

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**



**Tratamiento de agua residual urbana en biorreactores expuestos  
inoculados con microalgas nativas de zonas áridas**

**POR**

**YANET SIMON GUILLERMO**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO**

**DE:**

**INGENIERO EN AGROECOLOGÍA**

**TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO**

**DICIEMBRE DE 2016**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

**Tratamiento de agua residual urbana en biorreactores expuestos  
inoculados con microalgas nativas de zonas áridas**

**POR:**

**YANET SIMON GUILLERMO**

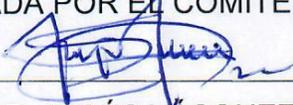
**TESIS:**

**QUE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ ASESOR COMO REQUISITO  
PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO EN AGROECOLOGÍA**

**REVISADA POR EL COMITÉ ASESOR:**

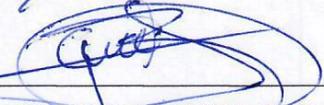
**ASESOR PRINCIPAL:**

  
\_\_\_\_\_  
**DR. JESÚS VÁSQUEZ ARROYO**

**ASESOR:**

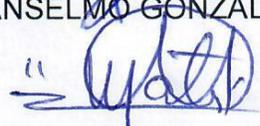
  
\_\_\_\_\_  
**DR. ALFREDO OGAZ**

**ASESOR:**

  
\_\_\_\_\_  
**M.C. GERARDO ZAPATA SIFUENTES**

**ASESOR:**

  
\_\_\_\_\_  
**DR. ANSELMO GONZÁLEZ TORRES**

  
\_\_\_\_\_  
**M.E. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO**



**COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

**TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO.**

**DICIEMBRE DE 2016**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

**Tratamiento de agua residual urbana en biorreactores expuestos  
inoculados con microalgas nativas de zonas áridas**

TESIS DE LA C. YANET SIMON GUILLERMO, QUE SE SOMETE A LA  
CONSIDERACION DEL H. JURADO EXAMINADOR COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO EN AGROECOLOGÍA**

REVISADA POR EL COMITÉ ASESOR:

PRESIDENTE:

DR. JESÚS VÁSQUEZ ARROYO

VOCAL:

DR. ALFREDO OGAZ

VOCAL:

M.C. GERARDO ZAPATA SIFUENTES

VOCAL:

DR. ANSELMO GONZÁLEZ TORRES

M.E. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO



**COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO.

DICIEMBRE DE 2016

## DEDICATORIA

A Dios por darme la vida, y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mis padres Ciro Simón Rosales y Esperanza Guillermo Casiano por darme la vida, por ser los pilares que me han acompañado siempre en este caminar de mi vida; por demostrarme siempre su apoyo incondicional, por su amor, trabajo, y sacrificio en todos estos años, por formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores; 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.

A mi hermano Cirino Simón Guillermo por tus consejos, por haber estado siempre al pendiente de mí y brindándome tu apoyo, muchas veces poniéndote en el papel de padre porque así lo eres, más que hermano eres como mi segundo padre; con mucho amor, cariño y respeto a tí dedico este logro alcanzado; gracias por depositar tu confianza en mí hermano.

A mi hermana Sonia Simón Guillermo por tus sabios consejos, por estar en los buenos y malos momentos de mi vida, por tus motivaciones a seguir luchando por alcanzar el éxito.

A mis demás hermanos (a): Lorena Simón Guillermo, Esquibel Simón Guillermo y a la pequeña consentida María Guadalupe Simón Guillermo por todos esos momentos que hemos compartido juntos, por su cariño, apoyo y los ánimos que siempre me han brindado, ustedes son el motivo por el cual he salido adelante.

A mis amigos que conocí en mi estadía por la universidad, por demostrarme su amistad y compartir momentos inolvidables juntos.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por regalarme la vida, por darme el valor y la fe para culminar esta etapa de mi vida; por protegerme durante todo mi camino y darme fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo del camino recorrido.

A mi madre por todo tu esfuerzo, tu apoyo brindado, que sin duda alguna en el trayecto de mi vida me ha demostrado su amor, corrigiendo mis faltas y celebrando mis triunfos, gracias por la confianza que depositaste en mí. A mi padre por darme la vida, por aportarme tu apoyo en este logro más y que siempre voy a darle gracias por haber depositado su confianza para conmigo. A mis hermanos y hermanas que con sus consejos, dedicación, comprensión, paciencia y apoyo me han ayudado a afrontar los retos que se me han presentado a lo largo de mi vida.

A mis hermanos y hermanas que con sus consejos, dedicación, comprensión, paciencia y apoyo me han ayudado a afrontar los retos que se me han presentado a lo largo de mi vida.

A mi abuela, mis tíos, tías, primos, padrinos y amistades que de una u otra manera contribuyeron para alcanzar mis sueños y alcanzar otro escalón más en mi formación.

A mi Alma Mater la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por haberme cobijado durante mi estancia de mi carrera y por brindarme la oportunidad de la realización de mis estudios profesionales.

A mis asesores por el apoyo otorgado para la realización de este proyecto, por su dedicación y por compartir sus conocimientos conmigo.

En especial al Doctor Jesús Vásquez Arroyo, por su apoyo, comprensión, paciencia y dedicación durante la realización de este proyecto y sobre todo por su amistad brindada durante este paso por la universidad.

# ÍNDICE

## Contenido

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE.....	iii
INDICE DE FIGURAS.....	vi
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivo específico.....	3
Hipótesis.....	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Aguas residuales.....	4
2.2 Clasificación de las aguas residuales.....	4
2.3 Caracterización de las Aguas residuales.....	7
2.4 Tratamiento de aguas residuales.....	9
2.4.1. Coagulación-Floculación.....	9
2.5 Las microalgas.....	10
2.6 Las microalgas presentes en el agua residual.....	12
2.7 Beneficios de las microalgas.....	12
2.8 Alimentación.....	12
2.9 Biomasa a partir de microalgas.....	15
2.10. Composición de lípidos de microalgas.....	15
2.11 Cultivos de microalgas.....	16
2.12. Sistemas de cultivo para microalgas.....	16
2.13. Aceite de microalgas.....	17
2.14. Extracción de lípidos.....	17
2.15. Biocombustibles.....	18
2.16. Generalidades.....	21
Los biocombustibles de primera generación (1G).....	21
Biocombustibles de segunda generación (2G).....	22
2.17. Calidad del aceite.....	23

2.18. Cantidad el aceite .....	24
2.18. Producción de biodiesel .....	24
<b>MARCO JURIDICO .....</b>	<b>25</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>27</b>
3.1. LUGAR, ÁREA DE TRABAJO Y PERIODO DE ESTUDIO .....	27
3.2. Instalación de los Fotobiorreactores .....	27
3.3. Muestreo .....	28
3.4. Variables de estudio .....	29
pH .....	29
Conductividad eléctrica (CE) .....	30
Sólidos Totales (ST) .....	30
Sólidos Totales Volátiles (STV) .....	32
Demanda Química de Oxígeno (DQO) .....	33
Temperatura (°C) .....	34
Nitrógeno total (N) .....	35
Fósforo (P) .....	36
Biomasa algal (mg/L) .....	37
Producción de biomasa (mgL-1h-1) .....	37
Diseño experimental .....	38
Análisis estadísticos de datos .....	38
<b>RESULTADOS .....</b>	<b>39</b>
4.3. Comportamiento de la Temperatura (Tratamiento 1) .....	49
4.4. Reproducibilidad y repetibilidad de las determinaciones de SST Y STV. ....	58
Reproducibilidad .....	58
Replicabilidad .....	58
4.4. Comportamiento de la biomasa algal durante el tratamiento del agua residual urbana .....	59
4.5. Remoción de DQO .....	62
<b>DISCUSIÓN .....</b>	<b>63</b>
<b>CONCLUSIÓN .....</b>	<b>65</b>
<b>LITERATURA CITADA .....</b>	<b>66</b>

## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características Físicas, Químicas y Biológicas del Agua Residual y su Procedencia (Barba-Ho, 2002).....	7
Cuadro 2. Microalgas empleadas en la degradación de diversos contaminante de aguas residuales (Fathi et al., 2013).....	13
Cuadro 3. Contenido de aceites de algunas especies de microalgas. ....	19
Cuadro 4. Hoy en día se pueden diferenciar distintos tipos de biomasa (Salinas-Callejas and Gasca-Quezada, 2009). ....	20
Cuadro 5. Obtención de biocombustibles en los diferentes procesos. ....	21
Cuadro 6. Productividad de biomasa y lípidos de diferentes tipos de Chlorella (Tejada-Benítez et al., 2015). ....	24
Cuadro 7. Límites máximos permisibles de contaminantes promedio mensual .....	25
Cuadro 8. Analisis de varianza para estimar el efecto del pH entre los tratamientos, los días de de duración y la hora de muestreo en el tratamiento de aguas residuales urbanas con microalgas nativas.....	48
Cuadro 9. Analisis de medias del pH para los tratamientos del agua residual urbana, utilizando el consorcio de microalgas nativas. Columnas con letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas significativas. ....	48
Cuadro 10. ANOVA del efecto los tratamientos, respecto de la temperatura, determinada a diferentes hora del día, durante los días de duración del tratamiento del agua residual urbana, utilizando microalgas nativas.. ....	55
Cuadro 11. Contenido de Remoción de DQO (mgL <sup>-1</sup> ) al final del experimento, comparado con el control. Se comparo el control y muestras de los tratamientos del agua residual, lo cual el mas alto de DQO, fue el tratamiento el T4 y T2 (López-Hernández et al., 2016). ....	62
Cuadro 12. Contenido de N (mgL <sup>-1</sup> ) al final del experimento, comparado con el control, lo cual el taramiento T1 y T2 resultaron mas altos de contenido de N (López-Hernández et al., 2016). ....	62

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cadena de un ácido graso. El ácido graso (C18:0 o ácido esteárico) a la izquierda. Ácido graso insaturado (C18:1 o ácido oleico) a la derecha. Éste último es de isomería (b) moléculas de lípidos. Triacilglicerol (lípidos neutro) en la izquierda. Fosfolípidos (lípidos polar) a la derecha. R', R'', R''' en las moléculas de acilglicerol representan cadenas de ácidos grasos (Halim et al., 2012). ....	16
Figura 2. Productividad de aceite de las microalgas en comparación con los cultivos convencionales. (1) 30% de aceite en biomasa (con base a peso seco); (2) 70% de aceite en biomasa (con base a peso seco). ....	18
Figura 3. Fotografía de los fotobiorreactores de vidrio de 20 L, como modelos para simulación de lagunas de alta tasa de producción de biomasa. ....	28
Figura 4. Muestra de 25 ml en cápsulas de porcelanas ....	31
Figura 5. Determinación de ST, crisoles después de 24 h en la estufa ....	32
Figura 6. Reactor para determinación de la DQO y espectrofotómetro portátil DR 900, HACH®. ....	34
Figura 7. La toma de temperatura se realizó con un termómetro de aguja (Taylor, USA, Patente No. 5, 775,488). ....	34
Figura 8. Colorímetro HACH DR/900 ....	35
Figura 9. Colorímetro HACH DR/900 ....	36
Figura 10. Representación fotográfica de los elementos empleados en el diseño experimental.....	39
Figura 11. Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 8:00 h durante seis días de duración del proceso. ....	41
Figura 12. Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 10:00 h durante seis días de duración del proceso. ....	42
Figura 13. Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 12:00 h durante seis días de duración del proceso. ....	43
Figura 14. Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 14:00 h durante seis días de duración del proceso. ....	43

Figura 15. Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 16:00 h durante seis días de duración del proceso. ....	44
Figura 16. Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I del primer día. ....	44
Figura 17. Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I del segundo día. ....	45
Figura 18. Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I del tercer día. ....	46
Figura 19. Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I del cuarto día. ....	46
Figura 20. Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I del quinto día. ....	47
Figura 21. Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I del sexto día. ....	47
Figura 22. Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 8:00 h durante seis días de duración del proceso. ....	49
Figura 23. Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 10:00 h durante seis días de duración del proceso. ....	50
Figura 24. Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 12:00 h durante seis días de duración del proceso. ....	50
Figura 25. Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 14:00 h durante seis días de duración del proceso. ....	51
Figura 26. Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 16:00 h durante seis días de duración del proceso. ....	51
Figura 27. Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el primer día del proceso. ....	52
Figura 28. Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el segundo día del proceso. ....	52
Figura 29. Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el tercer día del proceso. ....	53

Figura 30. Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el cuarto día del proceso. ....	53
Figura 31. Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el quinto día del proceso. ....	54
Figura 32. Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el sexto día del proceso. ....	54
Figura 33. Análisis de medias de los tratamientos considerando los días de duración del experimento para las variables de pH y temperatura (°C).....	56
Figura 34. Análisis de medias de los tratamientos considerando la hora del muestreo del experimento para las variables de pH y temperatura (°C).....	57
Figura 35. Análisis de medias para los tratamientos de aguas residuales para las variables de sólidos totales solubles (SST) y sólidos totales volátiles (STV). Letras diferentes, indican diferencias estadísticas significativas ( $\alpha = 0.05$ ).....	57
Figura 36. Repetibilidad del comportamiento de los sólidos solubles totales (SST) en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el proceso.....	59
Figura 37. Comportamiento de los sólidos totales volátiles (STV) en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el proceso de tratamiento de agua residual urbana. ....	60
Figura 38. Repetibilidad del comportamiento de los sólidos totales volátiles (STV) en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el proceso.....	60
Figura 39. Producción de biomasa (mg/L) en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el proceso.....	61
Figura 40. Repetibilidad de la biomasa (g/L) en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el proceso. ....	61

## RESUMEN

Más del 80% de las aguas residuales en los países en vías de desarrollo se descargan sin tratamiento, contaminando ríos, lagos y zonas costeras. El objetivo del presente estudio fue comparar la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO), N y P del agua residual urbana, utilizando fotobiorreactores expuestos al ambiente y estimar la producción de biomasa algal y obtención de agua para reúso en el sector agrícola. El trabajo se realizó en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. Como modelo de fotobiorreactores se utilizaron cuatro galones de vidrio de 20 L. Tres de ellos fueron para evaluar los tratamientos y uno como testigo control. Se evaluaron cuatro tratamientos. T1= 65% agua residual + 35 % mezcla de microalgas; T2= 65% + 30% y 5% de lodos activados; T3= 65% + 35% y 10 mg de Fertilizante (N, P, K, Mg y S) y T4= 65% + 30% + 5% y 10 mg de Fertilizante. Cada tratamiento se expuso cinco días al ambiente, limpiando apropiadamente los garrafones para reiniciar con el siguiente tratamiento. Los parámetros evaluados fueron pH y temperatura (°C) a las 8, 10, 12 y 14 h, sólidos solubles totales ( $\text{mgL}^{-1}$ ), sólidos totales volátiles ( $\text{mgL}^{-1}$ ) y la obtención de biomasa todos los días. Se arreglaron los tratamientos en un diseño completamente al azar con tres repeticiones, en el cual se encontraron diferencias estadísticas significativas para las variables de pH, temperatura, sólidos solubles totales y volátiles. La tendencia fue incrementar la temperatura durante el día. La eficiencia de remoción de T1-T4 para DQO fue del 64.5, 80.8, 36.9 y 86.4% respectivamente. Los niveles finales de N fueron medios; 25, 28, 36 y 26  $\text{mgL}^{-1}$  respectivamente y el pH alcanzó un máximo de 8.9 al quinto día. La máxima producción de biomasa se alcanzó al cuarto día de tratamiento.

**Palabras claves:** fotobiorreactores, biomasa algal, demanda química de oxígeno, sólidos totales volátiles.

## INTRODUCCIÓN

Se calcula que la Tierra tiene 1,386 millones de  $\text{Km}^3$  de agua. Es la única sustancia presente en la naturaleza que puede encontrarse tanto en forma sólida, líquida o gaseosa. Solamente el 0.007 % de esta es accesible para el consumo humano directo. En México se siembran 22 millones de hectáreas, los rendimientos de riego son 2.2 a 3.3 veces más que los de temporal. A nivel mundial, la agricultura de riego origina el 40% de la producción agrícola (SEMARNAT, 2012).

Más del 80% de las aguas residuales en los países en vías de desarrollo se descarga sin tratamiento, contaminando ríos, lagos y zonas costeras. Se denomina agua residual al agua que ha sido utilizada en las actividades diarias de tipo doméstico, industrial, agrícola u otro y que se contaminaron con sustancias fecales, orina, procedentes de desechos orgánicos de origen antropogénica, animales, además de residuos procedentes de la actividad industrial (Meza-Bazan, 2013).

Los métodos de tratamiento de las aguas residuales, donde se aplican fuerzas físicas se conocen como operaciones unitarias, mientras que los métodos de tratamiento en donde la remoción de contaminantes se debe a reacciones químicas o biológicas se llaman procesos unitarios. Actualmente operaciones y procesos unitarios se asocian para el tratamiento de aguas residuales municipales. Para realizar el tratamiento de las aguas residuales existen tres tipos de procesos: Físicos, fisicoquímicos y biológicos (Torres et al., 2006).

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos capaces de usar la energía solar y el dióxido de carbono para crear biomasa. Debido a que las células crecen en suspensión acuosa, éstas, debe tener acceso eficiente al agua,  $\text{CO}_2$ , y otros nutrientes (Widjaja et al., 2009). Las algas son las plantas de más rápido crecimiento en el mundo, son una fuente importante de biomasa, serán en corto plazo, una fuente competitiva como biocombustible, pueden ser cultivadas en casi cualquier lugar, incluso en aguas

residuales o agua salada, y no requiere de cultivos de tierras fértiles o alimento (Demirbas and Dermibas, 2011).

El primer uso de microalgas por los seres humanos se remonta 2000 años para los chinos, que utilizaron el género *Nostoc* para sobrevivir durante la hambruna. Sin embargo, la biotecnología de microalgas comenzó a desarrollarse a mediados del siglo pasado. Hoy en día, existen numerosas aplicaciones comerciales de las microalgas: (i) se pueden utilizar para mejorar el valor nutricional de alimentos debido a su composición química, (ii) que desempeñan un papel crucial en la acuicultura y (iii) pueden ser incorporadas en los cosméticos. Por otra parte, se cultivan como fuente de moléculas altamente valiosos (Spolaore et al., 2006).

## OBJETIVOS

### **Objetivo general**

Comparar la eficiencia de remoción N y P del agua residual urbana, utilizando fotobiorreactores expuestos al ambiente y estimar la producción de biomasa algal y obtención de agua para reúso en el sector agrícola.

### **Objetivo específico**

Determinar la eficiencia de remoción de DQO, N y P en los tratamientos.

Estimar la producción de biomasa entre tratamientos restando la producción del testigo.

### **Hipótesis**

Ho= El uso de microalgas permite la remoción eficiente de nutrimentos del agua residual urbana de Torreón.

Ha= El uso de microalgas no permite la remoción eficiente de nutrimentos del agua residual urbana de Torreón.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Aguas residuales

Se define como agua residual o agua servida, a las aguas que provienen del sistema de abastecimiento de aguas de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias (Varila-Quiroga and Díaz-López, 2008). Éstas, contienen tanto materia orgánica como inorgánica, y los microorganismos desempeñan un papel especialmente importante eliminando los compuestos orgánicos. El tipo de materia orgánica presente en el agua residual influye sobre el grado y la complejidad del tratamiento biológico, por lo que el análisis del fraccionamiento nos proporciona información complementaria para la optimización de los procesos (Rodríguez and Mañunga, 2012).

Sus características originales han sido modificadas por actividades humanas y por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado(Gomez, 2014).

Son materiales derivados de residuos domésticos o de procesos industriales, los cuales por razones de salud pública y por consideraciones de recreación económica y estética, no pueden desecharse vertiéndolas sin tratamiento en lagos o corrientes convencionales(Ecured, 2016).

El tratamiento de aguas residuales es necesario para que la población pueda proteger y aprovechar los recursos hídricos provenientes de ríos, lagos y acuíferos. Los problemas de contaminación del agua preocupan a la población respecto de su calidad y el mantenimiento de ecosistemas saludables (Ramírez Rueda, 2013).

### 2.2 Clasificación de las aguas residuales

Las principales fuentes de aguas residuales son: aguas domésticas, aguas residuales industriales, aguas de usos agrícolas y aguas pluviales. Aunque la mayor parte de las aguas servidas provienen del uso doméstico e industrial(Morgan and Benítez, 2016).

