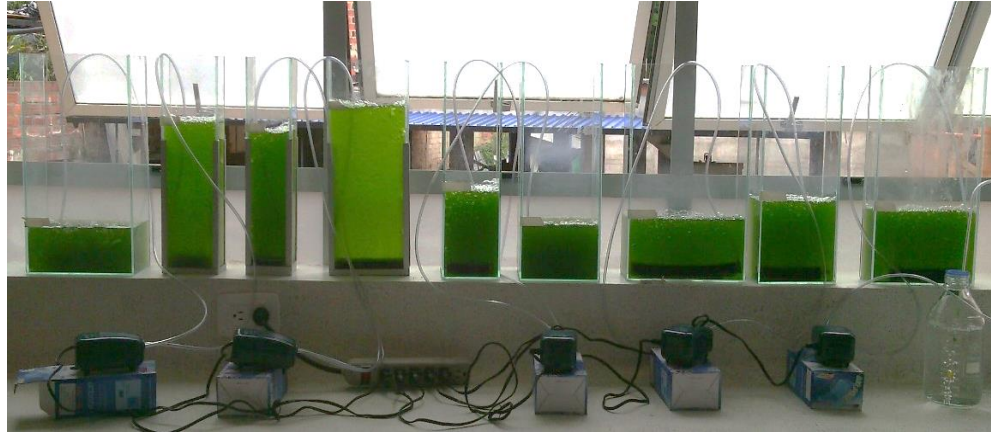
**3.2.1 Productividad de biomasa.** De acuerdo a los datos de concentración en los tres ciclos de cultivo, los resultados de productividad fueron calculados por medio de una diferencia entre la máxima concentración de biomasa ( $x_{m\acute{a}x}$ ) y la concentración de biomasa inicial ( $x_0$ ) en un ciclo de 25 días [20], la productividad fue calculada usando la ecuación:

$$Productividad = \frac{x_{m\acute{a}x} - x_0}{d\acute{a}a_{ciclo}} \quad (4)$$

**Tabla 2.** Productividad (g/L\*d-1) de cada ciclo

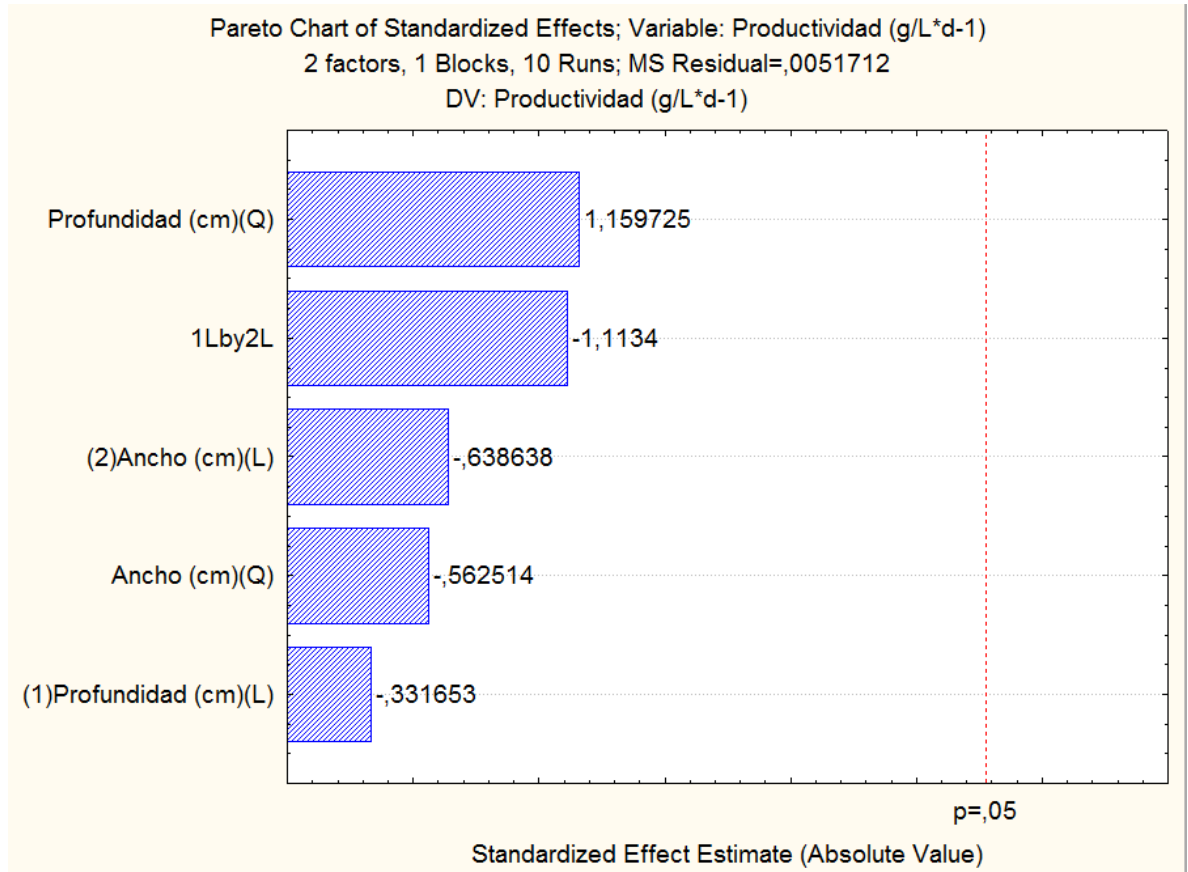
Reactor	Productividad (g/L*d <sup>-1</sup> )			PROMEDIO
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	
<b>1</b>	0,239	0,026	-0,003	<b>0,087</b>
<b>2</b>	0,216	0,171	0,043	<b>0,143</b>
<b>3</b>	0,182	0,373	0,184	<b>0,246</b>
<b>4</b>	0,146	0,074	0,201	<b>0,141</b>
<b>5</b>	0,163	0,297	0,094	<b>0,185</b>
<b>6</b>	0,195	0,408	0,339	<b>0,314</b>
<b>7</b>	0,117	0,136	0,033	<b>0,095</b>
<b>8</b>	0,199	0,235	-0,020	<b>0,138</b>
<b>9</b>	0,102	0,225	0,020	<b>0,115</b>

