



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos (ERIS).

**ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA, EN LA
EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y COLIFORMES FECALES EN UN
FOTOBIORREACTOR DE CULTIVO MIXTO DE ALGAS CLORÓFITAS**

Ing. Carlos Adrián Barrios de León

Asesorado por el Dr. Ing. Félix Douglas Aguilar Carrera

Guatemala, noviembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA, EN LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y COLIFORMES FECALES EN UN FOTOBIOREACTOR DE CULTIVO MIXTO DE ALGAS CLORÓFITAS

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

ING. CARLOS ADRIÁN BARRIOS DE LEÓN

ASESORADO POR

Dr. ING. FÉLIX DOUGLAS AGUILAR CARRERA

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE
**MAESTRÍA (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN CIENCIAS DE INGENIERÍA
SANITARIA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Núñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

EXAMINADOR(A)	Dr. Ing. Félix Douglas Aguilar Carrera
EXAMINADOR(A)	MSc. Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR(A)	MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA, EN LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y COLIFORMES FECALES EN UN FOTOBIOREACTOR DE CULTIVO MIXTO DE ALGAS CLORÓFITAS

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, con fecha uno de febrero de dos mil dieciocho.



Ing. Carlos Adrián Barrios de León

Correo electronico: carlosbarrios719@hotmail.com

Carné No.: 2007 17732



Guatemala, 30 de octubre de 2018.

Maestro en Ingeniería Sanitaria
Ing. Adan Ernesto Pocasangre
Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS)
Facultad de ingeniería, USAC

Habiendo revisado el documento titulado:

**ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA, EN
LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y COLIFORMES
FECALES EN UN FOTOBIORREACTOR DE CULTIVO MIXTO DE ALGAS
CLOROFITAS**

Elaborado por el ingeniero Carlos Adrián Barrios de León, como parte de su Estudio Especial, y como requisito para optar al grado académico de Maestro en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, mediante la presente me permito informarle mi satisfacción con su contenido y revisión de lingüística, por lo tanto, le comunico que dicho documento cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo la atención prestada a la presente me suscribo de usted.

Atentamente.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Dr. Ing. Félix Douglas Aguilar

Asesor del estudio



Guatemala, 31 octubre de 2018

Señores Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS):

Respetuosamente les comunico que he revisado y aprobado, en mi calidad de coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el informe final del Estudio Especial titulado:

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA, EN LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y COLIFORMES FECALES EN UN FOTOBIORREACTOR DE CULTIVO MIXTO DE ALGAS CLORÓFITAS

Presentado por el estudiante:

Ing. Carlos Adrián Barrios de León

Les manifiesto que el estudiante cumplió en forma satisfactoria con todos los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- y por la Universidad de San Carlos de Guatemala en la realización de su estudio.

Agradeciéndoles de antemano la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente,
"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria



Guatemala, 5 de noviembre de 2018

El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: Dr. Ing. Félix Aguilar, M.Sc. Ing. Adán Pocasangre y, M.Sc. Ing. Zenón Much, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria; M.Sc. Ing. Adán Pocasangre y la revisión lingüística realizada por la Licenciada Ruth Nohemi Cardona Mazariegos, Colegiada No. 12498, al trabajo del estudiante Ing. Carlos Adrián Barrios de León, titulado: **ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA, EN LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y COLIFORMES FECALES EN UN FOTOBIORREACTOR DE CULTIVO MIXTO DE ALGAS CLORÓFITAS**. En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala al quinto día del mes de noviembre de 2018.

Imprimase

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
DIRECTOR

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Porque Él supo elegir este momento para alcanzar la meta propuesta, guiar nuestro camino y resguardarme.
Mis padres	Jesús Adrián Barrios Linares y Eugenia de León Palacios, por su amor, sus consejos, paciencia y el apoyo para alcanzar este sueño.
Mi esposa	Patricia Abigail Urrutia, por tu amor y apoyo incondicional.
Mi hija	Fátima Adriana, por iluminar mi vida con cada sonrisa y momento que hemos vivido.
Mis hermanos	Marlos Adrián, Herman Kenneth y Kenneth Denilson, por el apoyo, sus consejos y amor para llegar a alcanzar este triunfo.
Mis suegros	Blanca Villeda y Mario Ovalle, por el apoyo hacia mi familia.
Mis padrinos	Marlene Ovando (q.e.p.d.) y Mario Solares, por el apoyo, sus consejos, sus enseñanzas y cariño que me brindaron.

Mi tía

Dalma Barrios, por su cariño y compartir conmigo muchas etapas de mi vida.

Mi familia

Abuelos(as), tíos(as), primos(as), sobrinos(as), por el apoyo y cariño recibido en cada momento, porque ustedes me impulsaron en cada paso que fue necesario.

Mis amigos

Rodrigo López, compañeros de ERIS 2017-2018 y otros, con mucho cariño, porque fueron parte importante en toda esta etapa y han prevalecido engrandeciendo nuestra amistad.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por conducirme por el buen camino y bendiciéndome cada día.
Mis padres, esposa, hija, y hermanos	Por el apoyo incondicional, paciencia y motivación.
Doctor Félix Aguilar	Por la asesoría brindada, por sus enseñanzas, consejos y su apoyo incondicional para realizar este estudio.
Msc. Ing. Zenón Much	Por su confianza y apoyo incondicional para la realización experimental de este proyecto.
Msc. Ing Adan Pocasangre	Por su apoyo y confianza en la realización de este proyecto.
Colaboradores	Amigos y personas que me ayudaron en la realización de este estudio.
Ing. Edwin Oviedo	Por su amistad, apoyo y acompañamiento en el trabajo de campo, durante la fase de construcción de este estudio.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por prepararme como profesional.

ERIS

Por brindarme la oportunidad de formación profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	I
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XIX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XXI
JUSTIFICACIÓN	XXIII
OBJETIVOS	XXV
HIPÓTESIS	XXVII
ANTECEDENTES	XXIX
ALCANCES Y LIMITACIONES.....	XXXVII
INTRODUCCIÓN	XXXIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Microalgas	1
1.1.1. Algas clorofitas	2
1.1.1.1. Algas chlorella.....	3
1.1.1.1.1. Chlorella SP.....	4
1.1.1.1.2. Chlorella vulgaris	5
1.1.2. Función fotosintética.....	5
1.1.3. Función depuradora.....	5
1.1.4. Crecimiento.	6

1.1.5. Parámetros que influyen en el crecimiento de las microalgas.....	7
1.2. Tratamiento de aguas residuales con microalgas	8
1.2.1. Algas presentes en las aguas residuales	8
1.2.2. Algas presentes en la PTAR de la USAC	8
1.2.3. Tratamiento biológico con microalgas	9
1.2.4. Sistemas de cultivo cerrado	11
1.2.4.1. Fotobiorreactores.....	11
1.2.4.2. Fotobiorreactores tubulares	12
1.2.4.3. Fotobiorreactores tubulares horizontales.	13
1.3. Tratamiento biológico como método de desinfección	13
2. DISEÑO METODOLÓGICO	17
2.1. Descripción del sitio de estudio	17
2.1.1. Planta de tratamiento de aguas residuales USAC.....	17
2.1.2. Ubicación y localización geográfica.....	18
2.1.3. Descripción de la planta de tratamiento	20
2.2. Diseño y construcción de los fotobiorreactores	21
2.3. Instalación y ubicación de los fotobiorreactores	24
2.4. Estabilización del sistema	29
2.5. Número de muestras.....	32
2.6. Metodologías de análisis realizados.....	33
2.7. Análisis estadístico	36
3. RESULTADOS.....	39
3.1. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	39
3.2. Demanda bioquímica de oxígeno filtrada (DBO ₅)	40
3.3. Sólidos suspendidos (SS)	41
3.4. Coliformes fecales (CF)	42

3.5. Potencial de hidrógeno (pH)	43
3.6. Temperatura	44
3.7. Oxígeno disuelto (OD)	45
3.8. Radiación solar	46
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	49
4.1. Determinación del porcentaje de remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos y coliformes fecales, a distintas cargas hidráulicas.....	49
4.1.1. Porcentaje de remoción de materia orgánica a distintas cargas hidráulicas en los fotobiorreactores ...	49
4.1.2. Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos a distintas cargas hidráulicas en los fotobiorreactores ...	51
4.1.3. Porcentaje de remoción de coliformes fecales a distintas cargas hidráulicas en los fotobiorreactores ...	55
4.1.4. Valores de coliformes fecales en el efluente de los fotobiorreactores a distintas cargas hidráulicas	57
4.2. Efecto que ejerce la variación de carga hidráulica, sobre la eficiencia de la carga de remoción, de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅), sólidos suspendidos (SS) y coliformes fecales (CF).....	60
4.2.1. Efecto que ejerce la variación de la carga hidráulica, sobre la eficiencia de la carga de remoción, de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅).....	60
4.2.2. Efecto que ejerce la variación de la carga hidráulica, sobre la eficiencia de la carga de remoción, de los sólidos suspendidos (SS).	63

4.2.3. Efecto que ejerce la variación de la carga hidráulica, sobre la eficiencia de la carga de remoción, de los coliformes fecales.	66
4.3. Correlación que existe entre la remoción de coliformes fecales con la radiación solar, pH, temperatura y oxígeno disuelto.....	69
4.3.1. Correlación que existe entre la remoción de coliformes fecales con la radiación solar.	69
4.3.2. Correlación que existe entre la remoción de coliformes fecales con el pH.....	76
4.3.3. Correlación que existe entre la remoción de coliformes fecales con la Temperatura.....	83
4.3.4. Correlación que existe entre la remoción de coliformes fecales con el Oxígeno disuelto.....	89
CONCLUSIONES	99
RECOMENDACIONES	103
BIBLIOGRAFÍA.....	105
ANEXO	111

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Algas <i>Chlorophyta</i> y algas <i>Streptophyta</i>	2
2. Curva de crecimiento de un cultivo de microalgas.....	7
3. Ventajas y desventajas de los sistemas abiertos y sistemas cerrados.....	10
4. Proceso oxigenación fotosintética.....	12
5. Rótulo ubicado en las afueras de la planta tratamiento de aguas residuales de la USAC	18
6. Ubicación e ingresos a la PTAR de la USAC	19
7. Vista aérea PTAR USAC	20
8. Ubicación del fotobiorreactor	25
9. Esquema de la ubicación de los fotobiorreactores en la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC.....	26
10. Fotobiorreactores.....	29
11. Estabilización del sistema.....	31
12. Porcentaje de remoción de DBO_5 a distintas cargas hidráulicas, en un sistema de flujo continuo	50
13. Porcentaje de remoción de DBO_5 a distintas cargas hidráulicas, en un sistema de flujo tipo <i>batch</i>	51

14. Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos a distintas cargas hidráulicas, en un sistema de flujo continuo.....	53
15. Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos a distintas cargas hidráulicas, en un sistema de flujo tipo <i>batch</i>	54
16. Porcentaje de remoción de coliformes fecales a distintas cargas hidráulicas, en un sistema de flujo continuo.....	55
17. Porcentaje de remoción de coliformes fecales a distintas cargas hidráulicas, en un sistema de flujo tipo <i>batch</i>	56
18. Valores de remoción de coliformes fecales (CF) a distintas cargas hidráulicas, en un sistema continuo	58
19. Valores de remoción de coliformes fecales (CF) a distintas cargas hidráulicas, en un sistema tipo <i>batch</i>	59
20. Porcentaje promedio de remoción de DBO ₅ vs carga hidráulica en un sistema continuo	61
21. Porcentaje promedio de remoción de DBO ₅ vs carga hidráulica en un sistema tipo <i>batch</i>	62
22. Porcentaje promedio de remoción de sólidos suspendidos vs carga hidráulica en un sistema continuo	64
23. Porcentaje promedio de remoción de sólidos suspendidos vs carga hidráulica en un sistema tipo <i>batch</i>	65
24. Porcentaje promedio de remoción de coliformes fecales vs carga hidráulica en un sistema continuo	67
25. Porcentaje promedio de remoción de coliformes fecales vs carga hidráulica en un sistema tipo <i>batch</i>	68

TABLAS

I.	Medidas del fotobiorreactor.....	21
II.	Diseño hidráulico de los fotobiorreactores.....	22
III.	Resultados de conteo de algas en fotobiorreactores al séptimo día (No. de algas clorofitas/ml)	32
IV.	Material y equipo utilizado en los análisis de laboratorio	34
V.	Resultados del análisis de DBO ₅ en mg/l, sistema continuo.....	39
VI.	Resultados del análisis de DBO ₅ en mg/l, sistema tipo <i>batch</i> ...	39
VII.	Resultados del análisis de DBO ₅ filtrada en mg/l, sistema continuo	40
VIII.	Resultados del análisis de DBO ₅ filtrada en mg/l, sistema tipo <i>batch</i>	40
IX.	Resultado de los análisis de sólidos suspendidos (SS) en mg/l, sistema continuo	41
X.	Resultado de los análisis de sólidos suspendidos (SS) en mg/l, sistema tipo <i>batch</i>	41
XI.	Resultados de los análisis de los coliformes fecales en NMP/100 ml, sistema continuo.....	42
XII.	Resultados de los análisis de los coliformes fecales en NMP/100 ml, sistema tipo <i>batch</i>	42
XIII.	Resultados del análisis del potencial de hidrógeno (pH) en unidades de pH, sistema continuo.....	43

XIV.	Resultados del análisis del potencial de hidrógeno (pH) en unidades de pH, sistema tipo <i>batch</i>	43
XV.	Resultados del análisis de temperatura <i>in situ</i> en grados celsius, sistema continuo.....	44
XVI.	Resultados del análisis de temperatura <i>in situ</i> en grados celsius, sistema tipo <i>batch</i>	44
XVII.	Resultados del análisis de oxígeno disuelto (OD) en mg/l, sistema continuo.....	45
XVIII.	Resultados del análisis de oxígeno disuelto (OD) en mg/l, sistema tipo <i>batch</i>	45
XIX.	Radiación solar, día del muestreo, sistema continuo	46
XX.	Radiación solar, día del muestreo, sistema tipo <i>batch</i>	46
XXI.	Análisis de correlación de Pearson en un sistema continuo	47
XXII.	Análisis de correlación de Pearson en un sistema tipo <i>batch</i> ..	47
XXIII.	Análisis de correlación de Pearson entre DBO ₅ y DBO ₅ filtrada	47
XXIV.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la radiación solar en un FBBCH, a un flujo continuo.	70
XXV.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la radiación solar en un FBMCH, a un flujo continuo.	71
XXVI.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la radiación solar en un FBACH, a un flujo continuo.	72

XXVII.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la radiación solar en un FBBCH, a un flujo tipo <i>batch</i>	73
XXVIII.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la radiación solar en un FBMCH, a un flujo tipo <i>batch</i>	74
XXIX.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la radiación solar en un FBACH, a un flujo tipo <i>batch</i>	75
XXX.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el pH en un FBBCH, a un flujo continuo.....	77
XXXI.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el pH en un FBMCH, a un flujo continuo.....	78
XXXII.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el pH en un FBACH, a un flujo continuo.....	79
XXXIII.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el pH en un FBBCH, a un flujo tipo <i>batch</i>	80
XXXIV.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el pH en un FBMCH, a un flujo tipo <i>batch</i>	81
XXXV.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el pH en un FBACH, a un flujo tipo <i>batch</i>	82

XXXVI.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura en un FBBCH, a un flujo continuo.	83
XXXVII.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura un FBMCH, a un flujo continuo.	84
XXXVIII.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura en un FBACH, a un flujo continuo.	85
XXXIX.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura en un FBBCH, a un flujo tipo <i>batch</i>	86
XL.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura en un FBMCH, a un flujo tipo <i>batch</i>	87
XLI.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura en un FBACH, a un flujo tipo <i>batch</i>	88
XLII.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBBCH, a un flujo continuo.	89
XLIII.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBMCH, a un flujo continuo.	90
XLIV.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBACH, a un flujo continuo.	91

XLV.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBBCH, a un flujo tipo <i>batch</i>	92
XLVI.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBMCH, a un flujo tipo <i>batch</i>	93
XLVII.	Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBACH, a un flujo tipo <i>batch</i>	94
XLVIII.	Rangos de concentración de oxígeno disuelto y consecuencias eco sistémicas frecuentes	95
XLIX.	Análisis de correlación del porcentaje de remoción de la DBO ₅ y el porcentaje de remoción de la DBO ₅ filtrada en un sistema continuo.....	96
L.	Análisis de correlación del porcentaje de remoción de la DBO ₅ y el porcentaje de remoción de la DBO ₅ filtrada en un sistema tipo <i>batch</i>	97

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
USAC	Universidad de San Carlos de Guatemala
ERIS	Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
FBBCH	Fotobiorreactor de baja carga hidráulica
FBMCH	Fotobiorreactor de mediana carga hidráulica
FBACH	Fotobiorreactor de alta carga hidráulica
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología
DBO₅	Demanda bioquímica de oxígeno
SS	Sólidos suspendidos
pH	Potencial de hidrógeno
OD	Oxígeno disuelto
°C	Grados centígrados
mg/l	Miligramo por litro
mts	Metros
cms	Centímetros
ml	Mililitros
m³	Metros cúbicos
lts	Litros
l/s	Litros por segundo
m³/día	Metros cúbicos por día
NMP	Número más probable
LMP	Límite máximo permisible

GLOSARIO

Afluente	Agua residual que entra en un sistema o unidad de la planta de tratamiento. de aguas residuales.
Aguas residuales	Son cualquier tipo de agua cuya calidad se vio afectada negativamente por influencia antropogénica. Incluyen las aguas usadas, domésticas, urbanas y los residuos líquidos industriales.
Algas clorofitas	Tienen clorofila a y b, se les llama algas verdes por su color, su pared celular está compuesta de celulosa. Este grupo de algas se halla muy extendido en la naturaleza, ya que algunas de éstas les dan color a los estanques o cubren los árboles.
Autodepuración	Es el proceso de recuperación de un curso de agua después de un episodio de contaminación orgánica.
Bacteriófagos	Son virus que infectan exclusivamente a las bacterias.
Coliformes fecales	Es un subgrupo de bacterias coliformes totales que se encuentran en gran cantidad en el intestino y excremento de los humanos y animales. Su presencia indica que el agua está contaminada y tiene el potencial de causar enfermedades.

DBO₅	Es una prueba usada para la determinación de los requerimientos de oxígeno para la degradación bioquímica de la materia orgánica en las aguas.
Depuración	Eliminación de las impurezas o contaminantes.
Efluente	Agua residual que sale en un sistema o unidad de la planta de tratamiento de aguas residuales una vez tratada.
Escherichia coli	Es un subgrupo de bacterias fecales, se encuentra en grandes cantidades en los intestinos, la presencia de este microorganismo indica que hay presencia de coliformes fecales.
Eutrofización	Proceso natural y/o antropogénico que consiste en el enriquecimiento de las aguas con nutrientes, a un ritmo tal, que no puede ser compensado por la mineralización total, de manera que la descomposición del exceso de materia orgánica produce una disminución del oxígeno en las aguas profundas.
Fotobiorreactor	Son dispositivos destinados al cultivo masivo de microalgas.
Mesófilas	Son las bacterias que se desarrollan mejor en el rango de temperatura de 25°C a 40°C.

Microalgas	Son microorganismos microscópicos (2-200 μm) fotosintéticos, también son polifiléticos y eucariotas, (excluyen, por tanto, las cianobacterias, que dejaron de considerarse auténticas algas al pasar al reino procariota) que pueden crecer de manera autotrófica o heterotrófica.
Oxígeno disuelto	Mide la cantidad de oxígeno gaseoso disuelto (O_2) en una solución acuosa.
Potencial de hidrógeno	Es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidrógeno presentes en determinadas disoluciones.
Predación	Es la ingestión de organismos vivos, incluyendo plantas por animales, animales por animales.
Protozoarios	Organismos microscópicos, unicelular protista; heterótrofos, fagótrofos, depredadores o detritívoros, a veces mixótrofos (parcialmente autótrofos); que viven en ambientes húmedos o directamente en medios acuáticos, ya sean aguas saladas o aguas dulces, y como parásitos de otros seres vivos.
Radiación solar	Es la cantidad de energía procedente del sol que se recibe en una superficie y tiempo determinados.
Sedimentación	Es un proceso que forma parte de la potabilización del agua y de la depuración de aguas residuales. Este

proceso se realiza para retirar la materia sólida fina, orgánica o no, de las aguas residuales.

Sólidos suspendidos Es el residuo no filtrable de una muestra de agua natural o residual industrial o doméstica, es la porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se seca a 103-105°C hasta peso constante.

Temperatura Es una magnitud física que refleja la cantidad de calor, ya sea de un cuerpo, de un objeto o del ambiente.

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo analizar el efecto que ejerce la variación de la carga hidráulica en la eficiencia de remoción de materia orgánica y coliformes fecales, en un fotobiorreactor de cultivo mixto de algas clorófitas.

Para cumplir con el objetivo general de la investigación, se determinó la presencia de algas clorofitas en el efluente de la tercera fase de los filtros percoladores de la PTAR de la USAC y se construyeron tres fotobiorreactores cada fotobiorreactor fue sometido a distintas cargas hidráulicas las cuales fueron: $1.32 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ (fotobiorreactor de baja carga hidráulica, FBBCH), $3.23 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ (fotobiorreactor de mediana carga hidráulica, FBMCH) y $5.32 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ (fotobiorreactor de alta carga hidráulica, FBACH).

En cada fotobiorreactor, se determinó la presencia y crecimiento de algas clorofitas y el periodo de tiempo en el que se estabilizó el sistema, tomándose en cada uno de ellos tres muestras a flujo continuo, y cinco a flujo tipo *batch*. En cada una de las muestras, se analizó la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda bioquímica de oxígeno filtrada (DBO_5 filtrada), sólidos suspendidos (SS), coliformes fecales (CF), radiación solar, potencial de hidrógeno (pH), temperatura y oxígeno disuelto (OD).

Cuando los fotobiorreactores trabajaron a flujo continuo, se determinó que no existió una relación causa-efecto entre remoción de materia orgánica y la carga hidráulica, dado que, en el FBBCH no se presentó remoción, en el FBMCH la remoción de DBO_5 fue de 25.49 % y con el FBACH la remoción que se obtuvo fue de 21.29 %.

Durante el estudio no se observó ninguna relación causa-efecto entre la remoción de materia orgánica y la carga hidráulica cuando los fotobiorreactores funcionaron a flujo *batch*, debido a que, en el FBBCH la remoción de DBO₅ fue de 15.02 %, en el FBMCH la remoción fue del 46.46 % y con el FBACH la remoción de DBO₅ fue de 29.98 %.

Cuando los fotobiorreactores trabajaron a flujo continuo y tipo *batch* al variar la carga hidráulica, no se vio afectada de forma significativa la remoción de coliformes fecales, dado que el FBMCH fue el que presentó mayor remoción de CF trabajando a flujo continuo y flujo tipo *batch*.

Cuando el FBMCH trabajo a flujo continuo, se obtuvo una remoción del 99.93 % (de un valor inicial de 1.3×10^6 a un valor final de 8.10×10^2 NMP/100 ml), y cuando trabajo a flujo tipo *batch*, se obtuvo una remoción del 99.92 % (de un valor inicial de 2.06×10^6 a un valor final de 1.45×10^3 NMP/100 ml).

Se pudo observar que la carga hidráulica no ejerció un efecto en la remoción de materia orgánica y la remoción de coliformes fecales; sin embargo, podría estar relacionado con el tiempo de retención, el cual se recomienda profundizar en un análisis posterior.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Guatemala, las aguas superficiales y aguas subterráneas están presentando problemas a causa de la contaminación y una mala gestión de aguas residuales, por lo que año con año la calidad del agua va disminuyendo.

Las fuentes de agua, en especial las superficiales se están contaminando a causa de una mala gestión de aguas residuales, ya que a estos cuerpos de agua van a desembocar directamente las aguas residuales, esto se puede apreciar en los lagos y ríos en donde existe población, urbanización y comercio a sus alrededores.

No solo los seres humanos se ven afectados por el deterioro de la calidad del agua de las fuentes superficiales, sino que también se ve afectado el ecosistema en general, la flora y la fauna de los cuerpos de agua que están siendo contaminados con aguas residuales están desapareciendo, ya que muchos de ellos no son capaces de adaptarse a los cambios bruscos que se producen a causa de la contaminación.

Otro efecto negativo que produce la contaminación de las fuentes de agua, es la disminución de actividades turísticas, ya que la alta contaminación que están sufriendo provocan una coloración y un mal olor en los cuerpos de agua, por lo que ya no los hace atractivos.

En Guatemala, el tratamiento de las aguas residuales se ha ido convirtiendo en prioridad, a causa de la elevada contaminación que están sufriendo las fuentes de agua, por lo que creyeron necesario crear un Acuerdo

que controle las descargas de las aguas residuales, el Acuerdo es 236-2006 el cual indica la calidad de las descargas de las aguas residuales según sea el cuerpo receptor, también se cuenta con un Acuerdo Gubernativo 12-2011 el cual es un reglamento de descargas de aguas residuales en la cuenca del lago de Atitlán, el cual indica la calidad de las descargas residuales según sea el cuerpo receptor, este último Acuerdo es más conservador, por los problemas que está pasando en la actualidad el lago de Atitlán.

En Guatemala, la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, viene desarrollando investigaciones, con el objetivo de lograr la remoción de nutrientes con tratamientos terciarios, en plantas de tratamientos de aguas residuales, a través de la utilización de cultivos mixtos de algas clorofitas, sin embargo hasta la fecha no se ha realizado un análisis con el objeto de establecer el comportamiento de remoción de materia orgánica y coliformes fecales, y si esto tiene una relación con la carga hidráulica con la que trabaje el fotobiorreactor.

De establecerse una relación entre carga hidráulica y la remoción de DBO_5 y coliformes fecales, se podría proponer el rango de carga hidráulica en el que debe operar un fotobiorreactor de cultivo mixto de algas clorofitas, para tener una eficiencia aceptable de remoción de DBO_5 y coliformes fecales. Debido a esto surge la pregunta: ¿Cuál es la relación que existe entre la remoción de materia orgánica y carga hidráulica, y la relación entre la remoción de coliformes fecales y la carga hidráulica en un fotobiorreactor de cultivo mixto de algas clorofitas?

JUSTIFICACIÓN

Las aguas negras: hacen referencia a las aguas residuales urbanas, entre los componentes más comunes de estas aguas están: microorganismos, urea, almidones, albumina, sulfatos, fosfatos, nitritos, sales, entre otros (Candela, 2016, pág. 15).

En Guatemala, debido a la alta tasa de crecimiento poblacional, un mal manejo del ordenamiento territorial una inadecuada gestión integral del recurso hídrico, falta de normas y leyes que protejan los cuerpos y fuentes de agua, las aguas residuales que se producen a diario son descargadas directamente a los cuerpos y fuentes de aguas superficiales.

A causa de lo antes mencionado, se están enfrentando graves problemas con los cuerpos de agua superficial, ya que estos se están contaminando y provocando eutrofización. Por lo que se busca darles tratamiento a las aguas residuales, antes de desembocar a los cuerpos de agua.

Uno de los problemas de las plantas de tratamiento, y sobre todo en los sistemas terciarios es el alto costo, por lo que se busca evaluar sistemas que ayude a que los costos no sean muy altos, sobre todo en operación y mantenimiento. Para minimizar los costos en los sistemas terciarios, es adecuado proponer sistemas biológicos, los cuales trabajen por gravedad y a condiciones naturales.

Un sistema biológico que trabaja por gravedad y en condiciones naturales es el fotobiorreactor de cultivo mixto de algas clorofitas, por lo que es importante

conocer el efecto de la variación de la carga hidráulica en la eficiencia de remoción de la materia orgánica y coliformes fecales, para establecer un rango de carga hidráulica, en el cual se logre la mejor eficiencia de materia orgánica y coliformes fecales en un fotobiorreactor de cultivo mixto de algas clorofitas.