En general, se consideran:

Aguas pluviales. Es el agua resultante del escurrimiento superficial de las lluvias, no se considera como agua residual, sin embargo debido a su gran carga de contaminantes si se está considerando como tal, además de que en la mayoría de los casos es mezclada con el agua residual en la red de drenaje (Ulacia, 2014).

Agua dulce. Es vital para la vida humana y el bienestar económico. La sociedad extrae grandes cantidades de agua de los ríos, los lagos, los humedales y los acuíferos subterráneos para abastecer los requerimientos de las ciudades, el campo y la industria. Nuestra necesidad de agua dulce nos hizo pasar por alto los beneficios igualmente vitales de mantener el agua en su curso natural conservando los ecosistemas de agua dulce saludables (Jackson et al., 2013).

Las tres cuartas partes de la Tierra están cubiertas por agua, 97.5% es salada (forma mares y océanos) y sólo 2.5% es agua dulce, del cual sólo 0.3% se localiza en lagos y ríos de donde el hombre toma la mayor parte del agua que utiliza, el resto se encuentra en glaciares, casquetes polares en forma de hielo y en depósitos subterráneos (INEGI, 2016).

Agua subterránea. Es aquella parte del agua existente bajo la superficie terrestre que puede ser colectada mediante perforaciones, túneles o galerías de drenaje o la que fluye naturalmente hacia la superficie a través de manantiales o filtraciones a los cursos fluviales (Ordoñez, 2011).

Agua superficial. El agua superficial es aquella que se encuentra circulando o en reposo sobre la superficie de la tierra. Estas masas de agua sobre la superficie de la tierra, forma ríos, lagos, lagunas, pantanos, charcas, humedales, y otros similares, sean naturales o artificiales. El agua superficial es la proveniente de las precipitaciones, que no se infiltra ni regresa a la atmósfera por evaporación o la que proviene de manantiales o nacimientos que se originan de las aguas subterráneas (EPA, 2004).

Agua para uso urbano. El agua urbana está constituida por los recursos hídricos destinados a las viviendas, espacios públicos (tales como parques, jardines, estanques y fuentes), establecimientos comerciales e industriales establecidos en centros considerados urbanos (en nuestro país, el INEGI considera como tales todos aquellos asentamientos humanos de más de 2,500 habitantes) (Muñoz, 2015).

El agua se distribuye entre sus diferentes usos para satisfacer las necesidades de la sociedad y es frecuente diferenciar entre sus usos consuntivos y no consuntivos; entre los primeros se ubican el abastecimiento urbano, la agricultura, la ganadería y la industria, y entre los segundos se encuentran la producción de energía eléctrica, la refrigeración de plantas industriales y centrales energéticas, la acuicultura y los caudales con fines ambientales y paisajísticos. Aunque estas demandas no consumen prácticamente agua, condicionan y limitan el suministro de los usos consuntivos porque deben estar disponibles en el momento y lugar requeridos, y con la calidad adecuada (IMTA, 2003).

Aguas residuales domésticas (ARD). Son los líquidos provenientes de las viviendas o residencias, edificios comerciales e institucionales (Díaz et al., 2012).

Aguas residuales municipales. Son los residuos líquidos transportados por el alcantarillado de una ciudad o población y tratados en una planta de tratamiento municipal (Mayr, 2002).

Aguas residuales industriales. Predominan los productos de desecho de los procesos industriales. El volumen y las características de esta agua varían mucho, dependiendo del tipo de industria. Estas aguas están integradas por las descargas generadas en las actividades de extracción y transformación de recursos naturales usando bienes de consumo y satisfacción para la población. Se calcula que la industria genera el 43% de las aguas residuales (Fernández-Alba et al., 2002).

Aguas negras. Son las aguas residuales provenientes de inodoros, es decir, aquellas que transportan excrementos humanos y orina, ricas en sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales (CONAGUA, 2013).

Aguas grises. Son las aguas residuales provenientes de tinajas, duchas, lavamanos y lavadoras (Seoáñez-Calvo, 2005).

### 2.3 Caracterización de las aguas residuales

Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química y biológica. Las principales propiedades físicas del agua residual así como sus principales constituyentes químicos y biológicos y su procedencia se presentan en el Cuadro 1.

Las características físicas son adquiridas en su mayor parte, según sea el contenido total de sólidos en sus diferentes variantes de materiales flotantes, sustancias coloidales y productos disueltos (Huisman and De azevedo-Netto, 1988).

Las propiedades químicas del agua residual son proporcionadas por componentes que podemos agrupar en tres categorías, según su naturaleza: materia orgánica, compuestos inorgánicos y componentes gaseosos (Zamora et al., 2008).

Cuadro1. Características Físicas, Químicas y Biológicas del Agua Residual y su Procedencia (Barba-Ho, 2002).

CARACTERÍSTICAS	PROCEDENCIA
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>	
<b>Color</b>	Agua residual domestica e industrial, desintegración natural de materiales orgánicos.
<b>Olor</b>	Agua residual en descomposición, vertidos industriales
<b>Solidos</b>	Agua de suministro, aguas residuales, domesticas e industriales, erosión del suelo, infiltración y conexiones incontroladas.
<b>Temperatura</b>	Aguas residuales domesticas e industriales.

CONSTITUYENTES QUÍMICOS	
<b>ORGÁNICOS</b>	
<b>Carbohidratos</b>	Aguas residuales, comerciales e industriales
<b>Aceite y grasa</b>	Agua residual doméstica, comercial e industriales
<b>Pesticidas</b>	Residuos agrícolas
<b>Fenoles</b>	Vertidos industriales
<b>Proteínas</b>	Aguas residuales domésticas y comerciales
<b>Agentes tensoactivos</b>	Aguas residuales domesticas e industriales
<b>Otros</b>	Desintegración natural de materiales orgánicos
<b>INORGÁNICOS</b>	
<b>Alcalinidad</b>	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea
<b>Cloruros</b>	Agua de suministro, aguas residuales domésticas, infiltración del agua subterránea, ablandadores de agua.
<b>Metales pesados</b>	Vertidos industriales
<b>Nitrógeno</b>	Aguas residuales domésticas y residuos agrícolas
<b>pH</b>	Vertidos industriales
<b>Fósforo</b>	Aguas residuales domesticas e industriales, escorrentía residual
<b>Azufre</b>	Aguas de suministro, aguas residuales domesticas e industriales
<b>Compuestos tóxicos</b>	Vertidos industriales
<b>GASES</b>	
<b>Sulfuro de hidrógeno</b>	Descomposición de aguas residuales domesticas
<b>Metano</b>	Descomposición de aguas residuales domesticas
<b>Oxigeno</b>	Agua de suministro, infiltración del agua superficial
<b>CONSTITUYENTES BIOLÓGICOS</b>	
<b>Animales</b>	Cursos de agua y plantas de tratamiento
<b>Plantas</b>	Cursos de agua y plantas de tratamiento
<b>Protistas</b>	Aguas residuales domésticas, plantas de tratamiento

## 2.4 Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de las aguas residuales, también conocido como proceso de depuración, es un sistema utilizado para remover contaminantes del agua; en él los sólidos inorgánicos que el agua contiene son separados parcialmente, haciendo que el resto de los sólidos orgánicos queden convertidos en sólidos minerales o en compuestos orgánicos relativamente estables (Silva et al., 2008).

### 2.4.1. Coagulación-floculación

Los procesos de coagulación y floculación son una parte importante en el tratamiento de aguas residuales, son dos procesos usados para remover material particulado de las suspensiones. La coagulación es el proceso que desestabiliza las partículas suspendidas para la reducción de las fuerzas de separación entre ellas y la floculación consiste en la aglomeración, mediante la agitación moderada del agua, de las partículas que se desestabilizaron durante la coagulación, formando otras de mayor tamaño y peso específico “flóculos” (Bernal-Martínez et al., 2011).

El procesamiento del agua cruda contempla un tratamiento fisicoquímico, conocido como coagulación y floculación. La coagulación, se define como la adición de sustancias químicas y la provisión de mezcla, para que las partículas y algunos contaminantes disueltos se aglutinen en partículas más grandes que se puedan retirar mediante procesos de remoción de sólidos. Su aplicación incluye la remoción de especies químicas disueltas y la turbiedad del agua por adición de coagulantes químicos convencionales; además, la coagulación/floculación es un paso fundamental en el proceso de tratamiento del agua, no solamente porque remueve las partículas responsables de la turbiedad producida por las partículas suspendidas y por el material coloidal, sino porque también remueve los microorganismos que, a menudo, se adhieren a las partículas. Sin embargo, existen desventajas asociadas al uso de estos

coagulantes, como altos costos de adquisición, producción de grandes volúmenes de lodo y el hecho que afectan significativamente el pH del agua tratada (Guzmán et al., 2013).

## **2.5 Las microalgas**

Las microalgas son un conjunto heterogéneo de microorganismos fotosintéticos unicelulares procariontes (cianobacterias) y eucariontes, que se localizan en hábitats diversos tales como aguas marinas, dulces, salobres, residuales o en el suelo, bajo un amplio rango de temperaturas, pH y disponibilidad de nutrientes; se les considera responsables de la producción del 50% del oxígeno y de la fijación del 50% del carbono en el planeta (Hernández et al., 2009).

Estudios previos han demostrado la efectividad de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales, las cuales eran ricas en nitrógeno y fosforo. La caracterización de la microalga *Chlorella* sp bien adaptada a aguas residuales municipales altamente concentradas en la remoción y producción de biodiesel (Sánchez-Esquivel et al., 2009). Las condiciones apropiadas para un crecimiento algal vigoroso son: (I) suministro e nutrimentos y CO<sub>2</sub> en concentraciones adecuadas; (II) iluminación adecuada, (III) mantenimiento favorable de la temperatura y (IV) adecuada agitación, para evitar la precipitación de las células y asegurar una distribución homogénea de los componentes y luz (Tamiya, 1957).

El cultivo de microalgas en sistemas abiertos se desarrolla bien, pero solamente algunas especies se pueden mantener, en virtud del control del pH alcalino y un ambiente selectivo. Los fotobiorreactores cerrados ofrecen una opción para el manejo mono-específico de una diversidad de algas en comparación con los sistemas (Molina-Maruenda and Pajarón-Sotomayor, 1989).

Así mismo, se sabe que los parásitos son ubicuos en los sistemas biológicos y por tanto tendrán una función importante en controlar las poblaciones de algas en estudio. La

cepas típicas empleada para estos 5 propósitos son: *Chlorella*, *Arthrospira*, *Dunaliella* y *Haematococcus* (Bajpai et al., 2014).

Las microalgas constituyen un grupo muy diverso de organismos unicelulares que comprenden a protistas eucarióticos y a cianofíceas del reino procariótico. Se consideran uno de los grupos de organismos más versátiles en términos de su tamaño, forma y función ecológica; de la misma manera que las plantas, convierten la energía solar en energía química mediante la fotosíntesis. Forman la base de la cadena alimenticia para más del 70% de la biomasa mundial, y se consideran maquinarias fotosintéticas generadoras de pigmentos con una adaptación ecofisiológica y plasticidad bioquímica única; lo que les permite la bioconversión directa de la energía solar en compuestos químicos, bajo una variedad de condiciones medioambientales y a una velocidad mayor que cualquier otra fuente vegetal. Además de ser productoras primarias de los ambientes acuáticos, estos microorganismos fotosintéticos son útiles en aplicaciones de biorremediación (Bajpai and Zappi, 2014).

Poseen un gran potencial como fuente de varios productos químicos tales como polisacáridos, lípidos y pigmentos que sirven de base a la industria química. Y se constituyen en fuente directa de alimento, medicamentos, forraje, fertilizantes y combustible. Hoy es indiscutible la importancia económica de las microalgas, que a diferencia de las plantas superiores, contienen relativamente pequeñas cantidades de material estructural y muchos de los componentes celulares son de reconocido valor económico (Herrera et al., 2010).

Contienen una gran cantidad de pigmentos esenciales que bajo la acción de la luz solar y de sustancias inorgánicas simples como dióxido de carbono, compuestos nitrogenados y fosforados, a través del proceso fotosintético son transformados en compuestos orgánicos complejos como carbohidratos, lípidos, proteínas, etc., que posteriormente se acumulan en las células y en los tejidos de los organismos simples y superiores. Por el proceso de fotosíntesis también regulan el contenido de oxígeno y dióxido de carbono

en la atmósfera, colaborando en el control del efecto invernadero, las lluvias ácidas y el adelgazamiento de la capa de ozono (Travieso and Benitez-Echegoyen, 1988).

## **2.6 Las microalgas presentes en el agua residual**

En un primer estudio con cepas nativas de microorganismos presentes en las aguas residuales de la acuicultura, se estudiaron tres cultivos de algas: un consorcio indígena mixta y cultivos puros de *Chlorellay Scenedesmus*. Se evaluaron los efectos de las condiciones axénicas y no axénicas sobre la capacidad del sistema para mantener la función y capacidad de recuperación. Se utilizaron dos criterios de éxito para examinar la resistencia del sistema: la productividad de los productos finales deseables (biomasa, clorofila, almidón y lípidos) y la eliminación de nitratos y materia orgánica de las aguas residuales (Halfhide et al., 2014).

## **2.7 Beneficios de las microalgas**

Presentan una mayor eficiencia de conversión de la luz, la producción de biocombustibles de algas requiere significativamente menos área de tierra que, los sistemas de biocombustibles basados en cultivos agrícolas, incluso de origen vegetal. Además, las algas pueden ofrecer beneficios ecológicos adicionales mediante la reducción de los contaminantes antropogénicos en el medio ambiente y la reducción de la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire para mantener su equilibrio en el ciclo del carbono, con ellas adoptamos proceso de ingeniería ecológica de la tecnología de las algas y diseñar un sistema de crecimiento eficiente en utilizar el recurso natural sostenible (Remaraj et al., 2015).

## **2.8 Alimentación**

El consumo humano de microalgas se limita a pocas especies debido al estricto control sobre seguridad alimentaria, factores comerciales, demanda del mercado y preparación específica. Los 3 géneros más destacados son *Chlorella*, *Spirulina* y *Dunaliella*, que se comercializan como suplementos alimentarios (Hernandez and Labbe, 2014).

También algunas especies se comercializan por su valor medicinal, como *Chlorella* que protege contra la insuficiencia renal y promoción del crecimiento de *Lactobacillus* intestinales. Además favorece la disminución en concentraciones de colesterol sanguíneo. En cambio *Dunaliella* se comercializa por su contenido de  $\beta$ -caroteno (Morris, 2014).

Se ha logrado determinar además, que una dieta con *Chlorella* aumenta el nivel de antioxidantes en fumadores, conformándola como un suplemento que favorece la salud. Por otro lado, los poli y monosacáridos de *C. pyrenoidosa* son una fuente altamente potencial para la creación de fármacos contra tumores. Incluidos en una dieta (10%) se ha logrado determinar que disminuye la asimilación y previene la acumulación de dioxinas que no ha presentado toxicidad en roedores (Weimin and Yang, 2016).

El consumo humano de microalgas está restringido a unas pocas especies debido a las estrictas regulaciones de seguridad alimentaria, factores comerciales y demanda del mercado. Las especies que mayoritariamente se cultivan para consumo humano son *Chlorella*, *Spirulina* y *Dunaliella* y tienen como denominador común, crecer en estanques en medioambientes altamente selectivos siendo inmunes a la contaminación de otras algas y protozoos.

Entre los beneficios citados del consumo de *Chlorella*, se encuentran el tratamiento de úlceras gástricas, acción preventiva frente a la arterioesclerosis e hipercolesterol y actividad antitumoral. La *Spirulina* (*Arthrospira*) se utiliza debido a su elevado contenido proteico y su excelente valor nutricional; también es una fuente esencial de ácidos grasos y ácido linoleico que no pueden sintetizar los humanos (Hernández and Labbe, 2014).

Cuadro 2. Microalgas empleadas en la degradación de diversos contaminante de aguas residuales (Fathi et al., 2013).

Microalgas	Tipos de aguas residuales
<i>Protothecazopfi</i>	Hidrocarburos derivados del petróleo

<i>Chlorellapyrenoidosa</i>	Tintes azoicos en aguas residuales
<i>Chlorellasp.</i>	Residuos de ganadería digeridos anaeróbica.
<i>Ankistrodesmus</i> y <i>Scenedesmus</i>	Aguas residuales de industria del papel y alperujos
<i>Spirulinaplatensis</i>	Agua residual urbana
<i>Chlorellasokoniana</i>	Agua residual en heterotrofia sin luz
<i>Botryococcusbraunii</i>	Agua residual tras tratamiento secundario
<i>Scenedesmus</i>	Altos niveles de amonio en efluente de digestión anaerobia

La actual inestabilidad de los precios mundiales del petróleo ha motivado a los investigadores y empresarios para buscar alternativas de solución a las necesidades de combustible de transporte y energía. Los biocombustibles representan una prometedora alternativa a largo plazo a los combustibles derivados del petróleo, pero las materias primas actuales tienen muchos inconvenientes bien documentados, incluyendo los impactos del uso de la tierra cuestionables, escalabilidad insuficiente, reducciones mínimas netas de energía, y (GEI) de reducción de gases de efecto invernadero marginal (Bajpai et al. 2014).

Los biocombustibles producidos a partir de microalgas se afirma que tienen el potencial para hacer frente a estas deficiencias sobre la base de los resultados de las evaluaciones del ciclo de vida (LCA) recientes (Quinn et al., 2014).

Las microalgas fotosintéticas son organismos unicelulares que, durante su cultivo, pueden fijar el dióxido de carbono de manera eficiente de diversas fuentes, incluidos los gases del aire y de escape de los procesos industriales. Esta característica puede conducir a beneficios económicos en el proceso de producción de biodiesel a través del mecanismo de desarrollo limpio, para las que puedan concederse créditos de carbono para beneficios ambientales y que contribuirán a la reducción de costes en el proceso de producción (Soares et al., 2013).

## **2.9 Biomasa a partir de microalgas**

La parte aérea de las plantas, las cuales llevan a cabo la fotosíntesis y están por lo general en la fase de crecimiento suele denominarse biomasa verde. Ésta, contiene principalmente carbohidratos, proteínas, fibras, flavonoides, colorantes, vitaminas, hormonas, aminoácidos y enzimas pero menos almidón y lignina. La producción primaria de fotosíntesis en especies C3 en climas templados, pueden llegar a producir hasta 20 ton de materia seca y 4 ton de proteína por ha por año, mientras que las plantas C4 en climas tropicales pueden producir 80 ton de materia seca y 6 ton de proteína (Schönicke et al.).

La biomasa de microalgas como materia prima para la producción de biocombustibles es una alternativa que atrae a la utilización de las plantas terrestres para la producción de biocombustibles. Sin embargo, hoy en día los sistemas de cultivo de microalgas con fines de producción de energía parece todavía no ser económicamente viable. Las microalgas, aunque cultivada bajo condiciones de estrés, tales como el inanición de nutrientes, salinidad alta, alta temperatura, etc. acumular cantidades considerables (hasta el 60-65% de peso seco) de lípidos o hidratos de carbono junto con varios metabolitos secundarios (Markou and Nerantzis, 2013).

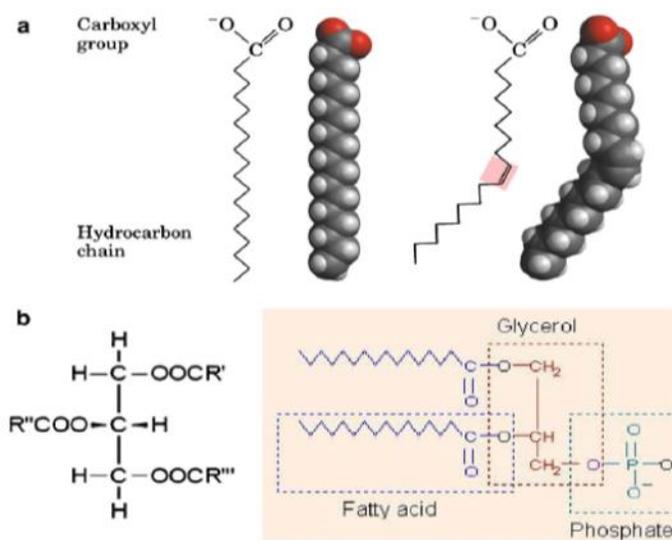
Los sistemas empleados con mayor frecuencia en la propagación de microalgas para la producción de biodiesel son del tipo abiertos que asemejan el entorno natural de las microalgas como lagos, lagunas y estanques. Las producciones y productividades de biomasa posibles en estos sistemas son bajas, cercanas a 1 g/l y 10-25 g/m<sup>2</sup>/d, respectivamente. Con estos bajos niveles productivos, los costos de producción son elevados, a pesar de la sencillez y el bajo costo de inversión en infraestructura, si se compara con sistemas cerrados (Faife-Pérez et al., 2012).