**Imagen 1.** Biofachadas para el cultivo de *C. vulgaris*



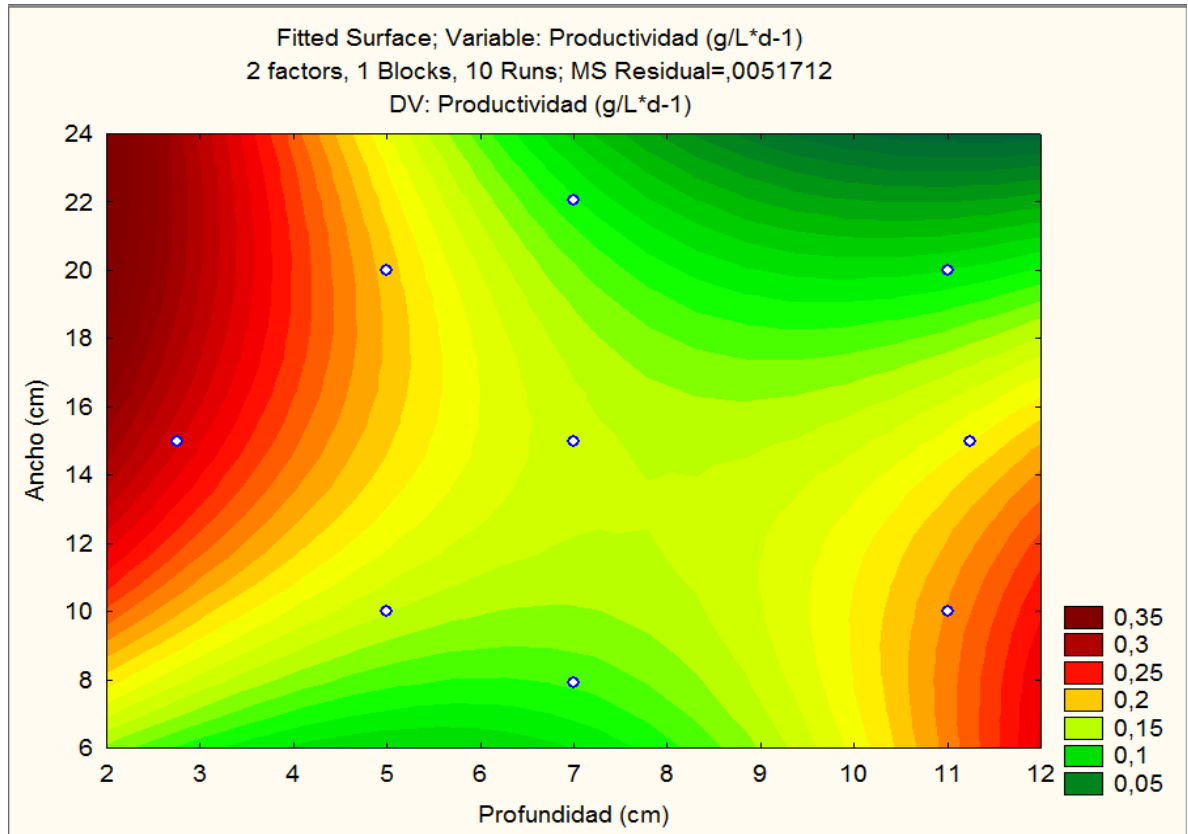
En la tabla 2 se observa que la mayor productividad obtenida fue para los fotobiorreactores 6 y 3 con valores promedio de 0,314 y 0,246 ( $\text{g/L}\cdot\text{d}^{-1}$ ) respectivamente; estos resultados fueron superiores a los reportados por Dogaris et al., (2015) cuya productividad obtenida usando *Nannochloris atomus* fue de 0,18  $\text{g/L}\cdot\text{d}^{-1}$  en un fotobiorreactor flat-plate con iluminación artificial por un periodo de 165 días y mayor a lo obtenido por Molina-Grima et al., (2016), quienes reportaron una productividad máxima de 0,19  $\text{g/L}\cdot\text{d}^{-1}$  para *Nannochloropsis gaditana* en fotobiorreactores tipo flat-plate al aire libre por un lapso de 2 años. Cabe también resaltar que los experimentos realizados por los equipos de Dogaris y Molina-Grima fueron llevados a cabo en zonas superiores al trópico de Cáncer, por lo cual, la fuente de energía solar no fue constante durante todo el tiempo. Por último se encontró que las productividades de los fotobiorreactores 1 y 8 en el ciclo final fueron negativas, esto indica que la concentración de biomasa inicial fue mayor a la obtenida al finalizar el ciclo. La productividad de cualquier sistema de microalgas es una función directa de la radiación solar total interceptada y el tipo de fotobiorreactor.