OBJETIVOS

General

Analizar el efecto que ejerce la variación de la carga hidráulica, en la eficiencia de remoción de materia orgánica y coliformes fecales, en un fotobiorreactor de cultivo mixto de algas clorófitas

Específicos

1. Determinar el porcentaje de remoción de materia orgánica, Sólidos suspendidos y coliformes fecales, a distintas cargas hidráulicas, en un fotobiorreactor, ubicado en el efluente de los filtros percoladores de la planta de tratamiento de la USAC.
2. Analizar el efecto que ejerce la variación de carga hidráulica, sobre la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), sólidos suspendidos (SS) y coliformes fecales (CF).
3. Analizar la correlación que existe entre la remoción de coliformes fecales con la radiación solar, pH, temperatura y oxígeno disuelto.
4. Establecer la relación entre la DBO_5 , con la DBO_5 filtrada.

HIPÓTESIS

La eficiencia de remoción de la materia orgánica y coliformes fecales, en un fotobiorreactor de cultivos mixto de algas clorófitas, se ve afectado en forma significativa, al variar la carga hidráulica de $1.32 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$ a $5.32 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$.

ANTECEDENTES

Por el alto costo de las unidades que conforman la planta de tratamiento que utilizan químicos y energía eléctrica se han realizado investigaciones implementando sistemas biológicos, que trabajen por gravedad y con condiciones naturales. Por lo que se vienen desarrollando investigaciones de sistemas que utilicen algas para el tratamiento de agua residuales.

De acuerdo a Candela (2016), además de los métodos de tratamiento de aguas residuales con algas, se está experimentando con procesos innovadores o modificaciones de procesos ya existentes que apuntan a tratar grandes cantidades de aguas residuales en un tiempo aceptable. Algo que es necesario para tratar los volúmenes de agua que se generan en una industria, un centro urbano o la agricultura, son:

- Cultivos hiperconcentrados (Solovchenko *et al.*, 2014)
- Sistema de celdas algales inmóviles (Markov *et al.*, 1995)
- Cultivos de algas por diálisis (Marsot *et al.*, 1991)
- Fotobioreactores tubulares (Pirt *et al.*, 1983)
- Piscinas de estabilización (Kayombo *et al.*, 1999)
- Mantos algales (Adey, 1982)

La utilización de algas para el tratamiento de agua residuales es un tema que viene desarrollándose desde:

Según Salazar (2005), indica que en la época de Caldwell (1940), se reportan los primeros estudios sobre la posibilidad de utilizar las microalgas como microorganismos “purificadores de aguas residuales”, debido al aprovechamiento de los “nutrientes inorgánicos” contenidos en estos tipos de agua, para favorecer el crecimiento de las microalgas, funcionando como medio de cultivo. Posteriormente Oswald (1957), introduce un nuevo concepto en la producción masiva de microalgas, al llevar a cabo el tratamiento de las aguas residuales obteniendo una producción de biomasa vegetal con un alto contenido proteico.

De acuerdo a Forero (2014), las primeras investigaciones enfocadas al estudio del potencial de los microorganismos para biodegradar contaminantes fueron llevadas a cabo, a mediados de 1946 y 1950, este “uso” intencionado recibió entonces el nombre de “Bioremediación”. Una alternativa para el tratamiento de estas aguas residuales es la ficorremediación, es decir, la remoción de nutrientes y metales pesados a manera de tratamiento secundario con el uso de algas.

En Guatemala, la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, viene desarrollando investigaciones relacionadas con el uso de microalgas, con el objetivo de lograr la remoción de nutrientes con tratamientos terciarios, en plantas de tratamientos de aguas residuales, con el fin de investigar tecnologías de bajos costos para solucionar los problemas de eutrofización.

Quienes han trabajado en temas relacionados con el uso de algas en tratamiento de aguas residuales en Guatemala son:

- a) El estudio realizado por Guerra y Zea (2015) encontraron que se da un crecimiento de algas de forma natural en las aguas del efluente de los filtros percoladores de la PTAR de la USAC y PTAR Ing. Arturo Pasos

Sosa. Identificaron que el tiempo en el cual se puede observar el máximo crecimiento de algas es de 7 días posteriores a la salida del agua del filtro percolador. En la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos, el nitrógeno amoniacal se redujo un 5.14 %, el de nitritos incrementó más de seis veces su valor inicial, nitratos se redujo un 18.73 % y fosfatos se redujo un 16.38 %. Para la planta de tratamiento Ing. Arturo Pazos Sosa, el valor de nitrógeno amoniacal se redujo en un 5.14 %, el de nitritos incrementó más de seis veces su valor inicial, nitratos se redujo un 7.82 % y fosfatos aumentó un 83.08 %.

- b) Argueta y Blandón (2016) confirmaron la existencia de algas clorofitas en la PTAR de la USAC, identificaron y contaron las algas *Chlorella*, con un crecimiento exponencial a los 12 días; *Microsistis*, *Sphaerocystis*, *Closteriopsis* y *Navícula*, todas estas con un crecimiento exponencial a los 7 días, para posteriormente entrar a una etapa de decaimiento. Indican que, a los 12 días, se obtuvo máximo promedio de remoción: de amonio en un 41.78 %, de fosfatos un 40.42 %, de nitratos un 53 %, de nitritos un 64.52 %.

- c) Aguilar (2017) en su tesis doctoral indica, que en la PTAR de la USAC y PTAR Ing. Arturo Pasos Sosa, la identificación de la máxima producción de biomasa en el agua residual, se realizó la caracterización del fitoplancton, encontrándose con un 95 % de certeza que en el agua residual de tipo doméstica de ambos sistemas de tratamiento es viable el desarrollo de cultivos de algas clorofitas de forma natural (sin inoculación y control de condiciones de intensidad solar y CO₂). La presencia mayoritaria de algas clorofitas es la especie *Chlorella* y esto podría estar relacionada con el desarrollo de procesos de tratamiento de tipo aerobio, la densidad de fitoplancton del alga *Chlorella*, para el agua residual

proveniente de los filtros percoladores de la estación depuradora de la USAC, se obtuvo un valor de 1.20×10^5 células por mililitro. Luego de identificar la presencia de algas clorofitas se evaluó la remoción de lo cual se obtuvo: La media de la concentración de nitrito en las muestras provenientes del filtro percolador de la planta de tratamiento de la USAC, presentó un incremento significativo equivalente a 277.17 %, el nitrato una reducción equivalente a 55.16 %, el nitrógeno amoniacal un leve incremento equivalente a 3.22 %, el cual no es significativo de acuerdo al análisis de significancia realizado, y el fosfato presentó una reducción significativa equivalente a 26.39 %. Y en la estación depuradora de la ERIS, la concentración de nitrito presentó un incremento significativo de 546.94 %, el nitrato una reducción equivalente a 31.54 %, el nitrógeno amoniacal se incrementó en un 56.47 %, y el fosfato se redujo en 27.83 %. En el estudio se obtuvo una predicción de remoción promedio teórica de fosfato en la estación depuradora de ERIS del 20 % y para la estación depuradora de la USAC de 34 %.

- d) Oviedo (2018) realizó un estudio para ver el efecto que produce la carga hidráulica, sobre la remoción de nutrientes como: nitrógeno total y fósforo total, en un fotobiorreactor, instalado en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala, el cual fue expuesto a radiación solar durante el período de la investigación. Utilizó un sistema de 3 fotobiorreactor de tuberías de policarbonato transparente de 8 pulgadas de diámetro externo, que se alimentó de las aguas residuales del efluente de los filtros percoladores de la etapa III, y fue expuesto a radiación solar; lo que propició las condiciones que desarrolló el crecimiento de algas clorofitas de la especie *Chlorella*. Los fotobiorreactores trabajaron a flujo continuo a diferentes cargas hidráulicas, siendo estas de 1.32, 3.23, y 5.32 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ respectivamente.

Pero lo cambio a flujo tipo *batch* ya que se observó un barrido de la biomasa en las primeras tres muestras. El estudio determinó que la carga hidráulica si ejerció un efecto significativo en la remoción de nitrógeno total a flujo continuo, con una correlación de Pearson de 0.998 y un nivel de significancia bilateral de 0.041. Para el nitrógeno total, trabajando el fotobiorreactor a flujo *batch* no hubo un efecto significativo al igual que, para el fósforo total trabajando el fotobiorreactor a flujo continuo y a flujo tipo *batch*.

A nivel internacional los estudios más recientes son:

- a) Pérez y Labbé (2014) indican que algunas especies de algas presentes en aguas contaminadas son utilizadas en tratamientos de aguas residuales por su elevada tolerancia. Además, varias de éstas también son utilizadas para fines comerciales específicos. Las *Chlorella*, *Ankistrodesmus*, *Scenedesmus*, *Euglena*, *Chlamydomonas*, *Oscillatoria*, *Micractinium*, *Golenkinia*, *Phormidium*, *Botryococcus*, *Spirulina*, *Nitzschia*, *Navicula* y *Stigeoclonium* han sido registrados en aguas residuales desde distintas procedencias. Los valores de reducción de la DBO y DQO son variables puesto que dependen de varios factores ambientales Colak & Kaya (1988) en estudios sobre utilización de microalgas en aguas residuales urbanas, registraron valores moderados de remoción de DBO de 68.4 %. En 2008, similares resultados son observados por Hodaifa y colaboradores con una remoción de 67.4 % en cultivos de *Scenedesmus obliquus* (Turpin) Kützing 1833, alimentados con agua residual procedente de la producción de aceite de oliva. Mientras que León & Chaves (2010) lograron una apreciable reducción de un 91.4 % en tratamientos con lagunas de estabilización y microalgas.

La remoción de coliformes también puede ser variable dependiendo de la estación y ubicación del sistema de tratamiento, se han reportado reducciones de coliformes fecales y *Salmonella* totales de 88.8 %, pero más frecuentemente entre 99.0 a 99.9 %. Ruiz- Marín *et al.* (2010) lograron un 95 % de remoción de coliformes fecales, sin embargo, el rango resultante fue de $5.0 - 8.0 \times 10^4$ MPNx100 ml⁻¹, lo que hacía inviable su descarga a cuerpos naturales de aguas implicando una desinfección adicional.

- b) Ceballos (2016) realizó un proyecto el cual estuvo estructurado en tres fases: En primer lugar, se inició con la implementación de un biorreactor de lodos activados convencional (Lecho suspendido) y un biorreactor alterno con la inclusión de un medio móvil (Soporte plástico). De manera seguida, se realizó el seguimiento del comportamiento del reactor de lodos activados convencional y biorreactor de lecho móvil con la variación del volumen de soportes plásticos (80 %, 70 % y 60 %, volumen con respecto al reactor). Los rangos de remoción de materia orgánica en términos de la demanda química de oxígeno, se encuentra entre 77 % y 88 %, evidenciando la estabilidad en el sistema por la poca diferencia entre los datos.
- c) Cartagena y Malo (2017) realizaron un proyecto de investigación para evaluar el uso de la microalga *Chlorella Vulgaris* en la remoción de materia orgánica de las aguas residuales tratadas por la PTAR, haciendo énfasis en la remoción por la demanda química de oxígeno (DQO) y por los sólidos suspendidos totales (SST). La metodología que llevó a cabo para la realización del proyecto consistió en la revisión bibliográfica, para conocer las condiciones de un adecuado crecimiento de la microalga *Chlorella Vulgaris*, posteriormente se realizó el cultivo de la misma obteniendo un

volumen de 7 L de microalga aproximadamente. Luego se realizaron 2 pre-experimentaciones; la primera con el fin de conocer si la microalga en porcentajes de volumen de 33 % y 50 %, se adaptaba y crecía en el agua residual tratada (ART), en la segunda se realizó un cultivo con microalga ya adaptada a éste nuevo sustrato y se evaluó el crecimiento de la microalga ya adaptada disminuyendo el porcentaje en volumen de microalga a 10 % y 30 %.

Se obtuvo una remoción por DQO de 35.30 % y 57.51 % por SST y el biotratamiento realizado por la microalga *Chlorella Vulgaris* siendo el cultivo realizado con microalga adaptada a un porcentaje en volumen de microalga de un 10% la que mejores resultados reportó (81.80 % por DQO y 89.91 % por SST), sirviendo como tratamiento complementario.

ALCANCES Y LIMITACIONES

El estudio se centró en determinar los siguientes parámetros:

- a) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5)
- b) Demanda bioquímica de oxígeno filtrada (DBO_5 filtrada)
- c) Coliformes fecales (CF)
- d) Sólidos suspendidos (SS)
- e) Potencial de hidrógeno (pH)
- f) Temperatura (t)
- g) Oxígeno disuelto (OD)

Los fotobiorreactores de cultivos mixtos de algas clorofitas funcionaron con estas cargas hidráulicas:

- a) Fotobiorreactor 1: trabajo a una baja carga hidráulica de $1.32 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ (FBBCH).
- b) Fotobiorreactor 2: trabajo a una mediana carga hidráulica de $3.23 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ (FBMCH).
- c) Fotobiorreactor 3: trabajo a una alta carga hidráulica de $5.32 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ (FBACH).

Las limitaciones del trabajo de investigación fueron las siguientes:

- a) Longitud del fotobiorreactor
- b) Control de la calidad del agua
- c) Control de la radiación solar

INTRODUCCIÓN

El trabajo de investigación se divide en: marco teórico, metodología, resultados, discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones. Para estructurar cada uno de los capítulos fue necesario la revisión bibliográfica de textos, investigaciones, estudios especiales, trabajos de graduación, Artículos científicos, manuales de laboratorio y asesoría profesional.

En el marco teórico, se describe qué es una microalga, los avances y utilización de las mismas, poniendo mayor énfasis a las algas clorofitas. Se realizó una explicación de la importancia del uso de las microalgas en el tratamiento de las aguas residuales, tomando en cuenta la clase de algas que se presentan en ellas, y en los sistemas que se pueden utilizar. Se presentó una descripción de los fotobiorreactores tubulares horizontales, y la utilización de los tratamientos biológicos como métodos de desinfección, mencionando los factores que pueden ayudar a desinfectar el efluente de los fotobiorreactores.

En la metodología, se presentó la ubicación, localización geográfica, y descripción de la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC, se indica la descripción de la unidad experimental, desde el diseño, la ubicación e instalación del sistema, y las tres cargas hidráulicas con las que trabajaron los fotobiorreactores. En esta etapa se encuentra la fase experimental, de cómo se realizó la estabilización del sistema y todos los análisis realizados como: la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), sólidos suspendidos (SS), coliformes fecales (CF), oxígeno disuelto (OD), potencial de hidrógeno (pH) y temperatura, los cuales se realizaron como lo indica el *Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater 20th Edition*. Para la radiación solar se tomaron los

datos de la estación meteorológica INSIVUMEH, La Aurora y la estación meteorológica la Aurora II, ubicada en la planta de tratamiento piloto de la ERIS.

En la primera parte de la discusión de resultados, se graficó el porcentaje de remoción de la DBO_5 , sólidos suspendidos y coliformes fecales con respecto al número de muestras, para indicar los porcentajes de remoción que se lograron alcanzar en cada fotobiorreactor, cuando trabajaron a flujo continuo y flujo tipo *batch* a distintas cargas hidráulicas. En la segunda parte, se realizó una prueba de normalidad con el programada SPSS a los porcentajes de remoción, para ver si tuvieron un comportamiento normal, y así ver si se utiliza la media o la mediana, y graficar los promedios y medianas, según lo que indicó la prueba de normalidad, con respecto a la carga hidráulica, para ver el comportamiento de la eficiencia de remoción a distintas cargas hidráulicas.

La tercera etapa se observó si el pH, la temperatura, el oxígeno disuelto y la radiación solar tiene una correlación significativa con la remoción de coliformes fecales. La evaluación de la correlación se realizó con el coeficiente de correlación de Pearson y su significancia, con ayuda del programa SPSS. Por último, se realizó una correlación de Pearson para observar si existe una relación entre la DBO_5 y la DBO_5 filtrada.

Lo realizado en la fase de discusión de resultados, se realizó con el fin de establecer las conclusiones y recomendaciones.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Microalgas

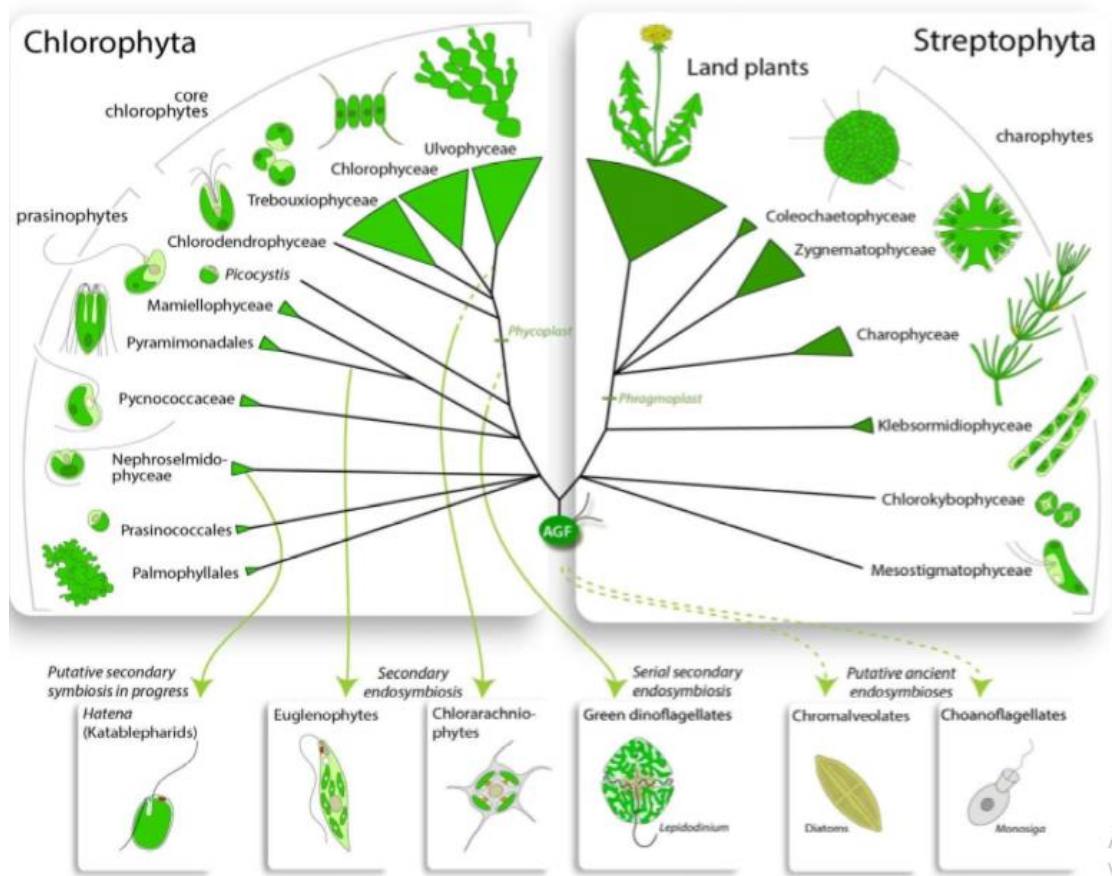
En los últimos años se han logrado avances importantes en la utilización de las microalgas para diversos fines como la salud humana, cosmética, purificación de aguas residuales, prevención de la contaminación acuática, industria farmacéutica, acuicultura, producción de pigmentos y antibióticos, entre otros (López & Meza, 2017, pág. 10).

Aunque son más las diferencias bioquímicas, fisiológicas, anatómicas y citológicas que separan a los distintos grupos de algas macroscópicas marinas, éstas se pueden agrupar tradicionalmente en tres grandes bloques en función de la naturaleza de sus pigmentos: algas rojas o rodofitas (*división Rhodophyta*), algas pardas o feofíceas (*clase Phaeophyceae*) y algas verdes o clorofitas (*división Chlorophyta*) (Romero, 2017, pág. 3).

Las algas verdes están distribuidas, tanto en hábitats acuáticos como terrestres, siendo un grupo de gran impacto ecológico. Son muy abundantes en agua dulce, donde suelen crecer de forma masiva si se encuentran en aguas ricas en nutrientes propios de aguas residuales (Romero, 2017, pág. 3).

Normalmente, las Chlorophyta se han dividido tradicionalmente en cuatro clases; Trebouxiophyceae, Chlorophyceae, Ulvophyceae y Prasinophyceae. Las tres primeras clases, se conocen como el núcleo de las Chlorophyta (Romero, 2017, pág. 4).

Figura 1. Algas Chlorophyta y Algas Streptophyta



Fuente: Romero, Lorena. Algas verdes macroscópicas de la península Ibérica. Pág. 5.

Las Charophyta incluyen tanto a organismos simples unicelulares como a complejos organismos multicelulares, siendo la mayoría de aguas dulces (Romero, 2017, pág. 5).

1.1.1. Algas clorofitas

Las clorofitas o algas verdes son un grupo (división) importante de algas que deben su color a la clorofila (sobre todo clorofila a y b), carotenoides y

xantofilas presentes en su estructura. Son también capaces de provocar florecimientos o blooms. Algunas de las algas clorofitas más estudiadas, según Martínez (2011) son (Guerra & Zea, 2015, pág. 10):

- **Scenedesmus:** clorofícea clorococal. Alga colonial, donde 2, 4 u 8 células alargadas se unen. A menudo presentan espinas en los extremos. Es común en aguas dulces y salobres en condiciones de nutrientes medio-altas. La relación óptima de nutrientes para Microalgas es N:P 16:1. (Guerra & Zea, 2015, pág. 10).
- **Chlorella:** clorofícea clorococal, especialmente conocida por su capacidad de eliminar nutrientes del agua. Se desarrolla en medios ricos en nutrientes. Es conocida por ser una de las algas clorofitas de más rápido crecimiento. Es esférica y su diámetro oscila normalmente entre las 2 y 10 μm . Contiene clorofila a y b. (Guerra & Zea, 2015, pág. 10).
- **Rodofitas o algas rojas:** son representativas del medio marino, encontrándose pocas en aguas dulces. Sus pigmentos fotosintéticos incluyen tres tipos de ficobilinas que les confieren su color característico. Las clorofitas florecimientos o blooms, la clase más destacada de clorofitas son las clorofíceas (Guerra & Zea, 2015, pág. 10).

1.1.1.1. Algas Chlorella

El nombre Chlorella proviene del griego *Chloros*, que significa verde, y del latín *ella*, que significa cosa pequeña, y fue descubierta y nombrada por el holandés M. W. Beijerinck en 1980. Su color es un verde fuerte, debido a su elevado contenido de clorofila, así que su capacidad de fotosíntesis se multiplica

requiriendo CO₂ agua, luz solar y minerales, para dividirse en cuatro células cada 20 horas (López & Meza, 2017, pág. 14).

Las especies de *Chlorella* son especialmente conocida por su capacidad de eliminar nutrientes del agua, se desarrollan por tanto en medios ricos en nutrientes. Es conocida por ser una de las microalgas con más rápido crecimiento. Son células esféricas, de coloración verde, se reconocen pirenoides, cloroplastos, envoltura gelatinosa y auto esporas contienen clorofila a y b (López & Meza, 2017, pág. 13).

Forma parte del género de algas verdes unicelulares de agua dulce del filo *Chlorophyta* de las cuales existen 30 especies de *Chlorella* según su clasificación botánica. Tiene forma esférica y miden de 2 a 10 µm de diámetro, no poseen flagelos. Se reproducen rápidamente a través de la fotosíntesis en medios autotróficos, heterotróficos y mixotróficos (López & Meza, 2017, pág. 14).

1.1.1.1.1. Chlorella SP.

Chlorella sp, es un alga verde de forma elipsoidal, la cual crece en forma de células simples. Pertenece a la división *Chlorophyta* y a la clase de las *Chlorophyceae*. Se ha cultivado de forma intensiva con fines de alimentación y obtención de metabolitos. (Infante, y otros, 2012, pág. 160).

Este género fue aplicado al tratamiento biológico de aguas residuales, probando su efectividad en la remoción de nitrógeno, fósforo, demanda química de oxígeno y metales. Su uso en aplicaciones de biorremediación ha sido bastante amplio, en forma suspendida o inmovilizada, como cepa pura o en asociación con otros microorganismos no fotosintéticos (Garza *et al.*, 2010) (Infante, y otros, 2012, pág. 160).

1.1.1.1.2. Chlorella Vulgaris

Esta es una microalga unicelular de color verde, de forma esférica, con un diámetro que está entre 100 y 1000 veces menor a 1 milímetro. El color verde lo obtiene gracias a los cloroplastos que son las estructuras encargadas de hacer la fotosíntesis, no presenta flagelo y en la mayoría de veces se encuentra en los cuerpos de agua dulce; se reproduce de forma acelerada y de forma asexual. Para eso precisa el carbono que obtiene de la fotosíntesis, agua, luz y pequeñas cantidades de minerales. Contiene grandes cantidades de proteínas, vitamina C, betacaroteno y vitaminas B (B1, B2, B6 y B12) (Cartagena & Malo, 2017, pág. 27).

1.1.2. Función fotosintética

La fotosíntesis es un proceso llevado a cabo por organismos fotoautótrofos, que tienen una capacidad de sintetizar materia orgánica partiendo de la energía del sol y la materia inorgánica. La importancia de este proceso no puede ser discutida, ya que la vida en la tierra se mantiene fundamentalmente gracias a la fotosíntesis que realizan las algas en medios acuáticos y las plantas en el medio terrestre, ya que estas introducen los nutrientes minerales en la base de la cadena trófica de los ecosistemas, generando materia orgánica que es consumida por organismos superiores (López & Meza, 2017, pág. 15).

1.1.3. Función depuradora

La fitorremediación, se define como el uso de plantas verdes para eliminar los contaminantes del entorno o para reducir su peligrosidad (López & Meza, 2017, pág. 16).

Las algas han ido ganando atención debido a su potencial de eliminación de nutrientes en las aguas residuales urbanas, industriales y agroindustria (López & Meza, 2017, pág. 16).

1.1.4. Crecimiento

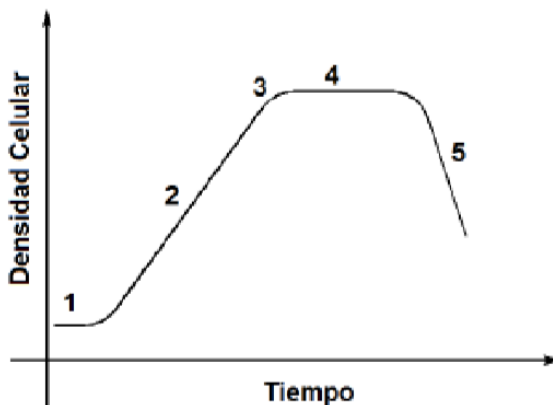
La composición y la productividad de las microalgas están determinadas principalmente por la alcalinidad del medio, el pH, la temperatura, la disponibilidad y concentración de nutrientes, la intensidad y tipo de luz, la densidad celular del cultivo y la contaminación o depuración por otros organismos. En promedio las microalgas duplican su biomasa a las 24 horas. Sin embargo, en fase exponencial algunas microalgas pueden duplicar su biomasa en tiempos tan cortos como 3,5 horas (Brenan, M., Owende, P., 2010) (López & Meza, 2017, pág. 16).

Según (Lee, Y.-K. *and* Shen, H., 2004) las fases de crecimiento que se desarrollan en un cultivo de microalgas son (López & Meza, 2017, pág. 16):

- Fase de latencia: se observa en la fase inicial de crecimiento, con frecuencia ocurre un retardo en el desarrollo de las células, debido al ajuste fisiológico por los cambios en las condiciones de nutrientes o del medio de cultivo (López & Meza, 2017, pág. 17).
- Fase exponencial: Llamada también fase de crecimiento acelerado, en el cual las células se han adaptado al medio, y comienzan a multiplicarse y crecen en forma exponencial (López & Meza, 2017, pág. 17).
- Fase de crecimiento lineal: conforme al cultivo va creciendo se produce una disminución de nutrientes, cambios de pH y alteración de otros factores como consecuencia del incremento de la población (López & Meza, 2017, pág. 17).

- Fase estacionaria: en esta ya no se observa una división celular neta, es decir que el número de células alcanzado se mantiene constante por cierto período, debido al balance entre la natalidad y mortalidad que presenta el cultivo (López & Meza, 2017, pág. 17).
- Fase de muerte: en esta fase las células empiezan a morir, aunque pueden durar semanas en la fase estacionaria e incluso meses (López & Meza, 2017, pág. 17).