## **2.10. Composición de lípidos de microalgas**

Una moléculas de ácido graso consiste de un grupo carboxiladohidrofílico unido a un extremo de una cadena de hidrocarburo hidrofóbico Figura 1.

## 2.11 Cultivos de microalgas

El cultivo de microalgas tiene una gran importancia en la acuicultura, ya que son el primer alimento de varias especies de importancia comercial.



**Figura 1.** Cadena de un ácido graso. El ácido graso (C18:0 o ácido esteárico) a la izquierda. Ácido graso insaturado (C18:1 o ácido oleico) a la derecha. Éste último es de isomería (b) moléculas de lípidos. Triacilglicerol (lípidos neutros) en la izquierda. Fosfolípidos (lípidos polares) a la derecha. R', R'', R''' en las moléculas de acilglicerol representan cadenas de ácidos grasos (Halim et al., 2012).

## 2.12. Sistemas de cultivo para microalgas

En la producción de organismos fotoautótrofos existen 2 diseños básicos: cultivos abiertos, donde la biomasa está expuesta a las condiciones medioambientales; y cerrados, denominados fotobiorreactores o PBR (por sus siglas en inglés), con poco o ningún contacto con el medio externo. Un sistema de cultivo es diseñado en base a diversos criterios: la biología de las especies a cultivar; forma del cultivo; requerimientos nutricionales, lumínicos y resistencia al estrés; relación de la superficie iluminada /volumen del reactor que determina la velocidad de crecimiento; orientación e inclinación;

tipo de sistemas de mezcla y dispersión de gases; sistemas de limpieza y de regulación de la temperatura; transparencia y durabilidad del material; capacidad de escalado. Por último, son también importantes bajos costos de construcción y operación para fines comerciales. La elección del tipo de sistema de cultivo es compleja, siendo importante determinar el tipo y valor del producto final desarrollado a partir de la biomasa, además de la disponibilidad de recursos hídricos y suelo (Hernández-Pérez and Labbé, 2014).

### **2.13. Aceite de microalgas**

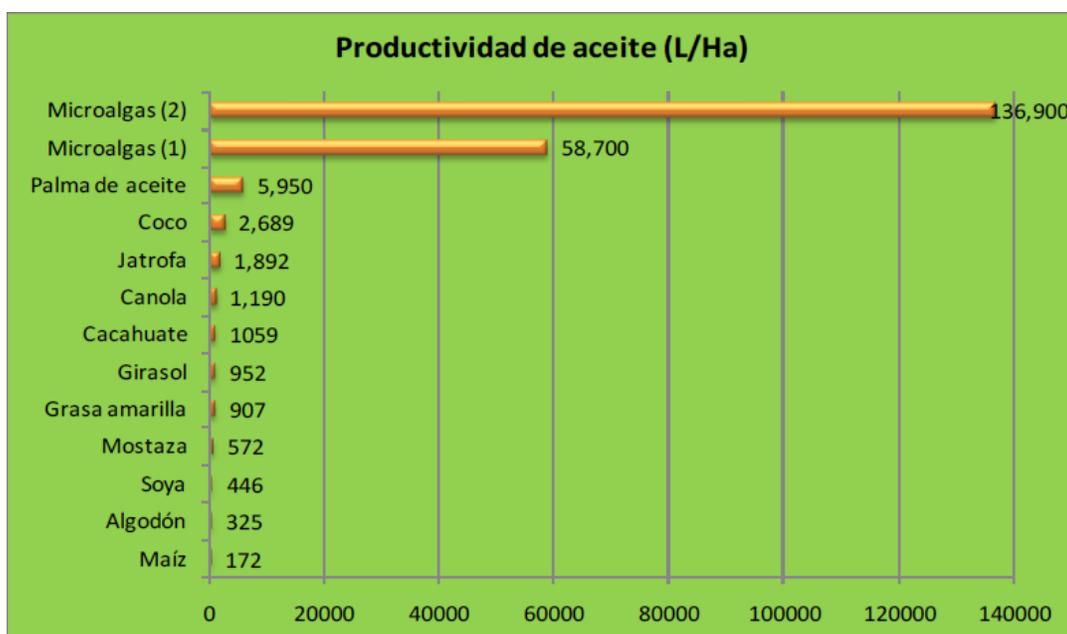
En las últimas décadas se ha destacado que las microalgas representan una alternativa más conveniente que cualquier otro tipo de organismo para la producción de triacilglicéridos y su conversión a biodiesel, ya que algunas especies oleaginosas, siendo organismos fotosintéticos, sólo requieren energía solar, agua, CO<sub>2</sub> y algunas sales para producir muy altos rendimientos de biomasa rica en lípidos. De hecho, son los organismos fotosintéticos más eficientes, absorben más CO<sub>2</sub> y liberan más O<sub>2</sub> que cualquier planta, crecen extremadamente rápido y llegan a acumular grandes cantidades de diversos productos. Algunas microalgas doblan su biomasa en 24 h y el tiempo de duplicación de biomasa durante la fase exponencial puede ser tan corto como 3.5 h. De manera más específica, los beneficios que se obtienen al usar microalgas para la producción de biodiesel son:

Las microalgas tienen un rendimiento de aceite mucho mayor que cualquier cultivo convencional. Es de 10 a 20 veces mayor que el derivado del aceite de palma y de 200 a 400 veces mayor que el derivado del aceite de soya (Fig. 2) (Loera-Quezada and Olguín, 2010).

### **2.14. Extracción de lípidos**

Extracción de lípidos de microalgas, prestando especial atención al uso de la extracción con disolventes orgánicos y extracción con fluidos supercríticos. Se concluye con una evaluación de cómo los diferentes procesos de pretratamiento celulares pueden efectuar

la extracción de lípidos de microalgas, así como una actualización sobre los últimos avances en el campo, tales como el desarrollo de un método de metilación en la extracción de lípidos de microalgas simultánea y el establecimiento de un método de extracción de lípidos de microalgas Cuadro 3 (Halim et al., 2012).



**Figura 2.** Productividad de aceite de las microalgas en comparación con los cultivos convencionales. (1) 30% de aceite en biomasa (con base a peso seco); (2) 70% de aceite en biomasa (con base a peso seco).

## 2.15. Biocombustibles

Se entiende por biocombustible aquellos combustibles que se obtienen de biomasa (Cuadro 4). El término biomasa, en el sentido amplio, se refiere a cualquier tipo de materia orgánica animal o vegetal que haya tenido su origen inmediato en el proceso biológico de organismos recientemente vivos, como plantas, o sus desechos metabólicos (el estiércol). En la actualidad se ha aceptado este término para denominar al grupo de productos energéticos y materias primas de tipo renovable que se origina a partir de la

materia prima orgánica formada por vía biológica. Quedan por tanto fuera de este concepto los combustibles fósiles o los productos orgánicos derivados de ellos, aunque también tuvieron su origen biológico en épocas remotas (Salinas-Callejas and Gasca-Quezada, 2009).

**Cuadro 3. Contenido de aceites de algunas especies de microalgas.**

Espece microalgas	Contenido de aceite (% del peso seco)	Productividad de lípidos (mg L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	Referencias
Parietochoris incisa (d)	60 <sup>a</sup>	NR	Solovchenko et al. (2008)
Nannochloropsis (m)	60 <sup>a</sup>	204	Rodolfi et al. (2009)
Neochlorisoleoabundans (d)	56 <sup>a</sup>	13.22	Gouveia et al. (2009)
Chlorellavulgaris (d)	42 <sup>a</sup>	12.77	Widjaja et al. (2009)
Cryptocodiniumcohnii (m)	41.14 <sup>a</sup>	82	Mendoza et al. (2008)
Scenedesmusobliquus (d)	43 <sup>b</sup>	NR	Mandal y Mallick (2009)
Neochlorisoleoabundans (d)	38 <sup>c</sup>	133	Li et al. (2008c)
Nannochloropsis (m)	28.7 <sup>c</sup>	90	Gouveia y Oliveira (2009)
Chlorellavulgaris (d)	27 <sup>c</sup>	127.2	Francisco et al (2010)
Nannochloropsisoculata (m)	30.7 <sup>c</sup>	151	Chiu et al. (2009)
Dunaliella (m)	67 <sup>c</sup>	33.5	Takagi et al. (2006)
Choricystisminor (d)	21.3 <sup>c</sup>	82	Mazzuca-Sobczuk y Chisti (2010)
Chlorellaprotothecoides (d)	50.3 <sup>d</sup>	NR	Xiong et al. (2008)
Chlorellavulgaris (d)	21 <sup>d</sup>	54	Liang et al (2009)
Scenedesmusrubescens (m)	73 <sup>e</sup>	NR	Matsunaga et al (2009)

<sup>a</sup> Cultivo bajo supresión de nitrógeno; <sup>b</sup> Cultivo bajo deficiencia de nitrógeno; <sup>c</sup> Cultivo con suficiencia de nutrientes; <sup>d</sup> cultivo heterotrófico; <sup>e</sup> Ausencia de nutrientes. m = marina y d = dulceacuícola; NR = no reportado (Pacheco-Vega et al., 2010)

Cuadro 4. Hoy en día se pueden diferenciar distintos tipos de biomasa (Salinas-Callejas and Gasca-Quezada, 2009).

<b>TIPO DE BIOMASA</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
<b>Biomasa primaria</b>	Es la materia orgánica formada directamente de los seres fotosintéticos. Este grupo comprende la biomasa vegetal, incluidos los residuos agrícolas y forestales.
<b>Biomasa secundaria</b>	Es la producida por los seres heterótrofos que utilizan en su nutrición la biomasa primaria. La constituyen la materia fecal o la carne de los animales.
<b>Biomasa terciaria</b>	Es la producida por los seres que se alimentan de biomasa secundaria, por ejemplo los restos y deyecciones de los animales carnívoros que se alimentan de herbívoros.
<b>Biomasa natural</b>	Es la que producen los ecosistemas silvestres; 40% de la biomasa que se produce en la tierra proviene de los océanos.
<b>Biomasa residual</b>	La que se puede extraer de los residuos agrícolas y forestales, y de las actividades humanas.
<b>Cultivos energéticos</b>	Recibe esta denominación cualquier cultivo agrícola cuya finalidad sea suministrar la biomasa para producir biocombustibles

## 2.16. Generalidades

Los biocombustibles son aquellos biocarburantes como alcoholes, éteres, ésteres y otros productos químicos que provienen de compuestos orgánicos de base celulósica (biomasa) extraída de plantas silvestres o de cultivo, que según la naturaleza de la biomasa, su uso energético y el uso del biocombustible deseado, se puede contar con diferentes métodos para obtener biocombustibles: procesos mecánicos (astillado, trituración y compactación), termoquímicos (combustión, pirolisis y gasificación), biotecnológicos (micro bacterianos y enzimáticos) y extractivos para obtener combustibles líquidos, sólidos y gaseosos (Cuadro 5)(Salinas-Callejas and Gasca-Quezada, 2009).

Cuadro 5. Obtención de biocombustibles en los diferentes procesos.

<b>Proceso de obtención de biocombustibles</b>			
	Técnicas	Productos	Aplicaciones
<b>Mecánicos</b>	Astillado	Leñas	Calefacción
	Trituración	Astillas	Electricidad
	Compactación	Briquetas	
		Aserrín	
<b>Termoquímicos</b>	Pirolisis	Carbón	Calefacción
	Gasificación	Aceites	Electricidad
		Gasógeno	Transporte Industria química
<b>Bioteconológicos</b>	Fermentación	Etanol	Transporte
	Digestión	Biogás	Industria química
	Anaeróbica		Calefacción Electricidad
<b>Extractivos</b>	Extracción físico-química	Aceites	Transporte
		Ésteres	Industria química
		Hidrocarburos	

### Los biocombustibles de primera generación (IG)

El uso de biocombustibles como fuente alterna al uso de hidrocarburos y a la reducción del impacto ambiental es un sentido nuevo, pero su empleo se ha hecho desde mucho

tiempo atrás. Por ejemplo, en los países subdesarrollados (sobre todo en zonas rurales) se emplean los rastrojos y la leña. En los países desarrollados se aprovecha la madera para generar electricidad, a diferencia del subdesarrollo, hay una verdadera industria silvícola sustentable que permite renovar los bosques y explotar su madera. Los biocombustibles líquidos más usados actualmente son: Los bioalcoholes que son alcoholes de origen orgánico (Bajpai et al. 2014).

Están formados por dos tipos fundamentales: el etanol y el metanol y Losbioaceites que se obtienen de las oleaginosas y de aceites vegetales fritos (aceite de cocina). Los biocombustibles, no tiene impacto neto en la cantidad de dióxido de carbono que hay en la atmósfera. Algunos la consideran energía renovable en la medida en que el ciclo de plantación y cosecha se podría repetir indefinidamente, teniendo en cuenta que no se agoten los suelos ni se contaminen los campos de cultivo. Un ejemplo en que los biocombustibles son benéficos para el medio ambiente es el uso del etanol en automóviles de Brasil (Sturm et al. 2011).

De acuerdo con la Unión Industrial de Caña de Azúcar (única), en su estudio muestra que hasta fines de julio de 2008 deberían de sembrarse más de 120 millones de árboles para neutralizar la contaminación por veinte años; con el uso de etanol, la contaminación a partir de 2003 se ha reducido en 90%. El uso de biocombustibles se adapta con mayor flexibilidad a la tecnología ya existente; en cambio, si se toma otra fuente alternativa como es el hidrógeno, se requiere una tecnología diferente y llevaría a la necesidad de reemplazar toda la tecnología existente desarrollada por el uso de hidrocarburos. Las mezclas de etanol con gasolina permiten que los motores funcionen mejor (como es el caso de E85), no obstante que la distancia recorrida por litro sea menor (Serna et al., 2011).

### **Biocombustibles de segunda generación (2G)**

Los biocombustibles de segunda generación (2G) se distinguen de los de primera generación en dos aspectos: se obtienen de vegetales que no tienen una función

alimentaria, y se producen con innovaciones tecnológicas que permitirán ser más ecológicos y avanzados que los actuales. Como se obtienen de materias primas no alimentarias, se pueden cultivar en tierras marginales que no se emplean para el cultivo de alimentos (UNESCO, 2010).

En este sentido, permiten una mayor diversificación con nuevas materias primas, nuevas tecnologías y nuevos productos finales, promoviendo de esta forma el desarrollo agrícola y agroindustrial. Se ha encontrado que la biomasa proveniente de la celulosa puede ser una materia prima básica en la producción de biocombustibles de segunda generación (B2G). La biomasa de celulosa permite generar el bioetanol celulósico, de manera que se pueden usar los desperdicios de los aserraderos y se puede reorientar y ampliar la silvicultura para diversificar el uso de los bosques y protegerlos de su desmonte para usos agrícolas y ganaderos (UNESCO, 2010).

### **2.17. Calidad del aceite**

La elección de la especie es el primer paso para el desarrollo de un proceso de producción, ya que el éxito depende principalmente de ello. La especie debe tener las características adecuadas para condiciones de cultivo muy particulares para obtener productos específicos. Entre las principales características deseables para cultivos a gran escala están: crecimiento rápido, alto contenido de productos de alto valor agregado, desarrollo en ambientes extremos, células grandes en colonias o filamentos, gran tolerancia a condiciones ambientales, tolerancia a niveles altos de CO<sub>2</sub> (15% o más), a contaminantes y al efecto físico de la agitación o turbulencia. Además, no debe excretar autoinhibidores (Loera-Quezada and Olguín, 2010).

### 2.18. Cantidad el aceite

La viabilidad para obtener biodiesel a partir de aceite de microalga depende de la productividad para producir biomasa y de cuánta de esta biomasa corresponde a lípidos. El Cuadro 6 muestra la productividad de lípidos para otros tipos de *Chlorella*, se puede observar que la *C. vulgaris* aparece en varios trabajos reportados con una alta productividad de biomasa, pero al incluir el contenido de lípidos, la *Chlorellasp* de este estudio alcanza una productividad de lípidos ligeramente mayor. Por otro lado, estudios con *Chlorella* de cultivos mixotróficos han mostrado altas tasas de crecimiento, en comparación con los autótrofos o heterótrofos (Tejada-Benítez et al., 2015).

Cuadro 6. Productividad de biomasa y lípidos de diferentes tipos de *Chlorella* (Tejada-Benítez et al., 2015).

Microalgas	Productividad de biomasa (mg L <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> )	Contenido de lípidos (%)	Productividad de lípidos (mg L <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> )
<i>Chlorellasp.</i>	98.61	40.23	39.67
<i>Chlorellavulgaris</i>	170	19.2	32.6
<i>Chlorellavulgaris</i>	200	18.4	36.9
<i>Chlorellavulgaris</i> fototrófica	10	33-38	4
<i>Chlorellavulgaris</i> heterotrófica	80	23-36	27-35
<i>Chlorellavulgaris</i> mixotrófica	90	21-34	22-54
<i>Chlorellasp</i>	129	31.12	53.96
<i>Chlorellasp.</i>	58.4	32	17.99

### 2.18. Producción de biodiesel

El biodiesel es un biocombustible líquido compuesto de alquil-ésteres de alcoholes de cadena corta como etanol y metanol, con ácidos grasos de cadena larga obtenidos a partir de biomasa renovable: aceites vegetales, grasas animales y aceites de microalgas. Se han hecho esfuerzos considerables para el desarrollo de derivados lipídicos

(triglicéridos) que se asemejen a las propiedades y comportamiento de energéticos a base de hidrocarburos fósiles.

Las microalgas más utilizadas para la producción de biodiesel corresponden a las microalgas clasificadas como diatomeas y algas verdes. El proceso de producción de biodiesel está conformado en términos generales por las etapas de cultivo de microalgas, cosecha, secado, extracción lipídica y transesterificación. Las microalgas por lo general se cultivan en sistemas cerrados (fotobiorreactores). Seguidamente se da inicio a la etapa de cosecha con el propósito de remover el agua y concentra las células, esta se puede realizar comúnmente por centrifugación, sedimentación, filtración y floculación (Mehrabadi et al. 2015).

Luego de la recolección, para aumentar la vida útil de la biomasa es común aplicar. Deshidratación mediante métodos como secado al sol, por aspersion y liofilización. Finalmente se extrae el aceite mediante procedimientos mecánicos, químicos o enzimáticos y este es transformado en biodiesel y glicerol, mediante la reacción de transesterificación alcalina (Fernández-Linares et al., 2012)

### MARCO JURIDICO

Normatividad en agua residual establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público (Cuadro 7).

Cuadro 7. Límites máximos permisibles de contaminantes promedio mensual

TIPO DE REÚSO	COLIFORME FECALES NMP/100 ML	HUEVOS DE HELMINTO (H/L)	GRASAS Y ACEITES MG/L	DBO5 (MG/L)	SST (MG/L)
SERVICIOS PÚBLICOS AL CONTACTO DIRECTO	240	1	15	20	20

<b>SERVICIOS PÚBLICO CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL</b>	<b>AL CON</b>	1,000	5	15	30	30
---	-------------------	-------	---	----	----	----

La NOM-001-SEMARNAT-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar su reúso.

NOM-002-SEMARNAT-1996. Esta NOM establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas.

NOM-003-SEMARNAT-1997. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, sin poner en riesgo la salud de los usuarios.

NMX-AA-005-SCFI-2013 Análisis de agua – Medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (CANCELA A LA NMX-AA-005-SCFI-2000).

### **3.MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Lugar, área de trabajo y periodo de estudio**

El presente estudio se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna con ubicación en el Periférico Raúl López Sánchez Km 2. CP 27059 Torreón Coahuila. En las instalaciones del Departamento de Agroecología, se realizaron las determinaciones durante el periodo de enero-mayo del 2016 en los laboratorios del Departamento de Agroecología, Riego y Drenaje, así como de Suelos de la misma institución.

#### **3.2.Instalación de los Fotobiorreactores**

Un fotobiorreactor se define como un sistema cerrado dedicado a producir biomasa fotoautotófica, donde la energía es administrada por luz artificial (López Sánchez y Morales-Narváez, 2006). En nuestro caso fue luz natural.

Estos fotobiorreactores fueron diseñados para poner en práctica cuatro tratamientos de aguas residuales, mediante el empleo de microalgas nativas y periodos de tiempo no mayores de cinco días (Figura 3).



