

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL	VIGENCIA: 2017-11-16
	REPOSITORIO INSTITUCIONAL	PAGINA: 1 de 7

16.

FECHA	lunes, 9 de diciembre de 2019
--------------	-------------------------------

Señores
UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
 BIBLIOTECA
 Girardot-Cundinamarca

UNIDAD REGIONAL	Seccional Girardot
TIPO DE DOCUMENTO	Trabajo De Grado
FACULTAD	Ciencias Agropecuarias
NIVEL ACADÉMICO DE FORMACIÓN O PROCESO	Pregrado
PROGRAMA ACADÉMICO	Ingeniería Ambiental

El Autor(Es):

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS	No. DOCUMENTO DE IDENTIFICACIÓN
Pedreros Cruz	María Camila	1.106.899.056
Rodríguez Pinzón	Duván Julián	1.106.899.512

Director(Es) y/o Asesor(Es) del documento:

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS
Suárez Pulido	Dalia Xiomara

TÍTULO DEL DOCUMENTO

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca
 Teléfono (091) 8281483 Línea Gratuita 018000976000
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
 NIT: 890.680.062-2

*Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
 Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional*





MACROPROCESO DE APOYO
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL
REPOSITORIO INSTITUCIONAL

CÓDIGO: AAAR113
VERSIÓN: 3
VIGENCIA: 2017-11-16
PAGINA: 2 de 7

EVALUACIÓN DE UN CULTIVO MIXTO DE MICROALGAS PARA LA REMOCIÓN DE NITRATOS (NO_3^-) Y FOSFATOS (PO_4^{3-}) EN AGUAS RESIDUALES PORCINAS.

SUBTÍTULO

(Aplica solo para Tesis, Artículos Científicos, Disertaciones, Objetos Virtuales de Aprendizaje)

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

Aplica para Tesis/Trabajo de Grado/Pasantía

Ingeniero Ambiental

AÑO DE EDICIÓN DEL DOCUMENTO

09/12/2019

NÚMERO DE PÁGINAS

75

DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS

(Usar 6 descriptores o palabras claves)

ESPAÑOL

INGLÉS

1. Aguas residuales	Wastewater
2. Microalgas	Microalgae
3. Eficiencia	Efficiency
4. Nitratos	Nitrates
5. Fosfatos	Phosphates
6. Tratamientos	Treatments

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca
Teléfono (091) 8281483 Línea Gratuita 018000976000
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
NIT: 890.680.062-2

Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL	VIGENCIA: 2017-11-16
	REPOSITORIO INSTITUCIONAL	PAGINA: 3 de 7

RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS
(Máximo 250 palabras – 1530 caracteres, aplica para resumen en español):

Las aguas residuales producto de la actividad porcícola, están contaminadas principalmente por materia orgánica y elevadas concentraciones de nitrógeno y fósforo. Por lo anterior, este trabajo evaluó la remoción de Nitratos (NO_3^-) y Fosfatos (PO_4^{3-}) en un cultivo mixto de microalgas como alternativa para el tratamiento de aguas residuales porcinas. Se estableció un cultivo de microalgas a partir de muestras obtenidas en la quebrada la Cajita del municipio de Melgar, Tolima. Se realizó una estandarización del cultivo por medio del uso de diferentes fertilizantes, siendo Irricol el más eficiente para el crecimiento algal. Se evaluaron dos diseños de sistemas uno abierto tipo pecera (TP) y uno tipo botellas (TB). A estos diseños se les evaluó los periodos de luz/oscuridad; donde cuatro estuvieron expuestos a la luz durante 24 horas, mientras que los cuatro restantes tuvieron disponibilidad de luz únicamente durante 12 horas, a todos los sistemas se les proporciono aireación constante. Se usaron tratamientos con agua residual porcina diluida al 50% y agua sin diluir 100%. Los análisis de las muestras se realizaron a través de las técnicas de cromatografía iónica para nitratos y fosfatos. Mediante el uso de un cultivo mixto de microalgas la remoción del día 8 al día 15 para nitratos en el tratamiento de los sistemas abierto TP y TB oscilaron entre 9,46% a 81,5%; mientras que para los fosfatos los valores de remoción fueron del 23,8% al 55,7%. Finalmente, la implementación de los sistemas abiertos TP, con condiciones de luz expuesta las 24 horas y 100% agua residual porcina, son los más eficientes para la depuración de contaminantes.

The wastewater produced by the pig activity is mainly contaminated by organic matter and high concentrations of nitrogen and phosphorus. Therefore, this work evaluated the removal of Nitrates (NO_3^-) and Phosphates (PO_4^{3-}) in a mixed microalgae culture as an alternative for the treatment of swine wastewater. A microalgae culture was established from samples obtained in the La Cajita ravine in the municipality of Melgar, Tolima. A standardization of the crop was carried out through the use of different fertilizers, Irricol being the most efficient for algal growth. Two designs of one open fish tank (TP) and one bottle (TB) type systems were evaluated. These designs were evaluated light / dark periods; where four were exposed to light for 24 hours, while the remaining four had light availability only for 12 hours, all systems were provided with constant aeration. Treatments with 50% diluted swine wastewater and 100% undiluted water were used. Sample analyzes were performed through ion chromatography techniques for nitrates and phosphates. Through the use of a mixed culture of microalgae the removal from day 8 to day 15 for nitrates in the treatment of the open TP and TB systems ranged from 9.46% to 81.5%; while for phosphates the removal values were from 23.8% to 55.7%. Finally, the implementation of open TP systems, with 24-hour exposed light conditions and 100% swine wastewater, are the most efficient for pollutant clearance.





MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
	PAGINA: 4 de 7

AUTORIZACION DE PUBLICACIÓN

Por medio del presente escrito autorizo (Autorizamos) a la Universidad de Cundinamarca para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mí (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que, en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autoriza a la Universidad de Cundinamarca, a los usuarios de la Biblioteca de la Universidad; así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado una alianza, son:

Marque con una "X":

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
1. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer.	x	
2. La comunicación pública por cualquier procedimiento o medio físico o electrónico, así como su puesta a disposición en Internet.	X	
3. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previa alianza perfeccionada con la Universidad de Cundinamarca para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones.	X	
4. La inclusión en el Repositorio Institucional.	x	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

Para el caso de las Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, de manera complementaria, garantizo(garantizamos) en mi(nuestra) calidad de estudiante(s) y por ende autor(es) exclusivo(s), que la Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi(nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
	PAGINA: 5 de 7

(aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestra) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "*Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores*", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Universidad de Cundinamarca está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: (Para Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía):

Información Confidencial:

Esta Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de la investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado. **SI** ___ **NO** **x**.