Figura 2. **Curva de crecimiento de un cultivo de microalgas. 1.- Fase de latencia. 2.- Fase exponencial. 3.- Fase de crecimiento lineal. 4.- Fase estacionaria. 5.- Fase de muerte**



Fuente: López, Silvia. Meza, José. Eficiencia de la microalga *Chlorella* sp. para la remoción de nutrientes en las lagunas de oxidación de la ciudad de Manta, pág.17

1.1.5. **Parámetros que influyen en el crecimiento de las microalgas**

Como todo organismo vivo, las condiciones físicas tienen una gran influencia en el crecimiento de las microalgas. Cada especie tiene un particular intervalo de temperatura, intensidad de luz, salinidad, pH, nutrientes dióxido de

carbono y oxígeno para la producción de un máximo crecimiento. (López & Meza, 2017, pág. 18).

1.2. Tratamiento de aguas residuales con microalgas

1.2.1. Algas presentes en las aguas residuales

Normalmente se encuentran distintos géneros de algas como *Chlorella*, *Scenedesmus* y *Micractinium*, además de *Euglena*, *Chlamydomonas* y *Oscillatoria*, que están en lagunas con excesiva carga o tiempos de residencia muy altos (Moreno A. , 2008, pág. 48).

Generalmente, las especies *Chlorella* sp. y *Scenedesmus* sp. dominan naturalmente la mayoría de los sistemas de tratamientos continuos basados en microalgas, siendo consideradas las especies *Chlorella* sp. como las más altamente resistentes (Moreno A. , 2008, pág. 51).

1.2.2. Algas presentes en la PTAR de la USAC

Guerra y Zea indica que:

Las algas identificadas en las muestras tomadas del efluente de los filtros percoladores de la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos, luego de tenerlas en observación durante 7 días se describen de la siguiente manera:

- Las familias identificadas son cianofitas, diatomeas, clorofitas y zooplancton.
- De la familia de las cianofitas se destacan las algas *Microcystis* sp.
- De la familia de las diatomeas se destacan las algas *Navícula* sp, *Fragilaria* sp, y *Aulacoseira* sp.

- De la familia de clorofitas se destacan las algas *Chlorella* sp y *Scenedesmus* sp.

1.2.3. Tratamiento biológico con microalgas

Las microalgas consumen los nutrientes inorgánicos (principalmente P, y N) y desplazan microorganismos patógenos mediante competencia entre especies por los recursos. De este modo, se reduce la capacidad del efluente de provocar eutrofización en cauces naturales y además se obtiene como producto adicional la biomasa de algas, útil para fines energéticos (Codina, García, Barón, da Silva, & Bosch, 2016, pág. 1).

Es importante destacar que el tratamiento con algas no reemplaza a los tratamientos convencionales con piletas anaeróbicas, facultativas y de maduración, sino que se propone como un tratamiento complementario posterior para mejorar la calidad del agua para su descarga final (Codina, García, Barón, da Silva, & Bosch, 2016, pág. 2).

Mejora el parámetro DBO_5 (Demanda Biológica de Oxígeno), ya que al realizar la fotosíntesis liberan el O_2 que las bacterias necesitan para la degradación de materia orgánica, y capturan el CO_2 que éstas producen, favoreciendo el proceso (Codina, García, Barón, da Silva, & Bosch, 2016, pág. 3).

Las microalgas, además de su metabolismo fotosintético, respiran al igual que todos los seres vivos, por lo tanto, podría decirse que aumentan el parámetro DBO_5 . Sin embargo, como toda la biomasa se cosecharía para su utilización antes de la descarga final del efluente, el resultado sería una agua tratada con

poco o nulo contenido de P, N, DBO₅ y sin biomasa de algas (Codina, García, Barón, da Silva, & Bosch, 2016, pág. 3).

La elección del tipo de sistema de cultivo es importante, y debe realizarse con base a factores biológicos, técnicos, ambientales y económicos (Pérez & Labbé, 2014, pág. 157).

Existen dos formas de cultivo de microalgas, que son mediante sistemas abiertos o cerrados (Rojo, 2015, pág. 21) :

Figura 3. **Ventajas y desventajas de los sistemas abiertos y sistemas cerrados**

Parámetro	Lagunas abiertas	Sistemas cerrados (FBR)
Riesgo de contaminación	Extremadamente alto	Bajo
Espacio requerido	Alto	Bajo
Perdidas de agua	Extremadamente alto	Casi ninguno
Perdidas de CO ₂	Alto	Casi ninguno
Calidad de la biomasa	No susceptible	Susceptible
Variabilidad de las especies desarrolladas	No existen datos. Las posibilidades de desarrollo se restringen a unas pocas variedades de algas	Alto. Se pueden cultivar una amplia variedad de microalgas
Flexibilidad de operación	Cambios de producción entre las variedades posibles prácticamente imposible	Cambio de variedad sin ningún problema
Reproducibilidad de los parámetros de producción	No existen datos. Dependen de las condiciones externas	Posible con ciertas tolerancias
Control del proceso	No hay datos.	Si
Estandarización	No es posible	Posible
Dependencia del clima	Absoluta. Alta influencia de lluvias	Insignificantes, ya que los sistemas cerrados funcionan correctamente con lluvias
Periodo de puesta en marcha	Largo. Entre 6-8 semanas	Relativamente cortos. Entre 2-4 semanas
Concentración de la biomasa durante el funcionamiento	Bajo. 0.1-0.2 g L ⁻¹	Alto. Aproximadamente entre 2-8 g L ⁻¹
Eficiencia de los procesos de tratamientos correctores	Bajo. Grandes volúmenes y bajas concentraciones.	Alta. Flujos volumétricos medios

Fuente: Moreno, Alberto. Fotobiorreactor cerrado como método de depuración de aguas residuales urbanas. Pág. 72.

1.2.4. Sistemas de cultivo cerrados

Las dificultades en los sistemas de cultivos abiertos han favorecido el desarrollo de los sistemas de cultivos cerrados. Éstos permiten un importante control de los parámetros disminuyendo sustancialmente los problemas presentes en los sistemas abiertos. Además, permiten realizar cultivos hiperconcentrados, ya sean mixtos o monoalgales (Pérez & Labbé, 2014, pág. 162)

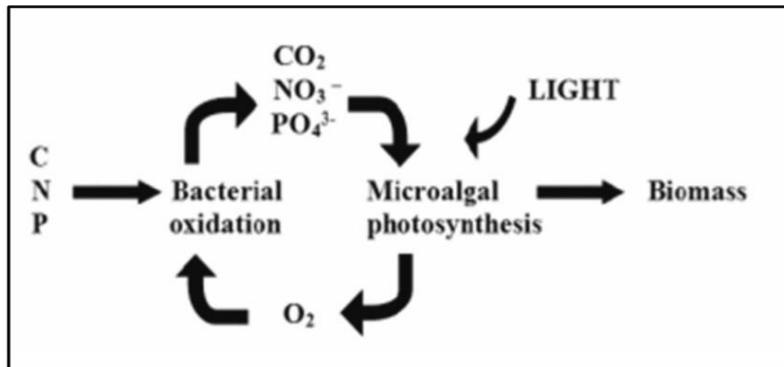
1.2.4.1. Fotobiorreactores

Los fotobiorreactores son un tipo de reactores biológicos que usan microalgas para la eliminación de los contaminantes presentes en corrientes de aguas residuales. Las algas crecen en estos sistemas asimilando los nutrientes presentes en las aguas residuales (C, N, P...) y usando luz y dióxido de carbono para llevar a cabo la fotosíntesis. (Rojo, 2015, pág. 20)

Este proceso se considera adecuado para el medio ambiente, ya que recicla los nutrientes de manera eficiente no conduce a contaminación secundaria y produce biomasa que se puede usar para distintos fines. (Rojo, 2015, pág. 20)

Por otro lado, la capacidad de capturar CO₂ por parte de las algas es una de las maneras más sostenibles con el medio ambiente en la mitigación de las emisiones de dióxido de carbono. El oxígeno necesario para la degradación de los residuos es producido por las microalgas que han crecido asimilando los nutrientes y el CO₂, en el proceso denominado oxigenación fotosintética. (Rojo, 2015, pág. 20)

Figura 4. **Proceso oxigenación fotosintética**



Fuente: Rojo, Elena. Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales de piscifactorías mediante fotobiorreactores de microalgas para la reutilización de agua y valorización de nutrientes Pág. 20.

Los sistemas cerrados de cultivos de microalgas son reactores transparentes de plástico o vidrio, con geometrías de diverso tipo: tubulares, cilíndricas o planas. Se empezaron a desarrollar con posterioridad a los sistemas de lagunaje su configuración y geometría dependen de condiciones locales, del producto a obtener y de las especificaciones económicas del sistema (Ruiz, 2011, pág. 25).

1.2.4.2. **Fotobiorreactores tubulares**

Los reactores tubulares son tubos de diámetro igual o menor a 100 cm, dispuestos de modo horizontal, vertical, helicoidal o inclinado. La biomasa es recirculada mediante bombas o empuje por aire. La longitud puede alcanzar cientos de metros (Ruiz, 2011, pág. 26).

El fotobiorreactor tubular es uno de los más adecuados para cultivos en exteriores bajo la acción de la radiación solar. Consiste en un colector solar, conformado por un arreglo de tubos rectos (Piedrahita & Montes, 2012, pág. 28).

El colector solar es orientado de tal manera que se maximice la captura de luz solar. En un arreglo típico, los tubos son ubicados paralelos entre sí y planos sobre el suelo (Piedrahita & Montes, 2012, pág. 29).

1.2.4.3. Fotobiorreactores tubulares horizontales

Este tipo puede presentar varios diseños. Su forma ofrece buenas ventajas en relación a los sistemas abiertos debido a su orientación hacia el sol lo que resulta en una alta y eficiente conversión de luz. Estos sistemas pueden manejar volúmenes grandes ya que son menos susceptibles a la contaminación. Una desventaja de este tipo de reactores es que pueden generar cantidades considerables de calor (Ramírez, Zepka, & Lopes, 2013, pág. 15).

Los tubos horizontales paralelos son algunas veces organizados como una valla, con el fin de incrementar el número de tubos que pueden ser acomodados en un área determinada. Los tubos siempre son orientados norte-sur y el suelo bajo el colector solar (Piedrahita & Montes, 2012, pág. 29).

1.3. Tratamiento biológico como método de desinfección

Los tratamientos biológicos que conlleven altos rendimientos de desinfección son idóneos para estas poblaciones por los mínimos requerimiento de instalación y mantenimiento (Moreno A. , 2008, pág. 27).

Existen diversos factores característicos de los sistemas de desinfección mediante la utilización de microalgas, que intervienen en el decaimiento de las poblaciones de microorganismos patógenos, como (Moreno A. , 2008, págs. 27-28):

- Radiación solar: la radiación solar afecta a la población bacteriana en aspectos diferentes, que implican todas las condiciones adversas para el desarrollo bacteriano. La radiación UV posee un importante poder germicida, conocido desde la antigüedad, que puede ser utilizado para la desinfección de las aguas residuales. (Moreno A. , 2008, pág. 28).
- Oxígeno disuelto: los medios en los que existen unas altas concentraciones de microalgas se caracterizan por una elevada producción de O₂. En principio, el aporte de OD al medio supone una activación de la población microbiana, pero en estos sistemas pueden alcanzarse situaciones de sobresaturación de OD, que por sí solas ejercen una acción desinfectante de las aguas tratadas. Además, estas concentraciones de oxígeno favorecen procesos de eliminación de patógenos, en los cuales está involucrada la radiación UV y el agotamiento de los nutrientes (Moreno A. , 2008, pág. 28).
- pH: el desarrollo masivo de microalgas conlleva el aumento de pH. Este incremento supone una ventaja para la desinfección de las aguas, ya que las bacterias son muy sensibles a los cambios de pH (Moreno A. , 2008, pág. 28).
- DBO y nutrientes: las bacterias como organismos heterótrofos, requieren de formas orgánicas de carbono, así como de nitrógeno orgánico, entre otros nutrientes. Los sistemas con alta producción de biomasa, utilizada como fase final de un proceso de depuración se caracterizan por las bajas tasas de DBO₅ y DQO, por lo que los suministros de estos nutrientes no siempre resultan suficientes para el desarrollo óptimo de las bacterias (Moreno A. , 2008, pág. 30).

- Concentración de algas: el abatimiento bacteriano en los sistemas de depuración de aguas basados en la acción de las microalgas está afectado por la concentración de algas, ya que afecta a la intensidad de la variación de los parámetros modificados por su presencia en el medio. Así, la concentración del oxígeno disuelto, el consumo de CO₂, el aumento del pH, y los demás fenómenos de interacción alga/bacteria, se ven potenciados por el aumento del número de algas por unidad de volumen (Moreno A. , 2008, pág. 29).
- Temperatura del agua: la temperatura es uno de los factores más estudiados en cuanto a su influencia en el decaimiento bacteriano. Los aumentos de temperatura suponen un cambio beneficioso en la remoción bacteriana por el incremento de la actividad metabólica de los microorganismos, que aumentan su susceptibilidad a las sustancias tóxicas presentes del medio (Moreno A. , 2008, pág. 29).
- Predación: en los sistemas de depuración de aguas por microalgas se dan ecosistemas donde las bacterias forman parte de la cadena alimenticia, y gran número de estos organismos son consumidos por protozoarios u otras formas más evolucionadas de vida animal. Así, algunos bacteriófagos específicos también se alimentan de las bacterias fecales (Moreno A. , 2008, pág. 30).
- Sedimentación: en la eliminación de los patógenos parecen estar involucrados los procesos de sedimentación por la adsorción y posterior arrastre, mediante las partículas sedimentables, apareciendo poblaciones de los indicadores bacterianos utilizados para el control de la contaminación fecal formando parte de los sedimentos (Moreno A. , 2008, pág. 30).

2. DISEÑO METODOLÓGICO

2.1. Descripción del sitio de estudio

2.1.1. Planta de tratamiento de aguas residuales USAC

La Universidad cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, las cuales después de tratadas son evacuadas hacia la cuenca que abastece el lago de Amatitlán (Pérez A. , 2012, pág. 22).

La planta de tratamiento fue diseñada por el Ing. Arturo Pazos en el año 1989, como un sistema de tratamiento biológico de un filtro percolador de tres etapas en serie, con una capacidad para 50,000 estudiantes. Fue construida por la Compañía Constructora de Obras Civiles (COCISA) en el año 1990 (Ramírez Ó. , 2012, pág. 26). El terreno donde se encuentra la PTAR de la USAC, está ubicado a la orilla de un barranco, por lo que se puede decir que la topografía es irregular, siendo esto de beneficio para la PTAR, que el agua fluya únicamente por la fuerza de gravedad.

Figura 5. **Rótulo ubicado en las afueras de la planta tratamiento de aguas residuales de la USAC**



Fuente: PTAR, USAC.

2.1.2. Ubicación y localización geográfica

La PTAR de la USAC se encuentra en la ciudad universitaria, campus central, ubicado en la zona 12 de la ciudad capital.

Sus colindancias son: al norte, este y sur colinda con los predios de la ciudad universitaria y al oeste con la colonia El Carmen y una quebrada de por medio, que se origina a inmediaciones de la ciudad universitaria (Ramírez Ó. , 2012, pág. 27).

Para ingresar a la PTAR de la USAC, se debe de ingresar a la Universidad de San Carlos de Guatemala, la cual cuenta con dos ingresos, ya sea por el Periférico o por la Avenida Petapa como se muestra en la figura 6, luego ingresa a la granja experimental de veterinaria, la cual se ubica después de la unidad de EPS.

El camino cuenta con cercas y solo puede entrar personal autorizado, la distancias desde la entrada por el Periférico o por la Avenida Petapa hasta la PTAR es aproximadamente de 1.78 Km. y 2.1 Km. respectivamente. Las coordenadas geográficas de la planta de tratamiento son las siguientes: latitud: 14° 34' 43" N, longitud: 90° 33' 34.8" O, altitud: 1456 msnm , (Pierri, 2013).

Figura 6. **Ubicación e ingresos a la PTAR de la USAC**



Fuente: <https://www.google.com/maps/place/Planta+De+Tratamiento+De+Agua+USAC>.
Consulta: 7 de junio del 2018.

Figura 7. Vista aérea PTAR USAC



Fuente: Noriega, José. <https://www.google.com/maps/place/Planta+De+Tratamiento+De+Agua>.
Consulta: 7 de junio del 2018

2.1.3. Descripción de la planta de tratamiento

La planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala, es tipo aerobia conformada por los siguientes tipos de tratamiento:

- Tratamiento preliminar o pre-tratamiento
 - Cámara de ingreso
 - Reja de cribas o de barras
 - Desarenador

- Tratamiento primario
 - Sedimentador primario

- Tratamiento secundario
 - Filtros percoladores de tres etapas
 - Sedimentador secundario
 - Digestor de lodos
 - Patio de secado

2.2. Diseño y construcción de los fotobiorreactores

El diseño y construcción se trabajó en conjunto con Oviedo (2018), quien utilizó el sistema de fotobiorreactores para analizar la remoción de nutrientes a distintas cargas hidráulicas.

Se diseñó un sistema experimental conformado por tres unidades de fotobiorreactores, las medidas de estos se vieron limitadas o restringidas a la disponibilidad existente en ERIS, ya que en el laboratorio se tenían tres tubos de acrílico de policarbonato con las medidas que se muestran en la tabla I.

Tabla I. **Medidas del fotobiorreactor**

Descripción	Longitud (cm)	Diámetro Interno (cm)	Diámetro Externo (cm)	Grosor de Paredes (cm)
Fotobiorreactor 1	132	19.12	20.32	0.6
Fotobiorreactor 2	182	19.12	20.32	0.6
Fotobiorreactor 3	182	19.12	20.32	0.6

Fuente: elaboración propia, 2018.

En el sistema se buscó que los tres fotobiorreactores trabajarán a distintas cargas hidráulicas, el fotobiorreactor 1 trabajó a una baja carga hidráulica (FBBCH), el fotobiorreactor 2 trabajó a una mediana carga hidráulica (FBMCH) y el fotobiorreactor 3 trabajó a una alta carga hidráulica (FBACH).

En la tabla II se presentan los cálculos hidráulicos, para obtener el tiempo de retención y carga hidráulica de acuerdo a los caudales, que fueron ajustados en campo durante el funcionamiento y operación de la planta piloto (Oviedo, 2018, pág. 23)

Tabla II. **Diseño hidráulico de los fotobiorreactores**

Descripción	Fotobiorreactor I Q mín	Fotobiorreactor II Q med	Fotobiorreactor III Q máx
Diámetro interno (cm)	19.12	19.12	19.12
Longitud (m)	1.32	1.82	1.82
Área (m ²)	0.02871	0.02871	0.02871
Volumen F.biorreactor (m ³)	0.038	0.052	0.052
Q (lts/d)	38.02	52.26	197.2
TRH (Hrs)	23.92	13.50	7.37
Carga Hidráulica (m³/m²/d)	1.32	3.23	5.32

Fuente: (Oviedo, Determinación del efecto de la carga hidráulica sobre la remoción de nutrientes en un fotobiorreactor de cultivo mixto de algas clorofitas, en la planta tratamiento de aguas residuales de la USAC, 2018)

Se utilizaron las siguientes ecuaciones para realizar el cálculo de carga hidráulica, en los cuales trabajaron los fotobiorreactores:

Área del fotobiorreactor:

$$A = \pi * \frac{D^2}{4} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$A = \text{área en } m^2.$

$D = \text{Diámetro en } m.$

Volumen:

$$V = A * L \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$V = \text{volumen en } m^3.$

$A = \text{área en } m^2.$

$L = \text{longitud en } m.$

Caudal:

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$Q = \text{caudal en } m^3/\text{seg}.$

$V = \text{volumen en } m^3.$

$t = \text{tiempo en } s.$

Tiempo de retención hidráulica:

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$TRH = \text{tiempo de retencion hidráulica en hrs}.$

$V = \text{volumen en lts}.$

$Q = \text{caudal en lts/hrs}.$

Carga hidráulica:

$$C.H = \frac{Q}{A} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$C:H = \text{carga hidráulica } \frac{m^3}{m^2 * \text{día}}.$

$Q = \text{caudal en } m^3/\text{día.}$

$A = \text{área en } m^2.$

Para la construcción de los fotobiorreactores se utilizaron los tres tubos acrílicos de policarbonato de 8 plg. de diámetro externo y se le colocó un tapón de PVC de 8 plg. en cada extremo.

En cada extremo se colocó un pedazo de tubería gris para drenaje, norma F949 y un empaque de hule para obtener un mejor sellado.

A los tapones por donde entra el agua residual de los filtros percoladores se le colocaron unos adaptadores macho y hembra con un pedazo de manguera de 3/8" al cual se le colocó una válvula de paso para regular el caudal y a los tapones de salida se les colocó 2 adaptadores machos, uno en el tubo de PVC de 1 1/2" de aproximadamente 50 cm. de largo para liberar la presión, ventilar, expulsar los gases producidos por el proceso de fotosíntesis de las algas y evitar condiciones anaerobias, y en el otro una manguera con válvula de paso para la recolección de muestras.

2.3. Instalación y ubicación de los fotobiorreactores

Los tres fotobiorreactores se colocaron en la PTAR de la USAC, a un costado del digestor dado que, había espacio y no se tenía ningún obstáculo que provocará sombra al sistema, con el fin que se aprovechará al máximo la radiación solar.

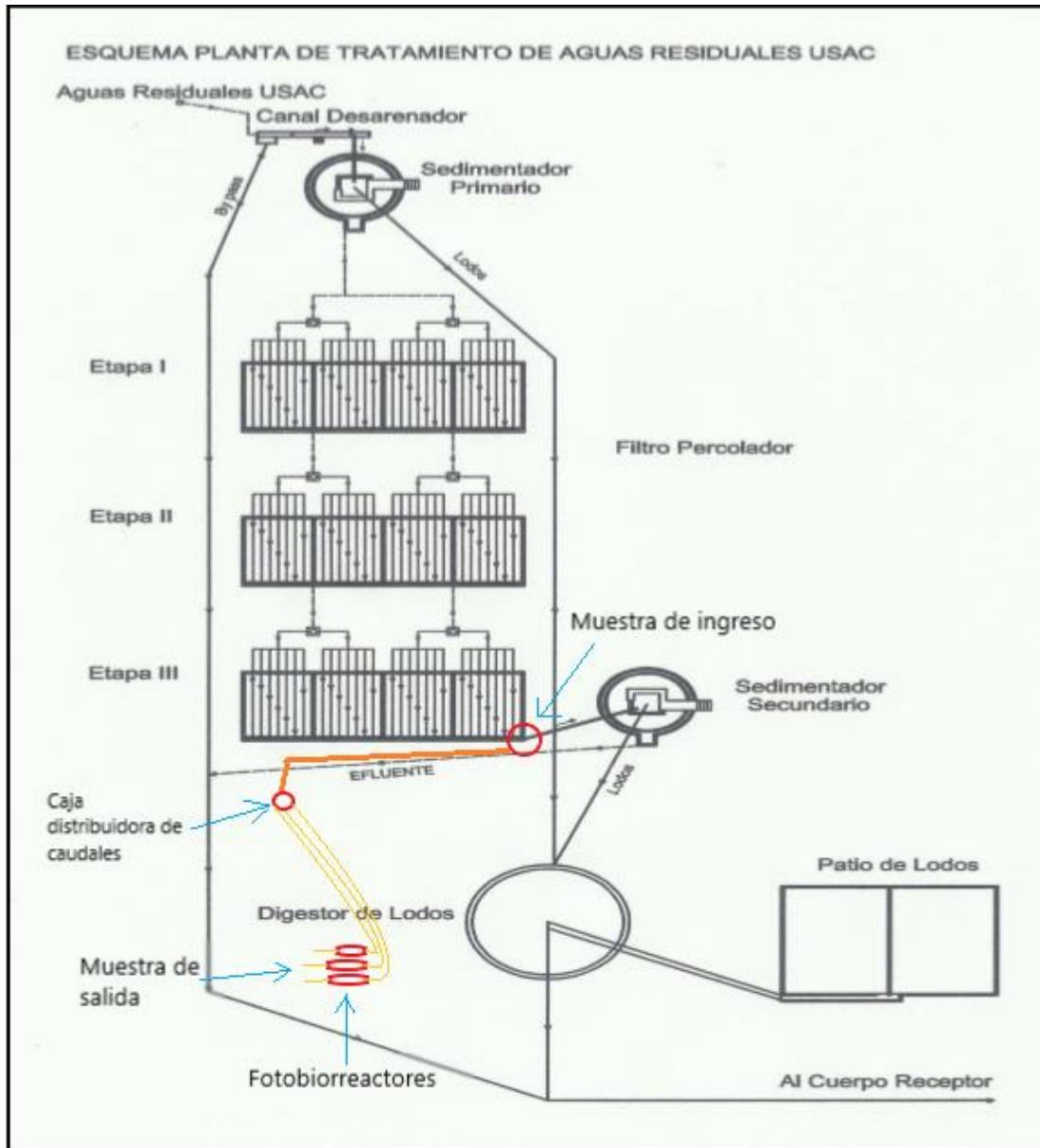
En la figura 8 y 9, se pudo observar la ubicación de los fotobiorreactores.

Figura 8. **Ubicación del fotobiorreactor**



Fuente: PTAR, USAC, 2018.

Figura 9. Esquema de la ubicación de los fotobiorreactores en la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC



Fuente: Ramírez, Óscar. Investigación de la eficiencia de las etapas en serie del filtro percolador de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos. Pág. 30.

Los tres fotobiorreactores fueron instalados de forma horizontal en paralelo, orientados norte-sur para el aprovechamiento de las condiciones ambientales de la radiación solar, lo cual funcionó como fuente de energía para que las algas realizarán la fotosíntesis y como germicida para la desinfección de las aguas residuales y fuera alimentado por las aguas residuales que salen de la tercera fase de los filtros percoladores antes de que entrara al sedimentador secundario.

Para la instalación de los tres fotobiorreactores se realizaron los siguientes pasos:

Paso 1: Instalación de la mesa de metal y los fotobiorreactores

En este paso se realizó la limpieza y nivelación del área donde se instaló la mesa de metal, en la cual se colocaron los fotobiorreactores.

Se realizó una fundición de concreto de 30X30X20 cm. en cada pata de la mesa, esto se realizó con el fin de asegurar la mesa donde se colocaron los fotobiorreactores, en la planta no hay seguridad y los encargados de la planta se encuentran en las instalaciones de 7 a.m. a 3 p.m.

Los fotobiorreactores se instalaron de forma horizontal en paralelo sobre la mesa metálica.

Paso 2: Captación y traslado del agua residual

Se colocó una manguera de $\frac{1}{2}$ " entre la salida de la última unidad de los filtros percoladores y el sedimentador secundario de la planta de tratamiento, la cual se encargó de trasladar el agua residual a una caja distribuidora de caudales que se ubicó a 30 metros de los filtros percoladores.

A la manguera que alimentó de agua residual a la caja distribuidora de caudales se le colocó al final una válvula de paso de $\frac{1}{2}$ " , la cual sirvió para calibrar el caudal.

La caja distribuidora de caudales debía cumplir con dos funciones: alimentar los fotobiorreactores con agua residual por medio de tres mangueras de $\frac{3}{8}$ " y retener la mayor cantidad posible de sólidos provocados por el desgaste que se tiene de la piedra volcánica y el desprendimiento de la biopelícula (capa biológica).

Paso 3: Traslado del agua residual de la caja distribuidora de caudales al fotobiorreactor

Las tres mangueras que salieron de la caja distribuidora de caudales se encargaron de alimentar el sistema que estaba compuesto por tres fotobiorreactores, cada manguera estuvo conectada a diferente unidad y válvula de paso, con las cuales se calibraron los caudales de cada fotobiorreactor.

Figura 10. **Fotobiorreactores**



Fuente: PTAR. USAC.