**Figura 3.** Fotografía de los fotobiorreactores de vidrio de 20L, como modelos para simulación de lagunas de alta tasa de producción de biomasa.

### 3.3. Muestreo

El diseño del proyecto consistió en la instalación de cuatro reactores de vidrio con una capacidad de 20L, los cuales contaban cada uno con una bomba de aire modelo ELITE 799, con un caudal de 19 L/h y una salida a la que se conectaba una manguera de 1 metro de largo, misma que en el extremo contrario conectaba con un difusor de aire, el cual se introducía a cada reactor respectivamente, se encendía a las 8:00 h y apagaba a las 16:00 h. Las tomas de muestras se realizaron en cinco horarios: 8:00, 10:00, 12:00, 14:00 y 16:00 h durante cinco días.

Se consideró la Norma Mexicana. NMX-003-AA-1980. Muestreo de aguas residuales, para la toma de muestras.

Se realizaron determinaciones diarias para sólidos suspendidos totales (SST), sólidos volátiles (SV), pH y temperatura. Así mismo, se caracterizó el agua residual empleada al

inicio de cada tratamiento y se determinó Demanda Química de Oxígeno (DQO), N, y P a los días 4 y 5 de los tratamientos.

### 3.4. Variables de estudio

Las variables en el presente trabajo fueron:

- pH (concentración de ion hidrógeno)
- Temperatura (°C)
- Sólidos totales (ST,  $\text{mgL}^{-1}$ )
- Sólidos totales volátiles (STV,  $\text{mgL}^{-1}$ )
- Demanda química de oxígeno (DQO,  $\text{mgL}^{-1}$ )
- Nitrógeno total (N,  $\text{mgL}^{-1}$ )
- Fósforo total (P,  $\text{mgL}^{-1}$ )
- Biomasa algal ( $\text{mgL}^{-1}$ )
- Producción de biomasa ( $\text{mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$ ).

#### pH

El pH es la concentración de iones de hidrogeno en una muestra. La medición del pH del agua es importante debido a que valores altos o bajos son tóxicos para los organismos acuáticos, ya sea directamente o indirectamente. Es un parámetro relevante utilizado en la evaluación de las propiedades corrosivas de un medio ambiente acuático.

Determinación de pH:

Se midió el pH a las muestras de aguas residuales con el potenciómetro ThermoScientificOrion 4 StarPlus™. Se calibró según las instrucciones del manual, se utilizaron dos puntos de calibración.

Se lavó el electrodo con agua destilada y se sumergió en cada reactor, se esperó a que la lectura se estableciera y se retiró para lavar de nuevo y continuar con la siguiente toma. La norma seguida para la medición de este parámetro fue la siguiente: NMX-AA-008-SCFI-2011 – Análisis de agua - Determinación del pH -Método de prueba.

**Conductividad eléctrica (CE)**

La CE es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura.

Determinación de CE:

Se encendió el equipo y se realizó la calibración para su uso de acuerdo al manual del equipo HANNA HI 993310. Las muestras y la disolución de calibración se mantuvieron a temperatura ambiente. Se enjuagó el electrodo antes de realizar la medición para evitar contaminación de la muestra por electrolitos. Se sumergió el electrodo en la muestra, se agitó, se dejó reposar. Una vez estabilizada la lectura, se anotó el valor de conductividad.

La norma seguida para la medición de este parámetro fue la siguiente: NMX-AA-093-SCFI-2000 Determinación de la conductividad electrolítica - Método de prueba.

**Sólidos Totales (ST)**

Se define a los sólidos totales como la suma de los sólidos suspendidos totales, sales disueltas y materia orgánica.

Determinación de sólidos totales (ST):

La determinación de ST se realizó conforme a lo establecido en la norma; NMX-AA-034-SCFI-2001.

En función de la cantidad de sólidos probables se pesó una cantidad de muestra a temperatura ambiente previamente homogenizada de 25 ml que contuvo como mínimo 25 mgL<sup>-1</sup> de sólidos totales.

Se transfirieron 25 ml de la muestra a una cápsula de porcelana (previamente puesta a peso constante registrado como m1). Se secó la muestra en la estufa (MAPSA HDT-18) hasta alcanzar una temperatura de 103°C – 105°C por 24 horas. Se transfirió al

deseccador por 25 minutos o hasta alcanzar la temperatura ambiente y se determinó su peso ( $m_2$ ) en una balanza analítica Explorer OHAUS.



**Figura. Muestra de 25 ml en cápsulas de porcelana.**

**Figura 4.** Muestra de 25 ml en cápsulas de porcelanas

Se calculó el contenido de sólidos totales de las muestras como:

$$ST = (m_2 - m_1) / V$$

Dónde:

ST: Son los sólidos totales, en  $\text{mgL}^{-1}$ ;

$m_2$ : es la masa de la cápsula con el residuo, después de la evaporación, en mg;

$m_1$ : es la masa de la cápsula vacía a peso constante, en mg

V: es el volumen de muestra, en L.

La toma de muestras para determinar ST se realizaba una vez al día a las 13:00 horas y era procesada el mismo día. Se preparaban dos repeticiones por reactor para de esta forma tener resultados más confiables de los valores de ST. Cada crisol se encontraba etiquetado para evitar confusiones y llevar un registro correcto de las determinaciones realizadas.



**Figura 5.**

**Figura 5.** Determinación de ST, crisoles después de 24 h en la estufa

### **Sólidos Totales Volátiles (STV)**

Los STV es la cantidad de materia orgánica (incluidos aquellos inorgánicos) capaz de volatilizarse por el efecto de la calcinación a  $(550 \pm 50)$  °C en un tiempo de 15 a 20 min.

Determinación de sólidos totales volátiles (STV):

Se introdujo la cápsula conteniendo el residuo de ST a la mufla (Felisa) a  $550^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$  durante 25 min, se transfirió la cápsula a un desecador por 25 minutos o hasta alcanzar su temperatura ambiente y al hacerlo se determinó su peso registrado como m3.

Se calculó el contenido de sólidos totales volátiles de las muestras como:

$$\text{STV} = (m_3 - m_2) / V.$$

Dónde:

STV: es la materia orgánica total, en  $\text{mgL}^{-1}$ ;

M3: es la masa de la cápsula con el residuo, después de la calcinación, en mg;

M2: es la masa de la cápsula con el residuo, después de la evaporación, en mg;

V: es el volumen de muestra, en L.

La determinación de ST se realizó conforme a lo establecido en la norma; NMX-AA-034-SCFI-2001.

Se utilizaron dos repeticiones por reactor para reducir el coeficiente de variación.

### **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Se tomaron las muestras para DQO los días 1, 4 y 5 de cada tratamiento. Para realizar este muestreo se emplearon tubos de ensayo con tapa de rosca con contratapa. Estos eran etiquetados con el número del biorreactor, el día en que iba el tratamiento y el número de tratamiento. Para conservar la muestra se disminuía el pH de estas a un valor de 2 o menor, añadiendo ácido sulfúrico 4M al tubo de ensayo y se introducían al refrigerador en caso de no poder medir al momento el DQO.

Al realizar el análisis se tomaba dos mililitros con una pipeta automática, se vierten en un vial y agitan por 10 segundos en vortex. Posteriormente se introducía la muestra en el digestor HACH DR/890 a 150°C por 120 minutos.

Enseguida se enfriaron los tubos a temperatura ambiente y se realizó la lectura en el colorímetro HACH DR/900. Para esto se empleaban viales de digestión HACH especiales para DQO (o COD por sus siglas en inglés, ChemicalOxygenDemand), los cuales fueron procesados en un reactor COD. Representa el contenido orgánico total de muestra, oxidable por dicromato de potasio en solución ácida.

Durante los tratamientos es tomada como una medida de la actividad microalgal. Al inicio y final de los tratamientos es considerada como la carga contaminante.

Para la toma, conservación y análisis de las muestras se tomó en cuenta la NMX-AA-030/2-SCFI-2011 – Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba - Parte 2 - determinación del índice de la demanda química de oxígeno – Método de tubo sellado a pequeña escala.



**Figura 6.** Reactor para determinación de la DQO y espectrofotómetro portátil DR 900, HACH®.

Los anteriores métodos analíticos se realizaron de acuerdo con las metodologías propuestas por Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Rice et al. 2012). Los valores de pH se obtuvieron empleando un electrodo de vidrio (Ultra BASIC Series Meter; Denver, Colorado, USA). Las concentraciones de Fósforo total (P), Nitrógeno total (N) y demanda química de oxígeno (DQO), fueron determinadas empleando equipo HACH (DR/890; Loveland, Colorado, USA), considerando las instrucciones del fabricante. Y valores de temperatura con un termómetro convencional.

### Temperatura (°C)

Las mediciones de temperatura se realizaron introduciendo un termómetro convencional en los orificios de cada biorreactor, estas mediciones se efectuaban cinco veces al día.



**Figura 7.** La toma de temperatura se realizó con un termómetro de aguja (Taylor, USA, Patente No. 5, 775,488).

### **Nitrógeno total (N)**

Debido a que el nitrógeno es un nutriente esencial para organismos fotosintéticos, es importante el monitoreo y control de descargas del mismo al ambiente.

Los compuestos nitrogenados se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza. Las fuentes de nitrógeno incluyen además de la degradación natural de la materia orgánica, fertilizantes, productos de limpieza y tratamiento de aguas potables (SEMARNAT, 2001a).

Determinación de Nitrógeno:

La determinación de nitrógeno total se realizó de acuerdo a las especificaciones del manual de procedimientos del colorímetro HATCH DR/900.

Se tomó una muestra de 50 ml de la parte aerobia del biorreactor y de esta se tomaron cinco mililitros de muestra y se transfirieron a un vial. Se agitó por 10 segundos en vórtex.

Después se pasó la muestra al digestor HACH DR/900 a 105°C por 30 minutos.

Enseguida se enfriaron los tubos a temperatura ambiente y se realizó la lectura en el colorímetro HACH DR/900.



**Figura 8.**Colorímetro HACH DR/900

Los análisis se realizaron de acuerdo a la norma: NMX-AA-026-SCFI-2001 Determinación de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba.

## Fósforo (P)

El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de organismos, por lo que la descarga de fosfatos en cuerpos de aguas puede estimular el crecimiento de macro y microorganismos fotosintéticos en cantidades nocivas.

El fósforo generalmente se encuentra en aguas naturales, residuales y residuales tratadas como fosfatos. Éstos se clasifican como ortofosfatos, fosfatos condensados y compuestos órgano fosfatados. Estas formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes, tales como productos de limpieza, fertilizantes, procesos biológicos, etc.(SEMARNAT, 2001b).

Determinación de Fósforo:

La determinación de fósforo total se realizó de acuerdo a las especificaciones del manual de procedimientos del colorímetro HATCH DR/900.

Se tomó una muestra de 50 ml de la parte aerobia del biorreactor y de esta se tomaron cinco mililitros de muestra y se transfirieron a un vial. Se agitó por 10 segundos en vórtex. Se vaciaron en el vial y se agitó por 10 segundos en un vortex cada tubo.

Después se introdujo la muestra en el digestor HACH DR/900 a 105°C por 30 minutos y cumplido el tiempo del digestor, se enfriaron los tubos a temperatura ambiente y se realizó la lectura en el colorímetro HACH DR/900.



**Figura 9.** Colorímetro HACH DR/900

Los análisis se realizaron de acuerdo a la norma: NMX-AA-029-SCFI-2001 Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba.

### **Biomasa algal (mg/L)**

Las microalgas ofrecen el gran atractivo de producir biomasa susceptible de ser convertida en combustibles como metano, etanol, biodiésel, bioqueroseno o hidrógeno además de otros bioproductos de amplia utilización en el sector farmacéutico y cosmético (betacarotenos, omega-3, etc.).

Las microalgas tienen un gran rendimiento y dependiendo de la variedad pueden acumular hasta un 60% de su peso en aceites que se pueden transformar en biodiésel y otros biocarburantes. Otra importante característica es que las algas son captadoras de CO<sub>2</sub>, por lo que al cultivarlas para producir biocombustibles se absorbe este gas que tanto afecta al calentamiento global. Las algas pueden fijar el CO<sub>2</sub> de las emisiones industriales forzando su difusión al medio líquido en el que se desarrollan formando compuestos orgánicos mediante la fotosíntesis, aprovechando la energía solar. La producción masiva de microalgas contribuye, de esta forma, a paliar el efecto invernadero y a restablecer el equilibrio térmico del planeta.

### **Producción de biomasa (mgL-1h-1)**

En diversos estudios ecológicos, la necesidad de estimar la producción de biomasa y diversidad es importante para desarrollar planes de manejo sustentable de los recursos naturales. La producción de biomasa, energética o medioambiental, mediante la utilización de efluentes y/o su aplicación a suelos degradados, es una solución integral para las industrias del sector minero-metalúrgico. A partir de problemas medioambientales, y con la aplicación de técnicas avanzadas de tratamientos de líquidos y suelos, y un conocimiento profundo de procesos agronómicos, se plantea la producción de un bien tangible, en el caso de uso comercial de la biomasa o los cultivos protectores, o no tangible, en el caso de aplicaciones paisajísticas o medioambientales (Espinoza-Bretado and Návar, 2005).

### **Diseño experimental**

Para evaluar el efecto de los tratamientos, se utilizó un diseño experimental completamente al azar, con un control (agua residual) y cuatro tratamientos (Figura 4):

T1= 65% agua residual + 35 % mezcla de microalgas;

T2= 65% de agua residual + 30% de mezcla con microalgas y 5% de lodos activados;

T3= 65% de agua residual + 35% de mezcla de microalgas y adición de 10 mg de Fertilizante (N, F, K, Mg y S); y

T4= 65% de agua residual + 30% de mezcla de microalgas + 5% de lodos activados y 10 mg de Fertilizante, todos con tres repeticiones cada uno.

### **Análisis estadísticos de datos**

Los datos serán analizados serán concentrados en hoja de Excel y sometidos a análisis estadístico mediante paquete de StatisticAnalysisSistem (SAS, 2015).





**Figura 10.** Representación fotográfica de los elementos empleados en el diseño experimental.

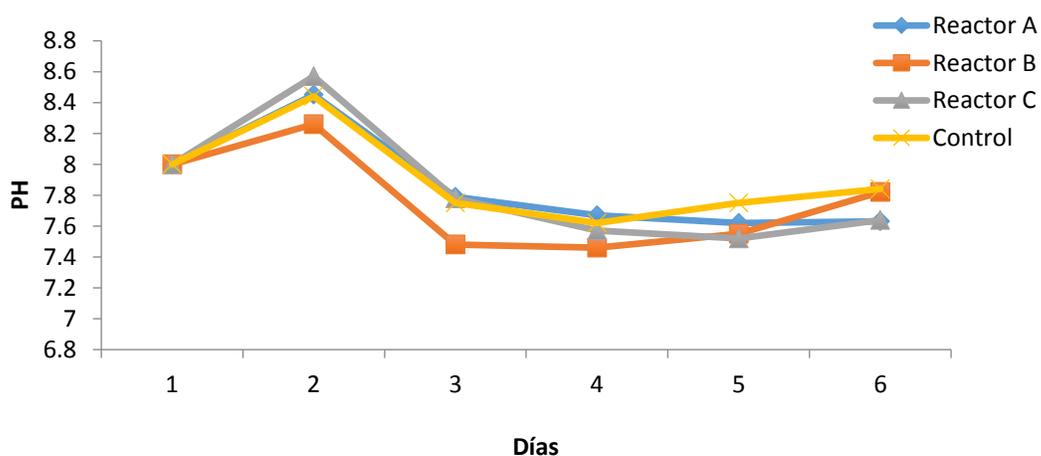
## RESULTADOS

De acuerdo a los resultados encontrados en el presente estudio, la composición del agua residual urbana y los tratamientos empleados al inicio del experimento se presentan en el Cuadro 9, Correspondiendo a una típica agua residual urbana, que por sus concentraciones se clasifica como de composición media de acuerdo con Rawat *et al.* (2011).

Cuadro 8. De composición del agua residual urbana empleada en el tratamiento.

En lo que respecta alComportamiento del pH (Tratamiento 1) nuestros resultados encontrados, (Figura 11), en general fue que el pH tiende a bajar, para el primer tratamiento. Con excepción del reactor B, el comportamiento de los demás fue similar, durante el tiempo de tratamiento, en la toma de muestra a las 8 h.

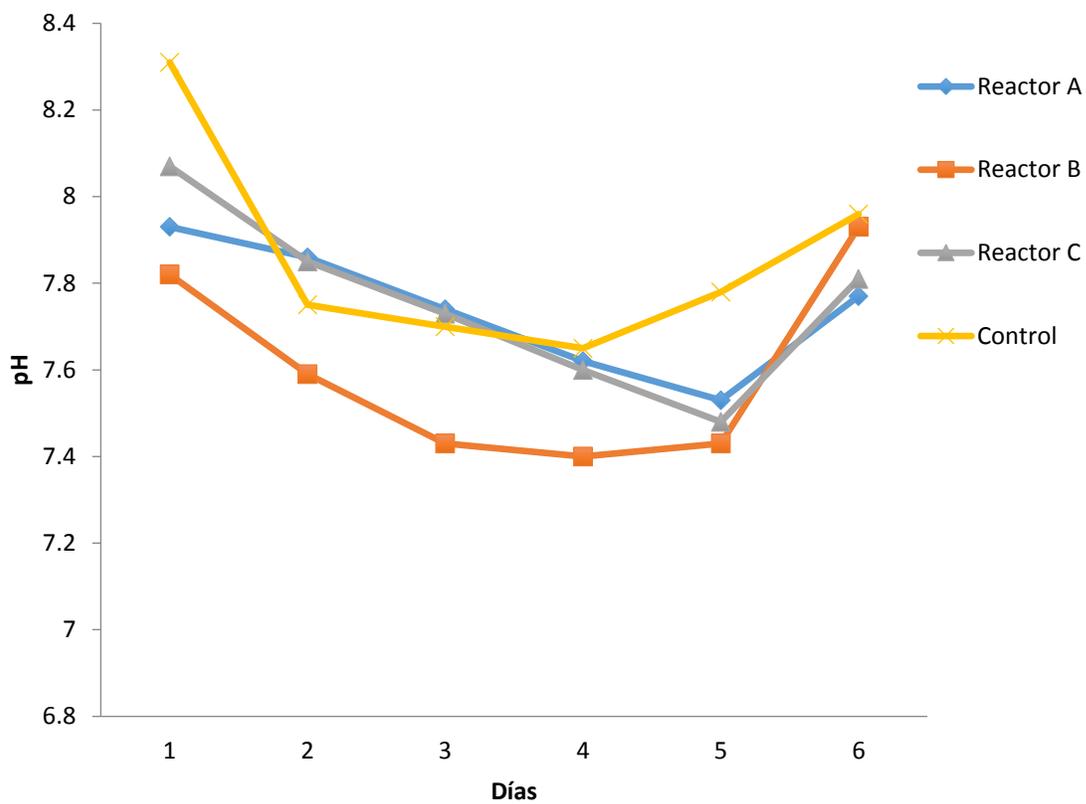
TRATAMIENTOS	DQO mg/L	PH	SST mg/L	STV
Control T1	250	7,9	205	ND
T1 -M	250	8	393	273
Control T2	584	8,2	156	88
T2-M	584	8,27	138	42
Control T3	236	8,46	191	98
T3-M	236	8,37	138	80
Control T4	690	9,2	202	88
T4-M	690	8,98	174	76



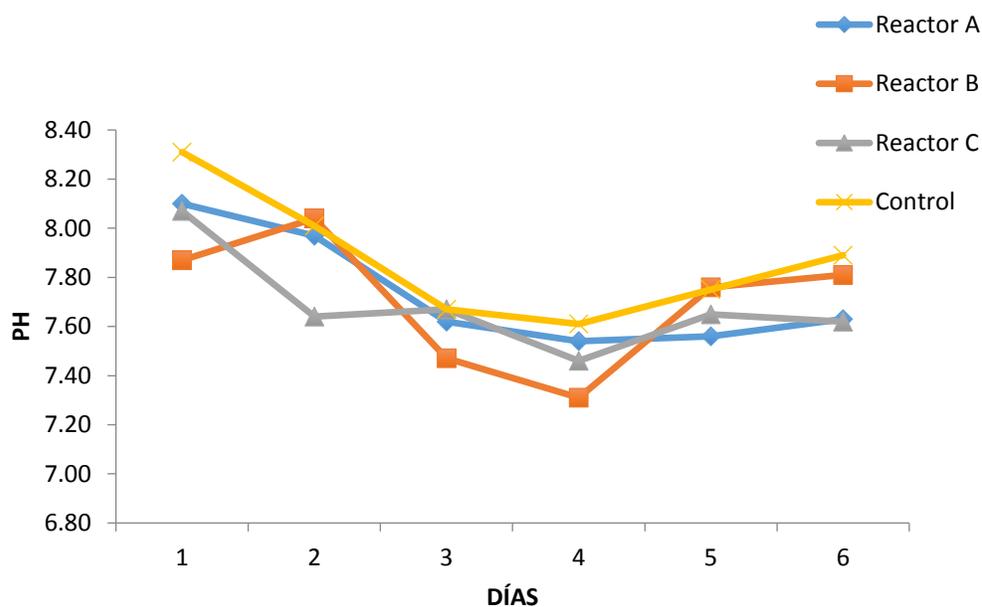
**Figura 11.** Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 8:00 h durante seis días de duración del proceso.