**Figura 3.** Significancia estadística del efecto de las dimensiones en la producción de biomasa



La figura 3 representa el diagrama de correlación estadística de Pareto mediante el cual se evalúa la significancia que tienen los parámetros de diseño estudiados (dimensiones del fotobiorreactor) en la producción de biomasa. De su análisis puede concluirse que bajo un nivel de confianza de 99,95 ni el ancho ni la profundidad son significativos sobre la producción de biomasa, esto se debe a que los mejores fotobiorreactores (3 y 6) poseen configuraciones inversamente proporcionales, acorde a los datos encontrados en la figura 4, donde para lograr una productividad superior a  $0,35 \text{ g/L} \cdot \text{d}^{-1}$  bajo las condiciones de radiación solar de la ciudad de Bucaramanga se requiere un fotobiorreactor con un ancho superior a 15 cm y una profundidad 3 cm.

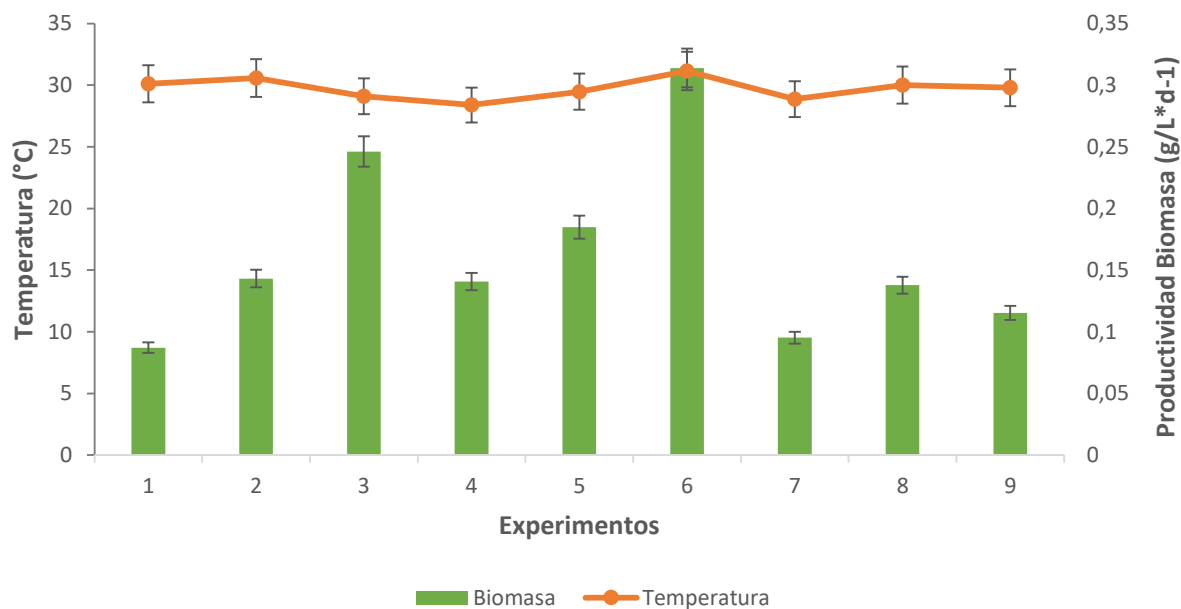
**Figura 4.** Productividad de biomasa de acuerdo a las dimensiones de cada fotobiorreactor



### 3.2 DETERMINACIÓN DE TEMPERATURA, pH Y VOLUMEN EVAPORADO

De acuerdo con los resultados obtenidos en la figura 5, la temperatura promedio para todos los fotobiorreactores evaluados fue de 29,719 °C con una desviación estándar de 0,859°C, esto significa que la variación fue menor a 1°C para cada experimento; gracias a lo anterior es posible demostrar que la temperatura no afecta la productividad de biomasa con puntos máximo y mínimo de 0,314 y 0,087 (g/L\*d<sup>-1</sup>). Además no infiere en las dimensiones de los fotobiorreactores.