2.4. Estabilización del sistema

Para la estabilización del sistema se llenaron en un 80 % los fotobiorreactores, las válvulas de paso de entrada y salida fueron cerradas, quedando el sistema sin flujo durante 7 días y expuesto a la radiación solar, esto

se realizó con el objetivo de propiciar las condiciones necesarias para el desarrollo de las algas clorofitas.

Conforme el paso de los días se observó un crecimiento de algas en los fotobiorreactores.

Día 1: el fotobiorreactor tuvo un color café apenas perceptible (ver Figura 11 a.), el color se debió a que el efluente de los filtros percoladores tenía sólidos, esto puede ser por el desgaste que sufre la piedra volcánica que contiene los filtros percoladores y por el desprendimiento de la biopelícula (capa biológica) que se forma en la piedra volcánica, que lograron pasar la caja distribuidora de caudales.

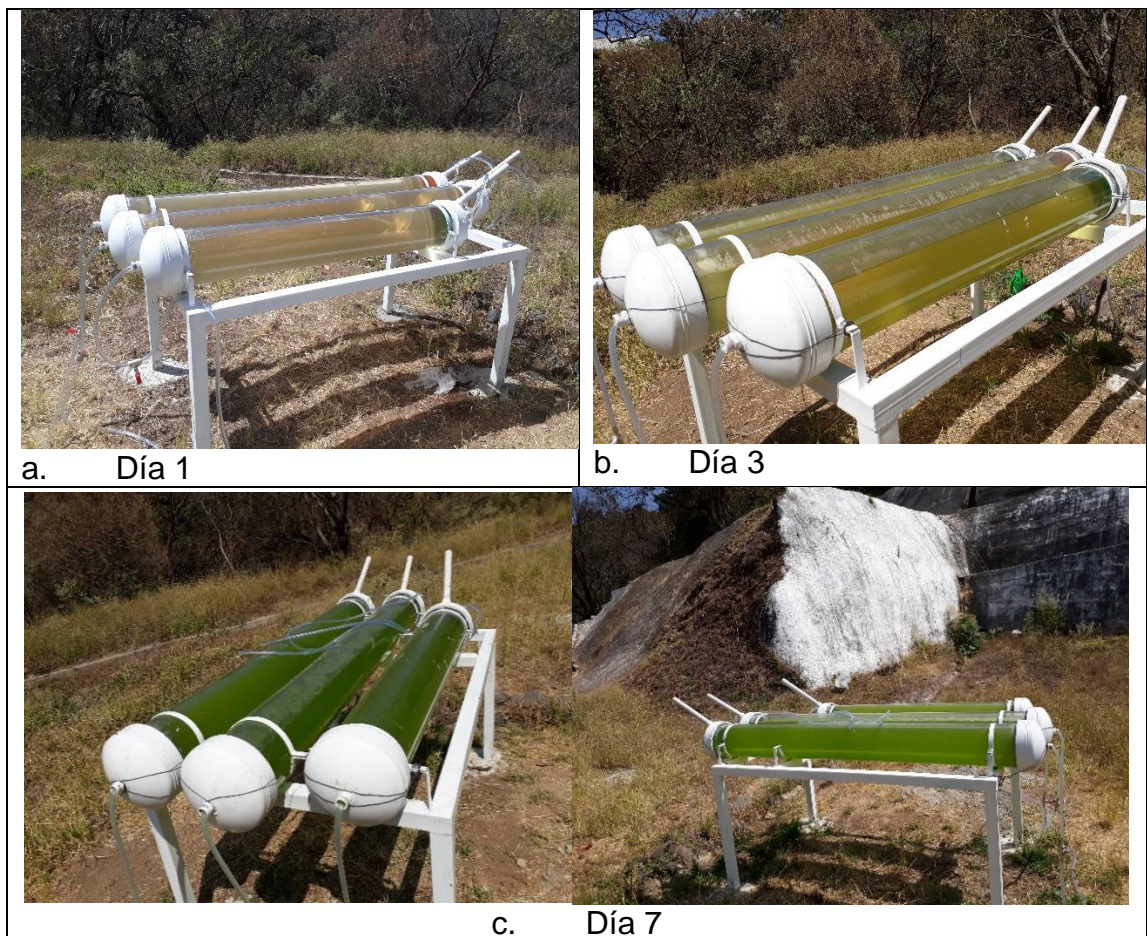
Día 3: los fotobiorreactores cambiaron de color, se empezaron a tornar verde, por lo que se puede decir que si existió un crecimiento de algas en los fotobiorreactores (ver Figura 11 b.). El mismo día se abrieron las llaves de paso para dejar pasar agua residual, con el fin de que ingresaran nutrientes a los fotobiorreactores y así asegurarse que las algas clorofitas que se estaban reproduciendo no se quedaran sin alimento y murieran.

Día 7: se observó un notable cambio de color en los tres fotobiorreactores, pasando de verde a un verde intenso, (Ver Figura 11 c.), lo que indicó la existencia de una considerable cantidad de algas clorofitas. Esto se pudo lograr gracias a la radiación solar que ayudó a las algas a realizar la fotosíntesis, y a los nutrientes que están presentes en el agua residual.

El sistema de fotobiorreactores de cultivo mixto de algas clorofitas tardó 7 días en estabilizarse, ya que en los siguientes días no se observó ningún cambio de color.

Oviedo (2018), indica que, la generación de burbujas de oxígeno O_2 , producido por el proceso de fotosíntesis de las algas es muy importante, porque indica la contribución que tienen las algas en la depuración de las aguas residuales, en cuanto a la transformación de los nutrientes en el crecimiento de su población, y los gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO_2) o el metano (CH_4) que son transformados a oxígeno, el que es aprovechado por las especies cuando se da vertido de las aguas tratadas por este sistema”.

Figura 11. **Estabilización del sistema**



Fuente: PTAR. USAC.

En el día 7, que se dio la estabilización del sistema se realizó un conteo de algas clorofitas, la técnica que se utilizó para el conteo de microalgas fue el método de conteo de fitoplancton, de *Estándar Methods For The Examination of Water and Wastewater 20th Edition*.

La recolección de la muestra para el conteo de algas clorofitas, se realizó en un frasco de 100 ml. Luego se les agregó 0.3 ml de solución de lugol tal y como lo indica el *Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater 20th Edition*, la solución de lugol se les agrego para la conservación del fitoplancton.

Los resultados que se obtuvieron en el conteo de algas fueron:

Tabla III. **Resultados de conteo de algas en fotobiorreactores al séptimo día (No. de algas Clorofitas/ml)**

Unidad	Fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica)	Fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica)	Fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica)
Análisis día 7	2,400,000	3,200,000	2,560,000

Fuente: elaboración propia.

2.5. Número de muestras

Para determinar el número de muestras se empleó la fórmula de muestras infinitas, según se muestra a continuación:

$$n = \frac{Z^2 \times S^2}{e^2}$$

Donde:

n = tamaño de la muestra.

S = desviación estándar.

Z = valor de la distribución.

t = de Student.

e = error relativo.

Para este estudio, se consideró los registros de la demanda bioquímica de oxígeno, obtenidos en ensayos realizados en la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, los cuales se muestran en el apéndice del trabajo de investigación de Aguilar (2017), obteniéndose de estos datos una desviación estándar de 19.34 % con un total de 7 grados de libertad.

Se consideró para este estudio un nivel de confianza del 95 %, se obtiene un valor de (Z) de 1.96, y estableciendo el nivel de error esperado en 15 %, el número de muestras propuesto fue de 6 de forma aleatoria.

A pesar de lo indicado anteriormente, en la ejecución del estudio, con el objetivo de empatar el número de muestras con el estudio realizado por Oviedo (2018), dado que existe interés por parte de ERIS de correlacionar ambos trabajos de investigación, se optó por aumentar el número de muestras a 8, con lo cual el error esperado del estudio mejoró a 13.5 %.

2.6. Metodologías de análisis realizados

El material y equipo que se utilizó para realizar los análisis tanto en el laboratorio como *in situ*, se presentaron en la siguiente tabla:

Tabla IV. **Material y equipo utilizado en los análisis de laboratorio**

Análisis	Material y equipo
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	<i>Nutrient buffer Pillows</i> para 300 cm ³ , equipo HACH HQ 40D.
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅) filtrada	Membrana fibra de vidrio 1.6 UM 47 MM, <i>nutrient buffer Pillows</i> para 300 cm ³ , Equipo HACH HQ 40D
Sólidos suspendidos (SS)	Membrana fibra de vidrio 1.6 UM 47 MM
Potencial de hidrógeno (pH)	Conductivímetro HI 9813-6
Temperatura	YSI Pro20
Oxígeno disuelto (OD)	YSI Pro20
Radiación solar planta piloto Aurora II	Estación meteorológica Davis Instruments Vantage pro2

Fuente: elaboración propia.

Para realizar los análisis, se tomaron 4 muestras las cuales se dividen de la siguiente manera:

- 1 muestra para el afluente de los fotobiorreactores (se tomó una sola muestra, dado que el agua residual que ingresaba a los tres fotobiorreactores era la misma).
- 1 muestra del efluente del fotobiorreactor 1.
- 1 muestra del efluente del fotobiorreactor 2.
- 1 muestra del efluente del fotobiorreactor 3.

El análisis se realizó en la entrada y salida de cada unidad, con el fin que se pudiera observar la eficiencia de cada uno de los fotobiorreactores.

Los parámetros que se analizaron en el laboratorio de ERIS fueron:

- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).

- Demanda bioquímica de oxígeno filtrada (DBO₅ filtrada).
- Sólidos suspendidos.
- Coliformes fecales.

El método que se utilizó para la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno fue la prueba de DBO₅, la cual estaba indicada en el *Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater 20th Edition*.

Se realizó el análisis de la demanda bioquímica de oxígeno filtrada, para ver si existía alguna variación entre la DBO₅ y la DBO₅ filtrada, dado que en el efluente de los fotobiorreactores se pudo observar la presencia de algas, por lo que pueden ocasionar un error en la lectura del DBO₅.

Los análisis de DBO₅ filtrada, se realizaron con muestras filtradas, los filtros utilizados fueron las membranas de fibra de vidrio 1.6 UM 47 MM, los mismos que se utilizaron para los análisis de sólidos suspendidos. Con la muestra filtrada el método que se utilizó fue la prueba de DBO₅, propuestas por el *Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater 20th Edition*.

Los sólidos suspendidos son los que quedan retenidos en los filtros, cuando se filtra el agua. El método utilizado fue el análisis de sólidos suspendidos secados a 103-105 °C esta explicado en el *Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater 20th Edition*.

La técnica utilizada para el análisis de coliformes fecales, fue la técnica de tubos múltiples de fermentación, la cual estaba definida por el *Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater 20th Edition*.

La técnica de tubos múltiples de fermentación se divide en:

- Prueba presuntiva
- Prueba confirmativa
 - Coliformes fecales

Los análisis que se realizaron *in situ* son:

- Potencial de hidrógeno (pH)
- Temperatura
- Oxígeno disuelto

Para el pH, temperatura y oxígeno disuelto se utilizaron los equipos mencionados en la tabla IV. Para el oxígeno disuelto el método utilizado fue el método de electrodos por membrana el cual está indicado en el *Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater 20th Edition*, se escogió este método ya que es el adecuado para realizarlo *in situ*, dado que se realizó en el lugar de muestreo, porque el OD puede variar rápidamente.

Otro dato que fue importante para el estudio fue la radiación solar, los cuales se obtuvieron mediante el uso de una estación meteorológica Davis Instruments Vantage pro2, la cual estaba ubicada en la planta experimenta de tratamiento de aguas residuales de ERIS en Aurora 2, además se presentaron los datos de radiación solar de las estaciones meteorológicas de INSIVUMEH y la estación meteorológica La Aurora.

2.7. Análisis estadístico

En el estudio se realizaron cálculos estadísticos, los cuales ayudaron a interpretar los datos que se obtuvieron en la investigación. Para realizar los análisis estadísticos, se utilizó el programa IBM SPSS *Statistics 22*.

Se realizaron pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk, para ver el comportamiento de los porcentajes de remoción, para saber si se utilizaban pruebas paramétricas o no paramétricas (media o mediana). Con los resultados de la prueba de normalidad, se realizó un cálculo estadístico con la que se obtuvo la media y la mediana.

Se realizaron análisis de correlación de Pearson, para observar si entre las variables existió una relación causa-efecto, en el análisis de correlación se tomó en cuenta el coeficiente de correlación de Pearson y el nivel de significancia.

3. RESULTADOS

3.1. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

Tabla V. Resultados del análisis de DBO₅ en mg/l, sistema continuo

Sistema continuo							
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅) en mg/l							
Unidad	Entrada	Fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica)		Fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica)		Fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica)	
Número de muestreo	*Entrada de DBO ₅ en mg/l	Salida de DBO ₅ en mg/l	Porcentaje de remoción	Salida de DBO ₅ en mg/l	Porcentaje de remoción	Salida de DBO ₅ en mg/l	Porcentaje de remoción
1	22.20	47.60	-114.41 %	31.60	-42.34 %	29.60	-33.33 %
2	41.00	38.60	5.85 %	23.40	42.93 %	27.20	33.66 %
3	34.00	23.00	32.35 %	8.20	75.88 %	12.40	63.53 %

Fuente: elaboración propia.

Nota: *Entrada: los valores de la muestra de entrada es el mismo para los 3 fotobiorreactores.

Tabla VI. Resultados del análisis de DBO₅ en mg/l, sistema tipo *batch*

Sistema tipo <i>batch</i>							
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅) en mg/l							
Unidad	Entrada	Fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica)		Fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica)		Fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica)	
Número de muestreo	*Entrada de DBO ₅ en mg/l	Salida de DBO ₅ en mg/l	Porcentaje de remoción	Salida de DBO ₅ en mg/l	Porcentaje de remoción	Salida de DBO ₅ en mg/l	Porcentaje de remoción
1	19.00	16.20	14.74 %	11.20	41.05 %	12.80	32.63 %
2	20.00	17.60	12.00 %	11.20	44.00 %	14.60	27.00 %
3	32.80	26.00	20.73 %	14.60	55.49 %	20.00	39.02 %
4	21.60	19.20	11.11 %	10.80	50.00 %	16.40	24.07 %
5	20.60	17.20	16.50 %	12.00	41.75 %	15.00	27.18 %

Fuente: elaboración propia.

Nota: *Entrada: los valores de la muestra de entrada es el mismo para los 3 fotobiorreactores.

3.2. Demanda bioquímica de oxígeno filtrada (DBO₅)

Tabla VII. **Resultados del análisis de DBO₅ filtrada en mg/l, sistema continuo**

Sistema continuo							
Demanda bioquímica de oxígeno filtrada (DBO ₅) en mg/l							
Unidad	Entrada	Fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica)		Fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica)		Fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica)	
Número de muestreo	*Entrada de DBO ₅ en mg/l	Salida de DBO ₅ en mg/l	Porcentaje de remoción	Salida de DBO ₅ en mg/l	Porcentaje de remoción	Salida de DBO ₅ en mg/l	Porcentaje de remoción
1	22.20	30.00	-35.14 %	28.60	-28.83 %	23.00	-3.60 %
2	41.00	15.00	63.41 %	20.20	50.73 %	21.80	46.83 %
3	34.00	7.20	78.82 %	9.20	72.94 %	9.80	71.18 %

Fuente: elaboración propia.

Nota: *Entrada: los valores de la muestra de entrada es el mismo para los 3 fotobiorreactores.

Tabla VIII. **Resultados del análisis de DBO₅ filtrada en mg/l, sistema tipo batch**

Sistema tipo batch							
Demanda bioquímica de oxígeno filtrada (DBO ₅) en mg/l							
Unidad	Entrada	Fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica)		Fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica)		Fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica)	
Número de muestreo	*Entrada de DBO ₅ en mg/l	Salida de DBO ₅ en mg/l	Porcentaje de remoción	Salida de DBO ₅ en mg/l	Porcentaje de remoción	Salida de DBO ₅ en mg/l	Porcentaje de remoción
1	19.00	6.40	66.32 %	7.60	60.00 %	9.00	52.63 %
2	20.00	9.60	52.00 %	11.60	42.00 %	13.00	35.00 %
3	32.80	9.40	71.34 %	12.00	63.41 %	15.20	53.66 %
4	21.60	7.60	64.81 %	7.60	64.81 %	10.00	53.70 %
5	20.60	11.60	43.69 %	13.20	35.92 %	14.40	30.10 %

Fuente: elaboración propia.

3.3. Sólidos suspendidos (SS)

Tabla IX. Resultado de los análisis de sólidos suspendidos (SS) en mg/l, sistema continuo

Sistema continuo							
Sólidos suspendidos (SS) en mg/l							
Unidad	Entrada	Fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica)		Fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica)		Fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica)	
Número de muestreo	*Entrada de SS en mg/l	Salida de SS en mg/l	Porcentaje de remoción	Salida de SS en mg/l	Porcentaje de remoción	Salida de SS en mg/l	Porcentaje de remoción
1	10.00	22.50	-125.00 %	15.14	-51.39 %	16.88	-68.75 %
2	22.00	11.05	49.76 %	8.00	63.64 %	2.13	90.30 %
3	19.14	5.78	69.82 %	6.00	68.66 %	3.00	84.33 %

Fuente: elaboración propia.

Nota: *Entrada: los valores de la muestra de entrada es el mismo para los 3 fotobiorreactores.

Tabla X. Resultado de los análisis de sólidos suspendidos (SS) en mg/l, sistema tipo *batch*

Sistema tipo <i>batch</i>							
Sólidos suspendidos (SS) en mg/l							
Unidad	Entrada	Fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica)		Fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica)		Fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica)	
Número de muestreo	*Entrada de SS en mg/l	Salida de SS en mg/l	Porcentaje de remoción	Salida de SS en mg/l	Porcentaje de remoción	Salida de SS en mg/l	Porcentaje de remoción
1	32.67	9.25	71.68 %	8.00	75.51 %	3.00	90.82 %
2	52.56	10.43	80.15 %	4.80	90.87 %	1.60	96.96 %
3	71.50	13.21	81.53 %	10.80	84.90 %	4.80	93.29 %
4	45.00	20.00	55.56 %	3.80	91.56 %	15.09	66.46 %
5	23.60	9.00	61.86 %	8.57	63.68 %	9.39	60.22 %

Fuente: elaboración propia.

3.4. Coliformes fecales (CF)

Tabla XI. Resultados de los análisis de los coliformes fecales en NMP/100 ml, sistema continuo

Sistema continuo							
Coliformes fecales (CF) en NMP/100 ml							
Unidad	Entrada	Fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica)		Fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica)		Fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica)	
Número de muestreo	Entrada de CF en NMP/100ml	Salida de CF en NMP/100ml	Porcentaje de remoción	Salida de CF en NMP/100ml	Porcentaje de remoción	Salida de CF en NMP/100ml	Porcentaje de remoción
1	1.40E+06	2.80E+03	99.80 %	7.90E+02	99.94%	1.70E+03	99.88%
2	1.10E+06	2.20E+03	99.80 %	9.40E+02	99.91%	3.50E+03	99.68%
3	1.40E+06	1.10E+03	99.92 %	7.00E+02	99.95%	2.80E+03	99.80%
Promedio	1.30E+06	2.03E+03	99.84 %	8.10E+02	99.93%	2.67E+03	99.79%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Resultados de los análisis de los coliformes fecales en NMP/100 ml, sistema tipo *batch*

Sistema tipo <i>batch</i>							
Coliformes fecales (CF) en NMP/100 ml							
Unidad	Entrada	Fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica)		Fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica)		Fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica)	
Número de muestreo	Entrada de CF en NMP/100ml.	Salida de CF en NMP/100ml	Porcentaje de remoción	Salida de CF en NMP/100ml	Porcentaje de remoción	Salida de CF en NMP/100ml	Porcentaje de remoción
1	2.20E+06	2.40E+03	99.89 %	7.90E+02	99.96 %	3.50E+03	99.84 %
2	1.40E+06	2.20E+03	99.84 %	1.40E+03	99.90 %	2.80E+03	99.80 %
3	2.20E+06	2.80E+03	99.87 %	2.40E+03	99.89 %	2.80E+03	99.87 %
4	2.80E+06	2.40E+03	99.91 %	9.40E+02	99.97 %	5.40E+03	99.81 %
5	1.70E+06	2.80E+03	99.84 %	1.70E+03	99.90 %	2.20E+03	99.87 %
Promedio	2.06E+06	2.52E+03	99.87 %	1.45E+03	99.92 %	3.34E+03	99.84 %

Fuente: elaboración propia.

3.5. Potencial de hidrógeno (pH)

Tabla XIII. Resultados del análisis del potencial de hidrógeno pH en unidades de pH, sistema continuo

Sistema continuo						
Potencial de hidrógeno (pH) en unidades de pH						
Unidad	Fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica)		Fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica)		Fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica)	
Número de muestreo	pH de la entrada	pH de la salida	pH de la entrada	pH de la salida	pH de la entrada	pH de la salida
1	7.5	9.1	7.5	9.3	7.5	9.4
2	7.2	7.6	7.2	8.1	7.2	7.6
3	7.4	8	7.4	8.5	7.4	8

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Resultados del análisis del potencial de hidrógeno pH en unidades de pH, sistema tipo *batch*

Sistema tipo <i>batch</i>						
Potencial de hidrógeno (pH) en unidades de Ph						
Unidad	Fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica)		Fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica)		Fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica)	
Número de muestreo	pH de la entrada	pH de la salida	pH de la entrada	pH de la salida	pH de la entrada	pH de la salida
1	7.1	8.1	7.1	8.5	7.1	8
2	5.8	7.5	5.8	8.3	5.8	7.5
3	7.1	7.3	7.1	7.9	7.1	7.4
4	6.72	7.24	6.72	7.03	6.72	7.94
5	7	7.3	7	8.1	7	7.6

Fuente: elaboración propia.

3.6. Temperatura

Tabla XV. Resultados del análisis de temperatura *in situ* en grados Celsius, sistema continuo

Sistema continuo						
Temperatura <i>in situ</i> (t) en grados Celsius (°C)						
Unidad	Fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica)		Fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica)		Fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica)	
Número de muestreo	Temperatura de entrada en °C	Temperatura de salida en °C	Temperatura de entrada en °C	Temperatura de salida en °C	Temperatura de entrada en °C	Temperatura de salida en °C
1	29.5	35.5	29.5	37	29.5	36.2
2	34.1	37.8	34.1	38	34.1	37.6
3	26.6	28.5	26.6	29	26.6	29

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. Resultados del análisis de temperatura *in situ* en grados Celsius, sistema tipo *batch*

Sistema tipo <i>batch</i>						
Temperatura <i>in situ</i> (t) en grados Celsius (°C)						
Unidad	Fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica)		Fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica)		Fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica)	
Número de muestreo	Temperatura de entrada en °C	Temperatura de salida en °C	Temperatura de entrada en °C	Temperatura de salida en °C	Temperatura de entrada en °C	Temperatura de salida en °C
1	28.7	30.3	28.7	32	28.7	34.0
2	25.9	33.0	25.9	33.3	25.9	30.2
3	25.1	26.5	25.1	30.3	25.1	30.0
4	23.5	24.4	23.5	25.3	23.5	25.7
5	24.2	29.7	24.2	32	24.2	33.6

Fuente: elaboración propia.

3.7. Oxígeno disuelto (OD)

Tabla XVII. Resultados del análisis de oxígeno disuelto (OD) en mg/l, sistema continuo

Sistema continuo						
Oxígeno disuelto (OD) en mg/l						
Unidad	Fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica)		Fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica)		Fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica)	
Número de muestreo	OD en la entrada en mg/l	OD en la salida en mg/l	OD en la entrada en mg/l	OD en la salida en mg/l	OD en la entrada en mg/l	OD en la salida en mg/l
1	3.07	10.67	3.07	9.44	3.07	11.76
2	3.17	4.74	3.17	5.82	3.17	5.31
3	3.23	6.32	3.23	5.8	3.23	5.65

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. Resultados del análisis de oxígeno disuelto (OD) en mg/l, sistema tipo *batch*

Sistema tipo <i>batch</i>						
Oxígeno disuelto (OD) en mg/l						
Unidad	Fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica)		Fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica)		Fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica)	
Número de muestreo	OD en la entrada en mg/l	OD en la salida en mg/l	OD en la entrada en mg/l	OD en la salida en mg/l	OD en la entrada en mg/l	OD en la salida en mg/l
1	3.18	6.94	3.18	5.08	3.18	6.19
2	3.27	4.37	3.27	4.12	3.27	5.09
3	3.58	5.22	3.58	4.15	3.58	4.99
4	4.29	6.43	4.29	4.69	4.29	8.26
5	3.43	7.02	3.43	5.4	3.43	8.33

Fuente: elaboración propia.

3.8. Radiación solar

Tabla XIX. Radiación solar, día del muestreo, sistema continuo

Estación meteorológica Aurora 2 Planta piloto ERIS			Estación meteorológica La Aurora		Estación meteorológica INSIVUMEH	
Número de muestreo	Aurora 2 (día)		La Aurora (día)		INSIVUMEH (día)	
	Radiación solar (Watts/m ²)	Radiación solar máxima	Radiación solar (Watts/m ²)	Radiación solar máxima	Radiación solar (Watts/m ²)	Radiación solar máxima
1	188.63	1415.00	196.74	1064.89	195.38	1102.52
2	223.15	1246.00	262.33	1070.95	265.16	1130.44
3	273.42	1060.00	290.77	1049.44	300.05	1130.44

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. Radiación solar, día del muestreo, sistema tipo *batch*

Estación meteorológica Aurora 2 Planta piloto ERIS			Estación meteorológica La Aurora		Estación meteorológica INSIVUMEH	
Número de muestreo	Aurora 2 (día)		La Aurora (día)		INSIVUMEH (día)	
	Radiación solar (Watts/m ²)	Radiación solar máxima	Radiación solar (Watts/m ²)	Radiación solar máxima	Radiación solar (Watts/m ²)	Radiación solar máxima
1	249.58	1034.00	255.10	984.64	265.16	1039.72
2	198.63	1136.00	219.40	863.35	216.32	1123.46
3	286.63	1076.00	288.16	1063.83	286.10	1116.48
4	209.25	1020.00	205.38	1064.07	202.36	1060.66
5	251.56	1044.00	260.03	977.45	258.19	1074.61

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Análisis de correlación de Pearson en un sistema continuo**

Sistema continuo						
Análisis	Fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica)		Fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica)		Fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica)	
	Correlación de Pearson	Significancia	Correlación de Pearson	Significancia	Correlación de Pearson	Significancia
Radiación solar	0.803	0.406	0.128	0.918	-0.499	0.667
pH	-0.260	0.832	0.577	0.609	0.911	0.271
Temperatura	-0.971	0.153	-0.763	0.448	-0.264	0.830
Oxígeno disuelto	-0.260	0.832	0.273	0.824	0.830	0.377

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Análisis de correlación de Pearson en un sistema tipo batch**

Sistema tipo batch						
Análisis	Fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica)		Fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica)		Fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica)	
	Correlación de Pearson	Significancia	Correlación de Pearson	Significancia	Correlación de Pearson	Significancia
Radiación solar	-0.162	0.795	-0.442	0.456	0.918	0.028
pH	0.173	0.781	-0.381	0.527	-0.323	0.596
Temperatura	-0.720	0.170	-0.593	0.292	0.538	0.350
Oxígeno disuelto	0.380	0.528	0.340	0.575	0.065	0.918

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Análisis de correlación de Pearson entre DBO₅ y DBO₅ filtrada**

Correlaciones				
Análisis	Porcentaje de remoción de DBO ₅ (flujo continuo)		Porcentaje de remoción de DBO ₅ (flujo tipo batch)	
	Correlación de Pearson	Significancia	Correlación de Pearson	Significancia
Porcentaje de remoción de DBO ₅ filtrada (flujo continuo)	-0.218	0.860	-	-
Porcentaje de remoción de DBO ₅ filtrada (flujo tipo batch)	-	-	-0.809	0.400

Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

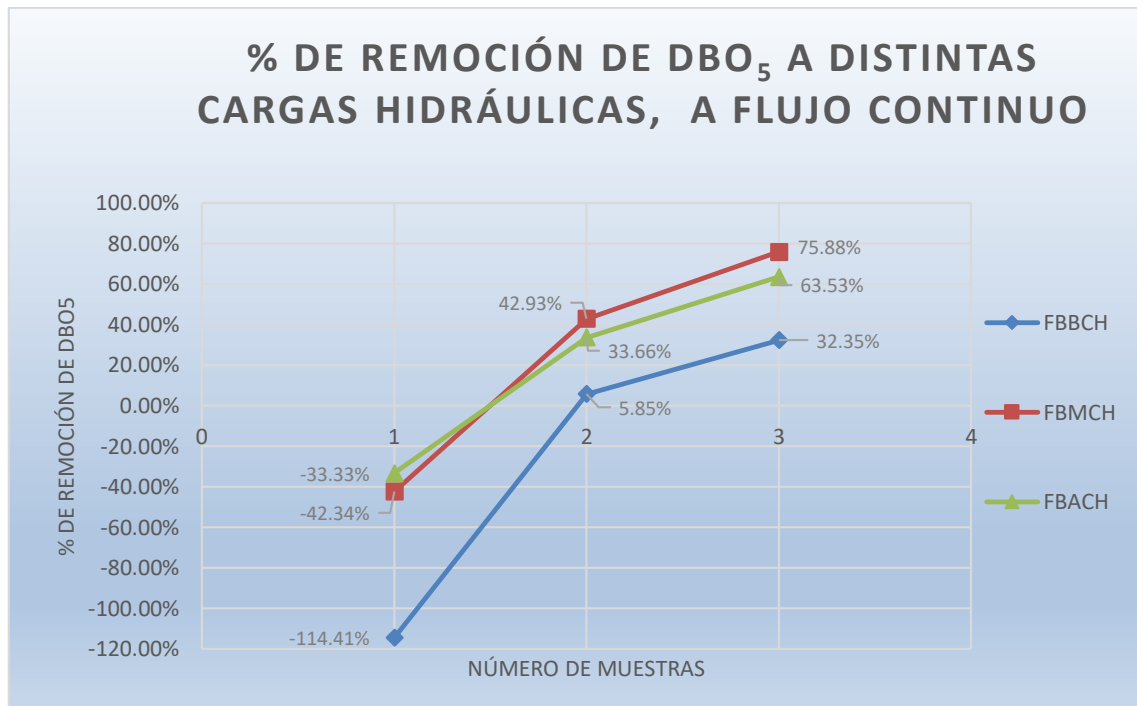
4.1. Determinación del porcentaje de remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos y coliformes fecales, a distintas cargas hidráulicas

4.1.1. Porcentaje de remoción de materia orgánica a distintas cargas hidráulicas en los fotobiorreactores

Como pudo apreciarse en la figura 12, la muestra número 1, se obtuvo en los tres fotobiorreactores que trabajaron a flujo continuo, no se presentó remoción, dado que el valor inicial de DBO_5 fue de 22.20 mg/l, en el fotobiorreactor de baja carga hidráulica (FBBCH), el valor final fue 47.60 mg/l, habiendo un aumento de 114.41 %, en el fotobiorreactor de mediana carga hidráulica (FBMCH) el valor de salida fue 31.60 mg/l, aumentando un 42.34 % y el fotobiorreactor de alta carga hidráulica (FBACH) presentó un 29.60 mg/l de DBO_5 en la salida, incrementando un 33.33 %.