El comportamiento del pH para la toma de muestra a las 10 h (**Figura 12**), en general tendió a bajar durante los días del tratamiento y subir el pH a 8 en el sexto día de tratamiento. Similar comportamiento se observa para las 12, 14 y 16 h (**Figuras 13-15**). En el horario de mayor variación del pH tuvimos un incremento debido a factores climáticos como lo fue el nublado y las lluvias.

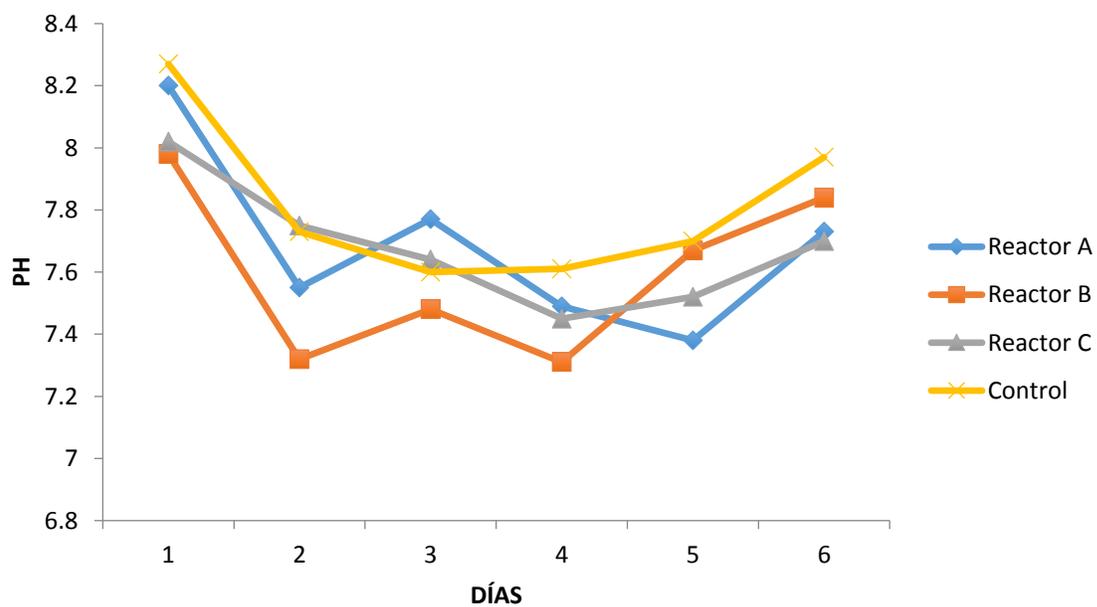
Por otra parte, al promediar los datos para la hora de muestreo, para el tratamiento 1, en el primer día, el control presentó el comportamiento de pH más alto y las repeticiones, correspondiendo a los reactores (A, B y C) presentaron variaciones, donde el reactor A al final del primer día, terminó como inició su pH (**Figura 16**).



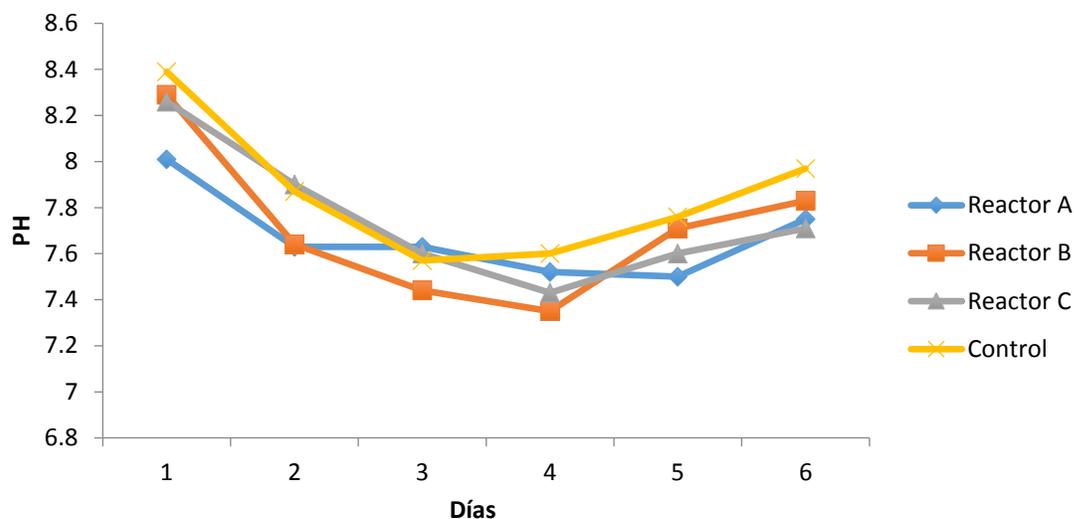
**Figura12.** Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 10:00 h durante seis días de duración del proceso.



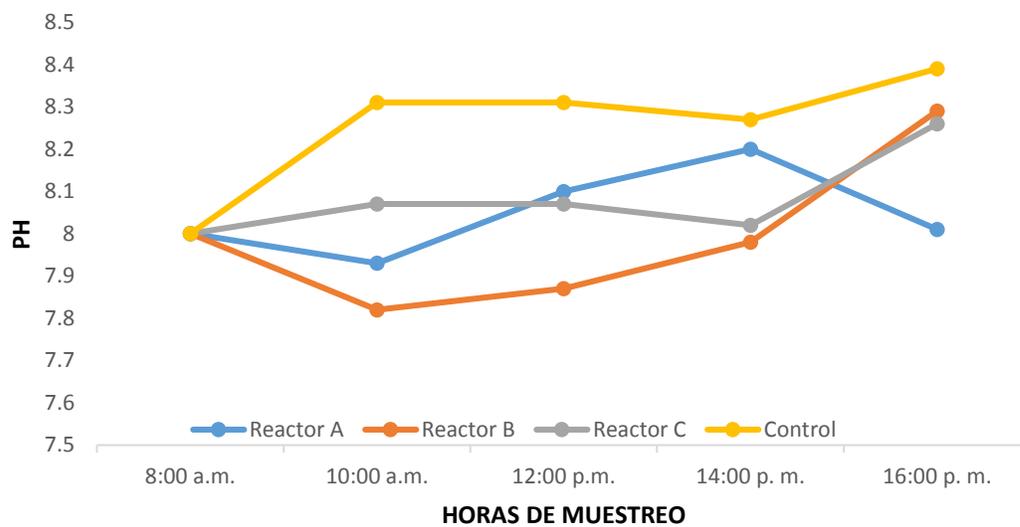
**Figura 13.** Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 12:00 h durante seis días de duración del proceso.



**Figura 14.** Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 14:00 h durante seis días de duración del proceso.

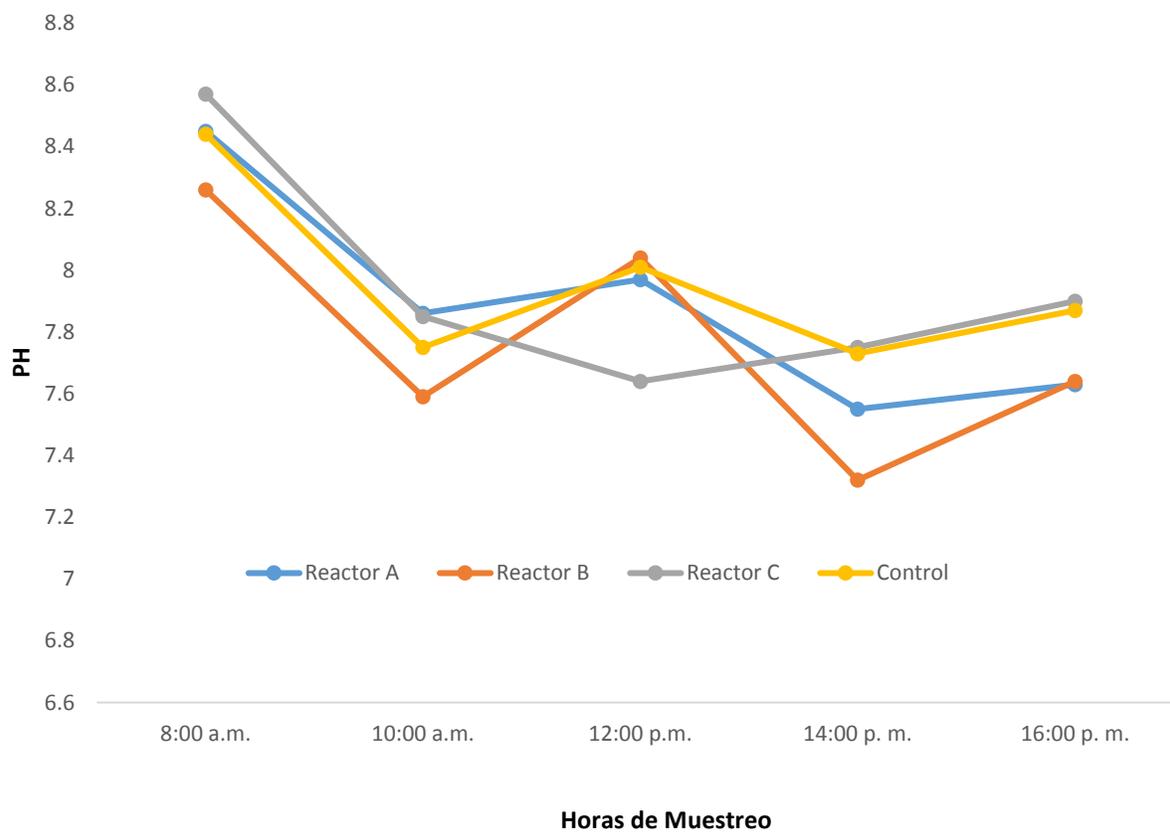


**Figura 15.** Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 16:00 h durante seis días de duración del proceso.

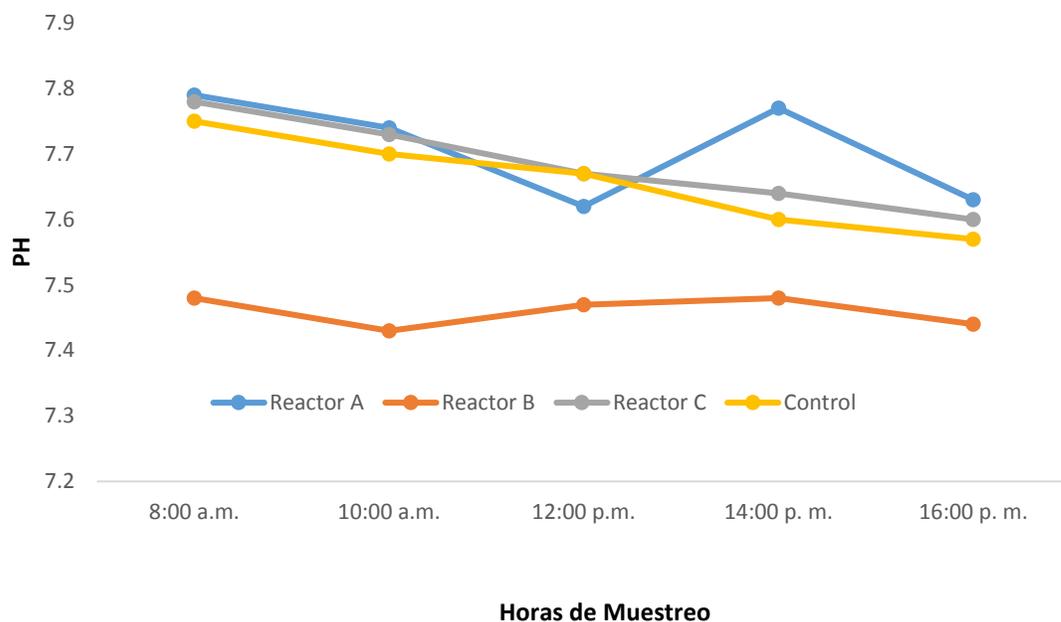


**Figura 16.** Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I del primer día.

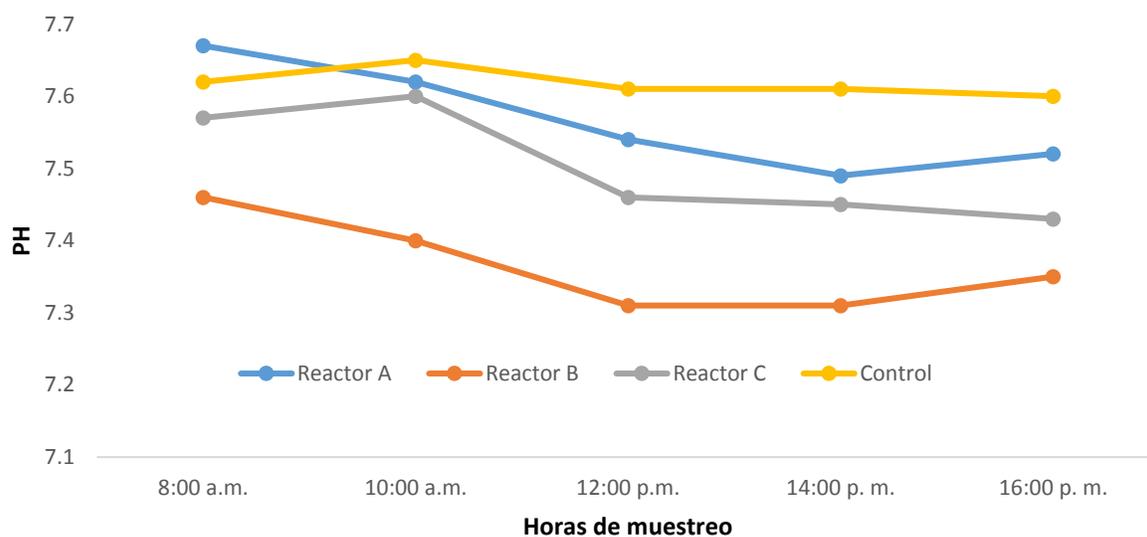
De acuerdo con los resultados para días de tratamientos, se observó unatendencia a disminuir el pH, durante el transcurso del día (**Figuras 17-21**), con variaciones bruscas con el tratamiento 2,5 y 6 probablemente debido a factores climáticos (nublado y lluvia).



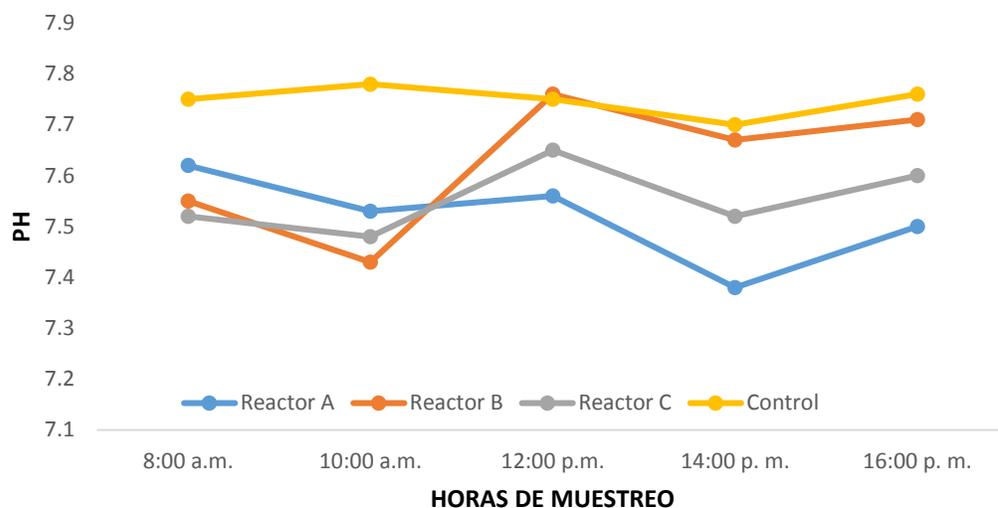
**Figura 17.** Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I del segundo día.



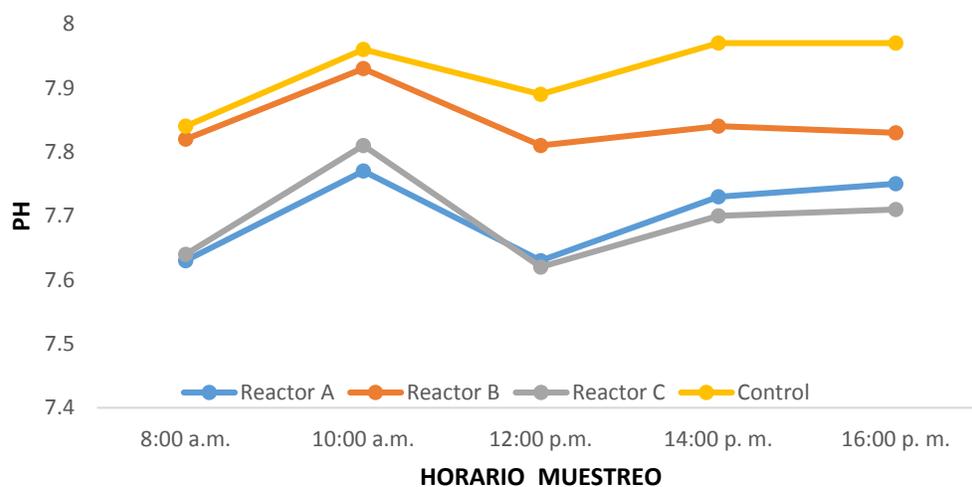
**Figura 18.** Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I del tercer día.



**Figura 19.** Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I del cuarto día.



**Figura 20.** Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I del quinto día.



**Figura 21.** Comportamiento del pH en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I del sexto día.

De acuerdo con el análisis de varianza (ANOVA), (Cuadro 9). Se encontraron diferencias altamente significativas entre tratamientos, días y horas, así como interacción entre estos para la variable pH.

Cuadro 9. Análisis de varianza para estimar el efecto del pH entre los tratamientos, los días de duración y la hora de muestreo en el tratamiento de aguas residuales urbanas con microalgas nativas.

Fuente	GL	SC	CM	Fc	P > F
Trat	3	120,06	40,019	1035,24	<0,0001
Días	4	15,296	3,834	98,92	<0,0001
Hora	4	2,612	0,653	16,89	<0,0001
Trat x Día	12	22,195	1,849	47,85	<0,0001
Tat x Hora	12	2,843	0,236	6,13	<0,0001
Día x Hora	16	3,003	3,003	4,86	<0,0001

Por otra parte, el análisis de medias, todos los tratamientos fueron diferentes estadísticamente ( $\alpha = 0.05$ ), lo implica el efecto del tratamiento sobre la variable.

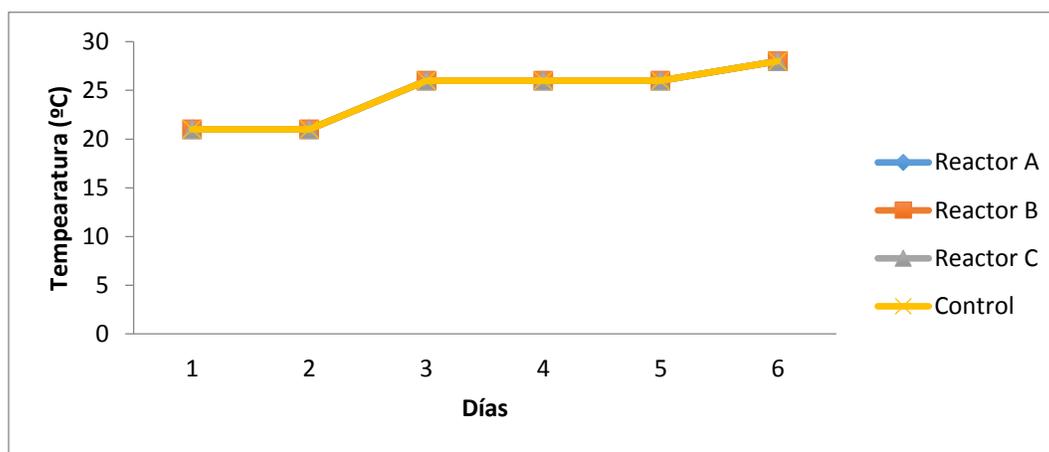
Cuadro 10. Análisis de medias del pH para los tratamientos de agua residual urbana, utilizando el consorcio de microalgas nativas. Columnas con letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas significativas.