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

LICENCIA DE PUBLICACIÓN

Como titular(es) del derecho de autor, confiero(erimos) a la Universidad de Cundinamarca una licencia no exclusiva, limitada y gratuita sobre la obra que se integrará en el Repositorio Institucional, que se ajusta a las siguientes características:

a) Estará vigente a partir de la fecha de inclusión en el repositorio, por un plazo de 5 años, que serán prorrogables indefinidamente por el tiempo que dure el derecho patrimonial del autor. El autor podrá dar por terminada la licencia solicitándolo a la

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca
Teléfono (091) 8281483 Línea Gratuita 018000976000
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
NIT: 890.680.062-2

Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional



Universidad por escrito. (Para el caso de los Recursos Educativos Digitales, la Licencia de Publicación será permanente).

b) Autoriza a la Universidad de Cundinamarca a publicar la obra en formato y/o soporte digital, conociendo que, dado que se publica en Internet, por este hecho circula con un alcance mundial.

c) Los titulares aceptan que la autorización se hace a título gratuito, por lo tanto, renuncian a recibir beneficio alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente licencia y de la licencia de uso con que se publica.

d) El(Los) Autor(es), garantizo (amos) que el documento en cuestión, es producto de mi (nuestra) plena autoría, de mi (nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy (somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro(aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

e) En todo caso la Universidad de Cundinamarca se compromete a indicar siempre la autoría incluyendo el nombre del autor y la fecha de publicación.

f) Los titulares autorizan a la Universidad para incluir la obra en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

g) Los titulares aceptan que la Universidad de Cundinamarca pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

h) Los titulares autorizan que la obra sea puesta a disposición del público en los términos autorizados en los literales anteriores bajo los límites definidos por la universidad en el "Manual del Repositorio Institucional AAAM003"

i) Para el caso de los Recursos Educativos Digitales producidos por la Oficina de Educación Virtual, sus contenidos de publicación se rigen bajo la Licencia Creative Commons: Atribución- No comercial- Compartir Igual.





j) Para el caso de los Artículos Científicos y Revistas, sus contenidos se rigen bajo la Licencia Creative Commons Atribución- No comercial- Sin derivar.



Nota:

Si el documento se basa en un trabajo que ha sido patrocinado o apoyado por una entidad, con excepción de Universidad de Cundinamarca, los autores garantizan que se ha cumplido con los derechos y obligaciones requeridos por el respectivo contrato o acuerdo.

La obra que se integrará en el Repositorio Institucional, está en el(los) siguiente(s) archivo(s).

Nombre completo del Archivo Incluida su Extensión (Ej. PerezJuan2017.pdf)	Tipo de documento (ej. Texto, imagen, video, etc.)
1. EVALUACIÓN DE UN CULTIVO MIXTO DE MICROALGAS PARA LA REMOCIÓN DE NITRATOS (NO ₃ ⁻) Y FOSFATOS (PO ₄ ⁻³) EN AGUAS RESIDUALES PORCINAS.pdf	Texto, Ilustraciones, Graficas, Tablas.

En constancia de lo anterior, Firmo (amos) el presente documento:

APELLIDOS Y NOMBRES COMPLETOS	FIRMA (autógrafo)
Pedrerros Cruz María Camila Rodríguez Pinzón Duván Julián	

21.1-51.20.

**EVALUACIÓN DE UN CULTIVO MIXTO DE MICROALGAS PARA LA
REMOCIÓN DE NITRATOS (NO₃⁻) Y FOSFATOS (PO₄⁻³) EN AGUAS
RESIDUALES PORCINAS**

MARIA CAMILA PEDREROS CRUZ

DUVÁN JULÍAN RODRÍGUEZ PINZÓN

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

GIRARDOT

2019

**EVALUACIÓN DE UN CULTIVO MIXTO DE MICROALGAS PARA LA
REMOCIÓN DE NITRÓGENO (N) Y FOSFORO (P) EN AGUAS RESIDUALES
PORCINAS**

MARIA CAMILA PEDREROS CRUZ

DUVÁN JULIÁN RODRÍGUEZ PINZÓN

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Ambiental

Directora Trabajo de Grado:

DALIA XIOMARA SUAREZ PULIDO

Bióloga

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

GIRARDOT

2019

TABLA DE CONTENIDO

Agradecimientos	6
1. RESUMEN EJECUTIVO.....	7
2. INTRODUCCIÓN.....	9
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
4. JUSTIFICACIÓN.....	14
5. OBJETIVOS.....	16
5.1. Objetivo general.....	16
5.2. Objetivos específicos.....	16
6. MARCO REFERENCIAL.....	17
6.1. Marco teórico.....	17
6.2. Marco conceptual.....	21
6.2.1. Aguas residuales.....	21
6.2.2. Ensamblaje algal.....	22
6.2.3. Fitodegradación.....	22
6.2.4. Fitorremediación.....	22
6.2.5. Fotoperíodo.....	22
6.2.6. Grupos funcionales del fitoplancton.....	22
6.2.7. Microalga.....	23
6.2.8. Organismos fotoautótrofos.....	23
6.2.9. Paradoja del plancton.....	23
6.2.10. Porcicultura.....	23
6.2.11. Sistemas abiertos.....	24
6.2.12. Sistemas cerrados.....	24
6.3. Marco legal.....	24
7. ESTADO DEL ARTE.....	26
8. DISEÑO METODOLÓGICO.....	28
8.1. Toma de muestras:.....	28
8.2. Estandarización del cultivo de microalgas.....	29
8.3. Determinación de especies incluidas en el cultivo mixto.....	30
8.4. Toma de muestras de aguas residuales porcinas.....	30

8.5. Tratamiento de aguas residuales porcinas	31
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
9.1. Estandarización del medio de cultivo para microalgas.....	35
9.2. Determinación de las principales familias y géneros del cultivo mixto de microalgas	44
9.3. Remoción de NO_3^- en el sistema abierto TB	51
9.4. Remoción de NO_3^- en el sistema abierto TB	55
9.5. Remoción de PO_4^{3-} en el sistema abierto TP	58
9.6. Remoción de PO_4^{3-} en el sistema abierto TB.....	59
9.7. Análisis estadístico	61
10. CONCLUSIONES.....	63
11. RECOMENDACIONES	64
12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

Contenido de Tablas

Tabla 1: Marco legal.....	24
Tabla 2: Tratamiento	34
Tabla 3: Medios de cultivos	35
Tabla 4: Soluciones modificadas del medio III (Soueka, 1960)	40
Tabla 5: Identificación de especies de microalgas	44
Tabla 6: Concentración y porcentajes de remoción.....	60

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1: Ubicación Quebrada La Cajita	28
Ilustración 2: Muestreo de microalgas.....	29
Ilustración 3: Toma de muestra de agua residual porcina	31
Ilustración 4: Sistemas abiertos TP y TB para cultivo de microalgas	32
Ilustración 5: Fotoperiodo y concentración de los sistemas	33
Ilustración 6: Muestras para análisis	34
Ilustración 7: Medio de cultivo I y II	39
Ilustración 8: Soluciones para alimento del cultivo.....	42
Ilustración 9: Fertilizante Irricol.....	43
Ilustración 10: Análisis estadístico – Paired tests.....	62

Tabla de gráficas

Gráfica 1: Remoción de NO_3^- – sistema abierto TB.....	51
Gráfica 2: Remoción de NO_3^- – sistema abierto TB.....	55
Gráfica 3: Remoción de PO_4^{3-} – sistema abierto TP	58
Gráfica 4: Remoción de PO_4^{3-} – sistema abierto TB	59

A nuestros padres

Agradecimientos

Queremos agradecer principalmente a Dios por habernos guiado y acompañado en todo el proceso de nuestra investigación.

A nuestros padres por su apoyo incondicional, por darnos la credibilidad en que esto era posible y por ser la base fundamental en nuestro proceso de formación.

A nuestra directora de Trabajo de Grado, Dalia Suarez, que en un primer instante confió en nosotros para el desarrollo de esta investigación, pues gracias a su confianza, dedicación, apoyo, interés, capacidad de orientar nuestras ideas y paciencia logramos que todo el trabajo investigativo fuera un éxito.

Finalmente, agradecemos al Fondo Ganadero del Tolima S.A., que desde un principio mostraron colaboración y disposición absoluta para obtener las muestras de agua residual requerida para los análisis. Además, agradecemos a la Universidad de Cundinamarca por brindarnos el espacio académico para realizar la fase experimental del proyecto y brindarnos la oportunidad de formarnos como profesionales.