En la muestra número 2 y 3 los valores fueron menores al valor inicial, obteniéndose una eficiencia en los fotobiorreactores, mostrando mejor remoción de DBO_5 en el FBMCH, el cual removió 42.93 % (entrada 41.00 mg/l, salida 23.40 mg/l) y 75.88 % (entrada 34.00 mg/l, salida 8.20 mg/l), seguida por el FBACH presentando una remoción de 33.66 % (entrada 41.00 mg/l, salida 27.20 mg/l) y 63.53 % (entrada 34.00 mg/l, salida 12.40 mg/l), por último el FBBCH removiendo un 5.85 % (entrada 41.00 mg/l, salida 38.60 mg/l) y 32.35 % (entrada 34.00 mg/l, salida 23.00 mg/l).

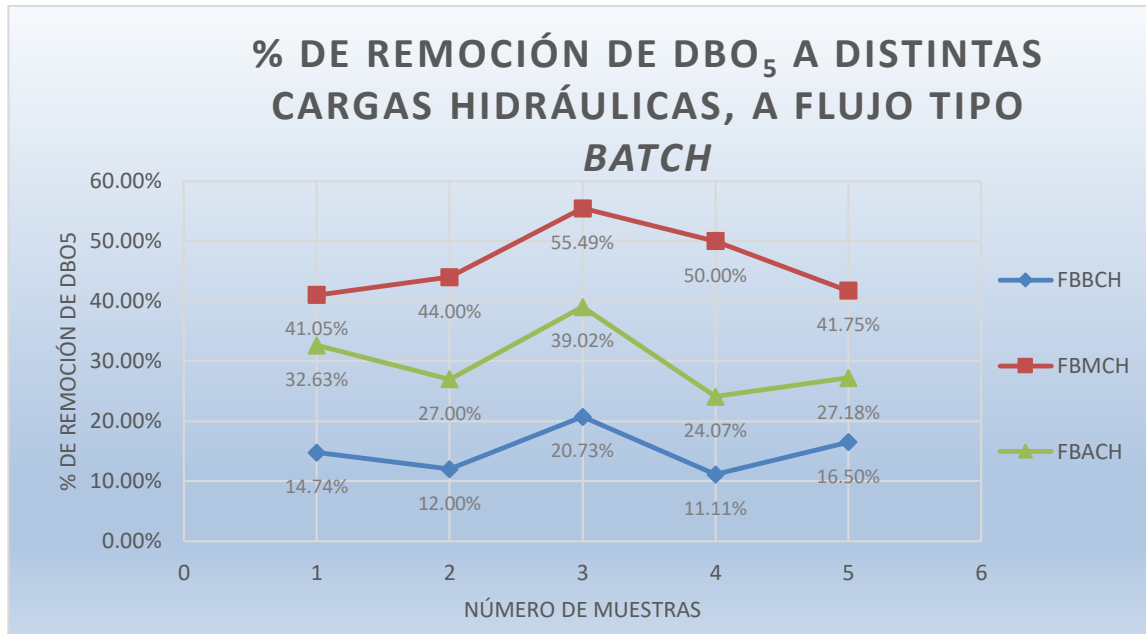
Figura 12. **Porcentaje de remoción de DBO₅ a distintas cargas hidráulicas, en un sistema de flujo continuo**



Fuente: elaboración propia.

La figura número 13 muestra el comportamiento del porcentaje de remoción de las muestras tomadas del sistema de fotobiorreactores que trabajó a flujo tipo *batch*, mostrando una mayor remoción en el FBMCH, siendo estos: muestra uno 41.05 %, muestra dos 44.00 %, muestra tres 55.49 %, muestra cuatro 50.00 %, muestra cinco 41.75 %. Seguida del FBACH, dando como resultado: muestra uno 32.63 %, muestra dos 27.00 %, muestra tres 39.02 %, muestra cuatro 24.07 %, muestra cinco 27.18 %. Y el FBBCH fue el que presentó el menor porcentaje de remoción de DBO₅, siendo estos: muestra uno 14.74 %, muestra dos 12.00 %, muestra tres 20.73 %, muestra cuatro 11.11 %, muestra cinco 16.50 %.

Figura 13. **Porcentaje de remoción de DBO₅ a distintas cargas hidráulicas, en un sistema de flujo tipo *batch***



Fuente: elaboración propia.

De los análisis realizados, se determinó que el fotobiorreactor de mediana carga hidráulica (FBMCH) fue el que presentó mejores porcentajes de remoción de DBO₅, trabajando tanto a flujo continuo como a flujo *batch*, siendo estos los porcentajes de remoción a flujo continuo: 42.93 % y 75.88 % y los porcentajes de remoción a flujo *batch*: 41.05 %, 44.00 %, 55.49 %, 50.00 % y 41.75 %.

4.1.2. **Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos a distintas cargas hidráulicas en los fotobiorreactores**

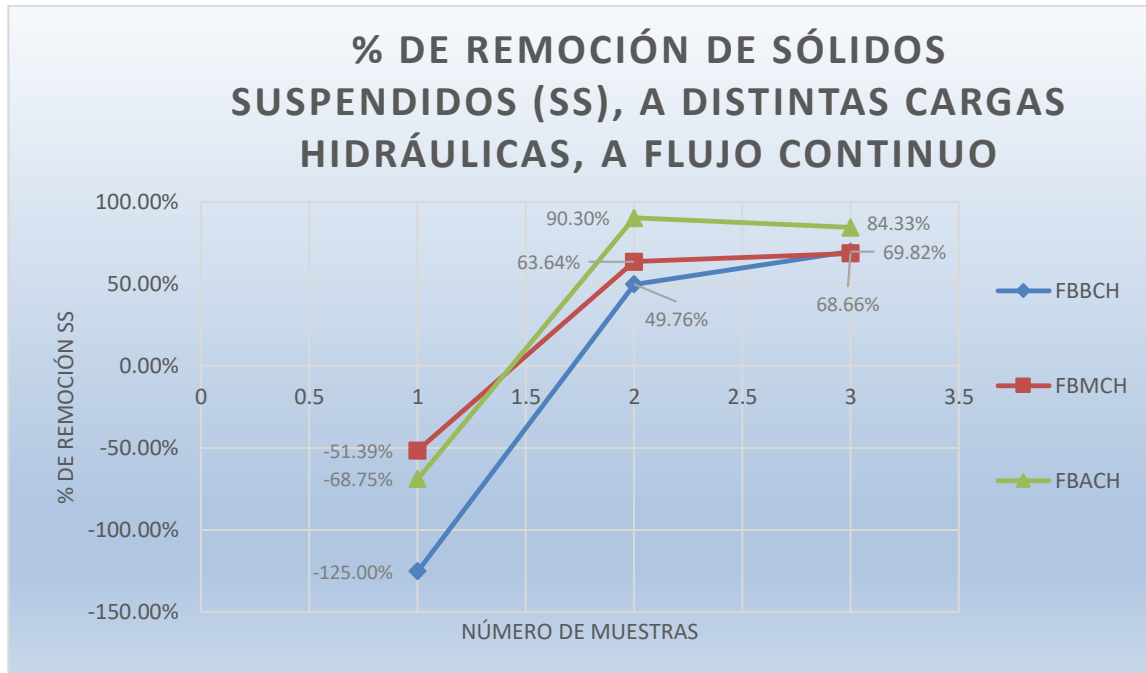
En la figura 14, se pudo observar que el porcentaje de remoción de sólidos suspendidos en los tres fotobiorreactores que trabajaron a flujo continuo no presentaron remoción en la muestra 1, dado que el valor inicial de sólidos suspendidos fue de 10.00 mg/l, en el fotobiorreactor de baja carga hidráulica (FBBCH) el valor final fue 22.50 mg/l, habiendo un aumento de 125.00 %, en el

fotobiorreactor de mediana carga hidráulica (FBMCH) el valor de salida fue 15.14mg/l, aumentando un 51.39 % y el fotobiorreactor de alta carga hidráulica (FBACH) presentó un 16.88 mg/l de sólidos suspendidos en la salida, incrementando un 68.75%.

En la muestra 2, los valores fueron menores al valor inicial, obteniendo una eficiencia en los fotobiorreactores, mostrando mejor porcentaje de remoción de sólidos suspendidos en el FBACH, el cual removió 90.30 % (entrada 22.00 mg/l, salida 2.13 mg/l), seguida por el FBMCH presentando una remoción de 63.64 % (entrada 22.00 mg/l, salida 8.00 mg/l), por último, el FBBCH removiendo un 49.76 %. (entrada 22.00 mg/l, salida 11.05 mg/l).

En la muestra 3, se observó que el FBACH siguió siendo el que tuvo mejor eficiencia con un 84.33 % (entrada 19.14mg/l, salida 3.00 mg/l), pero en el FBBCH y en el FBMCH, el porcentaje de remoción de sólidos suspendidos fue muy similar siendo estos: 69.82% (entrada 19.14 mg/l, salida 5.78 mg/l) y 68.66% (entrada 19.14 mg/l, salida 6.00 mg/l) respectivamente.

Figura 14. **Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos a distintas cargas hidráulicas, en un sistema de flujo continuo**



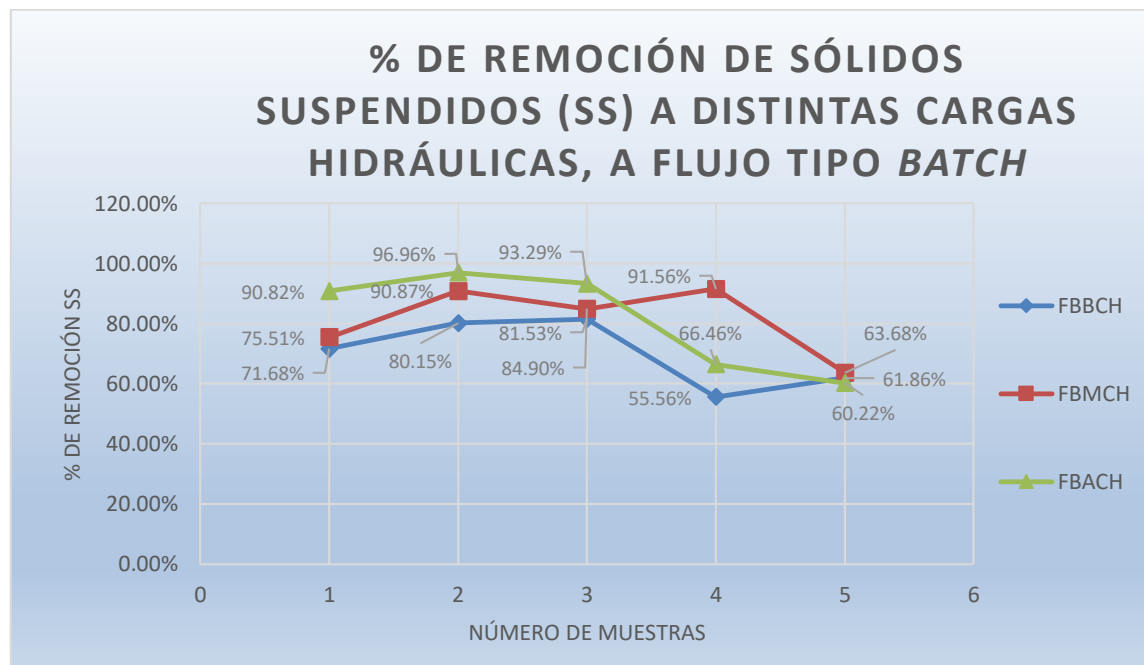
Fuente: elaboración propia.

La figura número 15 muestra el comportamiento del porcentaje de remoción de las muestras tomadas del sistema de fotobiorreactores que trabajo a flujo tipo *batch*, mostrando una mayor remoción en el FBACH de la muestra 1 a la 3, siendo estos: muestra uno 90.82 %, muestra dos 96.96 %, muestra tres 93.29 %, seguido del FBMCH, dando como resultado: muestra uno 75.51 %, muestra dos 90.87 %, muestra tres 84.90 %, Y el FBBCH fue el que presentó el menor porcentaje de remoción de sólidos suspendidos, siendo estos: muestra uno 71.68 %, muestra dos 80.15 %, muestra tres 81.53 %.

En la muestra cuatro, el FBMCH presentó el mayor porcentaje de remoción de sólidos suspendidos obteniendo un 91.56 %, en el FBACH disminuyó el porcentaje de remoción de sólidos suspendidos a un 66.46 %, y el FBBCH obtuvo un 55.56 % de porcentaje remoción siendo esta la más baja.

En la muestra 5 los porcentajes de remoción de sólidos suspendidos en los FBBCH, FBMCH y FBACH fueron muy parecidos, los cuales fueron del 61.86 %, 63.68 % y 60.22 % respectivamente.

Figura 15. **Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos a distintas cargas hidráulicas, en un sistema de flujo tipo *batch***



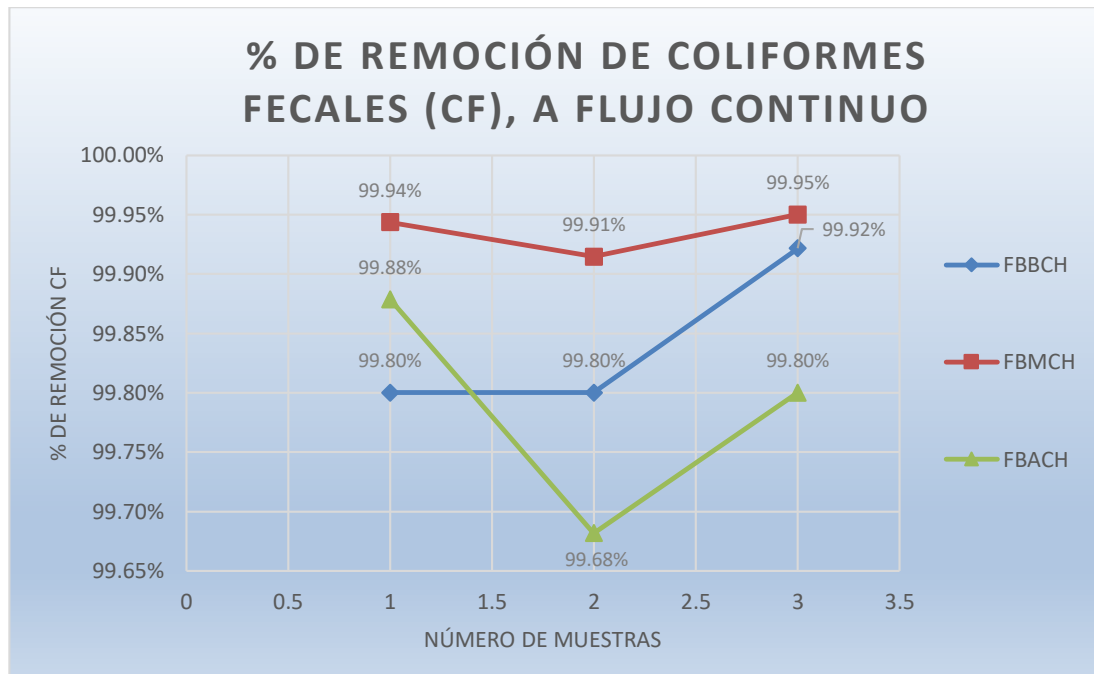
Fuente: elaboración propia.

Se pudo determinar en los análisis de sólidos suspendidos realizados que el porcentaje de remoción en los tres fotobiorreactores que trabajaron a flujo continuo el que presentó mejor eficiencia fue el FBACH, obteniendo una remoción de 90.30 % y 84.33 %, y el fotobiorreactor que presentó la mejor remoción trabajando a flujo tipo *batch* de la muestra uno a la tres fue el FBACH siendo del 90.82 % en la muestra uno, 96.96% en la muestra dos y 93.29 % en la muestra tres, luego se observó que el FBMCH obtuvo la mayor remoción en la muestra cuatro y cinco siendo estas de 91.56 % y 63.68 % respectivamente.

4.1.3. Porcentaje de remoción de coliformes fecales a distintas cargas hidráulicas en los fotobiorreactores

La figura número 16 muestra el comportamiento del porcentaje de remoción de coliformes fecales de las muestras tomadas del sistema de fotobiorreactores que trabajo a flujo continuo, los resultados obtenidos de remoción de coliformes fecales en cada una de las muestras del FBBCH fueron: muestra uno y dos 99.80 %, muestra tres 99.92 %. En las muestras del FBMCH los porcentajes de remoción fueron: muestra uno 99.94 %, muestra dos 99.91 % y muestra tres 99.95 %. En el FBACH de la muestra uno a la tres se obtuvieron los porcentajes de remoción de 99.88 %, 99.68 % y 99.80 % respectivamente.

Figura 16. **Porcentaje de remoción de coliformes fecales a distintas cargas hidráulicas, en un sistema de flujo continuo**

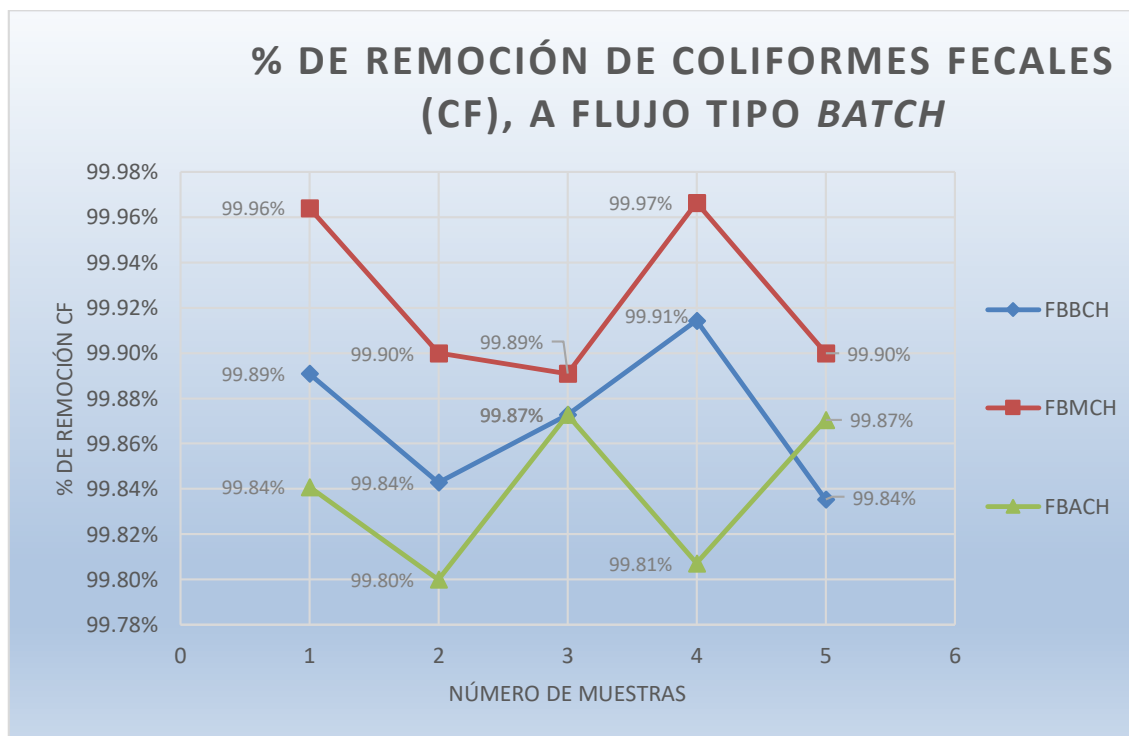


Fuente: elaboración propia.

Como se pudo observar en la figura número 17 cuando los fotobiorreactores trabajaron a flujo tipo *batch* presentaron remoción de coliformes fecales.

Los porcentajes de remoción de coliformes fecales en el FBBCH fueron: 99.89 %, 99.84 %, 99.87 %, 99.91 % y 99.84 %. En el FBMCH la eficiencia de remoción fue: 99.96 %, 99.90 %, 99.89 %, 99.97 % y 99.90 %. Y en el FBACH los porcentajes de remoción fueron: 99.84 %, 99.80 %, 99.87 %, 99.81 % y 99.87 %.

Figura 17. **Porcentaje de remoción de coliformes fecales a distintas cargas hidráulicas, en un sistema de flujo tipo *batch***



Fuente: elaboración propia.

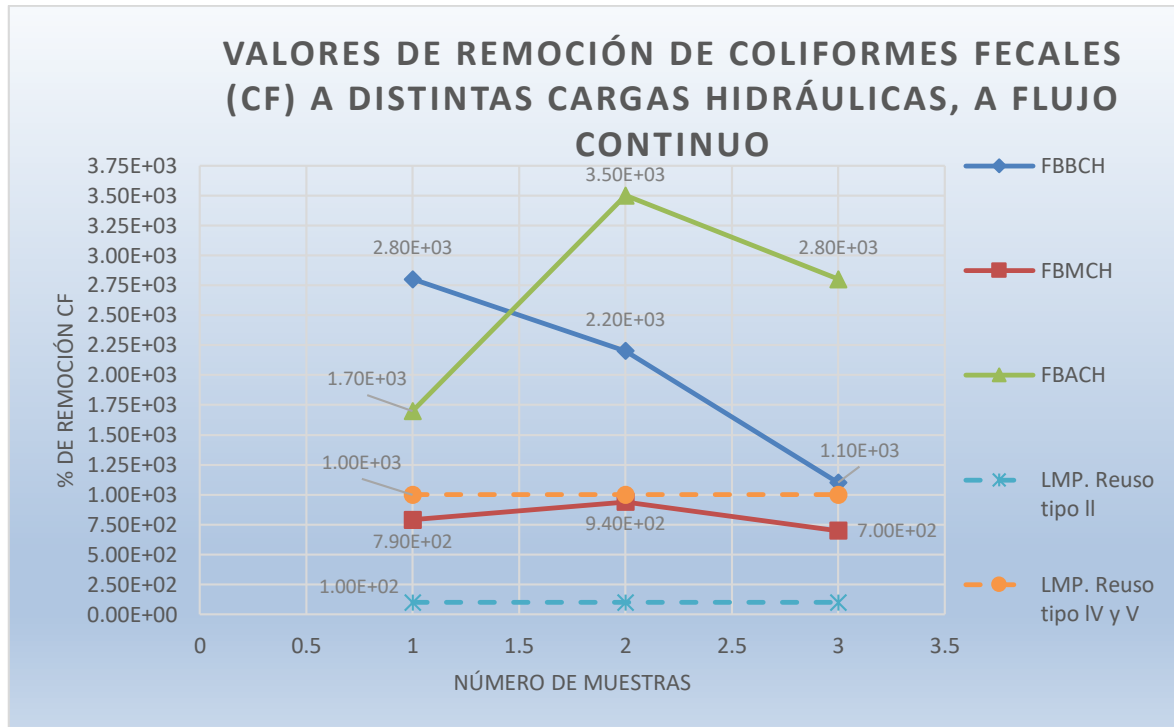
Cuando se trabajó a flujo continuo y flujo tipo *batch* el fotobiorreactor que presentó los valores más altos de porcentaje de remoción de coliformes fecales fue el FBMCH. Con porcentajes de remoción a flujo continuo de: 99.94 %, 99.91

% y 99.95 %, y los porcentajes de remoción a flujo tipo *batch* de: 99.96 %, 99.90 %, 99.89 %, 99.97 % y 99.90 %.

4.1.4. Valores de coliformes fecales en el efluente de los fotobiorreactores a distintas cargas hidráulicas

De acuerdo a lo que establece la Normativa 236-2006, para el reúso de aguas tratadas los límites máximos permisibles (LMP), para el reúso tipo IV y V (reúso para pastos y otros cultivos, reúso recreativo) es de 1×10^3 NMP/100cm³, basándonos en la figura número 18, se pudo observar que el fotobiorreactor que cumple con esta normativa es el FBMCH, debido a que el valor promedio de coliformes fecales en el efluente es de: 8.1×10^2 NMP/100cm³. Y en el FBBCH y FBACH no cumplieron con la normativa antes mencionada, ya que los valores promedio presentes de coliformes fecales en el efluente están por encima del LMP, siendo estos: 2.03×10^3 NMP/100cm³ y 6.67×10^3 NMP/100cm³.