Tratamientos	pH	TEMP
T1	7.71 <sup>D</sup>	34.21 <sup>B</sup>
T2	8.37 <sup>C</sup>	35.77 <sup>A</sup>
T3	8.68 <sup>B</sup>	31.14 <sup>C</sup>
T4	9.47 <sup>A</sup>	34.37 <sup>B</sup>

El tratamiento que presentó el mayor pH fue en el día 5 se encuentra el mayor pH y la hora de muestreo lo fue a las 16 h. Durante los 4 tratamientos de las muestras del agua residual el más alto de pH fue el tratamiento 4, con un pH de 9.47<sup>A</sup>.

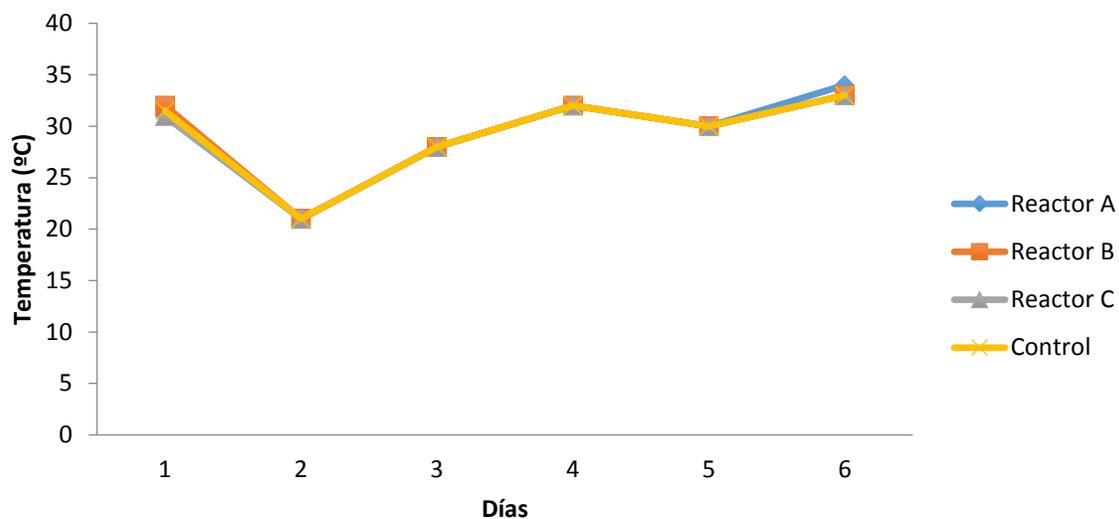
### 4.3. Comportamiento de la Temperatura (Tratamiento 1)

De acuerdo con los resultados encontrados en el estudio para la variable de temperatura a través de los días, durante la toma de muestra a las 8 h, Figura 12, la tendencia del comportamiento es incrementarse al paso de los días.

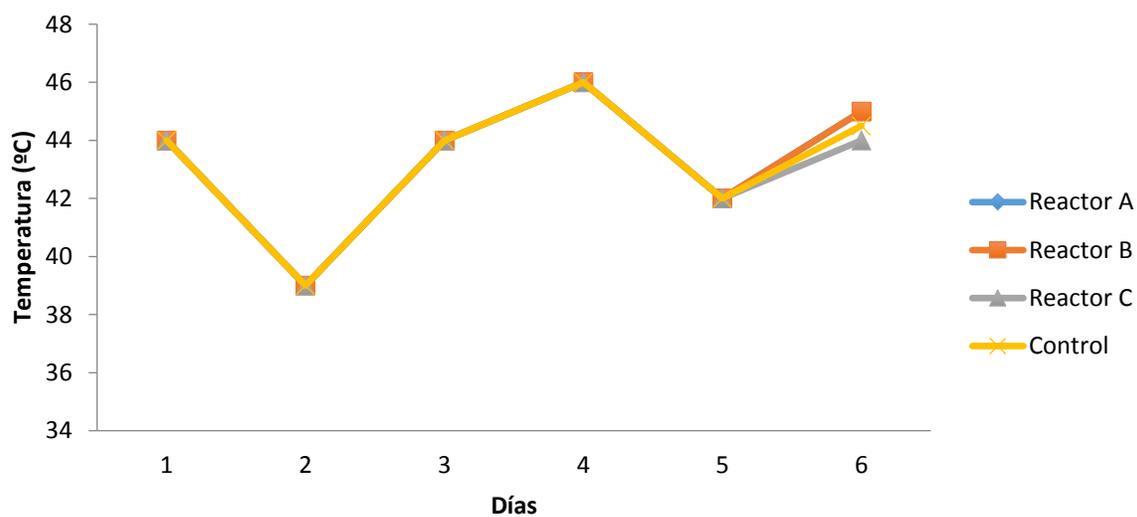


**Figura 22.** Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 8:00 h durante seis días de duración del proceso.

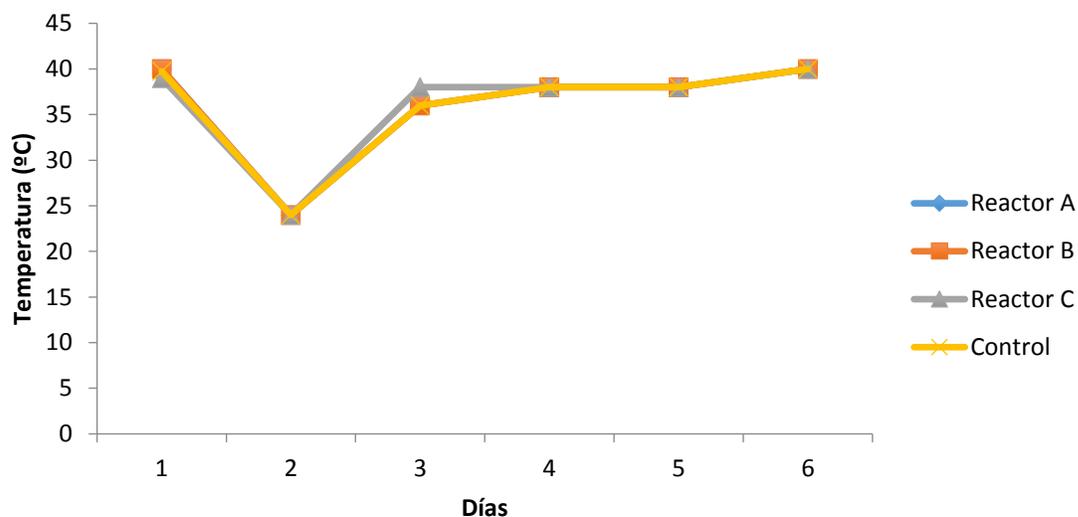
Así mismo, la tendencia a incrementarse la temperatura con el transcurso de la hora de muestreo, durante los días de tratamientos, fueron similares en comportamiento a los de las 8 h con excepción del día 2 y 5 día en los que se observaron efectos ambientales adversos (nublado y lluvias). La tendencia de incrementarse la temperatura durante el día se puso de manifiesto al observarse como inicia (temperatura baja) y termina con una mayor temperatura al final del día, observándose poca variación entre las determinaciones en los diferentes reactores (**Figura 22-32**).



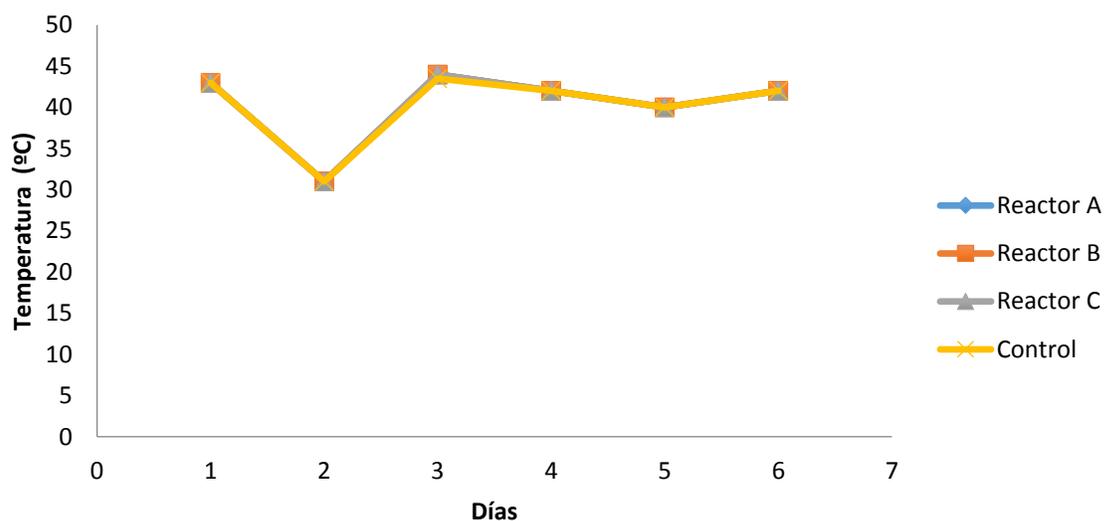
**Figura 23.** Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 10:00 h durante seis días de duración del proceso



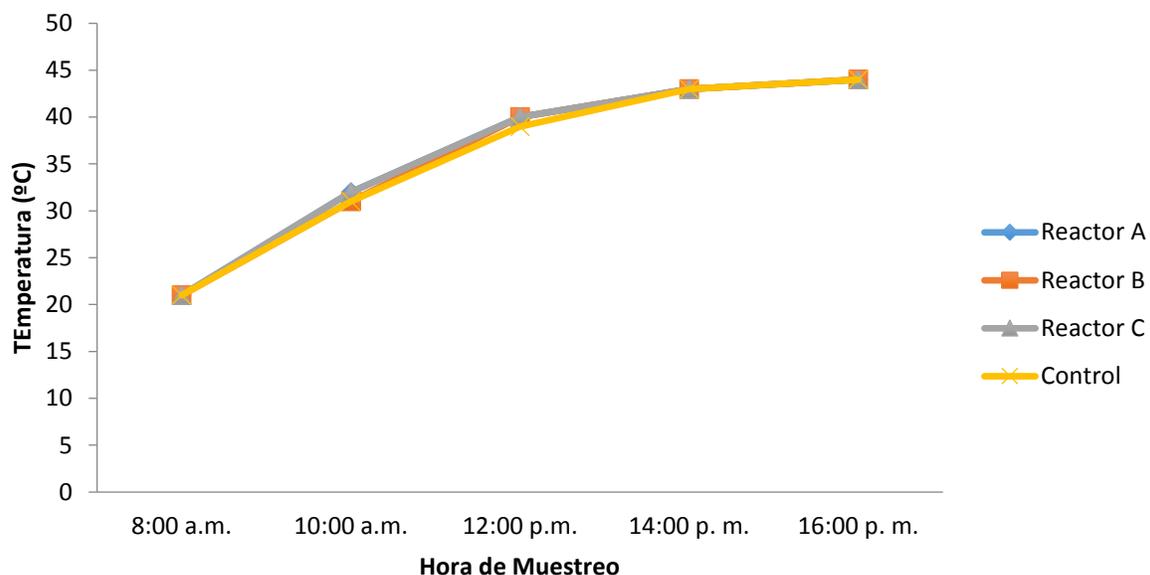
**Figura 24.** Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 12:00 h durante seis días de duración del proceso.



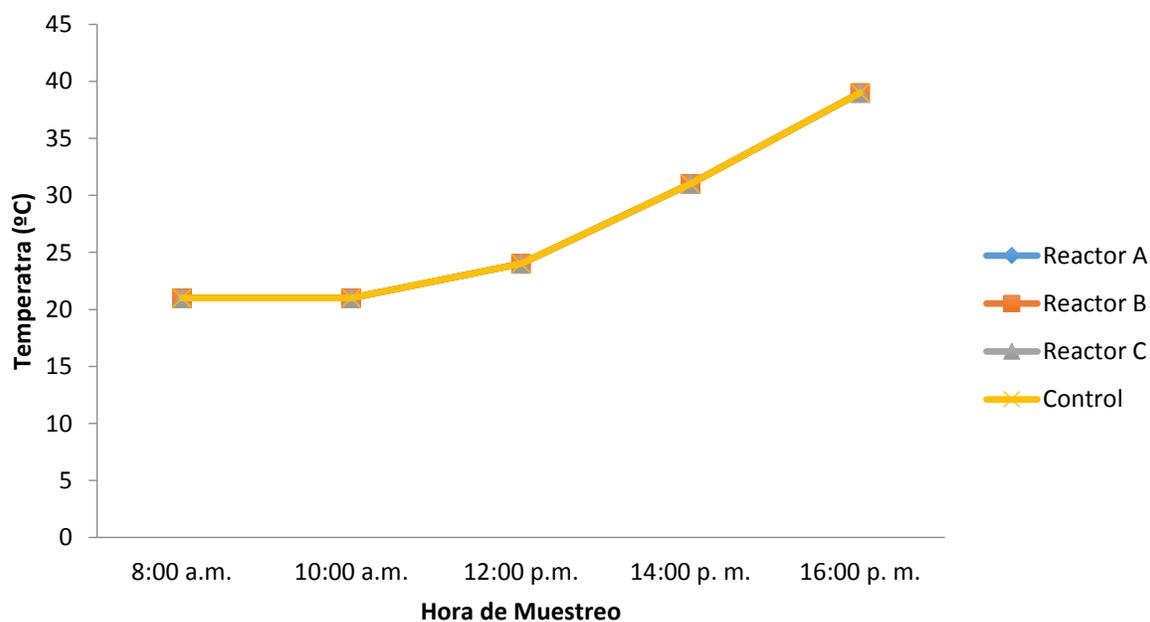
**Figura 25.** Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 14:00 h durante seis días de duración del proceso.



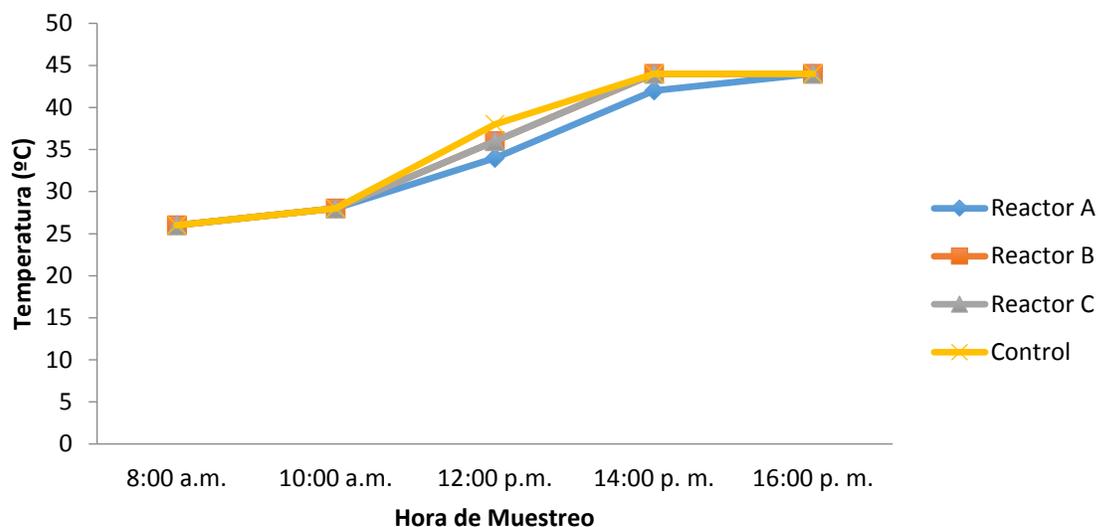
**Figura 26.** Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I a las 16:00 h durante seis días de duración del proceso.



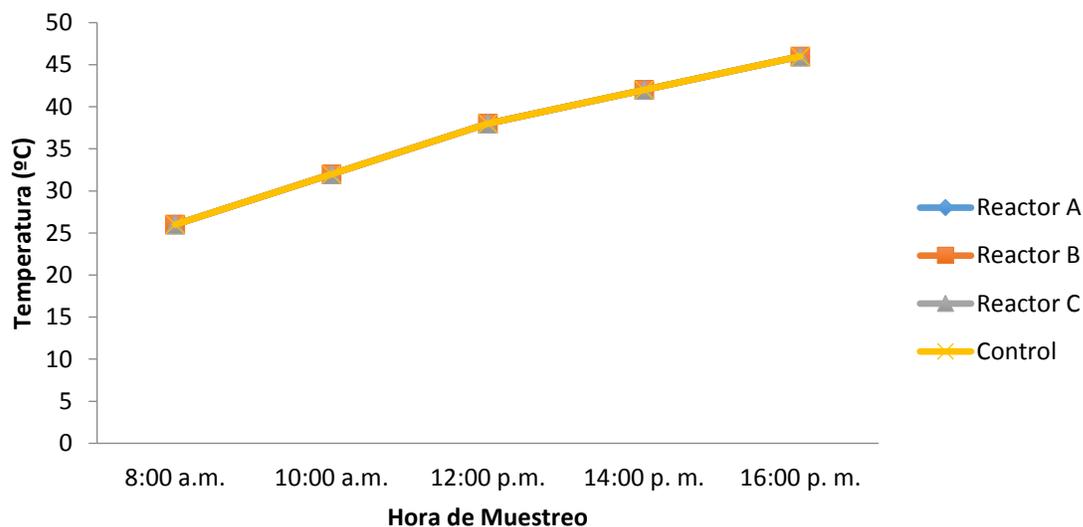
**Figura 27.** Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el primer día del proceso.



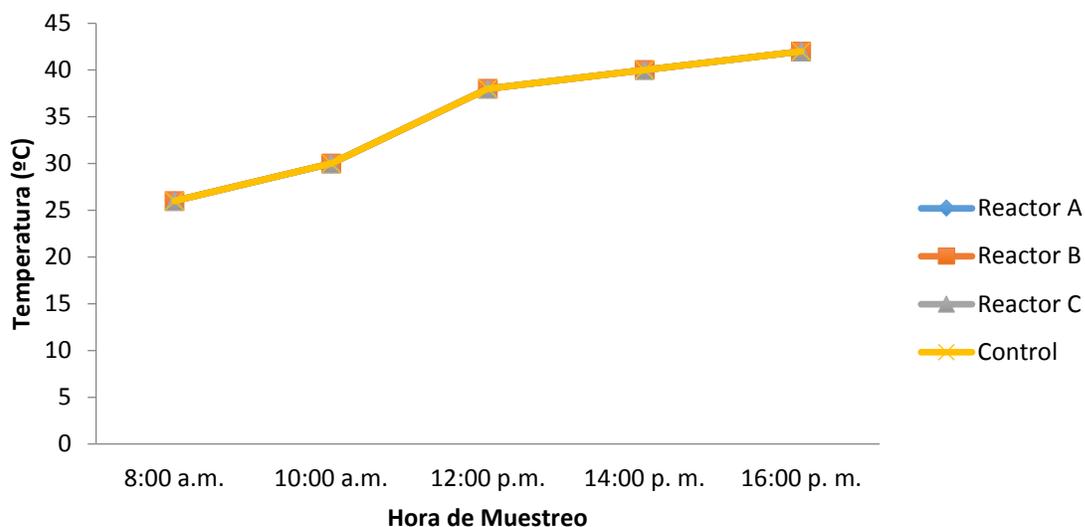
**Figura 28.** Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el segundo día del proceso.