1. RESUMEN EJECUTIVO

Los recursos hídricos están expuestos a graves amenazas originadas por las actividades industriales, y la falta de sistemas de tratamiento para las aguas residuales, ocasionando desechos líquidos que impactan de forma negativa el ambiente. Las aguas residuales producto de la actividad porcícola, están contaminadas principalmente por materia orgánica y elevadas concentraciones de nitrógeno (N) y fósforo (P). La actividad porcícola es la encargada de la cría y reproducción; incluyendo el cuidado alimenticio y sanitario para la producción de cerdos y por lo tanto las aguas residuales de esta actividad provienen de las excretas, orina y el agua de lavado de estos animales. Por lo anterior, este trabajo evaluó la remoción de Nitratos (NO_3^-) y Fosfatos (PO_4^{3-}) en un cultivo mixto de microalgas como alternativa para el tratamiento de aguas residuales porcinas. Se estableció un cultivo de microalgas a partir de muestras obtenidas en la quebrada la Cajita del municipio de Melgar, Tolima. Se realizó una estandarización del cultivo por medio del uso de diferentes fertilizantes, siendo Irricol el más eficiente para el crecimiento algal. Se evaluaron dos diseños de sistemas uno abierto tipo pecera (TP) y uno tipo botellas (TB), con un total de ocho replicas para los dos sistemas. A estos diseños se les evaluó los periodos de luz/oscuridad; donde cuatro estuvieron expuestos a la luz durante 24 horas, mientras que los cuatro restantes tuvieron disponibilidad de luz únicamente durante 12 horas, a todos los sistemas se les proporcionó aireación constante. Cada recipiente contenía 3,5 litros de mezcla (2,5 litros de agua residual y 1 litro de microalgas); correspondiendo al 71,4% de agua residual y 28,6% de microalga en las muestras, usando tratamientos con agua residual porcina diluida al 50% y agua sin diluir 100%. Los análisis de las muestras se realizaron en el Laboratorio AGQLabs PRODYCON a través de las técnicas de cromatografía iónica

para nitratos y fosfatos. Mediante el uso de un cultivo mixto de microalgas la remoción del día 8 al día 15 para nitratos en el tratamiento de los sistemas abierto TP y TB oscilaron entre 9,46% a 81,5%; mientras que para los fosfatos los valores de remoción fueron del 23,8% al 55,7%. Finalmente, la implementación de los sistemas abiertos TP, con condiciones de luz expuesta las 24 horas y 100% agua residual porcina, son los más eficientes para la depuración de contaminantes.

2. INTRODUCCIÓN

La cantidad total de carbono (C) en la biosfera terrestre es de 2767 gigatonelada (Gt), y las fracciones de C en la materia orgánica de la planta, la hojarasca y el suelo son del 19%, 4% y 77%. La cantidad total de N es de 135 Gt, con aproximadamente el 94% almacenado en el suelo, 5% en la biomasa viva de la planta y 1% en la basura. La cantidad total de P es de 17 Gt en la biosfera terrestre, el 33% se almacena en la materia orgánica del suelo si se modela la mineralización bioquímica del mismo compuesto, o 31 Gt con 67% en materia orgánica del suelo (Wang, 2010). Adicionalmente, se estima que anualmente en Colombia se vierten 117.000 toneladas de nitrógeno total y 29.400 toneladas de fósforo a los sistemas hídricos, situación que afecta negativamente la riqueza hídrica del país incrementando los procesos de eutrofización en los cuerpos de agua y reduciendo la calidad del recurso para su uso en otras actividades (MADS, 2016).

Las microalgas son organismos unicelulares que utilizan la luz solar como fuente de energía principal y obtienen el carbono de moléculas inorgánicas como el dióxido de carbono (CO_2), por lo cual se denominan fotoautótrofos. Las microalgas para su crecimiento requieren de CO_2 , agua, luz, y sales minerales. Sus principales requerimientos nutricionales son alguna fuente de nitrógeno como nitrato o amonio y una fuente de fósforo que suele ser el fosfato (Fernandez, 2014).

Estos microorganismos, se caracterizan por transformar la materia inorgánica en materia orgánica. Las microalgas asimilan el nitrógeno cuando toman el ion amonio (NH_4^+) y lo transforman en nitrógeno gaseoso (N_2), permitiendo que esto se convierta en materia prima para la producción de bioenergía y de esta manera generar biomasa a partir del CO_2

(García M. d., 2013). El fósforo es un nutriente de las plantas que permite el crecimiento de las microalgas en las aguas superficiales, este fósforo es suministrado como fosfato o fosfatos ácidos (PO_4^{-3} , HPO_4^{-2}) que se encuentran en las aguas residuales o cuando se vierten directamente a las aguas (Pütz, 2010).

Las características de las aguas residuales porcinas procedente de residuos de limpieza, sobrantes de alimentos y excretas de animales (heces y orina), presenta concentraciones orgánicas altas y en aumento, según el tamaño de la granja. En granjas de hasta 2500 cerdos la Demanda Química Orgánica (DQO) está entre 3478 y 9300 mg/L; en granjas de 2500 a 8000 cerdos DQO entre 19,344 y 38,544 mg/L y en granjas con más de 8000 cerdos DQO entre 34,310 y 40,498 mg/L, presentando concentraciones para NO_3^- de 20 a 129 mg/L y para PO_4^{-3} de 22 a 280 mg/L (Romero, 2018). La contaminación proveniente de las actividades porcícolas permite que se fomente la eutrofización o enriquecimiento de nutrientes en el agua, generando el aumento de la concentración de compuestos de N y P, que provoca un crecimiento acelerado de las algas o las plantas acuáticas superiores, causando trastornos negativos en el equilibrio de las poblaciones biológicas presentes en el medio acuático; además, produce la acidificación de suelos y aguas por la reacción ácida de los distintos compuestos como el ácido nítrico, sulfúrico y el hidrogeno que producen variaciones del pH, afectando al ecosistema en general (GARCIA, 2010). Una de las dificultades de los sistemas de tratamiento de agua residual, son los altos costos, tanto de la operación y el mantenimiento del sistema. Además, es necesario contar con un área de terreno que cumpla con los cálculos de diseño de la planta para la ejecución del tratamiento antes de su vertimiento a los cuerpos de agua superficial.

Por lo anterior, se han considerado a las microalgas como especies importantes en la remoción de nitrógeno (N) y fosforo (P) en las aguas residuales, porque tienen la capacidad de asimilar estos contaminantes como nutrientes que ayudan a su crecimiento y a la generación de nuevas células (Raouf, Homaidan, & Ibraheembc, 2012).

Este trabajo pretendió evaluar la eficiencia de las microalgas provenientes de la quebrada La Cajita del municipio de Melgar, Tolima en la remoción de N y P en aguas residuales porcinas, controlando variables como el periodo de luz y el tipo tratamiento en el sistema.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel global más de 1000 millones de toneladas de aguas residuales son vertidas anualmente al agua subterránea, ríos, lagos y océanos, contaminándolos con metales pesados, disolventes, aceites, grasas, detergentes, ácidos, sustancias radioactivas, fertilizantes, pesticidas u otros productos químicos que generan un desequilibrio entre la oferta; la creciente demanda del recurso hídrico debido al crecimiento poblacional y la presión sobre este recurso (Rodríguez H. , 2015). Ahora bien, la falta de sistemas de tratamiento de aguas residuales ocasiona grandes desechos de agua contaminada, produciendo el deterioro del ecosistema y el ambiente.