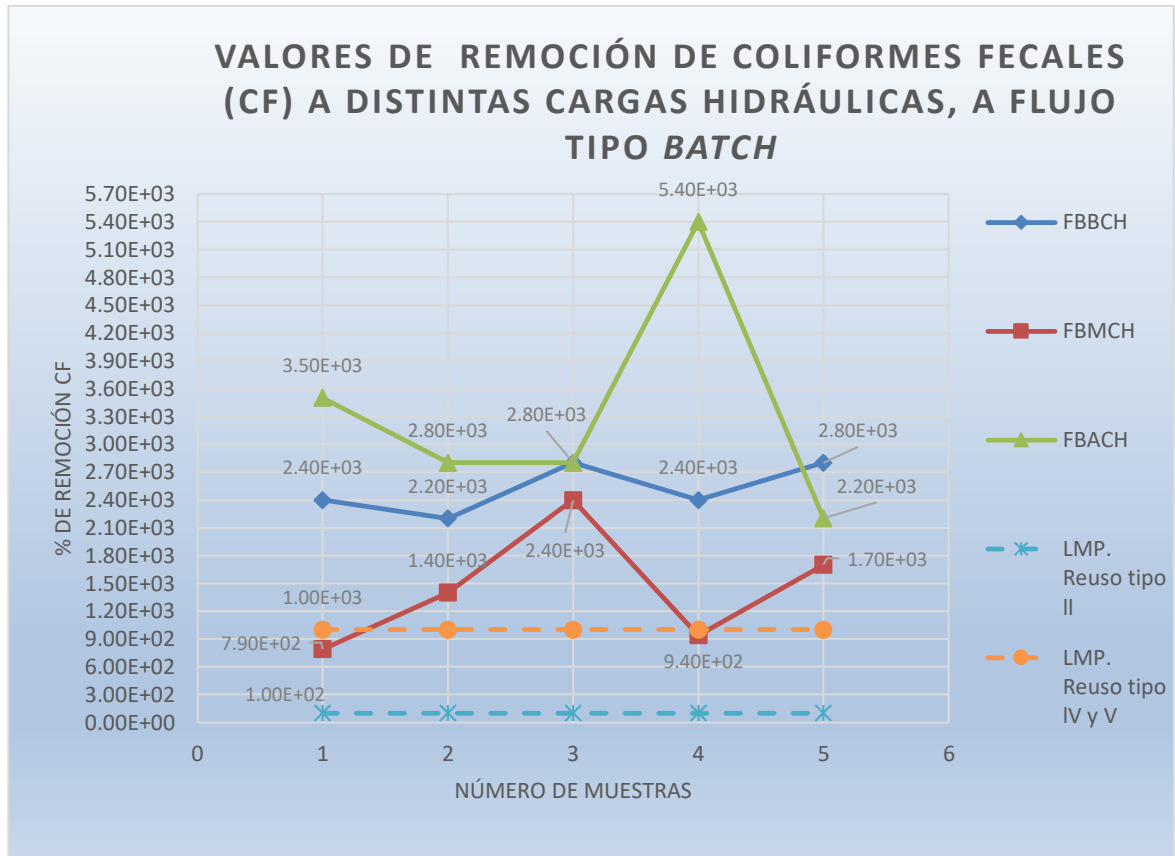
Figura 18. Valores de remoción de coliformes fecales (CF) a distintas cargas hidráulicas, en un sistema continuo



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la figura 19, los valores presentes de coliformes fecales en el efluentes de los fotobiorreactores que trabajaron a flujo tipo *batch*, no permitieron que los valores de coliformes fecales se mantengan dentro de que establece la Normativa 236-2006 para el reúso, arrojando los valores promedio de coliformes fecales del FBBCH de: 2.52×10^3 NMP/100cm³, en el FBMCH el valor promedio de coliformes fecales presente en el efluente fue de 1.45×10^3 NMP/100cm³ y en el FBACH el valor promedio de coliformes fecales fue de 3.34×10^3 NMP/100cm³.

Figura 19. Valores de remoción de coliformes fecales (CF) a distintas cargas hidráulicas, en un sistema tipo *batch*



Fuente: elaboración propia.

De los análisis realizados se determinó que los tres fotobiorreactores que trabajaron a flujo continuo y flujo tipo *batch* cumplen con el límite máximo permisible de coliformes fecales para las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores (LMP 1×10^4 NMP/100cm³) del Acuerdo Gubernativo 236-2006, ya que los valores promedio de coliformes fecales en el efluente de los fotobiorreactores cuando trabajaron a flujo continuo fueron de: FBBCH 2.03×10^3 NMP/100cm³, FBMCH 8.1×10^2 NMP/100cm³ y FBACH 6.67×10^3 NMP/100cm³. Y cuando trabajaron a flujo tipo *batch* los valores de coliformes fecales fueron de: FBBCH 2.52×10^3 NMP/100cm³, FBMCH 1.45×10^3 NMP/100cm³ y FBACH 3.34×10^3 NMP/100cm³. El FBMCH que trabajo a flujo continuo presentó un valor

promedio de 8.1×10^2 NMP/100cm³ de coliformes fecales, siendo este el único que cumple con el límite máximo permisible del Acuerdo Gubernativo 236-2006, para el reúso tipo IV y V de aguas residuales (reúso para pastos y otros cultivos, reúso recreativo) el cual es de 1×10^3 NMP/100cm³.

4.2. Efecto que ejerce la variación de carga hidráulica, sobre la eficiencia de la carga de remoción, de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), sólidos suspendidos (SS) y coliformes fecales (CF)

A los porcentajes de remoción de DBO₅, sólidos suspendidos y coliformes fecales obtenidos en el trabajo experimental se les realizó una prueba de normalidad Shapiro-wilk (ver anexo pág. 111) con el programa SPSS, para observar si los datos cumplían con una distribución normal (distribución normal: cuando se tiene un valor de significancia mayor al 5 %), esta prueba fue realizada con el fin de saber si se utilizarían análisis estadísticos paramétricos (promedio o media) o no paramétricos (mediana).

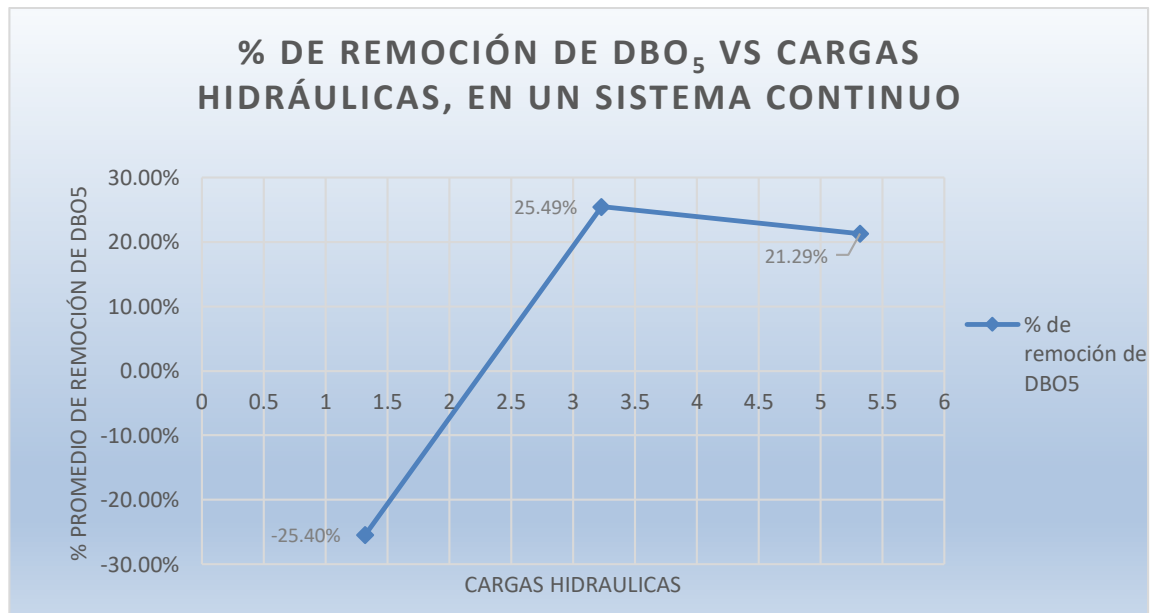
Los análisis estadísticos para determinar la media y la mediana se realizaron con el programa SPSS, las tablas de los resultados de dichos análisis se pueden observar en el anexo (pág.111).

4.2.1. Efecto que ejerce la variación de la carga hidráulica, sobre la eficiencia de la carga de remoción, de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

Se pudo observar en la gráfica número 20 que, cuando los fotobiorreactores trabajaron a flujo continuo, no mostraron relación, causa y efecto entre la DBO₅ y la carga hidráulica, dado que, cuando se varió la carga hidráulica no existió

ninguna relación directa con la remoción de DBO₅, debido a que al trabajar el fotobiorreactor a una baja carga hidráulica de 1.32 m³/m²*día no se presentó remoción, al trabajar a una mediana carga hidráulica de 3.23 m³/m²*día la remoción de DBO₅ fue de 25.49 % y el fotobiorreactor que trabajo con una alta carga hidráulica de 5.32 m³/m²*día la remoción de DBO₅ que se obtuvo fue de 21.29 %.

Figura 20. **Porcentaje promedio de remoción de DBO₅ vs carga hidráulica en un sistema continuo**

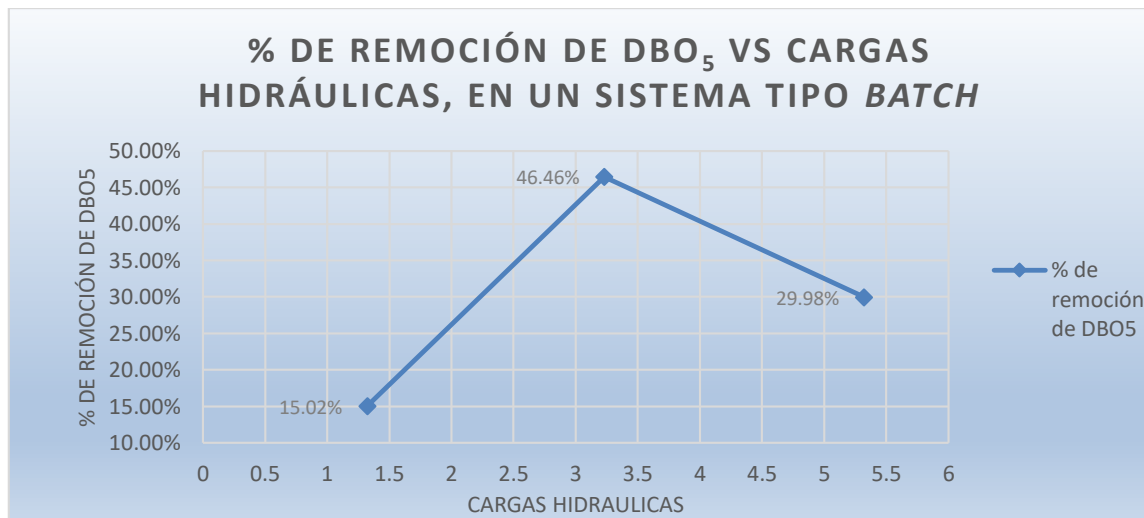


Fuente: elaboración propia.

En la figura número 21, no se observó ninguna relación causa y efecto entre la remoción de DBO₅ y la carga hidráulica cuando los fotobiorreactores funcionaron a flujo *batch*, debido a que, cuando se cambió la carga hidráulica no existió ninguna relación directa con la remoción de DBO₅, dado que, cuando el fotobiorreactor trabajo a una baja carga hidráulica de 1.32 m³/m²*día se obtuvo una remoción de DBO₅ de 15.02 %, cuando trabajo a una mediana carga hidráulica de 3.23 m³/m²*día la remoción de DBO₅ fue de 46.46 % y con el

fotobiorreactor que trabajo a una alta carga hidráulica de 5.32 m³/m²*día la remoción de DBO₅ fue de 29.98 %.

Figura 21. **Porcentaje promedio de remoción de DBO₅ vs carga hidráulica en un sistema tipo *batch***



Fuente: elaboración propia.

La DBO₅ no se vio afectada cuando el sistema trabajo a flujo continuo o flujo *batch*, dado que el fotobiorreactor que obtuvo la mayor eficiencia es el FBMCH, el FBMCH que funciono a una carga de 3.23 m³/m²*día es la carga óptima para que el fotobiorreactor trabaje adecuadamente, ya que cuando trabajo a una carga de 5.32 m³/m²*día (FBACH), comenzó a disminuir la eficiencia, debido a que la carga hidráulica era muy alta por lo que disminuyo el tiempo de retención hidráulica. Lo que provocó que el agua residual proveniente de los filtros percoladores no tuvieran el tiempo necesario para realizar la autodepuración dentro de los fotobiorreactores.

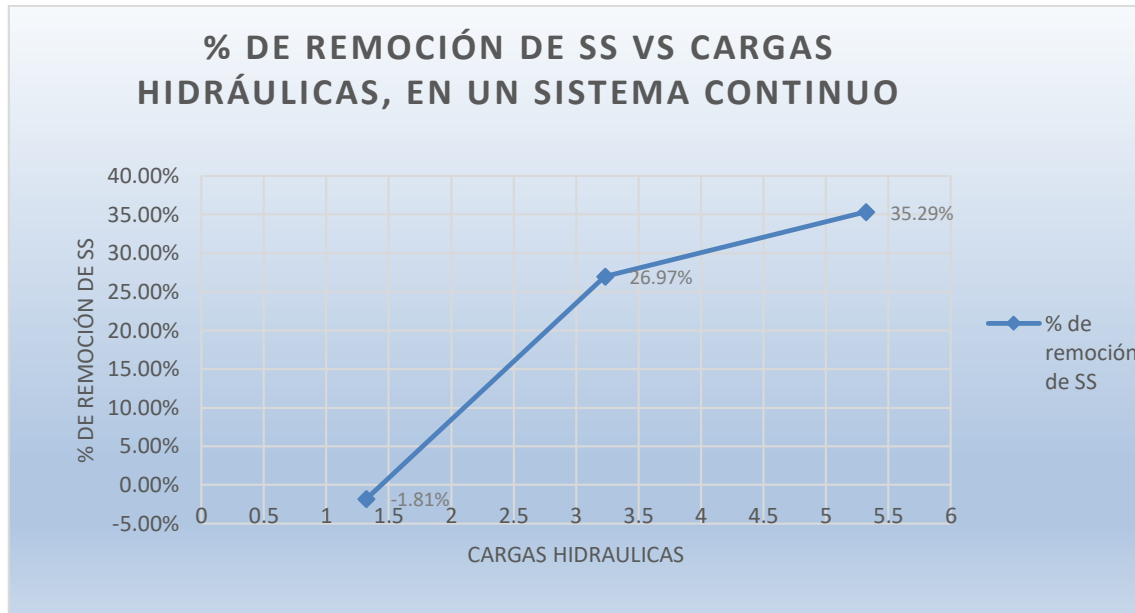
Cuando se trabajó a una carga hidráulica de 1.32 m³/m²*día (FBBCH), se observó una alta presencia de algas en el fotobiorreactor, lo cual se pudo determinar por la alta coloración que presentó. Las algas presentes en las

muestras afectaron los resultados de porcentaje de remoción de DBO_5 . Dado que las algas al momento de realizar el proceso de fotosíntesis producen O_2 .

4.2.2. Efecto que ejerce la variación de la carga hidráulica, sobre la eficiencia de la carga de remoción, de los sólidos suspendidos (SS)

En la figura número 22, se pudo observar que cuando los fotobiorreactores trabajaron a flujo continuo existió una relación entre remoción de sólidos suspendidos y carga hidráulica, dado que el fotobiorreactor que trabajó con una carga hidráulica de $1.32 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$ (FBBCH) no mostro remoción de sólidos suspendidos, el fotobiorreactor que trabajó con una carga hidráulica de $3.23 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$ (FBMCH) presentó un porcentaje de remoción de 26.97% y el fotobiorreactor que trabajo a una carga hidráulica de $5.32 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$ (FBACH) presentó una mayor remoción de sólidos suspendidos siendo esta de 35.29% . Entonces se puede decir que a mayor carga hidráulica mayor remoción de sólidos suspendidos.

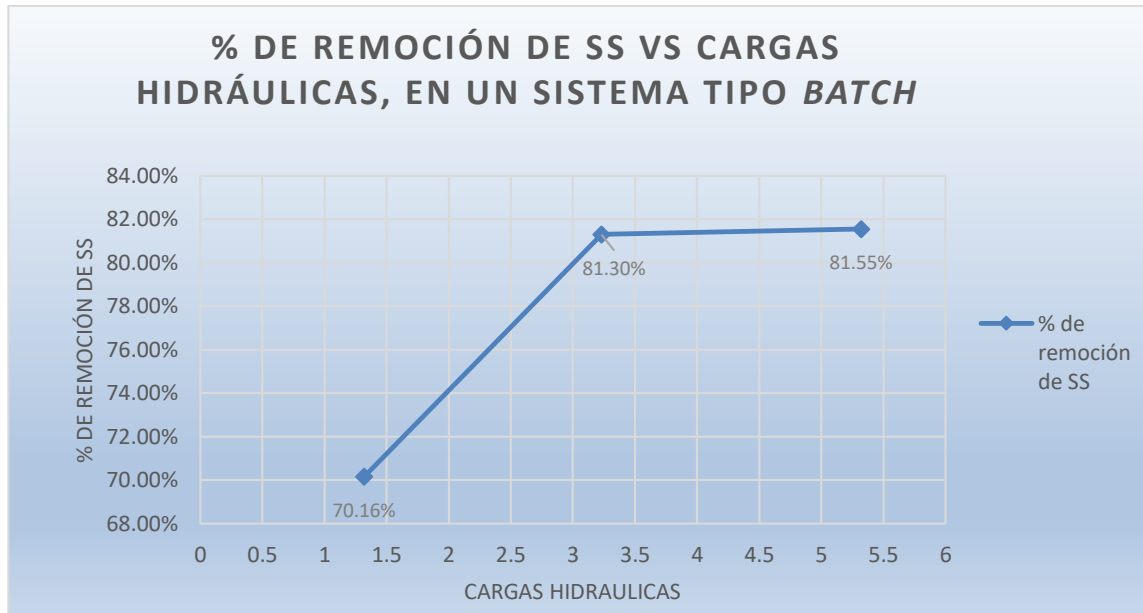
Figura 22. **Porcentaje promedio de remoción de sólidos suspendidos vs carga hidráulica en un sistema continuo**



Fuente: elaboración propia.

Se pudo observar en la figura número 23, la carga hidráulica no ejerce relación, causa-efecto en el porcentaje de remoción de sólidos suspendidos cuando los fotobiorreactores trabajaron a flujo tipo *batch*, dado que el FBBCH presentó una remoción de 70.16 % y en el FBMCH y FBACH los porcentajes promedio de remoción de sólidos suspendidos no mostraron diferencia entre sí, siendo estos de: 81.30 % y 81.55 %.

Figura 23. **Porcentaje promedio de remoción de sólidos suspendidos vs carga hidráulica en un sistema tipo *batch***



Fuente: elaboración propia.

La presencia de sólidos suspendidos en el afluente de los fotobiorreactores es causada por la ubicación del sistema, dado que se encuentra entre los filtros percoladores y el sedimentador secundario causando que los sólidos suspendidos retenidos en los filtros de análisis sean restos de piedra volcánica y desprendimiento de la biopelícula.

La presencia de sólidos suspendidos en el efluente de los fotobiorreactores es causada por la biomasa, esto se pudo percibir dado que los filtros que se utilizaron para realizar los análisis presentaron una coloración verdosa.

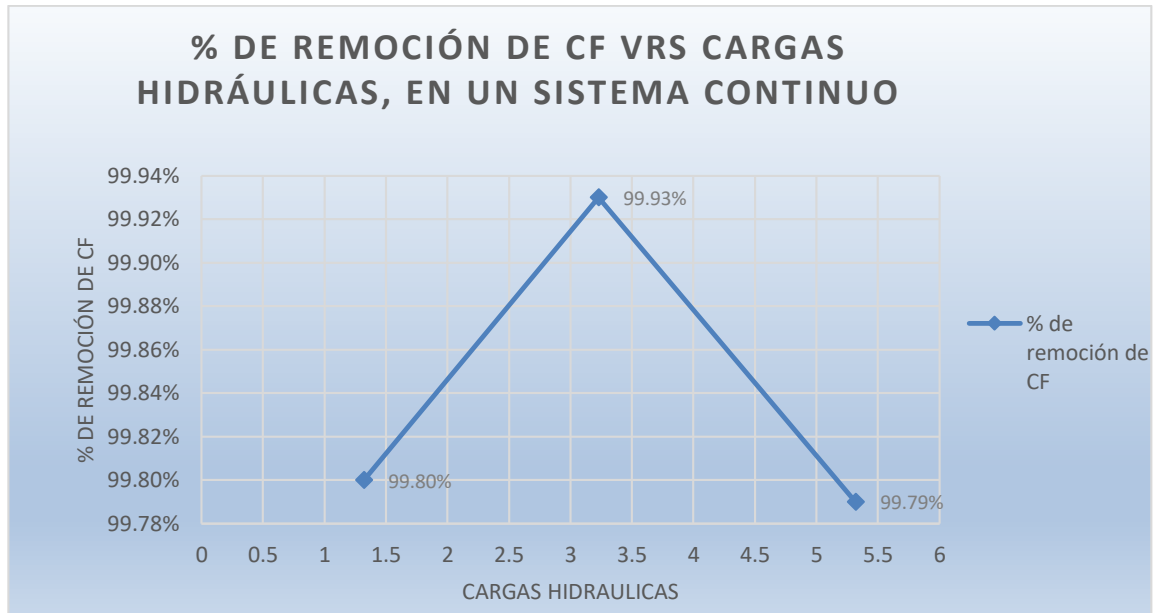
Por la coloración que se percibió en los fotobiorreactores cuando trabajaron a flujo continuo y flujo *batch*, el FBBCH fue el que presentó un tono más verdoso por tener mayor presencia de algas, debido a esto presentó menor

remoción de sólidos suspendidos. El FBACH presentó un tono más claro, debido a menor presencia de algas, por lo que se obtuvo una mayor remoción.

4.2.3. Efecto que ejerce la variación de la carga hidráulica, sobre la eficiencia de la carga de remoción, de los coliformes fecales

En la figura número 24, se observó que cuando los fotobiorreactores trabajaron a flujo continuo no existe una relación, causa-efecto entre remoción de coliformes fecales y la carga hidráulica, dado que, cuando se varió la carga hidráulica no existió ninguna relación directa con la remoción de coliformes fecales, debido a que, cuando el fotobiorreactor trabajo a una baja carga hidráulica (FBBCH) de $1.32 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$ se presentó una remoción de 3 logaritmos (1.3×10^6 a 2.03×10^3 NMP/100 ml) representando un 99.84 %, al trabajar a una mediana carga hidráulica (FBMCH) de $3.23 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$ la remoción de coliformes fecales fue de 4 logaritmos (1.3×10^6 a 8.10×10^2 NMP/100 ml) siendo un 99.93 % de remoción y el fotobiorreactor que trabajo con una alta carga hidráulica (FBACH) de $5.32 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$ presentó una remoción de coliformes fecales de 3 logaritmos (1.3×10^6 a 2.67×10^3 NMP/100 ml) representando un 99.79 % de eficiencia.

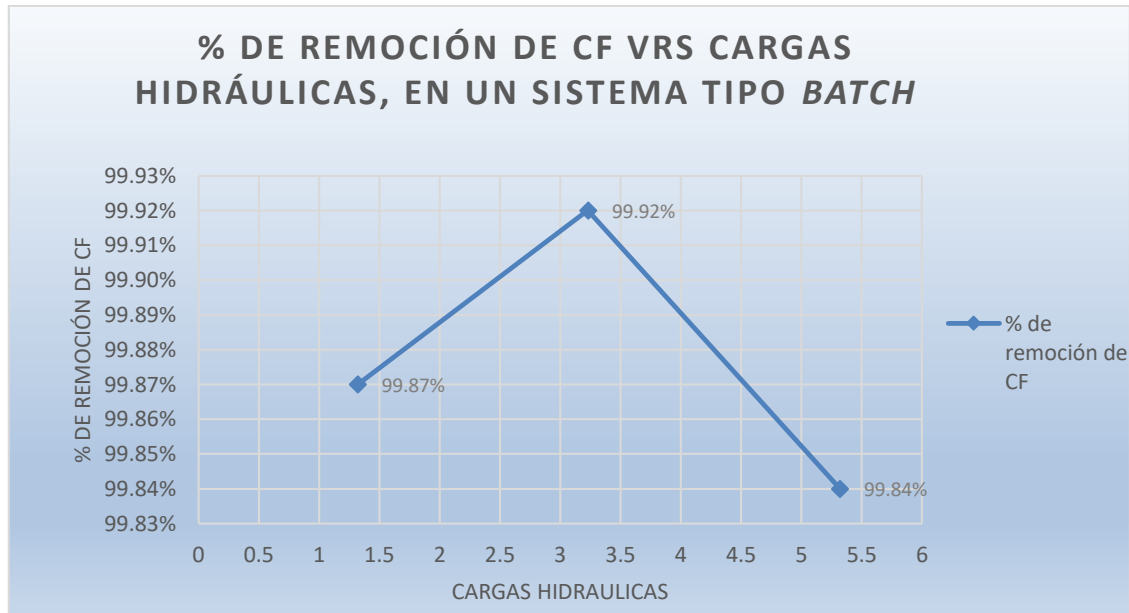
Figura 24. **Porcentaje promedio de remoción de coliformes fecales vs carga hidráulica en un sistema continuo**



Fuente: elaboración propia.

En la figura número 25, no se observó ninguna relación, causa-efecto entre remoción de coliformes fecales y la carga hidráulica cuando los fotobiorreactores funcionaron a flujo *batch*, debido a que, cuando se modificó la carga hidráulica no existió ninguna relación directa con la remoción de coliformes fecales, ya que, cuando el fotobiorreactor trabajó a una baja carga hidráulica de $1.32 m^3/m^2 \cdot día$ se presentó una disminución de 3 logaritmos de coliformes fecales (2.06×10^6 a 2.52×10^3 NMP/100 ml) lo que indica una eficiencia del 99.87 %, cuando trabajó a una mediana carga hidráulica de $3.23 m^3/m^2 \cdot día$ se presentó una disminución de 3 logaritmos de coliformes fecales (2.06×10^6 a 1.45×10^3 NMP/100 ml) lo que representa un 99.92 % de eficiencia y cuando el fotobiorreactor trabajó a una alta carga hidráulica de $5.32 m^3/m^2 \cdot día$ se logró una remoción de 3 logaritmos (2.06×10^6 a 3.34×10^3 NMP/100 ml) lo que representa un 99.84 % de eficiencia.

Figura 25. **Porcentaje promedio de remoción de coliformes fecales vs carga hidráulica en un sistema tipo batch**



Fuente: elaboración propia.

De los análisis realizados, se determinó que no existe una relación, causa-efecto entre la carga hidráulica y la remoción de coliformes fecales, debido a que el fotobiorreactor que presentó mejor remoción trabajando a flujo continuo y flujo tipo *batch* fue el FBMCH con porcentajes promedio de remoción de coliformes fecales de: 99.93% a flujo continuo y 99.92% a flujo tipo *batch*.

Como indica Moreno (2008), que:

Existen diversos factores característicos de los sistemas de desinfección mediante la utilización de microalgas, que intervienen en el decaimiento de las poblaciones de microorganismos patógenos (pág. 27). Siendo estos la radiación solar, oxígeno disuelto, pH, DBO y nutrientes, concentración de algas, temperatura del agua, predación y sedimentación.

4.3. Correlación que existe entre la remoción de coliformes fecales con la radiación solar, pH, temperatura y oxígeno disuelto

4.3.1. Correlación que existe entre la remoción de coliformes fecales con la radiación solar

Según la tabla XXIV, se presentó el análisis de correlación de los datos del porcentaje de remoción de coliformes fecales respecto a los datos de radiación solar, el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la radiación solar en un FBBCH a flujo continuo es de 0.803, dado que el coeficiente de correlación esta entre el rango de 0.8 y 1, arrojando una correlación muy buena.

El nivel de significancia que se presentó en la tabla antes mencionada es de 0.406, es mayor al 0.05, por lo que no existe una relación significativa entre las dos variables, aunque la correlación de Pearson, indica que existe una muy buena correlación, la probabilidad de equivocarnos es muy alta, por lo que indica que no existe una correlación significativa.

Tabla XXIV. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la radiación solar en un FBBCH, a un flujo continuo**

Correlaciones			
		% Remoción de CF, en FBBCH a flujo continuo	Radiación Solar, en FBBCH a flujo continuo
% Remoción de CF, en FBBCH a flujo continuo	Correlación de Pearson	1	.803
	Sig. (bilateral)		.406
	N	3	3
Radiación Solar, en FBBCH a flujo continuo	Correlación de Pearson	.803	1
	Sig. (bilateral)	.406	
	N	3	3

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXV, se pudo observar el análisis de correlación de Pearson, en los datos del porcentaje de remoción de coliformes fecales y radiación solar en un FBMCH a flujo continuo.