**Figura 29.** Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el tercer día del proceso.

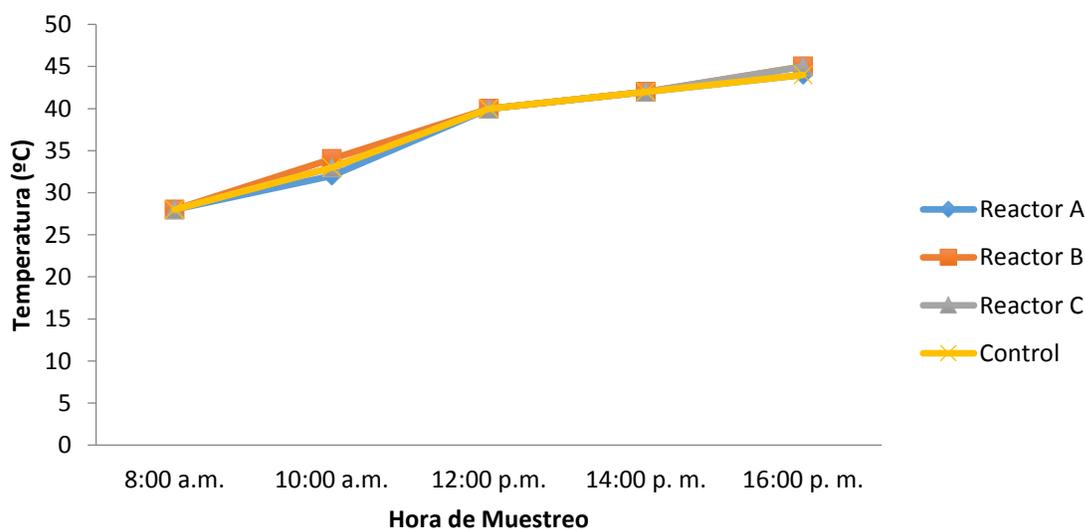


**Figura 30.** Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el cuarto día del proceso.



**Figura 31.** Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el quinto día del proceso.

De acuerdo con el análisis de medias, el tratamiento promedio con mayor temperatura fue el 2 (35.8 °C) (Cuadro 10), sin diferencias estadísticas entre los tratamientos T1 y T4.

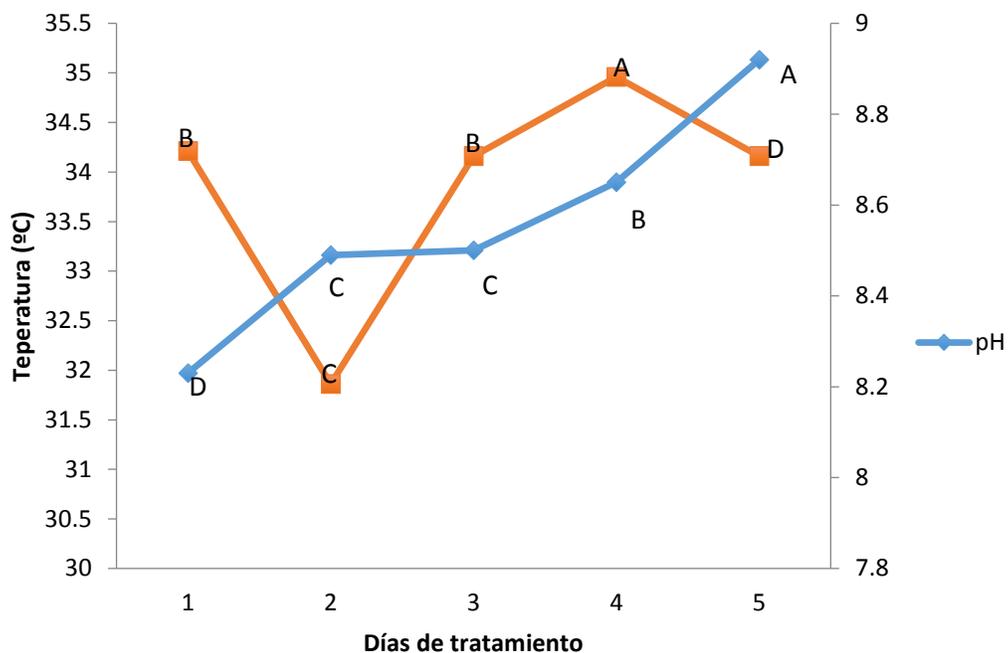


**Figura 32.** Comportamiento de la temperatura en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el sexto día del proceso.

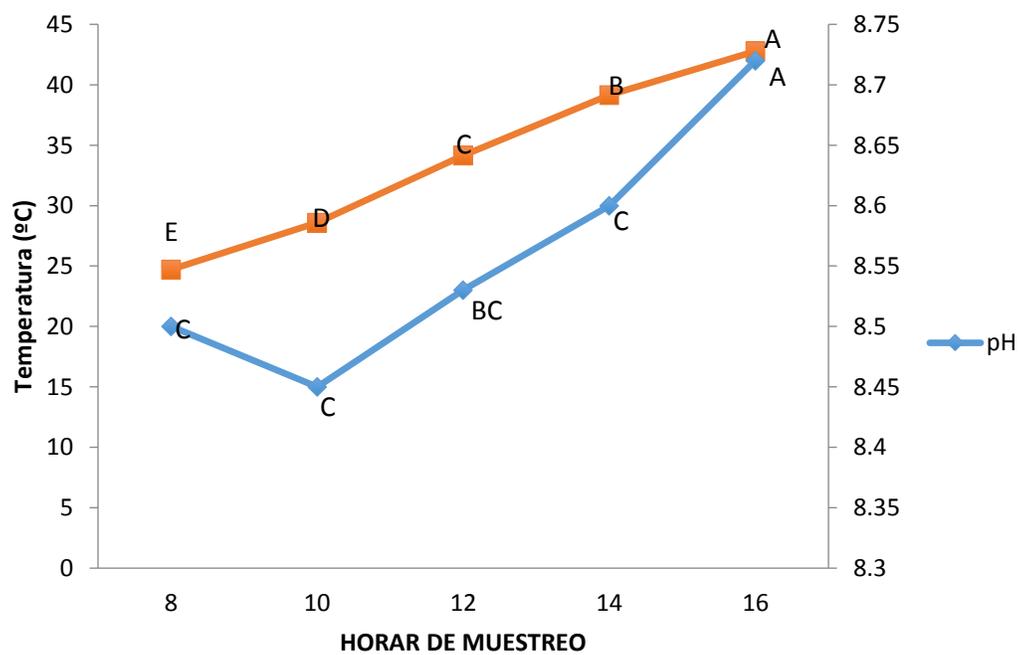
Cuadro 11. ANOVA del efecto los tratamientos, respecto de la temperatura, determinada a diferentes hora del día, durante los días de duración del tratamiento del agua residual urbana, utilizando microalgas nativas..

Fuente	GL	SC	CM	Fc	P > F
Trat	3	855,77	285,25	135,6	<0,0001
Días	4	330,72	82,68	39,3	<0,0001
Hora	4	13148,18	3287,04	1562,5	<0,0001
Trat x Día	12	1060,88	88,4	42,02	<0,0001
Tat x Hora	12	55,54	4,62	2,2	<0,0123
Día x Hora	16	191,61	11,97	5,69	<0,0001

Como se demuestra por el ANOVA, se encontraron diferencias estadísticas significativas entre tratamiento, tiempo y hora de muestreo, así como la interacción de ambos y del analisis de medias, la mayor temperatura a través del tiempo lo fue el día cuatro y la última hora de muestreo (16:00 h) (**Figuras 33-34**).



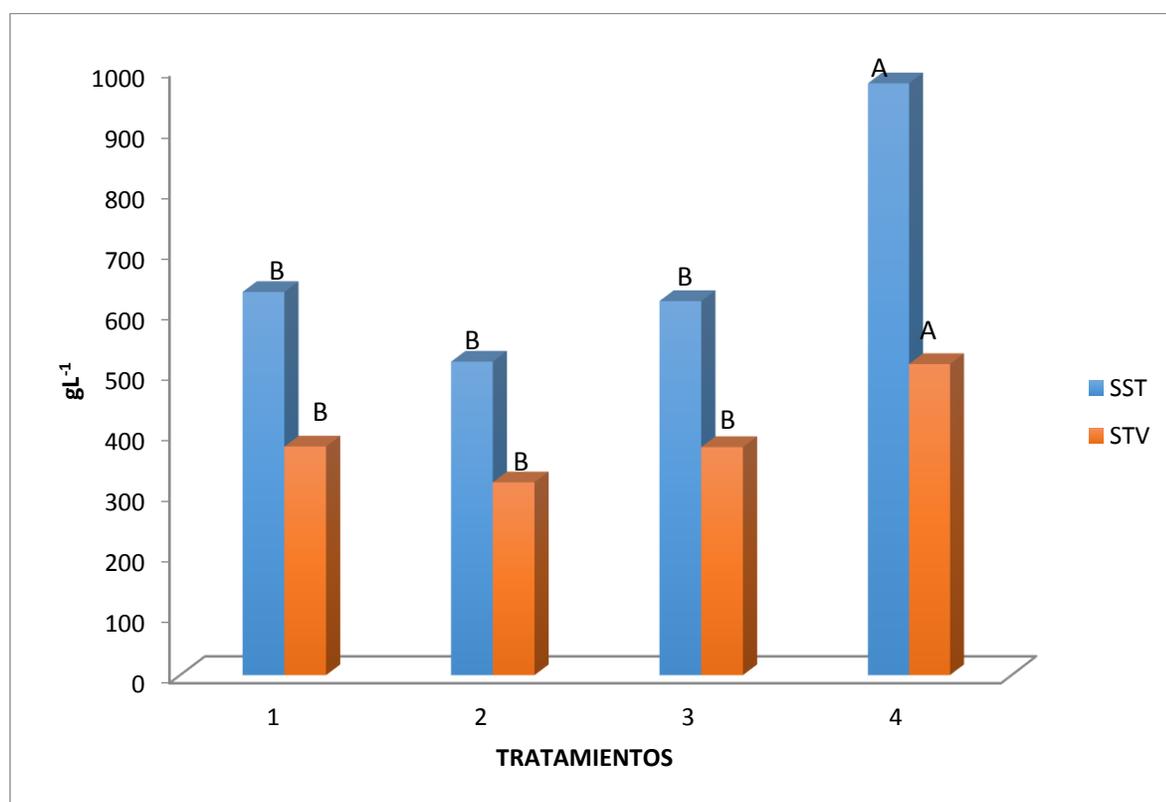
**Figura 33.** Análisis de medias de los tratamientos considerando los días de duración del experimento para las variables de pH y temperatura (°C).



**Figura 34.** Análisis de medias de los tratamientos considerando la hora del muestreo del experimento para las variables de pH y temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

### 4.3. Comportamiento de los Sólidos Solubles Totales (SST $\text{mgL}^{-1}$ ) y volátiles.

El comportamiento general de los sólidos totales y volátiles tomados diariamente indicaron que solamente el tratamiento 4 presentó diferencias estadísticas significativas, indicando la necesidad de incorporar todos los elementos al sistema de fotobioreactor como lo es el N y el P como fertilizante de síntesis química, además de los lodos activados (**Figura 35**).



**Figura 35.** Análisis de medias para los tratamientos de aguas residuales para las variables de sólidos totales solubles (SST) y sólidos totales volátiles (STV). Letras diferentes, indican diferencias estadísticas significativas ( $\alpha = 0.05$ ).

#### 4.4. Reproducibilidad y repetibilidad de las determinaciones de SST Y STV.

Al tratar de definir la reproducibilidad, hay que distinguir entre la reproducibilidad, replicabilidad, repetibilidad, fiabilidad, robustez, y generalización ya que estos términos se utilizan a menudo en muy diferentes formas. Del mismo modo, las cuestiones relacionadas, como la ciencia abierta, la transparencia, y la verdad son a menudo mal definidos (Rapparteur, 2016).

**Reproducibilidad.** Se somete el estudio de los datos en bruto para el mismo análisis utilizado en el estudio, y llegar a los mismos resultados y conclusiones.

**Replicabilidad.** Es la capacidad de que un investigador duplique los resultados de un estudio previo si los procedimientos son seguidos, pero nuevos datos son obtenidos. Fallas en la replicabilidad pueden ocurrir cuando los métodos de ambos estudios son defectuosos o suficientemente diferentes o cuando los resultados son estadísticamente compatibles, a pesar de las diferencias significativas.

Como se puede observar en la **(Figura 36)**, el comportamiento de la repetibilidad para los SST en el transcurso de los días y cuando la biomasa llega a su máximo, las desviaciones estándar tienden a reducirse, en este caso, las desviaciones estándar fueron bajas y ello debido a la capacitación del alumno para la determinación de la variable previa al estudio experimental, realizando hasta cinco repeticiones por muestra.

En la determinación de STV, se pudo observar como es de esperarse que los reactores no presentaron un comportamiento homogéneo, esto es para el tratamiento 1, por lo cual, para futuros experimentos será necesario incrementar hasta seis o 10 repeticiones esta determinación, de manera que se reduzca el error de muestreo y buscar un comportamiento más homogéneo de los reactores (Figura 37 y 38).

#### 4.4. Comportamiento de la biomasa algal durante el tratamiento del agua residual urbana

El comportamiento de la biomasa algal durante el tratamiento de las aguas residuales urbanas mostró su máximo valor promedio a los cuatro días. Valores que son esperados de acuerdo con resultados experimentales realizados por el grupo de trabajo (**Figura 39**), se podrá notar que los resultados son más homogéneos que SST y STV.

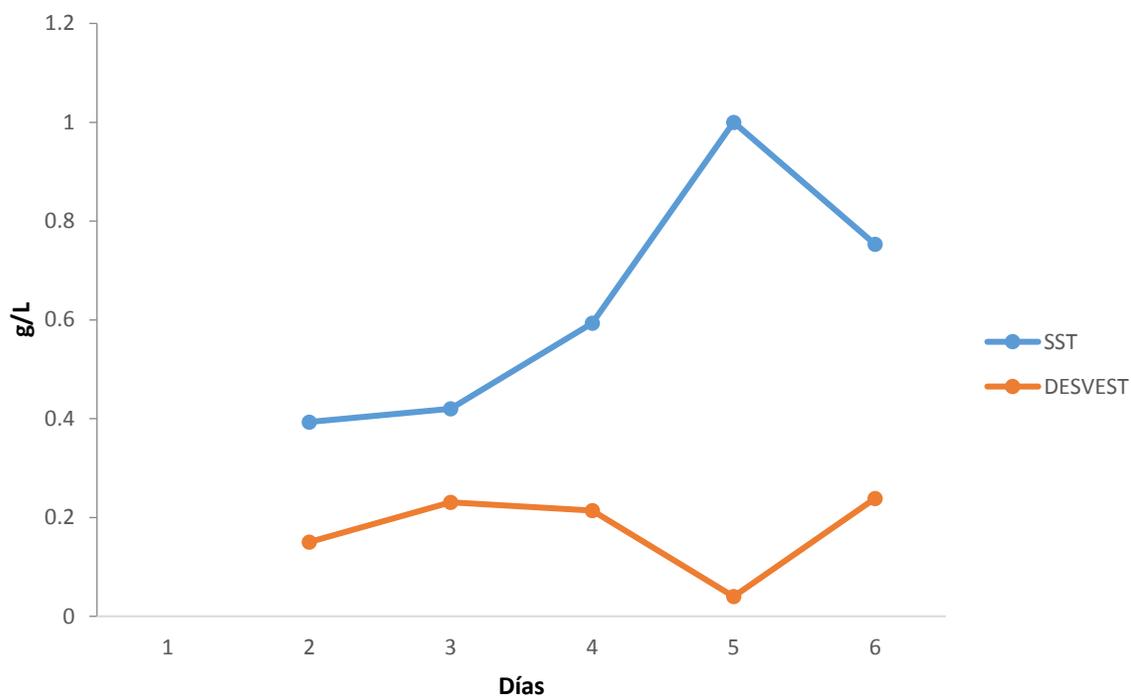
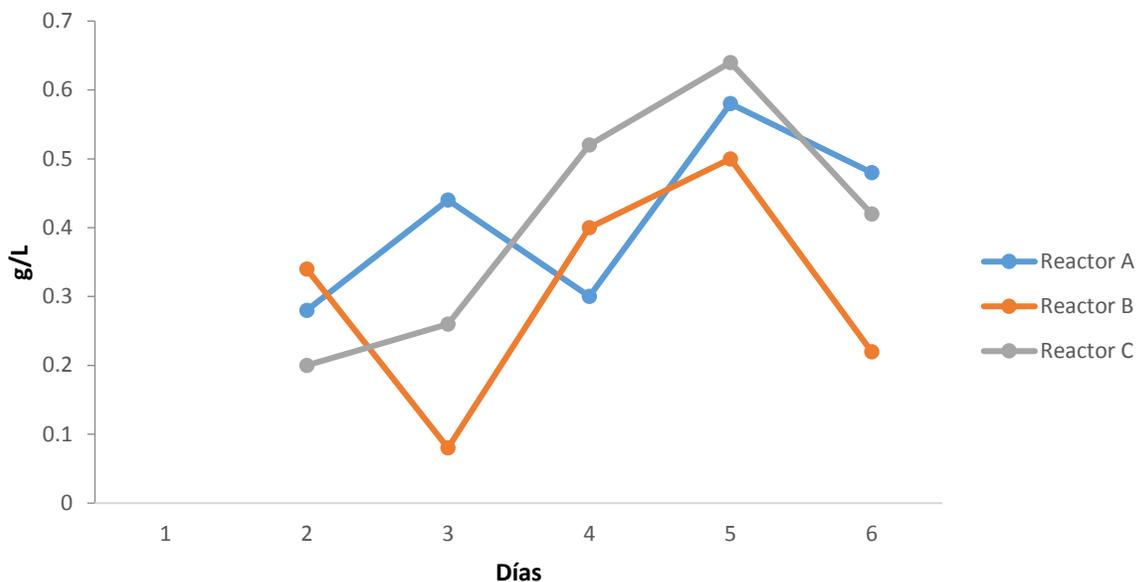
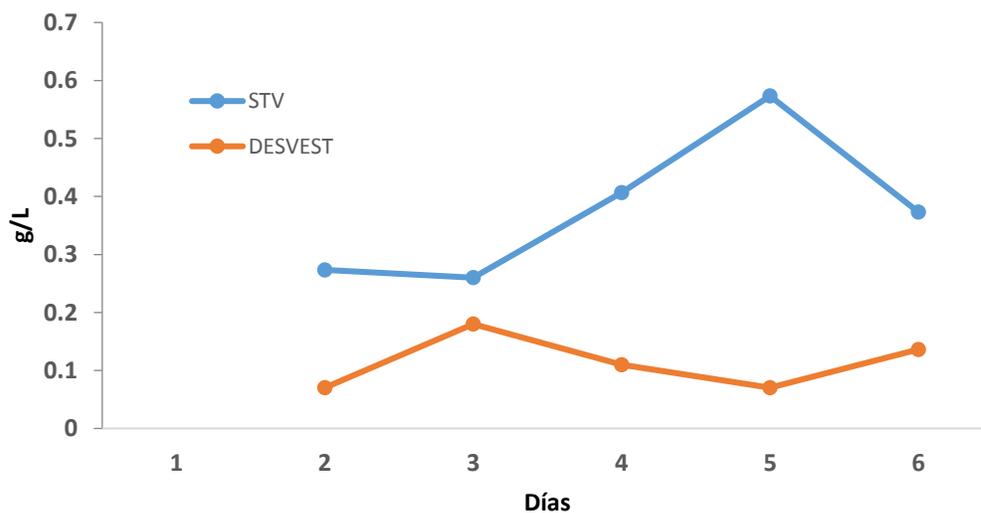


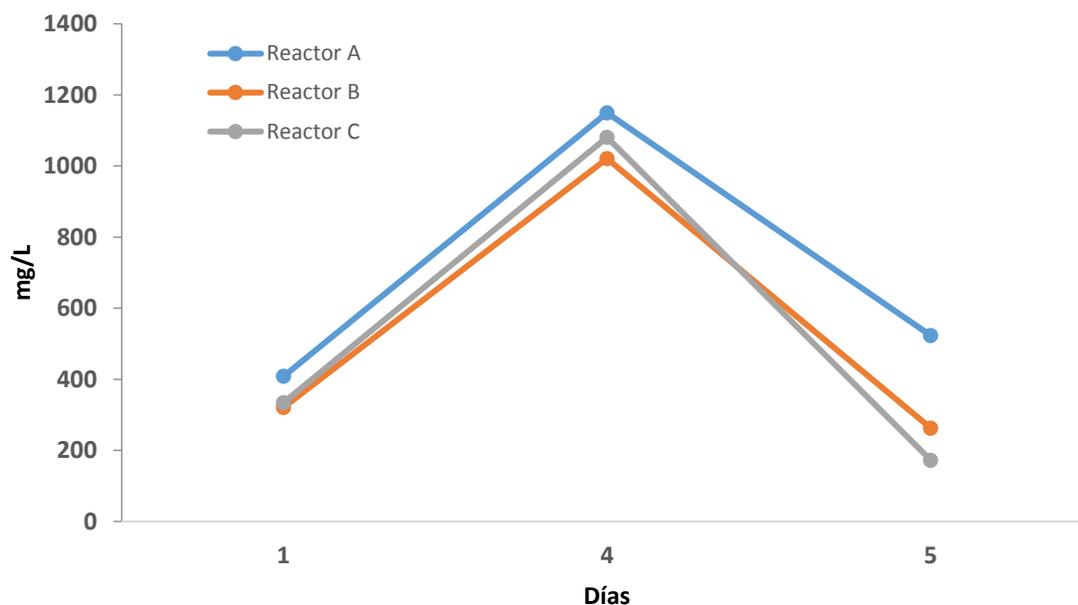
Figura 36. Repetibilidad del comportamiento de los sólidos solubles totales (SST) en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el proceso.