Es por ello que surge la necesidad de implementar sistemas de tratamiento que permitan reducir la carga de contaminante de los vertimientos, de tal manera que los cuerpos de agua no superen su capacidad de concentración ni se vean afectados por procesos de eutrofización. Por consiguiente, se ha identificado que el sector pecuario es el mayor productor de aguas residuales a los cuerpos de agua, al no realizar ningún tratamiento antes de su disposición en fuentes de agua superficial.

La producción comercial de cerdos se ha intensificado de manera significativa en las últimas décadas debido a su mayor consumo (FAO, Cerdos y la producción animal, 2014). Las granjas porcinas representan una fuente importante de contaminación de los recursos hídricos por el incremento de microorganismos patógenos (Coliformes fecales) y nutrientes (N y P) que producen la eutrofización de los cuerpos de agua (García J. R., 2013). La contaminación del subsuelo se da por el nitrógeno y fósforo contenido en las excretas, cuando son regados con estas aguas (Gil, 2010). En las granjas porcícolas no hay

sistemas de tratamiento que permitan reducir la carga contaminante del vertimiento y esto se atribuye principalmente a que suponen una inversión elevada, sumada a los costos de operación y mantenimiento, implicando que la disposición final de los efluentes sea directamente a los cuerpos de agua (Sociedad de Agricultores de Colombia - SAC, 2002).

Teniendo en cuenta el planteamiento del problema del proyecto se busca responder la siguiente pregunta de investigación: ¿Es eficiente la remoción de N y P en aguas residuales porcinas empleando un cultivo mixto de microalgas?

4. JUSTIFICACIÓN

Generalmente la incorrecta disposición de las aguas residuales porcinas sin ningún tratamiento provoca impactos negativos en el aire, agua y suelo. Es común que en las granjas se presente sobrepoblación de animales en áreas reducidas, dificultando que el suelo absorba la cantidad de residuos que éstos generan, dejando como resultado graves problemas en el manejo de los mismos. El 82 % del agua que ingresa en las granjas sale como agua residual, asociada a las heces, orina, alimento desperdiciado y otros materiales, que se arrastran a través de los drenajes (Alfonzo Gutiérrez, 2015).

En la producción de cerdos se generan descargas de alta concentración principalmente por la producción, alimentos con alto contenido de proteína que no son asimilados por el cerdo y a un mal manejo del agua en las granjas (Hernández, 2000). En promedio las características de las aguas residuales por excretas de cerdos presenta los siguientes valores: N total entre 752 a 977 mg/L, P total entre 79 a 81 mg/L, DQO entre 900 a 60,000 mg/L y DBO entre 590 a 25,000 mg/L (Romero, 2018).

A nivel nacional existen 1.518 granjas porcícolas, presentando un mayor índice en el sistema productivo, que consiste en las etapas de cría, levante y ceba; en las regiones: Andina 35,51%, Occidental 28,06% y finalmente la región Central 22,92% (DANE, 2003). A su vez, en el departamento del Tolima se encuentran 12 empresas dedicadas a la cría de ganado porcino. Estas empresas se encuentran ubicadas en diferentes municipios del departamento; siendo Ibagué la ciudad donde se reportan 5 empresas, Líbano 3, Armero 1, Cajamarca 1, Guaduas 1 y Planadas 1 (Empresite, 2015).

Evidenciando esta problemática, surgió la necesidad de buscar alternativas para el tratamiento de las aguas residuales porcinas que permita reducir las altas concentraciones de contaminantes. Con el desarrollo del proyecto se buscó que el afluyente obtenido tenga características óptimas ya sea para ser vertido a un cuerpo de aguas superficial o para reutilizar en sistemas de riego, de tal forma que se reduzcan los impactos generados tanto en el recurso hídrico como en el suelo.

El uso de microalgas se posiciona como un sistema de bajo consumo de energía, alta eficiencia en la remoción de contaminantes y productos de biomasa para la producción de biocombustibles, alimentos, cosméticos y biofertilizantes, entre otros.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Evaluar la remoción de N y P en un cultivo mixto de microalgas como alternativa para el tratamiento de aguas residuales porcinas.

5.2. Objetivos específicos

- Determinar las principales familias y géneros del cultivo mixto de microalgas.
- Caracterizar la eficiencia del sistema abierto tipo pecera y tipo botella sobre la remoción de N y P de las microalgas.
- Evaluar el efecto de los periodos luz-oscuridad sobre las microalgas para la remoción de los contaminantes y las condiciones óptimas para el cultivo.

6. MARCO REFERENCIAL

6.1. Marco teórico

Pérez (2015) señala que “las microalgas son organismos unicelulares eucariotas fotosintéticos capaces de transformar la energía luminosa en energía química con una eficiencia cuatro veces superior a la de las plantas. Su importancia radica en su papel como productores primarios de la cadena trófica, que las constituyen en las primeras formadoras de materia orgánica. Por su tamaño reducido y variado (5–50 μm en promedio) son de fácil captura y digestión por multitud de organismos que se alimentan en forma directa del fitoplancton” (p. 13).

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos procariontes y eucariotas, capaces de utilizar nutrientes como el dióxido de carbono (CO_2), agua y energía solar para producir biomasa. La biomasa de las algas contiene tres componentes principales: las proteínas, cuyo porcentaje sobre el peso seco puede variar del 46-63%; los carbohidratos, con porcentajes generalmente entre el 10-17%; y los lípidos, con porcentajes que varían del 4-61% (Rhodes, 2009).

Las microalgas se encuentran en ambientes acuáticos que con frecuencia se ven afectados por vertimientos de diferentes sustancias como excreciones humanas o de animales y productos químicos que incrementan la concentración de elementos como nitrógeno y fósforo que afectan el equilibrio de los ecosistemas por la eutrofización y la contaminación en general (EPA, Contaminación por nutrientes, 2016)

De acuerdo a lo anterior, es importante destacar que para el desarrollo de un cultivo mixto se pueden emplear dos tipos de sistemas: el sistema abierto y el sistema en fotobiorreactores. Según (García, 2008) los sistemas abiertos son los más comunes, pues se comprenden tanto de medios naturales, como lagunas y estanques, como artificiales con variedad de diseños (p. 161).

Respecto a este tipo Posten, 2009 y colaboradores plantean que el más utilizado es el High Rate Algal Ponds – HRAP (Estanques de Algas de Alta Tasa) que cuentan con una profundidad de entre 15 a 30 cm, dividido por un muro central formando 2 canales. El cultivo circula mediante paletas situadas en uno de los canales. Este sistema es de los más rentables, ya que puede ser utilizado para el tratamiento de aguas residuales de distintas fuentes, lo que disminuye los costos por requerimientos nutricionales (p. 5).

A su vez para los sistemas abiertos se tiene un control de los parámetros, la Temperatura adecuada de 28 a 35 °C; pero en este sistema no es posible controlar este parámetro, por lo tanto, se cubre los estanques con plásticos. El pH indicado es de 8 y el mecanismo de paletas permite una eficiente mezcla permitiendo la exposición de las células a la luz (Grobbelaar, 2004).

En los sistemas cerrados el autor (Contreras, 2003) cita que estos sistemas “se lleva a cabo mediante reactores cerrados tubulares, y es particularmente atractivo por la robustez del sistema y la reducción del riesgo de contaminación” (p, 1).