El coeficiente de correlación de Pearson es de 0.128, por lo que está entre el rango de 0.7 y 0.2, dado que arroja una relación mínima con un valor de significancia de 0.918, que es un valor mayor a 0.05 por lo que no existe una asociación significativa entre la remoción de coliformes fecales y la carga hidráulica.

Tabla XXV. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la radiación solar en un FBMCH, a un flujo continuo**

		Correlaciones	
		% Remoción de CF, en FBMCH a flujo continuo	Radiación Solar, en FBMCH a flujo continuo
% Remoción de CF, en FBMCH a flujo continuo	Correlación de Pearson	1	.128
	Sig. (bilateral)		.918
	N	3	3
Radiación Solar, en FBMCH a flujo continuo	Correlación de Pearson	.128	1
	Sig. (bilateral)	.918	
	N	3	3

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXVI, se pudo observar el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y radiación solar en un FBACH a flujo continuo, el cual es de -0.499, el valor esta entre el rango de -0.4 y -0.6, indicando que existe una correlación moderada. Sin embargo, el nivel de significancia es de 0.667 (66.7 %), es mayor al 0.05 (5 %), por lo tanto, no se puede señalar que existe una asociación estadísticamente significativa entre las variables.

Tabla XXVI. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la radiación solar en un FBACH, a un flujo continuo**

Correlaciones			
		% Remoción de CF, en FBACH a flujo continuo	Radiación Solar, en FBACH a flujo continuo
% Remoción de CF, en FBACH a flujo continuo	Correlación de Pearson	1	-.499
	Sig. (bilateral)		.667
	N	3	3
Radiación Solar, en FBACH a flujo continuo	Correlación de Pearson	-.499	1
	Sig. (bilateral)	.667	
	N	3	3

Fuente: elaboración propia.

Se pudo observar en la tabla XXVII, que el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y radiación solar en un FBACH a flujo tipo *batch*, es de -0.162, y un nivel de significancia de 0.795.

El coeficiente de correlación de Pearson, indica una correlación mínima y el nivel de significancia es mayor a 0.05, lo cual indica que no existe una correlación estadísticamente significativa.

Tabla XXVII. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la radiación solar en un FBBCH, a un flujo tipo *batch***

Correlaciones			
		% Remoción de CF, en FBBCH a flujo tipo <i>batch</i>	Radiación Solar, en FBBCH a flujo tipo <i>batch</i>
% Remoción de CF, en FBBCH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	1	-.162
	Sig. (bilateral)		.795
	N	5	5
Radiación Solar, en FBBCH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	-.162	1
	Sig. (bilateral)	.795	
	N	5	5

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXVIII, se puede observar que el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la radiación solar en un FBMCH a flujo tipo *batch* es de -0.442, arrojando una correlación moderada.

Sin embargo, el nivel de significancia es de 0.456 (45.6 %), siendo este mayor al 0.05 (5 %), por lo que no se puede señalar que existe una asociación significativa entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y radiación solar en un FBMCH a flujo tipo *batch*.

Tabla XXVIII. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la radiación solar en un FBMCH, a un flujo tipo *batch***

		Correlaciones	
		% Remoción de CF, en FBMCH a flujo tipo <i>batch</i>	Radiación Solar, en FBMCH a flujo tipo <i>batch</i>
% Remoción de CF, en FBMCH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	1	-.442
	Sig. (bilateral)		.456
	N	5	5
Radiación Solar, en FBMCH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	-.442	1
	Sig. (bilateral)	.456	
	N	5	5

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXIX, se puede apreciar que el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la radiación solar en un FBACH a flujo tipo *batch* es de 0.918, el valor se encuentra entre 0.8 y 1, lo que indica que entre estas dos variables existe una correlación muy buena.

La dirección de la correlación es positiva, por lo que se puede decir que la relación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y radiación solar en el FBACH a flujo *batch* es directamente proporcional dado que, al aumentar la radiación solar, aumenta el porcentaje de remoción de coliformes fecales o viceversa.

El nivel de significancia que se presentó en la tabla mencionada anteriormente, es de 0.028 (2.8 %), es menor que 0.05 (5 %), por lo que la significancia corrobora que hay asociación significativa entre el porcentaje de

remoción de coliformes fecales y radiación solar en un FBACH que trabajo a flujo tipo *batch*.

Tabla XXIX. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la radiación solar en un FBACH, a un flujo tipo *batch***

		Correlaciones	
		% Remoción de CF, en FBACH a flujo tipo <i>batch</i>	Radiación Solar, en FBACH a flujo tipo <i>batch</i>
% Remoción de CF, en FBACH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	1	.918*
	Sig. (bilateral)		.028
	N	5	5
Radiación Solar, en FBACH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	.918*	1
	Sig. (bilateral)	.028	
	N	5	5

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

Fuente: elaboración propia.

Se puede concluir que la radiación solar ejerció un efecto directo en la remoción de coliformes fecales en el fotobiorreactor de alta carga hidráulica (FBACH) cuando este trabajo a flujo tipo *batch*, presentando un coeficiente de correlación de Pearson de 0.918 y un nivel de significancia de 0.028.

En el FBACH que trabajo a flujo tipo *batch* se presentó una asociación significativa entre la remoción de coliformes fecales y la radiación solar, en este fotobiorreactor se pudo observar una menor coloración y turbiedad, lo cual provocó que la radiación solar funcionara como método de desinfección.

En los fotobiorreactores donde la radiación solar no ejerció ningún efecto en la remoción de coliformes fecales fue debido a que los rayos UV no penetraron

directamente al sistema, y al no penetrar directamente los rayos UV, no logró tener contacto con los microorganismos que se encontraban alejadas de las paredes del fotobiorreactor, lo que hace que no haya una mayor remoción de coliformes fecales basándonos en el color y la turbiedad que presentaron. Para mejorar esta condición en algún estudio futuro se puede disminuir el diámetro de los fotobiorreactores, ya que siempre va a existir coloración y turbiedad causada por la presencia de algas, por lo que al disminuir el diámetro del fotobiorreactor se puede mejorar el contacto de la radiación solar con los microorganismos.

4.3.2. Correlación que existe entre la remoción de coliformes fecales con el pH

En la tabla XXX, se puede observar que, el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el pH en un FBBC a flujo continuo es de -0.260, el valor esta entre -0.2 y -0.4, se pudo observar que entre estas dos variables existe una baja correlación.

El nivel de significancia es de 0.832 (83.2 %), es mayor al 0.05 (5 %), por lo que indica que no existe una asociación entre las variables.

Tabla XXX. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el pH en un FBBCH, a un flujo continuo**

		Correlaciones	
		% Remoción de CF, en FBBCH a flujo continuo	pH, en FBBCH a flujo continuo
% Remoción de CF, en FBBCH a flujo continuo	Correlación de Pearson	1	-.260
	Sig. (bilateral)		.832
	N	3	3
pH, en FBBC a flujo continuo	Correlación de Pearson	-.260	1
	Sig. (bilateral)	.832	
	N	3	3

Fuente: elaboración propia.

Se puede apreciar en la tabla XXXI, que el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el pH en un FBMCH a flujo continuo es de 0.577, lo que indica que entre estas dos variables existe una correlación moderada. Sin embargo, el nivel de significancia es de 0.609 (60.9 %), el cual es mayor a 0.05 (5 %), por lo que no existe una asociación significativa entre las variables.

Tabla XXXI. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales el pH en un FBMCH, a un flujo continuo**

		Correlaciones	
		% Remoción de CF, en FBMCH a flujo continuo	pH, en FBMCH a flujo continuo
% Remoción de CF, en FBMCH a flujo continuo	Correlación de Pearson	1	.577
	Sig. (bilateral)		.609
	N	3	3
pH, en FBMCH a flujo continuo	Correlación de Pearson	.577	1
	Sig. (bilateral)	.609	
	N	3	3

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXXII, se puede observar que, el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el pH en un FBMCH a flujo continuo es de 0.911, viendo que el valor está en 0.8 y 1, por lo que existe una correlación muy buena entre estas dos variables. La dirección de la correlación es positiva, por lo que se puede decir que es directamente proporcional.

Sin embargo, el nivel de significancia es de 0.271 (27.1 %), siendo este mayor al 0.05 (5 %), por lo que no se pudo señalar que existe una asociación significativa entre las variables.

Tabla XXXII. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y pH en un FBACH, a un flujo continuo**

Correlaciones			
		% Remoción de CF, en FBACH a flujo continuo	pH, en FBACH a flujo continuo
% Remoción de CF, en FBACH a flujo continuo	Correlación de Pearson	1	.911
	Sig. (bilateral)		.271
	N	3	3
pH, en FBACH a flujo continuo	Correlación de Pearson	.911	1
	Sig. (bilateral)	.271	
	N	3	3

Fuente: elaboración propia.

Según la tabla XXXIII, el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el pH en un FBACH a flujo tipo *batch* es de 0.173, entre estas dos variables existió una correlación mínima.

El nivel de significancia confirma que no hay una asociación significativa entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el pH en un FBACH a flujo tipo *batch*, porque el nivel de significancia es de 0.781 (78.1 %), mayor al 0.05 (5 %).

Tabla XXXIII. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el pH en un FBBCH, a un flujo tipo *batch***

		Correlaciones	
		% Remoción de CF, en FBBCH a flujo tipo <i>batch</i>	pH, en FBBCH a flujo tipo <i>batch</i>
% Remoción de CF, en FBBCH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	1	.173
	Sig. (bilateral)		.781
	N	5	5
pH, en FBBCH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	.173	1
	Sig. (bilateral)	.781	
	N	5	5

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXXIV, se puede observar, que el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el pH en un FBMCH a flujo tipo *batch* fue de -0.381, por lo que vemos que entre estas dos variables existe una correlación baja. El nivel de significancia es de 0.527 (52.7 %), esta es mayor al 0.05 (5 %), por lo que confirma que no existió una asociación significativa entre las variables.

Tabla XXXIV. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el pH en un FBMCH, a un flujo tipo *batch***

Correlaciones			
		% Remoción de CF, en FBMCH a flujo tipo <i>batch</i>	pH, en FBMCH a flujo tipo <i>batch</i>
% Remoción de CF, en FBMCH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	1	-.381
	Sig. (bilateral)		.527
	N	5	5
pH, en FBMCH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	-.381	1
	Sig. (bilateral)	.527	
	N	5	5

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXXV, se puede observar que, el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el pH en un FBAC a flujo tipo *batch* es de -0.321, el valor se encuentra entre -0.2 y -0.4, lo que indica que entre estas dos variables existe una correlación baja. El nivel de significancia es de 0.596 (59.6 %), esta es mayor al 0.05 (5 %), lo que confirma que no existe una asociación entre las variables.

Tabla XXXV. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el pH en un FBACH, a un flujo tipo *batch***

		Correlaciones	
		% Remoción de CF, en FBACH a flujo tipo <i>batch</i>	pH, en FBACH a flujo tipo <i>batch</i>
% Remoción de CF, en FBACH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	1	-.323
	Sig. (bilateral)		.596
	N	5	5
pH, en FBACH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	-.323	1
	Sig. (bilateral)	.596	
	N	5	5

Fuente: elaboración propia.

Se pudo determinar que el pH no tuvo relación significativa con la remoción de coliformes fecales en los fotobiorreactores que trabajaron a flujo continuo y tipo *batch*, presentando una leve variación de pH en las muestras realizadas.

Como se pudo observar en la tabla XIII, el rango de pH en el efluente del FBBCH, FBMCH y el FBACH, a flujo continuo fue de: 7.6 a 9.1, 8.1 a 9.3, 7.6 a 9.4 respectivamente. En la tabla XIV, se pudo observar, que el pH en el efluente del FBBCH, FBMCH y el FBACH a flujo tipo *batch* están en los rangos de: 7.24 a 8.1, 7.03 a 8.5 y 7.4 a 8 respectivamente.

Con los rangos de pH que se obtuvieron en los fotobiorreactores a flujo continuo y flujo tipo *batch* están por encima del rango de pH óptimo para las condiciones óptimas de crecimiento de microorganismos (*E. coli*) que es de 6 a 7 unidades de pH. Al estar por encima de las condiciones óptimas de crecimiento de la *E. coli* existe una disminución de la velocidad de crecimiento bacteriano, lo que pudo beneficiar la remoción de coliformes fecales, ya que predominó la muerte bacteriana que el crecimiento bacteriano.

4.3.3. Correlación que existe entre la remoción de coliformes fecales con la temperatura

En la tabla XXXVI, se puede observar que, el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura en un FBBCH a flujo continuo es de -0.971, viendo que el valor esta entre -0.8 y -1, se puede decir que entre estas dos variables existe una correlación muy buena. La dirección de la correlación es negativa por lo que se puede decir que es indirectamente proporcional.

Sin embargo, el nivel de significancia es de 0.153 (15.3 %) mayor al 0.05 (5 %), por lo tanto, no se puede señalar que existe una asociación significativa entre las variables.

Tabla XXXVI. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura en un FBBCH, a un flujo continuo**

Correlaciones			
		% Remoción de CF, en FBBCH a flujo continuo	Temperatura en FBBCH a flujo continuo
% Remoción de CF, en FBBCH a flujo continuo	Correlación de Pearson	1	-.971
	Sig. (bilateral)		.153
	N	3	3
Temperatura en FBBCH a flujo continuo	Correlación de Pearson	-.971	1
	Sig. (bilateral)	.153	
	N	3	3

Fuente: elaboración propia.

Según la tabla XXXVII, el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura en un FBMC a flujo continuo es de -0.763, lo cual indico que entre estas dos variables exilio una buena correlación. Sin embargo, el nivel de significancia es mayor al 0.05 (5 %), por lo tanto, no se pudo señalar una asociación significativa entre las variables.

Tabla XXXVII. Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura un FBMCH, a un flujo continuo

		Correlaciones	
		% Remoción de CF, en FBMCH a flujo continuo	Temperatura en FBMCH a flujo continuo
% Remoción de CF, en FBMCH a flujo continuo	Correlación de Pearson	1	-.763
	Sig. (bilateral)		.448
	N	3	3
Temperatura en FBMCH a flujo continuo	Correlación de Pearson	-.763	1
	Sig. (bilateral)	.448	
	N	3	3

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXXVIII, se observó que, en el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura en un FBACH a flujo continuo fue de -0.264, lo que indica que entre estas dos variables existió una correlación baja. Y lo confirma el nivel de significancia de 0.83 (83 %), siendo esta mayor al 0.05 (5 %), lo cual indica que entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura no existió una asociación significativa.

Tabla XXXVIII. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura en un FBACH, a un flujo continuo**

		Correlaciones	
		% Remoción de CF, en FBACH a flujo continuo	Temperatura en FBACH a flujo continuo
% Remoción de CF, en FBACH a flujo continuo	Correlación de Pearson	1	-.264
	Sig. (bilateral)		.830
	N	3	3
Temperatura en FBACH a flujo continuo	Correlación de Pearson	-.264	1
	Sig. (bilateral)	.830	
	N	3	3

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXXIX, se puede observar que, el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura en un FBBCH a flujo tipo *batch* es de -0.720, ya que el valor se encuentra entre -0.6 y -0.8, lo que indica que entre estas dos variables existió una correlación buena. por lo tanto, al aumentar la temperatura, disminuyó el porcentaje de remoción de coliformes fecales en un sistema de flujo tipo *batch*.

Sin embargo, el nivel de significancia es de 0.170 (17 %), mayor al 0.05 (5 %), lo que señala que no existió una asociación significativa entre las variables.

Tabla XXXIX. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura en un FBBCH, a un flujo tipo *batch***

Correlaciones			
		% Remoción de CF, en FBBCH a flujo tipo <i>batch</i>	Temperatura en FBBCH a flujo tipo <i>batch</i>
% Remoción de CF, en FBBCH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	1	-.720
	Sig. (bilateral)		.170
	N	5	5
Temperatura en FBBCH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	-.720	1
	Sig. (bilateral)	.170	
	N	5	5

Fuente: elaboración propia.

Según la tabla XL, el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura en un FBMCH a flujo tipo *batch* es de -0.593, se pudo observar que entre estas dos variables existió una correlación moderada.

El nivel de significancia fue mayor al 0.05 (5 %), por lo que no se pudo señalar que existió una asociación significativa entre las variables.

Tabla XL. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura en un FBMCH, a un flujo tipo *batch***

		Correlaciones	
		% Remoción de CF, en FBMCH a flujo tipo <i>batch</i>	Temperatura en FBMCH a flujo tipo <i>batch</i>
% Remoción de CF, en FBMCH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	1	-.593
	Sig. (bilateral)		.292
	N	5	5
Temperatura en FBMCH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	-.593	1
	Sig. (bilateral)	.292	
	N	5	5

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XLI, se pudo observar que el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura en un FBAC a flujo tipo *batch* fue de 0.538, vemos que entre estas dos variables existió una correlación moderada.

La dirección de la correlación es positiva, por lo que se puede decir que es directa, por lo tanto, al aumentar la temperatura, aumenta el porcentaje de remoción de coliformes fecales.

Sin embargo, el nivel de significancia fue de 0.350 (35 %), y mayor al 0.05 (5 %), por lo que no se pudo señalar que existió una relación significativa entre las variables, debido a que la probabilidad de equivocación era alta.

Tabla XLI. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y la temperatura en un FBACH, a un flujo tipo *batch***

Correlaciones			
		% Remoción de CF, en FBACH a flujo tipo <i>batch</i>	Temperatura en FBACH a flujo tipo <i>batch</i>
% Remoción de CF, en FBACH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	1	.538
	Sig. (bilateral)		.350
	N	5	5
Temperatura en FBACH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	.538	1
	Sig. (bilateral)	.350	
	N	5	5

Fuente: elaboración propia.

Se puede concluir que la temperatura no tuvo relación significativa con la remoción de coliformes fecales, en los fotobiorreactores que trabajaron a flujo continuo y tipo *batch*.

Como se pudo observar en la tabla XV, el rango de temperatura en el efluente del FBBCH, FBMCH y el FBACH, a flujo continuo fue de: 28.5°C a 37.8°C, 29°C a 38°C, 29°C a 37.6°C respectivamente. Y en la tabla XVI, se pudo observar que la temperatura en el efluente del FBBCH, FBMCH y el FBACH a flujo tipo *batch* estaban en los rangos de: 24.4°C a 33°C, 25.3°C a 33.3°C y 25.7°C a 33.6°C respectivamente.

La *E. coli* es la bacteria que representa mayor porcentaje de coliformes fecales, de acuerdo a sus requerimientos de temperatura optima de crecimiento, se cataloga como mesófila, ya que se desarrolla mejor en el rango de temperatura de 25°C a 40°C, con los rangos de temperatura que se obtuvieron

en los fotobiorreactores a flujo continuo y tipo *batch*, se puede decir que a la temperatura que se trabajo fue la óptima para el crecimiento bacteriano del grupo mesofilios.

4.3.4. Correlación que existe entre la remoción de coliformes fecales con el oxígeno disuelto

En la tabla XLII, se pudo observar que, el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBBCH a flujo continuo fue de -0.260, el valor esta entre -0.2 y -0.4, lo que indica que entre estas dos variables existió una correlación baja. El nivel de significancia es de 0.832 (83.2 %) mayor a 0.05 (5 %), por lo que confirma que no existió una asociación significativa entre las variables.

Tabla XLII. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBBCH, a un flujo continuo**

		Correlaciones	
		% Remoción de CF, en FBBCH a flujo continuo	Oxígeno disuelto en FBBCH a flujo continuo
% Remoción de CF, en FBBCH a flujo continuo	Correlación de Pearson	1	-.260
	Sig. (bilateral)		.832
	N	3	3
Oxígeno disuelto en FBBCH a flujo continuo	Correlación de Pearson	-.260	1
	Sig. (bilateral)	.832	
	N	3	3

Fuente: elaboración propia.

Se pudo observar en la tabla XLIII que, el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBMCH a flujo continuo fue de 0.273, la correlación entre estas dos variables fue baja.

El nivel de significancia es de 0.824 (82.4 %), mayor al 0.05 (5 %), por lo que confirma que entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBMCH a flujo continuo no existió una asociación significativa.

Tabla XLIII. Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBMCH, a un flujo continuo

		Correlaciones	
		% Remoción de CF, en FBMCH a flujo continuo	Oxígeno disuelto en FBMCH a flujo continuo
% Remoción de CF, en FBMCH a flujo continuo	Correlación de Pearson	1	.273
	Sig. (bilateral)		.824
	N	3	3
Oxígeno disuelto en FBMCH a flujo continuo	Correlación de Pearson	.273	1
	Sig. (bilateral)	.824	
	N	3	3

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XLIV, se observó que, en el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBACH a flujo continuo el coeficiente de correlación de Pearson fue de 0.830, y el valor esta entre 0.8 y 1, lo que indica que existió una correlación muy buena entre estas dos variables. La dirección de la correlación es positiva

por lo que se puede decir que es directa, por lo tanto, al aumentar el oxígeno disuelto aumento el porcentaje de remoción de coliformes fecales en un sistema de flujo continuo.

El nivel de significancia fue de 0.377 (37.7 %), mayor al 0.05 (5 %), por lo que no se pudo señalar que existió una asociación significativa entre las variables, aunque la correlación de Pearson, lo indique, debido a que la probabilidad de estarnos equivocando al señalar la relación es alta.

Tabla XLIV. Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBACH, a un flujo continuo

		Correlaciones	
		% Remoción de CF, en FBACH a flujo continuo	Oxígeno disuelto en FBACH a flujo continuo
% Remoción de CF, en FBACH a flujo continuo	Correlación de Pearson	1	.830
	Sig. (bilateral)		.377
	N	3	3
Oxígeno disuelto en FBACH a flujo continuo	Correlación de Pearson	.830	1
	Sig. (bilateral)	.377	
	N	3	3

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XLV, se pudo observar que, el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBBCH a flujo tipo *batch* fue de 0.380, y entre 0.2 y 0.4, vemos que entre estas dos variables existió una correlación baja. El nivel de significancia fue de 0.528 (52.8 %), mayor a 0.05 (5 %), por lo que confirma que no existió una asociación significativa entre las variables.

Tabla XLV. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBBCH, a un flujo tipo *batch***

		Correlaciones	
		% Remoción de CF, en FBBCH a flujo tipo <i>batch</i>	Oxígeno disuelto en FBBCH a flujo tipo <i>batch</i>
% Remoción de CF, en FBBCH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	1	.380
	Sig. (bilateral)		.528
	N	5	5
Oxígeno disuelto en FBBCH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	.380	1
	Sig. (bilateral)	.528	
	N	5	5

Fuente: elaboración propia.

Como se pudo observar en la tabla XLVI, el coeficiente de correlación de Pearson, entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBMCH a flujo tipo *batch* fue de 0.340, viendo que el valor estuvo entre 0.2 y 0.4, se observó que entre estas dos variables existió una correlación baja. El nivel de significancia fue de 0.575 (57.5%), mayor a 0.05 (5%), por lo que confirmó que no existió una asociación significativa entre las variables.

Tabla XLVI. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBMCH, a un flujo tipo *batch***

Correlaciones			
		% Remoción de CF, en FBMCH a flujo tipo <i>batch</i>	Oxígeno disuelto en FBMCH a flujo tipo <i>batch</i>
% Remoción de CF, en FBMCH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	1	.340
	Sig. (bilateral)		.575
	N	5	5
Oxígeno disuelto en FBMCH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	.340	1
	Sig. (bilateral)	.575	
	N	5	5

Fuente: elaboración propia.

De la tabla XLVII, se puede concluir que el coeficiente de correlación de Pearson entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBACH a flujo tipo *batch* fue de 0.065, lo que indica que entre estas dos variables existió una correlación mínima. Y el nivel de significancia fue de 0.918 (91.8 %), mayor a 0.05 (5 %), por lo que pudo confirmarse que no existió una asociación significativa entre las variables.

Tabla XLVII. **Análisis de correlación entre el porcentaje de remoción de coliformes fecales y el oxígeno disuelto en un FBACH, a un flujo tipo *batch***

		Correlaciones	
		% Remoción de CF, en FBACH a flujo tipo <i>batch</i>	Oxígeno disuelto en FBACH a flujo tipo <i>batch</i>
% Remoción de CF, en FBACH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	1	.065
	Sig. (bilateral)		.918
	N	5	5
Oxígeno disuelto en FBACH a flujo tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	.065	1
	Sig. (bilateral)	.918	
	N	5	5

Fuente: elaboración propia.

Los medios en los que existe unas altas concentraciones de microalgas se caracterizan por una alta producción de O₂. En principio el aporte de OD al medio supone una activación de la población microbiana, pero en estos sistemas pueden alcanzarse situaciones de sobresaturación de OD, que por sí solas ejercen una acción desinfectante de las aguas tratadas. Además, estas concentraciones de oxígeno favorecen procesos de eliminación de patógenos en los que están involucradas la radiación UV y el agotamiento de los nutrientes (Moreno A. , 2008, pág. 28)

Como se pudo observar en la tabla XVII, el rango de oxígeno disuelto en el efluente del FBBCH, FBMCH y el FBACH, a flujo continuo en mg/l fue de: 4.74 a 10.67, 5.8 a 9.44 y 5.31 a 11.76 respectivamente. En la tabla XVIII, se pudo observar que el oxígeno disuelto en el efluente del FBBCH, FBMCH y el FBACH a flujo tipo *batch* en mg/l estuvieron en los rangos de: 4.37 a 7.02, 4.12 a 5.4 y 4.99 a 8.33 respectivamente.

Como se pudo observar en la tabla XLVIII, se puede decir que hay sobresaturación de OD cuando este es mayor a 12 mg/l, lo que indica que no se obtuvo sobresaturación en los tres fotobiorreactores a flujo continuo y tipo *batch*, por lo que no se logró tener las condiciones deseadas, ya que los sistemas estaban trabajando en condiciones naturales, y no en condiciones controladas.

Tabla XLVIII. Rangos de concentración de oxígeno disuelto y consecuencias eco sistémicas frecuentes

[OD] mg/L	Condición	Consecuencias
0	Anoxia	Muerte masiva de organismos aerobios
0-5	Hipoxia	Desaparición de organismos y especies sensibles
5-8	Aceptable	[OD] adecuadas para la vida de la gran mayoría de especies de peces y otros organismos acuáticos.
8-12	Buena	
>12	Sobresaturada	Sistemas en plena producción fotosintética.

Fuente: (Goyenola, 2007, pág. 1)

Se pudo concluir que el oxígeno disuelto no tuvo una relación significativa con la remoción de coliformes fecales, en los fotobiorreactores que trabajaron a flujo continuo y tipo *batch*, ya que no se logró una sobresaturación de oxígeno disuelto (mayor a 12mg/l).

4.4. Relación entre la DBO₅, con la DBO₅ filtrada

Según la tabla XLIX se presentó el análisis de correlación, de los datos del porcentaje de remoción de DBO₅, y el porcentaje de remoción de DBO₅ filtrada, utilizando la correlación de Pearson, que determina si existe una relación lineal entre dos variables.

Como se pudo observar, el coeficiente de correlación de Pearson entre estas dos variables fue de -0.218, viendo que el valor estuvo entre -0.2 y -0.4, se observó que entre estas dos variables existió una correlación baja.

El nivel de significancia obtenido fue de 0.860 por lo que fue mayor a 0.05 (5 %), lo que indicó que no se puede señalar que existió una asociación significativa entre las variables, aunque el coeficiente de correlación de Pearson indique una correlación baja.

Tabla XLIX. **Análisis de correlación del porcentaje de remoción de la DBO₅ y el porcentaje de remoción de la DBO₅ filtrada en un sistema continuo**

Correlaciones			
		Porcentaje de remoción de DBO ₅ en un sistema continuo	Porcentaje de remoción de DBO ₅ filtrada en un sistema continuo
Porcentaje de remoción de DBO ₅ en un sistema continuo	Correlación de Pearson	1	-.218
	Sig. (bilateral)		.860
	N	3	3
Porcentaje de remoción de DBO ₅ filtrada en un sistema continuo	Correlación de Pearson	-.218	1
	Sig. (bilateral)	.860	
	N	3	3

Fuente: elaboración propia.