**Figura 5.** Variación de la temperatura promedio respecto a la productividad de biomasa



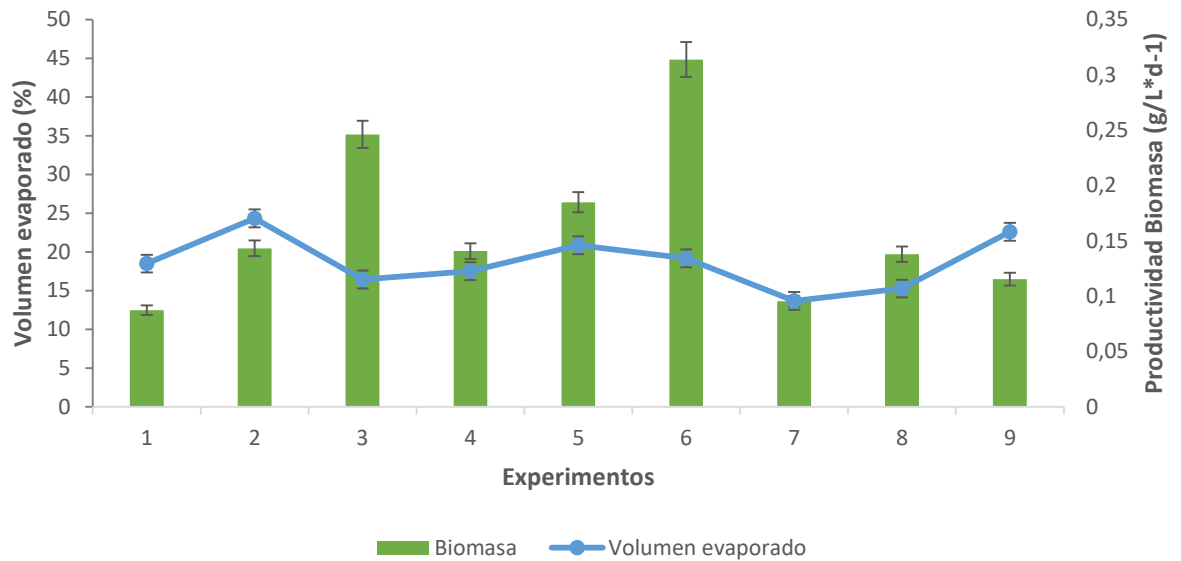
Con respecto a la tabla 3, se encontró que no se presentaron caídas significativas de pH, manteniéndose en un rango de 9,6 a 10,7. De acuerdo con los resultados de desviación estándar, el pH durante todo el ciclo no alcanzó a variar en 1 unidad; esto significa que el cultivo no sufre caídas significativas de producción de biomasa, además ni la temperatura ni la radiación afectan la composición química del medio. La contaminación que ocurre dentro del reactor por estar expuesto al ambiente no modifica la producción de biomasa. Por otra parte el proceso fotosintético de CO<sub>2</sub> provoca un aumento gradual de pH en el medio debido a la acumulación de OH<sup>-</sup>, lo que puede promover la eliminación de nutrientes como el nitrógeno en forma de amoníaco por stripping a la atmósfera.

**Tabla 3.** Datos de pH promedio para cada ciclo

Reactor	CICLO 1		CICLO 2		CICLO 3	
	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
1	9,6	0,6	10,0	0,7	10,1	0,4
2	10,6	0,4	10,9	0,4	10,0	0,7
3	10,0	0,4	10,1	0,4	10,7	0,7
4	9,8	0,3	10,3	0,7	9,7	0,2
5	10,1	0,4	10,3	0,6	10,3	0,4
6	9,7	0,6	10,4	0,5	10,7	0,4
7	10,3	0,6	10,4	0,7	9,9	0,6
8	10,1	0,4	10,4	0,7	10,0	0,3
9	10,7	0,4	10,6	0,7	9,6	0,8

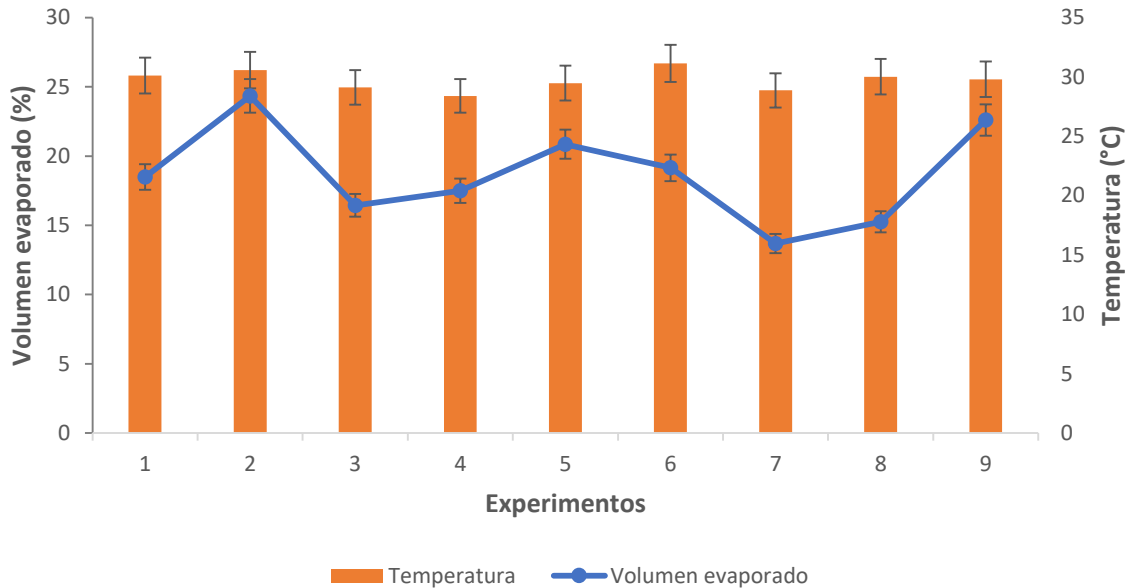
En la figura 6 se encontró que los fotobiorreactores que presentaron mayor evaporación fueron el 2, 5 y 9. Según las productividades y los porcentajes de evaporación obtenidos en los experimentos se determinó que la orientación (E/W y N/S) no afecta significativamente, debido a que Colombia no presenta estaciones, es decir; las condiciones climáticas imperantes se mantienen, los fotobiorreactores pueden ubicarse de cualquier forma (lateral o frontal); lo anterior es congruente con los resultados propuestos por Molina-Grima et al., (2016), quienes reportaron que la orientación de los reactores (E/W y N/S) no fueron significativos sobre la producción de biomasa dado que los valores medidos fueron similares para cada experimento, la desviación estándar de volumen promedio evaporado de 0,2 L.