**Figura 37.** Comportamiento de los sólidos totales volátiles (STV) en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el proceso de tratamiento de agua residual urbana.

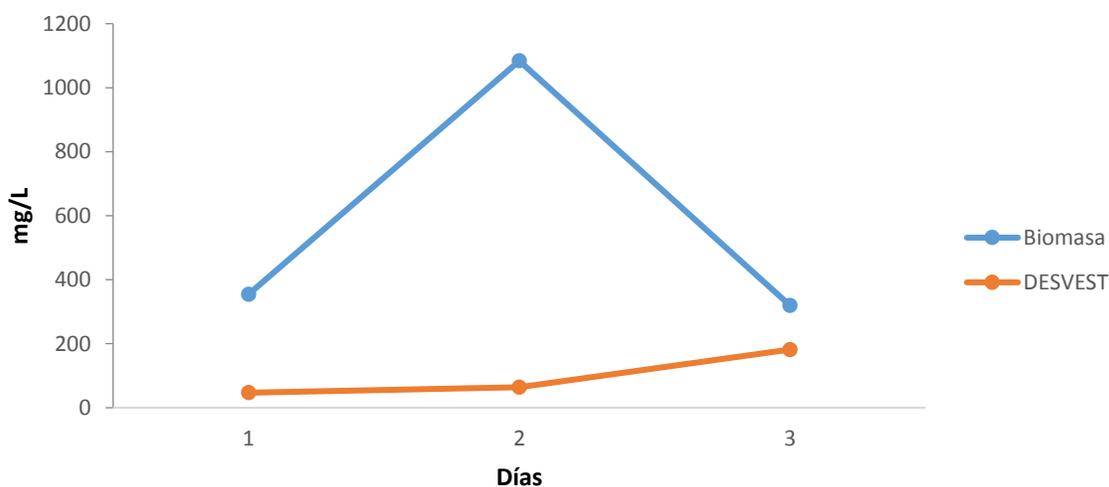


**Figura 38.** Repetibilidad del comportamiento de los sólidos totales volátiles (STV) en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el proceso.



**Figura 39.** Producción de biomasa (mg/L) en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el proceso.

Nuevamente, se pone de manifiesto una buena repetibilidad, dados los bajos niveles de desviación estandar y que conforme se incrementan la concentración de la biomasa algal, mayor precisión se tiene en su determinación (**Figura 40**).



**Figura 40.** Repetibilidad de la biomasa (g/L) en reactores con agua residual urbana para el tratamiento I durante el proceso.

#### 4.5. Remoción de DQO

Se comparo el control y muestras de los tratamientos del agua residual, lo cual el mas alto de DQO, fue el tratamiento el T4 y T2

Cuadro 12. Proporción de remoción de DQO ( $\text{mgL}^{-1}$ ) al final del experimento, comparado con el control.

Tratamiento	Control	mg L-1	%
T1	250	86	64.48
T2	584	112	80.8
T3	263	161.0	36.94
T4	690	94	86.4

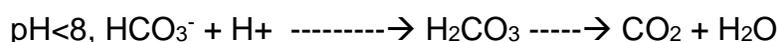
Cuadro 13. Contenido de N ( $\text{mgL}^{-1}$ ) al final del experimento, comparado con el control, lo cual el tratamiento T1 y T2 resultaron mas altos de contenido de N

Control	Tratamiento
53	25 T1
40	28 T2
38	36 T3
32	26 T4

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el presente estudio indican que el fotobiorreactor expuesto al ambiente y estudiando un consorcio nativo microalgal, presentó una alternativa de interés en el tratamiento de las aguas residuales; este sistema permite la generación y separación de biomasa microalgas que será susceptible de aprovechamiento en la elaboración de dietas para el ganado regional, así como la obtención de un agua residual para actividades de reúso y que cumple con las especificaciones de normatividad oficial mexicana (SEMARNAT, 2014).

Por lo tanto, el pH, es un factor que dependiendo de la fuente de carbono disponible y está determinado por la siguiente reacción de acuerdo con Goldman et al. (1982).



Por tanto, el pH es el principal determinante de la concentración relativa de especies carbonatadas en el agua y podrían afectar la disponibilidad de carbono para la fotosíntesis algal en cultivos masivos. Cada especie de microalga tiene un rango de pH en el cual su crecimiento es óptimo, dependiendo de qué especies químicas este más habituada a asimilar. El pH en la mayoría de cultivos de microalgas se encuentra entre 7 y 9, con un óptimo entre 8.2-8.7 (Azov, 1982 y Ma *et al.*, 2014), por lo tanto, las algas se desarrollaron en un pH óptimo, no llegando a 9.0, contrario a lo encontrado por López-Hernández et al., (2016), quienes reportan valores de hasta superiores a 10.

El efecto de la temperatura sobre las reacciones bioquímicas es uno de los factores ambientales más importantes que influye sobre la composición bioquímica del alga (Hu, 1984). En cuanto a la temperatura, las microalgas en las que está interesado generalmente para su cultivo, son las consideraciones como especies tropicales, debido a que su crecimiento no sufre alteraciones en un intervalo de 16 a 27 °C presentando un óptimo de 24°C (Thompson et al., 1992).

Bajas temperaturas en referencia con el intervalo anterior no matan a la microalgas, sin embargo, puede provocar una disminución de crecimiento, temperaturas arriba de 35°C provocaría que la mayoría de las microalgas colapsaran.

El comportamiento de los SST y STV fueron tomados diariamente lo que indicaron que solamente el tratamiento 4 presentó diferencias estadísticas significativas, indicando la necesidad de incorporar todos los elementos al sistema de fotobioreactor como lo es el N y el P como fertilizante de síntesis química, además de los lodos activados.

El comportamiento de la biomasa algal durante el tratamiento de las aguas residuales urbanas mostró su máximo valor promedio a los cuatro días, valores que son esperados de acuerdo con resultados experimentales realizados por el grupo de trabajo, se podrá notar que los resultados son más homogéneos que SST y STV.

El contenido de remoción de DQO ( $\text{mgL}^{-1}$ ) al final del experimento, comparado con el control se comparo el control de las muestras de los tratamientos del agua residual, lo cual el mas alto de DQO, fue el tratamiento el T4 y T2.

## CONCLUSIÓN

Será importante considerar el uso de la mezcla de lodos activados como una alternativa para la sustitución del uso de fertilización química para promover la producción de biomasa en sistemas de alto rendimiento de biomasa.

Claro está que se deberá de afinar la concentración de éstos, dado que se realizaron estudios con mezclas de microalga y lodos activados, resultando una mezcla apropiada de 1.5, este resultado no superó a la de usar solamente inóculo algal (Su et al., 2012b). Como se sabe, la causa principal de lo anterior, se debió a que la inoculación de lodo activado propicio la generación de CO<sub>2</sub> en el proceso de tratamiento, lo que incentivó el crecimiento de biomasa algal, tal y como se encuentra por el incremento de las concentraciones de OD durante el día y disminución por la noche.

Cabe destacar que este sistema de tratamiento, presenta ventajas significativas con respecto a los tratamientos de aguas residuales de lagunas tradicionales ya que, en cuatro días y con menor área de lagunas, se obtienen efluentes con calidad de reúso que sólo sistemas de tratamiento de lodos activados pueden producir a mayores costos operativos.

## LITERATURA CITADA

- Bajpai, R., Zappi, M., 2014. Algal Biorefineries. Springer1, 39-36.
- Bajpai, R., Zappi, M., Dufreche, S., Subramaniam, R., Prokop, A., 2014. Status of algae as vehicles for commercial production of fuels and chemicals. Algal Biorefineries1, 3-24.
- Bajpai R. Prokop A. y Zappi M. (2014). Algal biorrefineries. Volume 1: Cultivation of cell and products. Springer. Netherlands. 331pp.
- Barba-Ho, L.E., 2002. Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición. Universidad del valle 1-51.
- Bernal-Martínez, L.A., Solís-Morelos, C., Linares-Hernández, I., Barrera-Díaz, C., Colín-Cruz, A., 2011. Municipal wastewater treatment by physicochemical and chemical oxidation system in continuous flow. Avances en Ciencias e Ingeniería2, 69-81.
- CONAGUA, 2013. Manual de sistemas de tratamiento de aguas residuales utilizados en Japón. 1-79.
- Demirbas, A., Dermibas, M.F., 2011. " Importance of algae oil as a source of biodisel ". Energy Conversion and Management52, 163-170.
- Díaz, C.E., Alavarado, G.A.R., Camacho, C.K.E., 2012. " El tratamiento de aguas residuales domesticas para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energías (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. Quivera14, 78-97.
- Ecured, 2016. Aguas Reciduales Quivera12, 58-69.
- EPA, 2004. " La ciencia del agua ". U. S. Geological Survey, 1-5.
- Espinoza-Bretado, R., Návar, J., 2005. Producción de biomasa, diversidad y ecología de especies en un gradiente de productividad en el matorral espinoso tamaulipeco del Nordeste de México. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente11, 25-31.
- Faife-Pérez, E., Rambla, O., Miguel, A., Alvarez-Delgado, A., 2012. Produccion de biodiesel a partir de microorganismos oleaginosos. Una fuente de energía renovable. Parte I. Levaduras y bacterias. ICIDCA. Sobre los derivados de la caña de azúcar46, 22-32.
- Fathi, A.A., Azooz, M.M., Fredan, M.A., 2013. Phycoremediation and the potencial of sustainable algal biofuel production using wastewater. American Jorunal of Applied Sciences10, 189-194.

- Fernández-Alba, A.R., Letón.García, P., Rosal-García, R., Dorado-Valiño, M., Villar-Fernández, S., Sanz-Fernández, S., Sanz-García, J.M., 2002. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Circulo de innovación en tecnologías medioambientales y energía, 1-137.
- Fernández-Linares, L.C., Montoya-Montiel, J., Millán-Oropeza, A., Badillo-Corona, A., 2012. Producción de biocombustibles a partir de microalgas. Ra Ximhai (Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo)8, 101-115.
- Gomez, A., H. R., 2014. Aguas Residuales. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental.9, 24-25.
- Guzmán, L., Villabona, A., Tejada, C., García, R., 2013. Reduction of water turbidity using natural coagulants. Revista U. D. C. A. actualidad y Divulgación Científica16, 253-262.
- Halfhide, T., Akerstrom, A., Lekang, O.I., Ragnar-Gislerod, H., Ergas, S.J., 2014. Production of algal biomass, chlorophyll, starch and lipids using aquaculture wastewater under axenic and non-axenic conditions. Algal Research6, 1-159.
- Halim, R., Danquah, M.K., Webley, P.A., 2012. Extraction of oil form microalgae for biodiesel production: A review Biotechnology Advances30, 709-732.
- Hernández, A.G., Vázquez-Duhalt, R., Saavedra, M.d.P.S., Carreón, L.S., Jiménez, A.M., 2009. Biodiesel a partir de microalgas. BioTecnología13, 1-24.
- Hernandez, P., A., Labbe, I.J., 2014. Microalgas Cultivos y Beneficios. Scielo49, 157-173.
- Hernández, P., A., Labbe, I.J., 2014. Microalgas, Cultivos y Beneficios. BIOLOGIA MARINA Y OCEANOGRAFIA49, 36-40.
- Hernández-Pérez, A., Labbé, J.I., 2014. Microalgas, cultivo y beneficios Revista de Biología Marina y Oceanografía49, 157-173.
- Herrera, R.S., Dayleni, F., Gonsalez, S.M., Cruz, A.M., 2010. Pigmentos. . Redalyc44, 45-50.
- Hu, Q. 1984. Environmental effects on cell composition, In: Richmond, A. (Ed.) Handbook of microalgae culture. Biotechnology and applied phycology. Blackwell Publishing, Iowa, USA., 57-82.
- Huisman, L., De azevedo-Netto, J.M., 1988. " Sistema de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades ". Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS)18, 1-384.

- IMTA, 2003. " Manual para el uso eficiente y racional del agua ". 1-101.
- INEGI, 2016. Panorama censal de los organismos operadores de agua en México (En Línea) ([http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2016/agua2016\\_0.pdf](http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2016/agua2016_0.pdf)) ( Consultado 30/9/2016) 5-10.
- Jackson, B., Nelson, G., Paul, L., 2013. Ecosistemas de Agua Dulce Sustentables. Sociedad Norteamericana de Ecología.10, 5-12.
- Loera-Quezada, M.M., Olguín, E.J., 2010. Las microalgas oleaginosas como fuente de biodiesel: retos y oportunidades. Rev Latinoam Biotecnol Amb Algal1, 91-116.
- López-Hernández, I., Vásquez-Arroyo, J. y Álvarez-Reyna, V.P., 2016. Remoción biológica de nutrimentos en aguas residuales urbanas con fotobiorreactores, utilizando microalgas nativas de zonas áridas. Rev. Mex. Ciencias Agrícolas17, 3569-3580.
- Markou, G., Nerantzis, E., 2013. Microalgae for high-value compounds and biofuels production: a review with focus on cultivation under stress conditions. Biotechnology Advances31, 1532-1542.
- Mehrabadi A. Craggs R. y Farid M.M. (2015). Wastewater treatment high rate algal ponds (WWT HRAP) for low-cost biofuel production. Bioresource Technol. 184, 202-214.
- Mayr, M.J., 2002. Aguas residuales municipales. Gestión ambiental urbana, 1-64.
- Meza-Bazan, M., 2013. " El enfoque médico social sobre el uso y consumo de la coca y la cocaína en Perú en la primera mitad del siglo xx" Universidad Antonio Ruiz de Montoya S. J. Lima2, 488-894.
- Molina-Maruenda, A., Pajarón-Sotomayor, S., 1989. La biotecnología de las algas. Botanica Complutensis15, 1-324.
- Morgan, J.M., Benítez, V., 2016. Análisis del estado de las plantas de tratamiento de aguas residuales en la República Mexicana. Instituto de Ingeniería UNAM5, 10-12.
- Morris, S., 2014. Microalgas Cultivos y Beneficios Scielo3, 58-62.
- Muñoz, V.C., 2015. Financiamiento y sustentabilidad del agua para uso urbano en México. ( En línea) ([http://dcsh.xoc.uam.mx/produccioneconomica/publicaciones/financiamiento\\_y\\_sustentabilidad\\_del\\_agua\\_para\\_uso\\_urbano\\_en\\_mexico.pdf](http://dcsh.xoc.uam.mx/produccioneconomica/publicaciones/financiamiento_y_sustentabilidad_del_agua_para_uso_urbano_en_mexico.pdf)) ( Consultado 7/29/2016). 3-8.
- Ordoñez, G.J.J., 2011. "Aguas subterráneas-acuíferos". Global water partnership, 1-44.

- Pacheco-Vega, J.M., Cadena-Roa, M.A., Sánchez-Saavedra, M.P., Tovar-Ramírez, D., Rangel-Dávalos, C., 2010. Effect of culture medium and nutrient concentration on fatty acid content of *Chaetoceros muelleri*. *Rev Latinoam Biotecnol Amb Algal*1, 6-15.
- Quinn, J.C., Hanif, A., Sharvelle, S., 2014. Microalgae to biofuels: life cycle impacts of methane production of anaerobically digested lipid extracted algae. *Bioresource Technology*171, 37-43.
- Ramírez Rueda, A., 2013. Evaluación de un bioreactor anaerobio de membranas sumergidos escala piloto para el tratamiento de aguas residuales tipo municipal. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química., México, D.F.
- Remaraj, R., Tsai, D.D.W., Chen, P.H., 2015. Biomass of algae growth on natural water medium. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*142, 124-128.
- Rodríguez, J., Mañunga, T., 2012. Effect of organic matter fraction on the performance of a pulp and paper mill wastewater treatment system *Revista U. D. C. A. actualidad y Divulgación Científica*15, 447-455.
- Salinas-Callejas, E., Gasca-Quezada, V., 2009. Los biocombustibles. *El cotidiano*157, 75-83.
- Sánchez-Esquivel, S., Flores-Cotera, L.B., Gutiérrez-Rojas, M., Rodríguez-Sanoja, R., Solís-Pereira, S., Langley-McCarron, E., 2009. Biotecnología y bioingeniería *Revista de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería A. C.*13, 1-120.
- Schönicke, P., Shahab, R., Hamann, R., Kamm, B., Microbial life on green biomass and their use for production of platform chemicals. *Microorganisms in Biorefineries*26, 22-49.
- SEMARNAT 2001a. NMX-AA-026-SCFI-2001, Análisis de agua - Determinación de Nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. (México., DOF), 21.
- SEMARNAT 2001b. NMX-AA-029-SCFI-2001, Análisis de aguas - Determinación de Fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. (México, DOF), 21.
- SEMARNAT, 2012. "En materia de aguas residuales". 1-15.
- Seoáñez-Calvo, M., 2005. " Aguas residuales urbanas: tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento". *Revista forestal española*32, 30-35.
- Serna, F., Barrera, L., Montiel, H., 2011. Impacto social y económico en el uso de biocombustibles. *Journal of Technology Management & Innovation*6, 1.15.

- Silva, J., Torres, P., Madera, C., 2008. "Reuso de aguas residuales domesticas en agricultura". *Agronomía Colombiana*26, 347-359.
- Soares, F.R., Martins, G., Seo, E.S.M., 2013. An assessment of the economic aspects of CO2 sequestration in a route for biodiesel production microalgae. *Environmental Technology*34, 1777-1781.
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., Isambert, A., 2006. " Commercial Application of microalgae". *Journal of bioscience and bioengineering*101, 87-96.
- Sturm B.S.M. y Lamer S.L. (2011). An energy evaluation of coupling nutrient removal from wastewater with algal biomass production. *Appl. Energy* 88, 3499-3506.
- Tamiya, H., 1957. Mass culture of algae. *Rev. Plant Physiol*8, 309-334.
- Tejada-Benítez, L., Argumedo-Henao, D., Alayón-Alvear, M., Saldarriaga-Castillo, C.R., 2015. Caracterización y perfil lípido de aceites de microalgas. *Revista Facultad de Ingeniería* 24, 43-54.
- Torres, F.P., Fonte, L.F., Valente, V.L., Loreto, E.L., 2006. "Mobilization of a hobo-related sequence in the genome of drosophila simulans". *Genetica*126, 10-101.
- Travieso, L., Benitez-Echegoyen, F., 1988. Cultivo de *Arthrospira* sp: del Laboratorio a planta piloto. Curso: Tecnología y aprovechamiento del cultivo heterotrófico de microalgas. Centro de Investigaciones Pesqueras. La Habana, 1-16.
- Ulacia, B.R., 2014. Sistema de captación de agua de lluvia. *Impluvium*10, 1-42.
- UNESCO, 2010. Tecnología y biocombustibles de segunda generación: Una herramienta para la toma de decisiones. *Dirección Nacional del Medio Ambiente*2, 1-166.
- Varila-Quiroga, J.A., Díaz-López, F.E., 2008. " Sewage treatment by activated sludge at laboratory scale ". *Journal of technology*7, 21-28.
- Weimin, W., Yang, Z., 2016. Microalgas. *Food Sci. Technol.*10, 53-58.
- Widjaja, A.C., Chien, C., Ju, Y.H., 2009. " Study of increasing lipid production from fresh water microalgae *Chlorella vulgaris* ". *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*40, 13-20.
- Zamora, F.N., Rodríguez, D., Yendis, H., 2008. "Efectos de riesgo con aguas residuales sobre propiedades químicas de suelos de la planicie de coro, Estado Falcón". *Bioagro*20, 193-199.