Según la tabla L, se presentó el análisis de correlación, de los datos del porcentaje de remoción de DBO₅, y el porcentaje de remoción de DBO₅ filtrada, en un sistema tipo *batch*, se utilizó la correlación de Pearson que determino si existió relación lineal entre dos variables.

Se pudo observar que, el coeficiente de correlación de Pearson, entre estas dos variables es de -0.809, viendo que el valor estuvo entre -0.8 y -1, vemos que entre estas dos variables existe una correlación muy buena. La dirección de la correlación es negativa por lo que se puede decir que es indirecta, por lo tanto, al aumentar el porcentaje de remoción de la DBO₅, disminuye el porcentaje de

remoción de la DBO₅ filtrada en un flujo tipo *batch*. Sin embargo, el nivel de significancia fue de 0.40, por lo que es mayor al 0.05 (5%), lo que indica que no existió una asociación significativa entre las variables, aunque el coeficiente de correlación de Pearson indicó una correlación muy buena.

Tabla L. **Análisis de correlación del porcentaje de remoción de la DBO₅ y el porcentaje de remoción de la DBO₅ filtrada en un sistema tipo *batch***

Correlaciones			
		Porcentaje de remoción de DBO ₅ en un sistema tipo <i>batch</i>	Porcentaje de remoción de DBO ₅ F en un sistema tipo <i>batch</i>
Porcentaje de remoción de DBO ₅ en un sistema tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	1	-.809
	Sig. (bilateral)		.400
	N	3	3
Porcentaje de remoción de DBO ₅ F en un sistema tipo <i>batch</i>	Correlación de Pearson	-.809	1
	Sig. (bilateral)	.400	
	N	3	3

Fuente: elaboración propia.

El análisis de DBO₅ midió el oxígeno que requieren las bacterias durante la estabilización de la materia orgánica susceptible a descomposición, cuando se realiza el análisis de DBO₅ se midió el OD inicial y El OD a los 5 días.

La medición de DBO₅ filtrada en lagunas de estabilización sirve como base para determinar la eficiencia real de una PTAR, pues en la DBO₅ bruta la presencia de algas puede aumentar la concentración final, enmascarando la real eficiencia del tratamiento” (Sánchez, 2012, pág. 211)

La biomasa que estuvo presente en los fotobiorreactores corresponde al cultivo mixto de algas clorofitas presentes en los tres fotobiorreactores. Las algas forman parte de la materia orgánica, y producen oxígeno disuelto, lo cual puede indicar una DBO₅ errónea, por lo que se realizó una DBO₅ filtrada a la misma muestra, para ver si existía una relación entre ambas.

Se pudo concluir que no existió una relación significativa entre la DBO₅ y la DBO₅ filtrada en los fotobiorreactores que trabajaron a flujo continuo y tipo *batch*, siendo los coeficientes de correlación de Pearson: -0.218 y -0.809 respectivamente y un nivel de significancia de 0.86 y 0.40.

En la DBO₅ influyeron las algas que fueron arrastradas al efluente de los fotobiorreactores sin importar el tamaño. Y en la DBO₅ filtrada, estuvieron presentes las algas que tienen un tamaño menor que los sólidos suspendidos, logrando pasar los filtros utilizados para realizar el análisis de sólidos suspendidos, se podría decir que estos forman parte de los sólidos disueltos, esto no garantizó la ausencia de algas en la DBO₅ filtrada, ya que se pudo observar una coloración verdosa en la muestra.

Las algas presentes en las muestras de DBO₅ produjeron OD que interfieren con los resultados y el material disuelto que se presentó en la DBO₅ filtrada, es decir que el material disuelto se puede generar de diversas formas que no son uniformes en un sistema, ya que pueden modificarse por las actividades de las bacterias o la oxidación, lo que hizo que la DBO₅ filtrada sea variable.

CONCLUSIONES

1. Cuando los fotobiorreactores trabajaron a flujo continuo y tipo *batch* no se vio afectada en forma significativa la remoción de materia orgánica y coliformes fecales al variar la carga hidráulica, dado que, cuando se trabajó a una carga hidráulica de $1.32 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$ se obtuvieron remociones bajas de DBO_5 (15.02 %) y CF (99.80 % y 99.87 %), al aumentar la carga hidráulica a un $3.23 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$ se obtuvo la mayor remoción de DBO_5 (25.49 % y 46.46 %) y CF (99.93 % y 99.92 %), al seguir aumentando la carga hidráulica a un $5.32 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$ disminuyó la eficiencia de DBO_5 (21.29 % y 29,98 %) y CF (99.79 % y 99.84 %), comportándose de forma errática, lo cual demuestra que no existe una relación lineal.
2. Cuando los fotobiorreactores trabajaron a flujo continuo, el FBBCH obtuvo una remoción de DBO_5 de 5.85 % y 32.35 %, en SS de 49.76 % y 69.82 % y en CF de 99.80 % y 99.92 %. En el FBMCH los porcentajes de remoción de DBO_5 fueron de 42.93 % y 75.88 %, en SS fueron de 63.64 % y 68.66 % y en CF fueron de 99.94 %, 99.91 % y 99.95 %. En el FBACH los porcentajes de remoción de DBO_5 fueron de 33.66 % y 63.53 %, en SS fueron de 90.30 % y 84.33 % y en CF fueron de 99.88 %, 99.68 % y 99,80 %.
3. Cuando los fotobiorreactores trabajaron a flujo tipo *batch*, el FBBCH obtuvo una remoción de DBO_5 de 14.74 %, 12 %, 20.73 %, 11.11 % y 16.5 %, en SS de 71.68 %, 80.15 %, 81.53 %, 55.56 % y 61.86 % y en CF de 99.89 %, 99.84 %, 99.87 % y 99.91 %. En el FBMCH los porcentajes de remoción de DBO_5 fueron de 41.05 %, 44 %, 55.49 %, 50 % y 41.75 %, en SS fueron de

75.51 %, 90.87 %, 84.90 %, 91.56 % y 63.68% y en CF fueron de 99.96 %, 99.90 %, 99.89 % y 99.97 %. En el FBACH los porcentajes de remoción de DBO_5 fueron de 32.63 %, 27 %, 39.02 %, 24.07 % y 27.18 %, en SS fueron de 90.82 %, 96.96 %, 93.29 %, 66.46 % y 60.22 % y en CF fueron de 99.84 %, 99.80 %, 99.87 % y 99.81 %.

4. En el parámetro de sólidos suspendidos, se pudo observar la relación entre la carga hidráulica y el porcentaje de remoción de sólidos suspendidos cuando los fotobiorreactores trabajaron a flujo continuo, dado que, el FBMCH presentó un porcentaje de remoción de 26.97 % y el FBACH obtuvo un porcentaje de remoción de 35.29 %.
5. El pH, la temperatura, el oxígeno disuelto y la radiación solar no ejercieron efecto en la remoción de CF a flujo continuo y tipo *batch*, con excepción del FBACH a flujo tipo *batch*, que presentó una correlación significativa entre la variable de radiación solar y porcentajes de remoción de CF, en el cual se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson de 0.918 y un nivel de significancia de 0.028.
6. No existió una relación significativa entre la DBO_5 y la DBO_5 filtrada en los fotobiorreactores que trabajaron a flujo continuo y tipo *batch*, siendo los coeficientes de correlación de Pearson: -0.218 y -0.809 respectivamente y un nivel de significancia de 0.86 y 0.40.
7. Los tres fotobiorreactores que trabajaron a flujo continuo y flujo tipo *batch* cumplen con el límite máximo permisible de CF para las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores (LMP 1×10^4 NMP/100cm³) del Acuerdo Gubernativo 236-2006, ya que los valores promedio de CF en NMP/100cm³ en el efluente a flujo continuo fueron de: FBBCH 2.03×10^3 ,

FBMCH 8.1×10^2 y FBACH 6.67×10^3 . Y a flujo tipo batch fueron de: FBBCH 2.52×10^3 , FBMCH 1.45×10^3 y FBACH 3.34×10^3 .

8. El FBMCH que trabajo a flujo continuo presentó un valor promedio de 8.1×10^2 NMP/100cm³ de coliformes fecales, siendo este el único que cumple con el límite máximo permisible del Acuerdo Gubernativo 236-2006, para el reúso tipo IV y V de aguas residuales (reúso para pastos y otros cultivos, reúso recreativo) el cual es de 1×10^3 NMP/100cm³.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio donde se analice el efecto que ejerce la variación del tiempo de retención hidráulica en la eficiencia de remoción de materia orgánica y coliformes fecales en un fotobiorreactor de cultivo mixto de algas clorofitas.
2. Instalar más de tres sistemas de fotobiorreactores que trabajen al mismo tiempo a distintas cargas hidráulicas, para obtener más datos y comparar de una mejor manera el comportamiento en la eficiencia de remoción de materia orgánica y coliformes fecales.
3. Realizar un estudio para la remoción de coliformes fecales en fotobiorreactores, tomando en cuenta los parámetros de pH, temperatura, radiación solar y oxígeno disuelto, utilizando equipo adecuado para un monitoreo constante.
4. Investigar un método de retención de biomasa en los fotobiorreactores, para que no disminuya la cantidad de algas.
5. Utilizar fotobiorreactores con menor diámetro para garantizar la penetración de los rayos UV al sistema y así lograr contacto con los microorganismos que se encuentren alejados de las paredes del fotobiorreactor.
6. Evaluar el funcionamiento del fotobiorreactor durante distintas épocas del año, para observar el comportamiento y eficiencia en diferentes condiciones climáticas.

BIBLIOGRAFÍA

1. APHA-AWWA-WPC. (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.EUA:APHA.*
2. Aguilar, F. (2017). Análisis del proceso de fitorremediación con algas clorofitas en las estaciones depuradoras de agua residual, para mitigar los efectos de eutrofización de los cuerpos receptores. Guatemala.
3. Candela, R. (2016). *Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica.* Bucaramanga.
4. Cartagena, J., & Malo, B. (2017). Evaluación del uso de la microalga *Chlorella vulgaris* en la remoción de materia orgánica de las aguas residuales de la PTAR El Salitre a nivel laboratorio. Bogotá.
5. Chacón, C., Andrade, C., Cárdenas, C., Araujo, I., & Morales, E. (julio de 2004). Uso de *Chlorella sp.* y *Scenedesmus sp.* en la remoción de nitrógeno, fósforo y DQO de aguas residuales urbanas de Maracaibo, Venezuela. *Boletín del centro de investigaciones biológicas*, 38(2), 94 - 108.

6. Codina, M., García, C., Barón, J., da Silva, S., & Bosch, J. (13 de mayo de 2016). *researchgate*. recuperado: 16 de junio 2018, researchgate web site: https://www.researchgate.net/publication/266485563_Planta_piloto_de_microalgas_para_mejoramiento_del_tratamiento_efluentes_urbanos_en_Catamarca_Argentina.
7. Goyenola, G. (junio de 2007). Red de monitoreo ambiental participativo de sistemas acuáticos RED MAPSA. recuperado: 20 de mayo 2018, http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/OD.pdf.
8. Guerra, H., & Zea, M. (2015). Identificación de presencia de algas generadas en los efluentes del sistema de filtros percoladores de la PTAR de la USAC y de la PTAR ING. Arturo Pazos Sosa, para uso potencial en remoción de nitrógeno y fósforo presente en el agua residual. Guatemala.
9. Hernández, J. (2004). Evaluación de un sistema de microalgas y bacterias para la eliminación de nutrientes de las aguas residuales domésticas. La Paz.
10. Infante, C., Angulo, E., Zárata, A., Florez, J., Barrios, F., & Zapata, C. (abril/junio de 2012). Propagación de la microalga *Chlorella* sp. en cultivo por lote: Cinética del crecimiento celular. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 159-164.
11. Krishna, A., Dev, L., & Thankamani. (2012). An integrated process for Industrial effluent treatment and Biodiesel production using Microalgae. *Research in Biotechnology*, 3(1), 47-60.

12. López, I., Vásquez, J., & Álvarez, V. (noviembre-diciembre de 2016). Remoción biológica de nutrientes en aguas residuales urbanas con fotobiorreactores utilizando microalgas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*(17), 3569-3580.
13. López, S., & Meza, J. (2017). Eficiencia de la microalga *Chlorella* sp. para la remoción de nutrientes en las lagunas de oxidación de la ciudad de Manta. Ecuador.
14. Méndez, L., Albarracín, I., Cravero, M., & Salomón, R. (enero-junio de 2011). Crecimiento de *Scenedesmus quadricauda* en efluentes cloacales de la ciudad de Trelew, Chubut, Argentina. *Cubana de Investigaciones Pesqueras*, 28(1), 36-41.
15. Moreno, A. (2008). Fotobiorreactor cerrado como método de depuración de aguas residuales urbanas. Sevilla.
16. Moreno, M., Naranjo, B., & Koch, A. (mayo de 2010). Evaluación de dos métodos para la reducción de nitrógeno, fósforo y DQO de aguas residuales, mediante un cultivo axénico de Cianobacterias y un consorcio microbiano, inmovilizados y en suspensión. *Ciencia*, 13(1), 55-61.
17. Noriega, J. (febrero de 2017). *Google Maps*. recuperado: 6 de febrero de 2018 de Google Maps: file:///C:/Users/usuario/Desktop/ERIS-2018/ESTUDIO%20ESPECIAL%201/estudio%20especial%201/mapas/Planta%20De%20Tratamiento%20De%20Agua%20USAC%20-%20Google%20Maps.pdf

18. Noyola, A., Morgan, J., & Guereca, L. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*. Mexico.
19. Oviedo, E. (2018). Determinación del efecto de la carga hidráulica sobre la remoción de nutriente en un fotobiorreactor de cultivo mixto de algas Clorofitas en la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC. Guatemala.
20. Pérez, A. (2012). Utilización con fines de riego del efluente de la ciudad Universitaria, USAC. Guatemala.
21. Pérez, A., & Labbé, J. (agosto de 2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Biología Marina y Oceanografía*, 49(2), 157-173.
22. Piedrahita, J., & Montes, S. (2012). Diseño del sistema de alimentación y control de temperatura en un fotobiorreactor para la producción de biomasa y ácidos grasos a partir del cultivo de la microalga *Chlorella Vulgaris*. Santiago de Cali.
23. Pierri, I. (2013). Eficiencia en la remoción de nitrógeno y fósforo en los filtros percoladores de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala . Guatemala.
24. Ramírez, L., Zepka, L., & Lopes, E. (julio-diciembre de 2013). Fotobiorreactor: herramienta para cultivo de Cianobacterias. *Ciencia y Tecnología*, 9-19.

25. Ramírez, Ó. (2012). Investigación de la eficiencia de las etapas en serie del filtro percolador de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos. Guatemala.
26. Reyes, J. (2015). Estudio de fotobiorreactor de microalga: sistema de monitoreo y simulación de estrategias de control. Piura.
27. Roa, A., & Cañizares, R. (2012). Bioremediación de aguas con fosfatos y nitratos utilizando *Scenedesmus incrassatulus* inmovilizado. Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, 10(1), 71-79 .
28. Rojo, E. (2015). Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales de piscifactorías mediante fotobiorreactores de microalgas para la reutilización de agua y valorización de nutrientes. Valladolid.
29. Romero, L. (2017). Algas verdes macroscópicas de la Península Ibérica . Sevilla.
30. Ruiz, A. (2011). Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente. Valencia.
31. Salazar, M. (23 de noviembre de 2005). Aplicación e importancia de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales. 7.
32. Sánchez, I. (julio-diciembre de 2012). Evaluación del desempeño de la planta de tratamiento de aguas residuales urbanas de ILHA Solteira (SP) por lagunas facultativas primarias. Ingeniería y Desarrollo, 30(2), 199-222 .

33. Sawyer, C. M. (2000). Química para ingeniería ambiental . (E. Ariza, Ed.) Colombia: Contextos Gráficos.
34. Siguí, N. (2013). Diseño y construcción de un filtro intermitente de grava sin recirculación y comparación con eficiencias teóricas de filtros con recirculación para el tratamiento de agua residual doméstica. Guatemala.
35. Valdéz, R., Montanez, J., Aguilar, C., & Zabala, A. (2012). Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores. Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila, 4(7).
36. Vargas, O., & Turca, J. (2016). Comportamiento de la eficiencia de remoción de materia orgánica en un bioreactor de lecho móvil alimentado con aguas residuales domésticas, con la variación del volumen del lecho. Bogotá.
37. Wegelin, M. (2005). Desinfección Solar del Agua, Guía de Aplicación. Cochabamba: Pilar León.

ANEXO

1. Prueba de normalidad del porcentaje de remoción de la DBO₅ en un sistema continuo

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Porcentaje de Remoción de DBO ₅ , en el fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica), en un sistema continuo	.322	3	.	.880	3	.325
Porcentaje de Remoción de DBO ₅ , en el fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica), en un sistema continuo	.279	3	.	.939	3	.522
Porcentaje de Remoción de DBO ₅ , en el fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica), en un sistema continuo	.265	3	.	.953	3	.584

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

2. Media mediana y moda del porcentaje de remoción de la DBO₅ en un sistema continuo

Estadísticos

		Porcentaje de Remoción de DBO ₅ , en el fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica), en un sistema continuo	Porcentaje de Remoción de DBO ₅ }, en el fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica), en un sistema continuo	Porcentaje de Remoción de DBO ₅ , en el fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica), en un sistema continuo
N	Válido	3	3	3
	Perdidos	0	0	0
	Media	-25.4033	25.4900	21.2867
	Mediana	5.8500	42.9300	33.6600
	Moda	-114.41 ^a	-42.34 ^a	-33.33 ^a
	Suma	-76.21	76.47	63.86

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

3. Prueba de normalidad del porcentaje de remoción de la DBO₅ en un sistema tipo *batch*

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	Gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Porcentaje de Remoción de DBO ₅ , en el fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	.183	5	.200*	.944	5	.693
Porcentaje de Remoción de DBO ₅ , en el fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	.255	5	.200*	.886	5	.337
Porcentaje de Remoción de DBO ₅ , en el fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	.282	5	.200*	.909	5	.460

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

4. Media, mediana y moda del porcentaje de remoción de la DBO₅ en un sistema tipo *batch*

		Estadísticos		
		Porcentaje de Remoción de DBO ₅ , en el fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	Porcentaje de Remoción de DBO ₅ , en el fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	Porcentaje de Remoción de DBO ₅ , en el fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>
N	Válido	5	5	5
	Perdidos	0	0	0
	Media	15.0160	46.4580	29.9800
	Mediana	14.7400	44.0000	27.1800
	Moda	11.11 ^a	41.05 ^a	24.07 ^a
	Suma	75.08	232.29	149.90

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

5. Prueba de normalidad del porcentaje de remoción de la DBO₅ filtrada en un sistema continuo

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Porcentaje de Remoción de DBO ₅ filtrada, en el fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica), en un sistema continuo	.340	3	.	.849	3	.239
Porcentaje de Remoción de DBO ₅ filtrada, en el fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica), en un sistema continuo	.306	3	.	.904	3	.399
Porcentaje de Remoción de DBO ₅ filtrada, en el fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica), en un sistema continuo	.257	3	.	.961	3	.621

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

6. Media mediana y moda del porcentaje de remoción de la DBO₅ filtrada en un sistema continuo

Estadísticos

		Porcentaje de Remoción de DBO ₅ filtrada, en el fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica)	Porcentaje de Remoción de DBO ₅ filtrada, en el fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica)	Porcentaje de Remoción de DBO ₅ filtrada, en el fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica)
N	Válido	3	3	3
	Perdidos	0	0	0
	Media	35.6967	31.6133	38.1367
	Mediana	63.4100	50.7300	46.8300
	Moda	-35.14 ^a	-28.83 ^a	-3.60 ^a
	Suma	107.09	94.84	114.41

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

7. Prueba de normalidad del porcentaje de remoción de la DBO₅ filtrada en un sistema tipo *batch*

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Porcentaje de Remoción de DBO ₅ filtrada, en el fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	.275	5	.200*	.915	5	.498
Porcentaje de Remoción de DBO ₅ filtrada, en el fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	.294	5	.180	.837	5	.157
Porcentaje de Remoción de DBO ₅ filtrada, en el fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	.346	5	.051	.768	5	.043

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

8. Media mediana y moda del porcentaje de remoción de la DBO₅ filtrada en un sistema tipo *batch*

Estadísticos

		Porcentaje de Remoción de DBO ₅ filtrada, en el fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	Porcentaje de Remoción de DBO ₅ filtrada, en el fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	Porcentaje de Remoción de DBO ₅ filtrada, en el fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>
N	Válido	5	5	5
	Perdidos	0	0	0
	Media	59.6320	53.2280	45.0180
	Mediana	64.8100	60.0000	52.6300
	Moda	43.69 ^a	35.92 ^a	30.10 ^a
	Suma	298.16	266.14	225.09

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

9. Prueba de normalidad del porcentaje de remoción de los sólidos suspendidos en un sistema continuo

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Porcentaje de Remoción de SS, en el fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica), en un sistema continuo	.351	3	.	.826	3	.179
Porcentaje de Remoción de SS, en el fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica), en un sistema continuo	.372	3	.	.781	3	.071
Porcentaje de Remoción de SS, en el fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica), en un sistema continuo	.373	3	.	.778	3	.063

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

10. Media mediana y moda del porcentaje de remoción de los sólidos suspendidos en un sistema continuo

Estadísticos

		Porcentaje de Remoción de SS, en el fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica), en un sistema continuo	Porcentaje de Remoción de SS, en el fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica), en un sistema continuo	Porcentaje de Remoción de SS, en el fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica), en un sistema continuo
N	Válido	3	3	3
	Perdidos	0	0	0
	Media	-1.8067	26.9700	35.2933
	Mediana	49.7600	63.6400	84.3300
	Moda	-125.00 ^a	-51.39 ^a	-68.75 ^a
	Suma	-5.42	80.91	105.88

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

11. Prueba de normalidad del porcentaje de remoción de los sólidos suspendidos en un sistema tipo *batch*

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Porcentaje de Remoción de SS, en el fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	.211	5	.200 [*]	.915	5	.498
Porcentaje de Remoción de SS, en el fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	.220	5	.200 [*]	.893	5	.372
Porcentaje de Remoción de SS, en el fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	.308	5	.136	.834	5	.150

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

12. Media mediana y moda del porcentaje de emoción de los sólidos suspendidos en un sistema tipo *batch*

		Estadísticos		
		Porcentaje de Remoción de SS, en el fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	Porcentaje de Remoción de SS, en el fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	Porcentaje de Remoción de SS, en el fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>
N	Válido	5	5	5
	Perdidos	0	0	0
Media		70.1560	81.3040	81.5500
Mediana		71.6800	84.9000	90.8200
Moda		55.56 ^a	63.68 ^a	60.22 ^a
Suma		350.78	406.52	407.75

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

13. Prueba de normalidad del porcentaje de remoción de los coliformes fecales en un sistema continuo

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Porcentaje de Remoción de CF, en el fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica), en un sistema continuo	.385	3	.	.750	3	.000
Porcentaje de Remoción de CF, en el fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica), en un sistema continuo	.292	3	.	.923	3	.463
Porcentaje de Remoción de CF, en el fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica), en un sistema continuo	.219	3	.	.987	3	.780

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

14. Media mediana y moda del porcentaje de remoción de los coliformes fecales en un sistema continuo

Estadísticos

		Porcentaje de Remoción de CF, en el fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica), en un sistema continuo	Porcentaje de Remoción de CF, en el fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica), en un sistema continuo	Porcentaje de Remoción de CF, en el fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica), en un sistema continuo
N	Válido	3	3	3
	Perdidos	0	0	0
Media		99.8400	99.9333	99.7867
Mediana		99.8000	99.9400	99.8000
Moda		99.80	99.91 ^a	99.68 ^a
Suma		299.52	299.80	299.36

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

15. Prueba de normalidad del porcentaje de remoción de los coliformes fecales en un sistema tipo *batch*

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	Gl	Sig.	Estadístico	Gl	Sig.
Porcentaje de Remoción de CF, en el fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	.235	5	.200*	.903	5	.429
Porcentaje de Remoción de CF, en el fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	.337	5	.065	.800	5	.081
Porcentaje de Remoción de CF, en el fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	.236	5	.200*	.870	5	.265

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

16. Media mediana y moda del porcentaje de remoción de los coliformes fecales en un sistema tipo *batch*

Estadísticos

		Porcentaje de Remoción de CF, en el fotobiorreactor 1 (baja carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	Porcentaje de Remoción de CF, en el fotobiorreactor 2 (mediana carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>	Porcentaje de Remoción de CF, en el fotobiorreactor 3 (alta carga hidráulica), en un sistema tipo <i>batch</i>
N	Válido	5	5	5
	Perdidos	0	0	0
Media		99.8700	99.9240	99.8380
Mediana		99.8700	99.9000	99.8400
Moda		99.84	99.90	99.87
Suma		499.35	499.62	499.19

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

17. Prueba de normalidad de la radiación solar de las estaciones La Aurora, Aurora II e INSIVUMEH, por cada día de toma de muestra en el sistema continuo

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Radiación Solar (Watts/m2) de la muestra 1, sistema continuo	.327	3	.	.872	3	.300
Radiación Solar (Watts/m2) de la muestra 2, sistema continuo	.364	3	.	.800	3	.115
Radiación Solar (Watts/m2) de la muestra 3, sistema continuo	.246	3	.	.970	3	.669

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

18. Media, mediana y moda de la radiación solar de las estaciones La Aurora, Aurora II e INSIVUMEH, por cada día de toma de muestra en el sistema continuo

Estadísticos

		Radiación Solar (Watts/m2) de la muestra 1, sistema continuo	Radiación Solar (Watts/m2) de la muestra 2, sistema continuo	Radiación Solar (Watts/m2) de la muestra 3, sistema continuo
N	Válido	3	3	3
	Perdidos	0	0	0
Media		193.5833	250.2133	288.0800
Mediana		195.3800	262.3300	290.7700
Moda		188.63 ^a	223.15 ^a	273.42 ^a
Suma		580.75	750.64	864.24

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

19. Prueba de normalidad de la radiación solar de las estaciones La Aurora, Aurora II e INSIVUMEH, por cada día de toma de muestra en el sistema tipo *batch*

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	Gl	Sig.
Radiación Solar (Watts/m2) de la muestra 1, sistema tipo <i>batch</i>	.243	3	.	.972	3	.682
Radiación Solar (Watts/m2) de la muestra 2, sistema tipo <i>batch</i>	.335	3	.	.858	3	.263
Radiación Solar (Watts/m2) de la muestra 3, sistema tipo <i>batch</i>	.289	3	.	.927	3	.478
Radiación Solar (Watts/m2) de la muestra 4, sistema tipo <i>batch</i>	.199	3	.	.995	3	.864
Radiación Solar (Watts/m2) de la muestra 5, sistema tipo <i>batch</i>	.307	3	.	.904	3	.397

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.

20. Media, mediana y moda de la radiación solar de las estaciones La Aurora, Aurora II e INSIVUMEH, por cada día de toma de muestra en el sistema tipo *batch*

Estadísticos

		Radiación Solar (Watts/m2) de la muestra 1, sistema tipo <i>batch</i>	Radiación Solar (Watts/m2) de la muestra 2, sistema tipo <i>batch</i>	Radiación Solar (Watts/m2) de la muestra 3, sistema tipo <i>batch</i>	Radiación Solar (Watts/m2) de la muestra 4, sistema tipo <i>batch</i>	Radiación Solar (Watts/m2) de la muestra 5, sistema tipo <i>batch</i>
N	Válido	3	3	3	3	3
	Perdidos	0	0	0	0	0
	Media	256.6133	211.4500	286.9633	205.6633	256.5933
	Mediana	255.1000	216.3200	286.6300	205.3800	258.1900
	Moda	249.58 ^a	198.63 ^a	286.10 ^a	202.36 ^a	251.56 ^a
	Suma	769.84	634.35	860.89	616.99	769.78

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

Fuente: elaboración propia, empleado programa SPSS.