**Figura 6.** Productividad de biomasa respecto a la variación del porcentaje de volumen evaporado



En la figura 7 se encontró que la temperatura promedio no afecta el volumen evaporado, esto es coherente con los resultados obtenidos en la figura 5 y la tabla 2, en donde se observa que no hay un cambio drástico en la temperatura que haya afectado la productividad de biomasa.

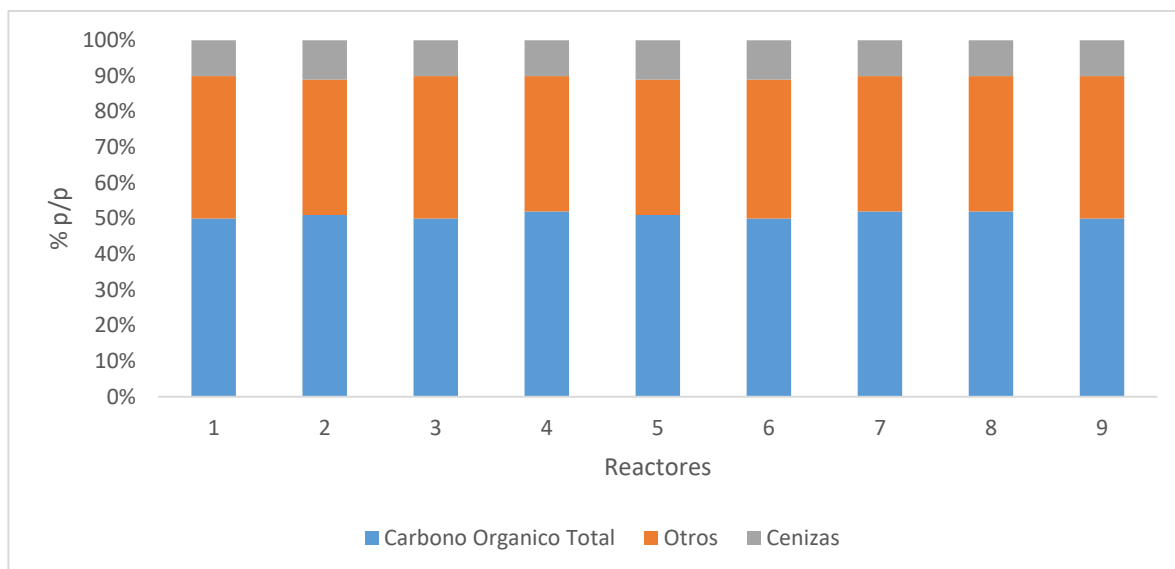
**Figura 7.** Variación del porcentaje de volumen evaporado respecto a la temperatura promedio



### 3.3 % DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL

En la figura 9 se estudió la influencia del % de carbono capturado del CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera para cada fotobiorreactor y se encontró que la concentración de carbono orgánico total en la biomasa producida demuestra que el diseño de los reactores no afecta la captura de CO<sub>2</sub>, por consiguiente la fuente de carbono es el mayor contribuyente en la producción de biomasa para las microalgas, quiere decir que el carbono puede ser agregado en compuestos orgánicos e inorgánicos. Según lo reportado por Becker et al., (1994) el 50 % de la biomasa de microalgas se compone de carbono, además la habilidad de *C. Vulgaris* de crecer en altas concentraciones de CO<sub>2</sub> ha sido demostrada en múltiples estudios según lo reportado por Chisti et al., (2008). Los datos de % de carbono orgánico total se muestran en la tabla 4.

**Figura 8.** Porcentaje de carbono orgánico total



**Tabla 4.** Porcentaje de carbono orgánico total para cada fotobiorreactor

PBR	% p/p		
	Carbono	Otros	Cenizas
1	50	40	10
2	51	38	11
3	50	40	10
4	52	38	10
5	51	38	11
6	50	39	11
7	52	38	10
8	52	38	10
9	50	40	10