Las microalgas absorben nutrientes esenciales en la formación de biomasa (Markou, 2011), incorporando el amonio, nitrato y fósforo por absorción directa. El nitrógeno forma parte de las proteínas y nucleótidos de la biomasa. Suministrado como nitrato (NO_3^-) o

amonio (NH_4^+). El fósforo es suministrado como fosfato (PO_4^{3-}) que forma parte de importantes intermedios metabólicos, lípidos, enzimas y multitud de especies bioquímicas. Las principales formas en que se encuentra el nitrógeno en las aguas residuales son amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-) y NO_3^- , mientras que el fosfato se presenta como PO_4^{3-} (ortofosfato) (Hammouda, 2012). Estos procesos se basan en que las microalgas antes de empezar a crecer, consumen nitrógeno y fósforo, cuando se cultivan en aguas residuales acumulan nutrientes en su interior; la asimilación de nutrientes comienza antes del crecimiento a una velocidad mayor que la de generación de biomasa. Así, la eliminación inicial de nutrientes previa se da al crecimiento de biomasa que tiene lugar en la oscuridad a velocidades similares que en presencia de luz (Cádiz, 2012).

En el tratamiento de aguas residuales se busca eliminar la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos, nutrientes, coliformes y toxicidad (Dominic, 2009). En condiciones apropiadas, las microalgas poseen una capacidad depuradora conocida como fitorremediación (Prajapati, 2013), definida como el uso de macroalgas y/o microalgas para la eliminación o biotransformación de contaminantes, desde aguas residuales (Maity, 2014).

Las aguas residuales de las porquerizas están formadas por heces fecales y orina mezcladas con el material utilizado como cama, residuos de alimento, polvo, otras partículas y una cantidad variable de agua proveniente de las labores de limpieza y por pérdidas desde los bebederos. La orina representa aproximadamente el 45% de la excreta y las heces el 55%. El contenido de humedad de la excreta es de alrededor del 88% y el contenido de materia seca es del 12%. Cerca del 90% de los sólidos se excretan en las heces; la orina contiene el 10% de los sólidos (PORCICULTORES, 2002).

Acerca del nitrógeno en las aguas residuales de porquerizas, este es el elemento de fertilización más importante debido a que el alimento suministrado a los cerdos contiene volúmenes altos de proteína. En las excretas, el nitrógeno total se compone principalmente de nitrógeno orgánico y amoniacal. Del nitrógeno total producido, el 60% está en forma amoniacal y el 40% en forma orgánica. La gran mayoría del nitrógeno de las heces fecales es orgánico mientras que la totalidad de la orina es amoniacal. En el proceso de lavado del tratamiento porcino, el fósforo se compone principalmente de fosfatos que presenta una carga contaminante de 116, 2 mg/L en las aguas porcinas (Arias, 2010). En cuanto a la biomasa algal, tiene una amplia utilización que va desde biofertilizante a producción de biocombustibles, también para alimentación animal y humana, para la obtención de productos biotecnológicos con uso en medicina, farmacia y/o cosmética (Gomez, 2007).

Phycoremediation es un proyecto que nace de la alianza entre CORE BIOTECH (Colombia) y Phycospectrum (India) que instaló exitosamente un sistema integrado de tanques de 20kL (kilolitro) en la planta de Pacific Rubiales (cerca de Bogotá). Involucra el uso de algas en el proceso de remoción de contaminantes tales como xenobióticos que son usados como fuente nutricional (son degradados enzimáticamente) y CO₂ proveniente del aire contaminado a través de la fotosíntesis. Este proyecto es desarrollado en diversos ambientes, por lo que es llevado a cabo a través de tres etapas que conllevan a la implementación de la tecnología. La primera de ellas consiste en estudios de laboratorio, seguido de pruebas piloto en algas y la comercialización de éstas a gran escala, los resultados superan el 90% de biorremediación (Montaño, 2015).

En Barrancabermeja (Colombia), se realizó un estudio para determinar cuál fue el efecto del cultivo de la microalga *Chlorella* sp (*Chlorella vulgaris*). Como método de tratamiento

in vitro de aguas residuales, con el fin de remover nitratos y fosfatos (Tafur & Estrada, 2015). El valor de remoción en cuanto a nitrógeno fue de 64,6% y de fosfatos 87%.

Otra de las investigaciones realizadas en Colombia por Arias y colaboradores, tuvo como propósito evaluar la reducción de la carga contaminante mediante sistemas económicos de tratamiento basado en un ensayo piloto de fitorremediación en las granjas porcícolas. Los porcentajes de remoción de contaminantes obtenidos por este sistema de tratamiento fue superior al 90% de nitrógeno y de fósforo un 90% (Sergio Arias, 2010).

Al mismo tiempo, Cartagena y colaboradores en Bogotá en el año 2010 realizaron una investigación acerca de la eficiencia de la microalga *Chlorella vulgaris* para la remoción de contaminantes orgánicos haciendo énfasis en la disminución de aceites y grasas. Con este estudio se buscó un aporte potencial a la investigación de microalgas nativas de Colombia para el biotratamiento de aguas residuales, siendo económicos y eficientes con respecto a los tratamientos convencionales. Se realizaron tomas de muestras y caracterización de la misma (DQO, oxígeno disuelto, aceites y grasas, pH) antes del biotratamiento. Finalmente se analizaron los resultados, la disminución de DQO para estos tratamientos registro entre 35% y 76% con respecto al inicial registrado, la disminución de aceites y grasas para estos tratamientos registro entre el 16% y el 80% con respecto al inicial registrado (Cartagena, Malo, 2010).

6.2. Marco conceptual

6.2.1. Aguas residuales. Son aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo,

antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado - Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA, 2014).

6.2.2. Ensamblaje algal. Se refiere a la identificación de comunidades, su asociación taxonómica y de cómo están dispuestas en el ecosistema. A su vez, este ensamble se relaciona con la estratificación o disposición del alga en una columna de agua que se ve afectada por diferentes variaciones (precipitaciones), de tal forma que pierde su formación.

6.2.3. Fitodegradación. Es un proceso biológico en el cual se aprovecha la efectividad de ciertas plantas al absorber, almacenar, metabolizar y degradar contaminantes ambientales, como metales pesados, compuestos derivados del petróleo y compuestos orgánicos (Jimenez, 2014).

6.2.4. Fitorremediación. Hace referencia al aprovechamiento de la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos como: metales pesados, metales radioactivos, compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo (Angélica Evelin Delgadillo Lopez, 2011).

6.2.5. Fotoperíodo. Son procesos de especies vegetales que regulan sus funciones biológicas como la reproducción y el crecimiento, que a través de los cambios de iluminación por el día y la noche que reciben las plantas pueden modificar su germinación (Alberto, 2009).

6.2.6. Grupos funcionales del fitoplancton. Requieren de una adaptación con el fin de determinar la afinidad entre el fósforo o el dióxido de carbono, para establecer diferentes condiciones externas en su desarrollo (silicio o luz). Teniendo en cuenta lo anterior, es

preciso mencionar que un alga cuando presenta condiciones óptimas de desarrollo, su proceso de crecimiento es exitoso. Por otro lado, cuando un hábitat se ve limitado por factores como luz, C y N, es probable que estas especies se adapten para poder funcionar en el medio en el que se encuentra (Reynolds, 2002).

6.2.7. Microalga. El término microalga está ligado al desarrollo biotecnológico; éste se refiere a aquellos microorganismos que contiene clorofila y otros pigmentos fotosintéticos, capaces de realizar fotosíntesis. Entre las microalgas se incluyen organismos con dos tipos celulares: cianobacterias, que tienen estructuras celular procariota, y las restantes microalgas con estructura celular eucariota (Luna, 2007).

6.2.8. Organismos fotoautótrofos. Son seres que, para sintetizar sus biomoléculas, utilizan como fuente de carbono el CO₂, y como fuente de energía la luz solar. A este grupo pertenecen: las plantas, las algas, las bacterias fotosintéticas del azufre, cianofíceas (Lopez, 2011).