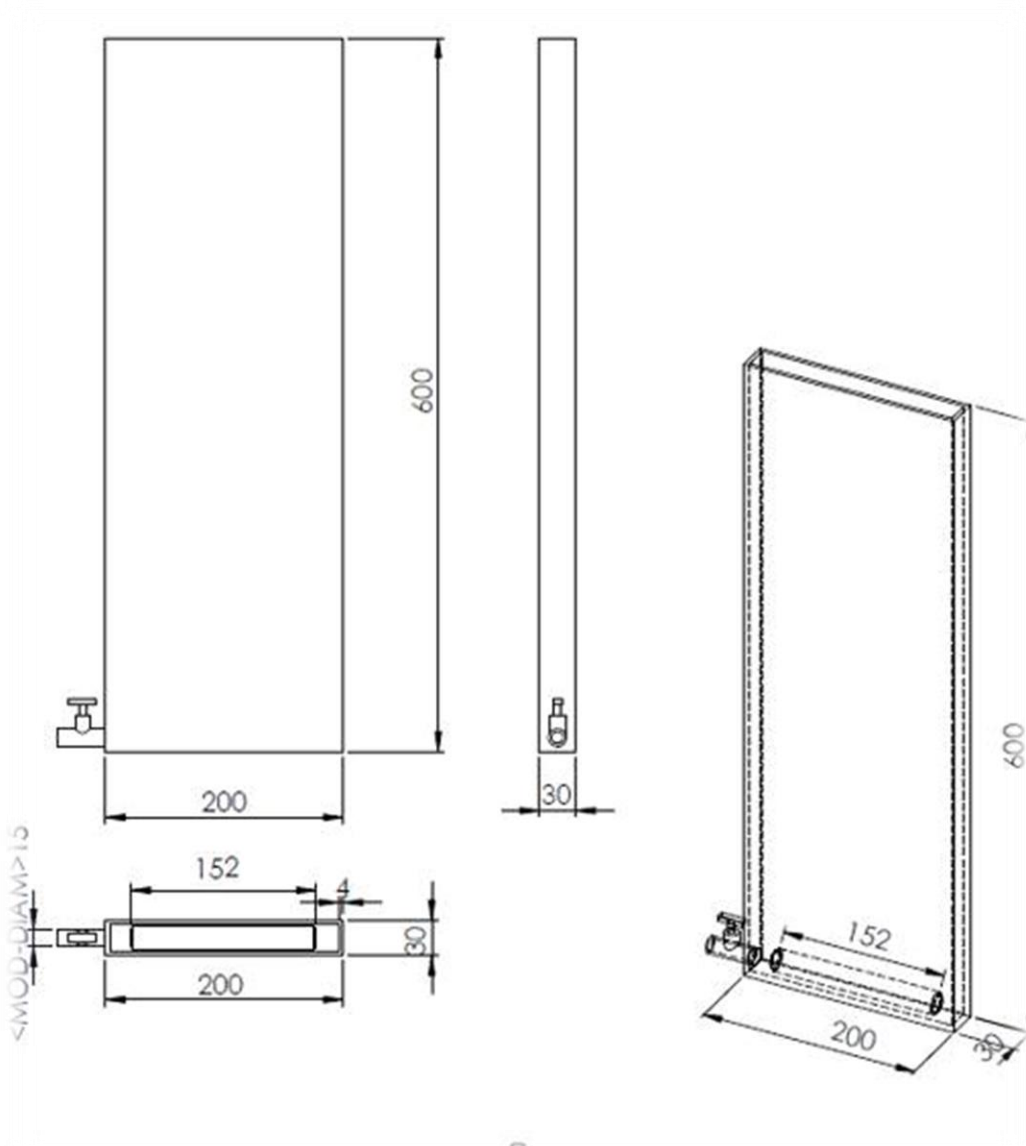
### 3.4 DISEÑO DEL FOTOBIORREACTOR TIPO FLAT – PLATE

Según los resultados obtenidos en los experimentos se llevó a cabo el diseño del fotobiorreactor con las dimensiones óptimas determinadas que permitan producir una mayor productividad de biomasa en el cultivo de *Chlorella Vulgaris* UTEX 1803, el diseño y las condiciones de cultivo se muestran en la tabla 5 y figura 9.

**Tabla 5.** Condiciones del cultivo

<b>Nombre</b>	Fotobiorreactor flat-plate
<b>Microalga</b>	<i>Chlorella Vulgaris</i> UTEX 1803
<b>Dimensiones</b>	(mm)
Ancho	200
Alto	600
Profundidad	30
<b>Material de fabricación</b>	Vidrio de 4 líneas, reforzado con láminas de aluminio
<b>Accesorios</b>	Válvula de descarga tipo bola Difusor de inyección de aire (152 mm de longitud)
<b>Agitación</b>	0,6 $L_{\text{aire}}/L_{\text{medio}}$
<b>Uso eficiente de luz</b>	Alto
<b>Ventajas</b>	Alta productividad de biomasa, económico, fácil de limpiar, baja acumulación de oxígeno
<b>Desventajas</b>	Dificultad de control de temperatura Cierta grado de crecimiento en la pared

**Figura 9.** Planos del fotobiorreactor diseñado



#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran la buena capacidad de la cepa *C. vulgaris* UTEX 1803 para producir una cantidad considerable de biomasa, además de su gran poder para captar CO<sub>2</sub> de la atmósfera.

Se demostró que bajo los parámetros de diseño estudiados (ancho y profundidad) para cada uno de los fotobiorreactores, se requiere del diseño de un fotobiorreactor con dimensiones de 20 cm de ancho y 3 cm de profundidad para obtener una productividad de 0,35 g/L\*d<sup>-1</sup> bajo las condiciones de radiación solar de la Ciudad de Bucaramanga.

Para las mediciones de temperatura en cada fotobiorreactor, se encontró que no afecta significativamente la productividad de biomasa debido a que la desviación estándar (0,859 ° C) no fue mayor a 1 °C.

Se evidenció que la orientación (E/W, N/S) ni la posición del fotobiorreactor (frontal y lateral) afectaron la productividad de biomasa ya que Colombia no presenta cambios de estaciones climáticas que generen variaciones significativas en la temperatura y en la incidencia de la luz solar.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar una nueva serie de cultivos de microalgas en el fotobiorreactor diseñado no solo con *Chlorella vulgaris* sino con otras cepas principalmente aquellas que sean nativas (Colombianas) con el fin de comparar sus productividades de biomasa.

Realizar una limpieza a los difusores en cada ciclo para evitar taponamientos que provoquen la disminución del flujo de aire en los cultivos y bajos rendimientos de biomasa.