6.2.9. Paradoja del plancton. Es considerada como la situación de un conjunto limitado de recursos permiten que vivan una población amplia de organismos planctónicos, esta se deriva de la Ley de Gause, que establece el principio de competitividad cuando dos especies compiten por un mismo recurso, de modo que, solo uno de ellos sobrevivirá (Hutchinson, 1961).

6.2.10. Porcicultura. Es una de las áreas ganaderas que se encarga de la crianza de los cerdos con fines industriales, es una de las actividades pecuarias que posee diferentes sistemas de producción enfocados a diversos productos para el mercado (Eva María Montero López, 2015).

6.2.11. Sistemas abiertos. Son piscinas expuestas al aire libre en las que se llenan de agua y se suministran nutrientes para acelerar el metabolismo y la reproducción de las microalgas, el rendimiento de producción es bajo, sin embargo, es un método más económico.

6.2.12. Sistemas cerrados. Son fotobiorreactores que se caracterizan por ser conductos transparentes y aislados, expuestos al exterior para aprovechar mejor la radiación solar. Este sistema es controlado por un sistema que suministra CO₂ y nutrientes para optimizar su productividad y reproducción, es el método más eficaz y productivo (pérez, 2016).

6.3. Marco legal

Se incluyen las principales normas vigentes relacionadas con la gestión integral del recurso hídrico y que son relevantes para su uso, protección, conservación y manejo de las aguas.

(Tabla 1Tabla 1).

Tabla 1: Marco legal

Decreto 1594 de 2014	Por el cual se reglamentan los usos del agua y residuos líquidos. Teniendo en cuenta que para esta investigación en el artículo 79 se dictan los parámetros para que todo vertimiento a un cuerpo de agua cumpla con las siguientes normas: pH: 6 a 9 unidades; temperatura: $\leq 40^{\circ}\text{C}$.
Decreto 1575 de 2007	Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano. En el capítulo V, se citan los procesos básicos del control y la vigilancia para garantizar la calidad del agua para consumo humano.
	Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. El artículo 7 presenta los criterios

Resolución 1207 de 2014	de calidad, el uso de agua residual tratada deberá cumplir previamente criterios de calidad para sistemas de riego.
Resolución 631 de 2015	Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. En el capítulo V, se disponen los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles (pH 6 a 9) en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas, (ARD) y de las aguas residuales (ARD – ARND) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales.
Resolución 2115 de 2007	Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.
Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), 2000	Titulo E, Tratamiento de aguas residuales. Se realiza un análisis sobre el diseño y técnicas para los sistemas de tratamiento de aguas residuales.
Guía Ambiental para el Subsector Porcícola de Colombia. SAC, 2002	Contiene una serie de lineamientos, conceptuales, técnicos, jurídicos y ambientales que se deben tener en cuenta en la planificación y ejecución de proyectos de las diferentes actividades productivas a fin de hacer más armónica las relaciones entre el usuario, las autoridades ambientales y la comunidad.

Fuente: Elaboración Propia.

7. ESTADO DEL ARTE

Un estudio en Maracaibo, Venezuela; evaluó el uso de la *Chlorella sp.* y *Scenedesmus sp.* para la remoción de nitratos, fosfatos y DQO de las aguas residuales del sistema de estabilización de la Universidad del Zulia, con condiciones de fotoperiodo de 12:12 h, 26°, sin aireación y durante 27 días. Como resultado de esta investigación se obtuvo una remoción del 44% en fosfatos con *Chlorella sp.* en agua residual esterilizada y del 48,7% en agua residual no esterilizada para *Scenedesmus sp.* La remoción de DQO para *Scenedesmus sp.* fue 55,8% en agua residual esterilizada al final del experimento; mientras que *Chlorella* alcanzó un máximo del 54,8% en agua residual no esterilizada a las 24h. Los resultados muestran que ambas especies de microalgas, ofrecen una buena alternativa para el tratamiento de las aguas residuales (Chacón, Andrade, Cárdenas, Araujo, & Morales, 2004).

El estudio realizado por (Roa & Cañizares, 2012) se basó en el uso de un cultivo Bold utilizando *Scenedesmus incrassatulus* inmovilizado en alginato de calcio, como una nueva alternativa tecnológica de remoción. Se trabajó con dos fotorreactores air-lift en condiciones controladas de temperatura (20°C), flujo de aire (1 L/min), a una densidad de flujo fotónico (DFP) de 250 $\mu\text{molm}^{-2} \text{s}^{-1}$; teniendo un seguimiento diario a los parámetros para analizar. Mediante esta tecnología se logró en el día 8, una remoción del 60% de la cantidad inicial de nitratos, mientras que los fosfatos disminuyeron en un 47%.

Según (Velandia & Olarte, 2016), en su estudio demostró que la obtención de altos porcentajes de remoción de Fósforo, Nitrógeno, DQO y DBO₅ de 75,7%, 84,93%, y 30,92%, fue viable para resultado viable para la implementación de procesos de

biorremediación en el sector de biocombustibles empleando la microalga *Chlorella vulgaris*. Este experimento se llevó a escala de laboratorio, desarrollando un tratamiento biológico que permitió medir y cuantificar la producción de biomasa y las cantidades de remoción para los nutrientes y parámetros específicos de las aguas residuales.

A través de la investigación realizada por (Hernandez, Vasquez, & Alvarez, 2016), empleando biorreactores piramidales mediante tres tratamientos con concentraciones de mezclas distintas y un control con tres repeticiones evaluados durante cuatro días; permitió una remoción alta en los parámetros DQO (98.1, 97.7 y 93.5%), N y P (87.5, 78.9, 88.6, 73.7, 85.5 y 89.5%); estos fotobiorreactores generaron al final del experimento agua para reusó y biomasa con importante contenido de proteínas.

En Colombia se están llevando investigaciones para la implementación de una planta de producción de biomasa a partir de microalgas, considerando que la viabilidad se da porque este país ofrece las condiciones óptimas medioambientales para el desarrollo de un proyecto de microalgas por la disponibilidad de agua, tierra y luminosidad. Además, económicamente es viable en cuanto haya la disponibilidad del área para los cultivos y el aumento de la productividad de las microalgas (MACHADO, 2013).

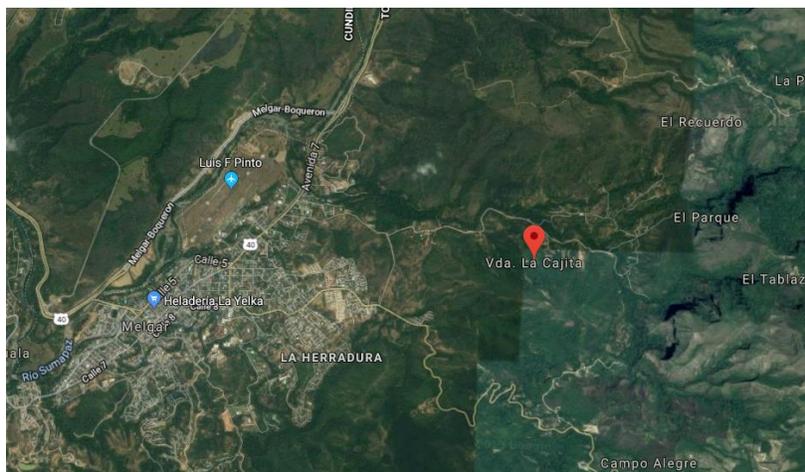
8. DISEÑO METODOLÓGICO

El proyecto de investigación se ejecutó en el laboratorio de aguas del Programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cundinamarca Girardot.