Implementar un sistema de control en el fotobiorreactor que permita realizar mediciones de pH, temperatura y cantidad de CO<sub>2</sub> con el fin de obtener mediciones más exactas lo cual permitirá un mejor estudio del comportamiento del cultivo en el fotobiorreactor.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FANGRUI, Ma y MILFORD, A. Hanna. Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology* 70 (1999) 1-15.
- [2] CHISTI, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25:294-306.
- [3] SONG D, FU J, y SHI D. Exploitation of Oil-Bearing Microalgae for Biodiesel. *Chin. Jour. Biotech.*2008; 24: 341-348.
- [4] XIN, Meng; YANG Jianming , XIN Xu; ZHANG Lei ; QINGJUAN, Nie y XIAN, Mo. Biodiesel production from oleaginous microorganisms. *Renewable Energy* .Volume 34, Issue 1, January 2009, Pages 1–5.
- [5] KALIA VC, y PUROHIT HJ. Microbial diversity and genomics in aid of bioenergy. *J Ind Microbiol Biotechnol.* 2008 May; 35 (5):403-19.
- [6] KYOUNG-HEE, K. 2013. Beyond Green: Growing Algae Facade, Sustainability: Visualization Sustainability and Performance 500-505.
- [7] MALLICK, N. Biotechnological potential of immobilized algae for wastewater N, P and metal removal: A review. *BioMetals* 2002; 15: 377–390.
- [8] JACOME-PILCO, CR; CRISTIANI-URBINA, E; FLORES-COTERA, LB; VELASCO-GARCIA, R; PONCE-NOYOLA, T y CANIZARES-VILLANUEVA, RO. Continuous Cr (VI) removal by *Scenedesmus incrassatulus* in an airlift photobioreactor. *Bioresour Technol* 2009; 100: 2388–91.
- [9] SZKLO, A y SCHAEFFER, R. Fuel specification, energy consumption and CO<sub>2</sub> emission in oil refineries. *Ener.* 2007; 32:1075–92.

[10] PETROBRAS. Management of atmospheric emissions. Technical Report. Rio de Janeiro ; 2005.35p. [En línea]. [Fecha de consulta: 10/05/2016]. Disponible en: [http://www2.petrobras.com.br/meio\\_ambiente/portugues/pdf/131205VersaoFinalPetrobrasInternet.pdf](http://www2.petrobras.com.br/meio_ambiente/portugues/pdf/131205VersaoFinalPetrobrasInternet.pdf). Viewed November 2007 [in Portuguese].

[11] KAJIWARA, S; YAMADA, H y NARUMASA, O. Design of the bioreactor for carbon dioxide fixation by *Synechococcus* PCC7942. *Energy Convers Manage* 1997; 38:529–32.

[12] CHAE, SR; HWANG, EJ y SHIN, HS. Single cell protein production of *Euglena gracilis* and carbon dioxide fixation in an innovative photo-bioreactor. *Bioresour Technol.* 2006; 97:322–9.

[14] FAN, L; ZHANG, Y; CHENG, L; ZHANG, L; TANG, D y CHEN, H. Optimization of carbon dioxide fixation by *Chlorella vulgaris* cultivated in a membrane photobioreactor. *Chem Eng Technol.* 2007; 8:1094–9.

[13] JACOB-LOPES, E; SCOPARO, CH; FERREIRA, LM y TEIXEIRA, TF. Effect of light cycles (night/day) on CO<sub>2</sub> fixation and biomass production by microalgae in photobioreactors. *Chem Eng Process.* 2009; 48:306–10.

[15] ERIKSEN, NT; RIISGARD, FK; GUNTHER, WS y IVERSEN, JLL. Estimation of O<sub>2</sub> production, CO<sub>2</sub> uptake, and growth kinetics of microalgal cultures in a gas-tight photobioreactor. *J Appl Phycol.* 2007; 19:161–174.

[16] POSTEN, C. 2009. Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae. *Engineering in Life Science* 9(3): 165-177.

[17] TREDICI, MR. 2004. Mass production of microalgae: Photobioreactors. In: Richmond A (ed). Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology, pp. 178-214. Blackwell Science, Iowa.

[18] ANDERSEN, R.A; BERGES, J.A; HARRISON, P.J. y WATANABE, M.M. (2005). Appendix A—Recipes for Freshwater and Seawater Media In Andersen, R.A.(Ed). Algal Culturing Techniques (pp 429-538). Burlington, MA: Elsevier Academic Press.

[19] STATSOFT, INC. (2004). STATISTICA (data analysis software system) version 7.

[20] FRANCO-LARA, E.H; PETERAT, J y WEUSTER-BOTZ, F.D. (2006). Model supported optimization of phototropic in a Stirred-Tank photobioreactor. Biotechn Bioeng. Vol. 95, No. 6, 1177-187.

## **BIBLIOGRAFÍA**

ANDERSEN, R.A; BERGES, J.A; HARRISON, P.J. y WATANABE, M.M. (2005). Appendix A—Recipes for Freshwater and Seawater Media In Andersen, R.A.(Ed). Algal Culturing Techniques (pp 429-538). Burlington, MA: Elsevier Academic Press

ANEMAET A, IDA G y BEKKER M,. HELLINGWERF K. Algal Photosynthesis as the Primary Driver for a Sustainable Development in Energy, Feed, Food Prod Mar Biotechnol.2010 12: 619–629.

AMARO, H. M., GUEDES, A. C. Y MALCATA, F. X. 2011. Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel. Applied Energy 88(10): 3402–3410.

BECKER, EW. 1994. Large-scale cultivation. New York: Cambridge University Press. In Microalgae: Biotechnology and Microbiology Book Review: 63-171.

BRENNAN, L. Y OWENDE, P. 2010. Biofuels from microalgae: a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. Renew. Sust. Energ. 14(2): 557–577.

CHAE, SR; HWANG, EJ y SHIN, HS. Single cell protein production of *Euglena gracilis* and carbon dioxide fixation in an innovative photo-bioreactor. Bioresour Technol. 2006; 97:322–9.

CHISTI, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. Biotechnology Advances, 25:294-306.

DOUCHA J, LIVANSKY K. Productivity, CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> exchange and hydraulics in outdoor open high-density microalgal (*Chlorella sp.*) photobioreactors operated in a Middle and Southern European climate. J Appl Phycol. 2006; 18:811–26

ERIKSEN, NT; RIISGARD, FK; GUNTHER, WS y IVERSEN, JLL. Estimation of O<sub>2</sub> production, CO<sub>2</sub> uptake, and growth kinetics of microalgal cultures in a gas-tight photobioreactor. J Appl Phycol. 2007; 19:161–174.

FANGRUI Ma, MILFORD, A. Hanna. Biodiesel production: a review. Bioresource Technology 70 (1999) 1-15.

FAN, L; ZHANG, Y; CHENG, L; ZHANG, L; TANG, D y CHEN, H. Optimization of carbon dioxide fixation by *Chlorella vulgaris* cultivated in a membrane photobioreactor. Chem Eng Technol. 2007; 8:1094–9.

FRANCO-LARA, E.H; PETERAT, J y WEUSTER-BOTZ, F.D. (2006). Model supported optimization of phototropic in a Stirred-Tank photobioreactor. Biotechn Bioeng. Vol. 95, No. 6, 1177-187.

IOANNIS, Dogaris; MICHAEL, Welch; ANDREAS, Meiser; LAWRENCE, Walmsley y PHILIPPIDIS, George. A novel horizontal photobioreactor for high-density cultivation of microalgae. Bioresource Technology 198 (2015) 316–324.

JACOB-LOPES, E; SCOPARO, CH; FERREIRA, LM y TEIXEIRA, TF. Effect of light cycles (night/day) on CO<sub>2</sub> fixation and biomass production by microalgae in photobioreactors. Chem Eng Process. 2009; 48:306–10.

JACOME-PILCO, CR; CRISTIANI-URBINA, E; FLORES-COTERA, LB; VELASCO-GARCIA, R; PONCE-NOYOLA, T y CANIZARES-VILLANUEVA, RO. Continuous Cr (VI) removal by *Scenedesmus incrassatulus* in an airlift photobioreactor. Bioresour Technol 2009; 100: 2388–91.

KAJIWARA, S; YAMADA, H y NARUMASA, O. Design of the bioreactor for carbon dioxide fixation by *Synechococcus* PCC7942. *Energy Convers Manage* 1997; 38:529–32.

KALIA VC, y PUROHIT HJ. Microbial diversity and genomics in aid of bioenergy. *J Ind Microbiol Biotechnol*. 2008 May; 35 (5):403-19.

KYOUNG-HEE, K. 2013. Beyond Green: Growing Algae Facade, Sustainability: Visualization Sustainability and Performance 500-505.

MALLICK, N. Biotechnological potential of immobilized algae for wastewater N, P and metal removal: A review. *BioMetals* 2002; 15: 377–390.

PETROBRAS. Management of atmospheric emissions. Technical Report. Rio de Janeiro ; 2005.35p. [En línea]. [Fecha de consulta: 10/05/2016]. Disponible en: [http://www2.petrobras.com.br/meio\\_ambiente/portugues/pdf/131205VersaoFinalPetrobrasInternet.pdf](http://www2.petrobras.com.br/meio_ambiente/portugues/pdf/131205VersaoFinalPetrobrasInternet.pdf). Viewed November 2007 [in Portuguese].

POSTEN, C. 2009. Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae. *Engineering in Life Science* 9(3): 165-177.

SCHMIDELL, W.; LIMA, A. U.; AQUARONE, E.; BORZANI, W. *Biotecnologia Industrial*. São Paulo: E. Blücher, 2001. Vol. 2, 254 p.

SONG D, FU J, y SHI D. Exploitation of Oil-Bearing Microalgae for Biodiesel. *Chin. Jour. Biotech.*2008; 24: 341-348.

STATSOFT, INC. (2004). STATISTICA (data analysis software system), version 7. Disponible en: [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com)

SZKLO, A y SCHAEFFER, R. Fuel specification, energy consumption and CO<sub>2</sub> emission in oil refineries. *Ener.* 2007; 32:1075–92.

TREDICI, MR. 2004. Mass production of microalgae: Photobioreactors. In: Richmond A (ed). *Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology*, pp. 178-214. Blackwell Science, Iowa.

XIN, Meng; YANG Jianming , XIN Xu; ZHANG Lei ; QINGJUAN, Nie y XIAN, Mo. Biodiesel production from oleaginous microorganisms. *Renewable Energy* .Volume 34, Issue 1, January 2009, Pages 1–5.