8.1. Toma de muestras:

Las muestras de microalgas fueron tomadas en la quebrada La Cajita ubicada en el municipio de Melgar, el clima de la zona es tropical, la temperatura en promedio es 27.1°C, el rango de precipitación promedio anual se encuentra entre 1200-1500 mm (CORTOLIMA, 2004). **Ilustración 1: Ubicación Quebrada La Cajita** Este lugar de muestreo se seleccionó debido a que las características climáticas de la zona son similares a las condiciones en la que se desarrolló el diseño experimental.

Ilustración 1: Ubicación Quebrada La Cajita



Fuente: Google Maps.

Para el protocolo de muestreo se tuvo en cuenta la Metodología para el Establecimiento del Estado Ecológico según la Directiva Marco de Agua. El procedimiento se inició seleccionando varios puntos de muestreo donde la corriente no fuera muy fuerte y el

sustrato no estuviera totalmente descubierto. El sustrato escogido fueron piedras, muestreando las comunidades en superficies parduzcas y resbaladizas. Se seleccionaron 20 piedras pequeñas, lavándolas suavemente para eliminar cualquier impureza, luego se tomó un cepillo raspando un área de 10 cm por piedra y se introdujo el cepillo dentro de la botella plástica transparente con agua de la quebrada; se realizó el rotulado para cada una de las muestras indicando las coordenadas, altitud, fecha y tipo de sustrato. Finalmente, se conservó cada una de las muestras dejando las botellas destapadas y con presencia de luz hasta el día que se llevaron al laboratorio. Se obtuvo un volumen total de la muestra de 10 litros. (**Ilustración 2**).

Ilustración 2: Muestreo de microalgas



Fuente: Elaboración propia.

8.2. Estandarización del cultivo de microalgas

Para la elaboración del medio de cultivo fue necesario cumplir con los requerimientos de crecimiento y nutrición, por lo tanto, la preparación del cultivo de las microalgas se realizó con la adición de nitrógeno (15%), fósforo (15%) y potasio (15%) que permitió aumentar el nivel de desarrollo del cultivo y así obtener mayor productividad.

Fue necesario utilizar como medio de alimento para las microalgas el uso del fertilizante orgánico (Robusto F), con el fin de suministrar los nutrientes esenciales NPK. A su vez, se preparó un medio de cultivo teniendo en cuenta el Manual de Maricultura Vegetal. Y por último, se realizaron medios de cultivos con el fertilizante (Irricol inicio), compuesto de NPK (13-36-12), estos procedimientos se realizaron con el fin de evaluar y determinar el crecimiento de las microalgas.

8.3. Determinación de especies incluidas en el cultivo mixto

Se realizó una evaluación cualitativa del ensamble de algas determinando hasta el nivel taxonómico posible (familia y/o género) y de este modo se consideraron los posibles grupos funcionales. Para esta determinación se empleó la guía Fitoplancton de agua dulce bases ecológicas, taxonómicas y sanitarias (John Jairo Ramírez Restrepo, 2000), el texto Microalgas acuáticas: La otra escala de la biodiversidad en la Amazonia colombiana del Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI).

8.4. Toma de muestras de aguas residuales porcinas

Se tomó un volumen de agua residual porcina de 25L, que tenía como punto de descarga una caja de verificación del Fondo Ganadero del Tolima ubicado en el kilómetro 3, vía al nevado zona industrial Chapetón de Ibagué-Tolima (**Ilustración 3**). Estas muestras se recolectaron en recipientes plásticos y posteriormente se trasladaron hacia la Universidad de Cundinamarca para su tratamiento.

Ilustración 3: Toma de muestra de agua residual porcina



Fuente: Elaboración propia.

Por medio del laboratorio Aconpis se realizaron los análisis de la caracterización inicial de la carga contaminante a través de la técnica espectrofotométrica, método salicilato de sodio para nitratos y cloruro estañoso para fosfatos.

8.5. Tratamiento de aguas residuales porcinas

Se implementaron dos diseños de sistemas uno abierto tipo pecera (TP) que corresponde a recipientes en forma de peceras y uno tipo botella (TB) que fueron botellas (**Ilustración 4**). Las 8 réplicas de los sistemas contenían 3,5L de mezcla (agua residual porcina 2,5L + 1L de microalga), usando tratamientos con agua residual porcina diluida al 50% y agua sin diluir 100%. En la investigación, no se estableció la densidad celular, por falta de los equipos necesarios para esto.

La proporción de Microalgas y agua residual Porcícola, fue establecida por los investigadores. El volumen final fue de 3 Litros, 28,6% de Microalga y 71,4% de Agua residual, este volumen en cada sistema estuvo asociado a la alta tasa de evaporación que se da en el laboratorio de Aguas por las temperaturas elevadas en sus instalaciones.

Se realizó la dilución de las muestras con el fin de evitar la saturación de los compuestos en el sistema.

Ilustración 4: Sistemas abiertos TP y TB para cultivo de microalgas



Fuente: Elaboración propia.

A estos sistemas se les evaluó los periodos de luz/oscuridad; cuatro de estos fueron expuestos a la luz durante todo el día (24 horas) con ayuda de iluminación fluorescente, mientras que los cuatro restantes tuvieron disponibilidad de luz solar durante doce horas. Estos sistemas mantuvieron con aireación constante durante todo el periodo experimental. **(Ilustración 5)**. El flujo de luz de la radiación solar al cual estuvieron expuestos los sistemas se midió por medio de la aplicación Luxómetro, obteniendo un resultado de 2255 luxómetro (lx). Sin embargo, no se cuantificó el flujo de luz para las lámparas LED empeladas de 20W, pero según la literatura corresponde a 1500 luminex (lm) (Soluciones Ambiente, 2014).

En los sistemas TB el intercambio de gases entre el cultivo y la atmosfera está muy limitado, y suele producirse acumulación de oxígeno en su interior que con un sencillo burbujeo de aire en el interior se libera (Rivas, Montes, & Domínguez, 2015); por lo tanto,

el mecanismo de control para el intercambio de gases en este tipo de sistema fue el burbujeo mediante los aireadores.

Ilustración 5: Fotoperiodo y concentración de los sistemas



Fuente: Elaboración propia.

El tiempo de tratamiento fue de 15 días. El día uno correspondió a la caracterización inicial del agua residual porcina sin tratamiento. A los ocho y 15 días se realizaron tomas de muestra para el análisis y la determinación de remoción de contaminantes con su debido tratamiento.

Tabla 2: Tratamiento

Tipo de sistema	Abierto TP ^P		Abierto TB ^B	
	100%	50%	100%	50%
8 Días	TP- 100%-24 ²⁴	TP- 50%- 24	TB-100%- 24	TB-50%-24
	TP-100%- 12 ¹²	TP-50%-12	TB-100%-12	TB-50%-12
15 Días	TP- 100%-24	TP- 50%- 24	TB-100%- 24	TB-50%-24
	TP-100%- 12	TP-50%-12	TB-100%-12	TB-50%-12

Donde TP significa: Sistema abierto tipo pecera

TB: Sistema abierto tipo botella

24: Luz durante todo el día

12: Luz durante 12 horas

100 y 50% hace referencia al porcentaje de dilución del AR Porcina

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los sistemas de tratamiento mencionados, se enviaron 16 muestras al Laboratorio AGQLabs PRODYCON para su respectivo análisis, a través de las técnicas de cromatografía iónica para los parámetros de nitratos y fosfatos (**Ilustración 6**). Para estas muestras las células se separaron del agua pasando por filtros de jeringa con membrana de 0,45 μm .

Ilustración 6: Muestras para análisis

Fuente: Elaboración propia.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1. Estandarización del medio de cultivo para microalgas

Para la estandarización del medio de cultivo de microalgas se usaron las siguientes alternativas:

Tabla 3: Medios de cultivos

DENOMINACIÓN		CANTIDAD	COMPOSICIÓN DEL MEDIO DE CULTIVO
Medio I	Robusto F-Fertilizante orgánico	3ml	Nitrógeno Total (N): 112.00 g/L Nitrógeno amoniacal (N): 49.0g/L Nitrógeno nítrico (N): 48.0g/L Nitrógeno orgánico (N): 15.0g/L Fosforo soluble en agua (P ₂ O ₅): 84.00g/L Potasio soluble en agua (K ₂ O): 42.00 g/L Calcio soluble en agua (CaO): 0.08g/L Magnesio soluble en agua (MgO): 4.68g/L Azufre soluble en agua (S): 6.62g/L Hierro soluble en agua (Fe): 1.58g/L Magnesio soluble en agua (Mn): 2.75g/L Cobre soluble en agua (Cu): 0.95g/L Zinc soluble en agua (Zn): 8.84g/L Molibdeno soluble en agua (Mo): 0.95g/L Boro soluble en agua (B): 1.07g/L Carbono orgánico oxidable: 20.00g/L pH al 10%: 2.30 Aminoácidos libres (18): 133.00 g/L



<p>Medio II</p>	<p>Triple 15- Fertilizante químico (N15, P15, K15)</p>	<p>3g</p>	<p>Nitrógeno total: 15 % Fósforo como Pentóxido de Fósforo (P_2O_5): 15 % Potasio como Óxido Potásico soluble en agua (K_2O): 15%</p> 
<p>Medio III</p>	<p>Medio mínimo (Sueoka, 1960)</p>	<p>51ml</p>	<p>Solución 1 Cloruro de amonio (NH_4Cl): 16g/L Cloruro de calcio dihidratado ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$): 2.04g/L Sulfato de magnesio ($MgSO_4$): 4g/L</p>  <p>Solución 2 Fosfato dipotásico (K_2HPO_4): 37.42g/L Fosfato monopotásico (KH_2PO_4)</p> 

			<p>Solución 3 (Ácido etilendiaminotetraacético) EDTA: 50g/L Sulfato de zinc ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) Ácido bórico (H_3BO_3): 11,4g/L Cloruro de magnesio ($MnCl_2 \cdot 4H_2O$): 5.06g/L Sulfato de hierro ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$): 4.99g/L Cloruro de cobalto ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$): 1.61g/L Sulfato de cobre ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$): 1.57g/L Molibdato de amonio ($(NH_4)_6Mo_7O_{24}$): 1.1g/L</p> 
Medio IV	Irricol inicio (N13, P36, K12)	3g	<p>Nitrógeno total (N): 13% Nitrógeno amoniacal (N): 9.4% Nitrógeno nítrico (N): 3.6% Fosforo asimilable (P_2O_5): 36% Potasio soluble en agua (K_2O): 12% Boro(B): 0.03% Magnesio(Mn):0.02% Molibdeno (Mo): 0.032% Zinc (Zn): 0.03%</p> 

Fuente: Elaboración propia.

En la preparación del medio I y II se agregó 3mL del fertilizante orgánico foliar – Robusto F y 3g del fertilizante químico triple 15 diluido en agua. Para cada medio se adicionaron 600mL de muestra de microalga y 400mL de agua aforando a 1000mL. Cada uno de estos recipientes (cuatro) estuvo con condiciones de luz y aireación, durante 10 días. Respectivamente los colores que se evidencia en la ilustración es debido a que el Fertilizante Robusto F viene en presentación líquida de color verde, mientras que el fertilizante triple 15 era de tonalidad rojiza. (*Ilustración 7*). Para conseguir un cultivo de microalgas en crecimiento activo es necesario el suministro mínimo de nutrientes y microelementos, así como adecuadas condiciones de luz, aireación y temperatura (Rivas, Montes, & Domínguez, 2015). De acuerdo a lo anterior, por falta de luz directa y elementos menores en la composición del fertilizante triple 15 no se presentó crecimiento y reproducción algal.

A su vez, los llamados micronutrientes (Hierro, Manganeso, Cobre, Zinc, Sodio, Molibdeno, Cloro y Cobalto) se requieren en mínimas cantidades por litro ($\mu\text{g/L}$) para que se desarrollen las microalgas (Agricultura, 2017). Sin embargo, para el caso del fertilizante Robusto F, su composición presentó concentraciones altas en unidades de gramos por litro (g/L) de azufre y boro; en contraste, no incluyó elementos menores como el sodio, el cloro y el cobalto.

De igual manera, los macronutrientes como el carbono, Nitrógeno, Fósforo, Silicio, Magnesio, Potasio y Calcio, se requieren en cantidades de hasta 100 g/L ya que en bajas concentraciones pueden actuar como factores limitantes para el crecimiento algal (Agricultura, 2017).

El exceso de macronutrientes en los medios de cultivo actúa como agentes tóxicos. Por ejemplo, el cobre es conocido como un alguicida. Por consiguiente, la ausencia del silicio y la elevada concentración del nitrógeno total, pudieron interferir en la regulación de la presión osmótica y el equilibrio de electrolitos en las células y por lo tanto en su crecimiento. El Nitrito puede llegar a ser tóxico para las microalgas en concentraciones superiores a 1,0 mg/L; mientras que el nitrato normalmente es suministrado como nitrato sódico, es bien tolerado en concentraciones muy altas de gramos por litro y por último las microalgas aceptan el amonio en concentraciones de hasta 50 mg/L (Fernández, 2014).

Ilustración 7: Medio de cultivo I y II



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que ni el fertilizante Triple 15 ni el fertilizante orgánico Robusto F fueron eficientes para el establecimiento del cultivo, se preparó el medio III, descrito por Sueoka (1960), en el Manual de Maricultura Vegetal; esta eficiencia de crecimiento de las microalgas se determinó mediante la observación en el microscopio con el objetivo 100X para cada uno de los medios de cultivo.

El medio está constituido por tres soluciones descritas en la **Tabla 3**. Sin embargo, estas soluciones, fueron modificadas (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) debido

a que no se contó con los reactivos necesarios para su preparación, por lo tanto se empleó el material disponible en el laboratorio de aguas de la Universidad de Cundinamarca.

Tabla 4: Soluciones modificadas del medio III (Soueka, 1960)

<i>Solución 1</i>	<i>Reactivo</i>	<i>g/0,5L</i>	<i>Dilución mL/L</i>
NH ₄ Cl	Cloruro de amonio	8	25
CaCO ₃	Carbonato de calcio	1.02	
<i>Solución 2</i>	<i>Reactivo</i>	<i>g/0,5L</i>	25
KH ₂ PO ₄	Fosfato monopotásico	7.26	
<i>Solución Trazas</i>	<i>Reactivo</i>	<i>g/0,25L</i>	1
EDTA	Ácido Etilendiamino Tetracético	12.5	
FeSO ₄ 7H ₂ O	Sulfato de hierro	1.2475	
CuSO ₄ 5H ₂ O	Sulfato de cobre	0.3925	
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	Molibdato de amonio	0.275	

Fuente: Elaboración propia.

La preparación de la solución uno consistió en mezclar 8g de NH₄Cl y 1.02g de CaCO₃ en 200mL de agua y después aforarlo a 500mL. En la solución dos, se adiciono 7.26g de KH₂PO₄ en 200mL de agua para ser aforado a 500mL. Finalmente, en la solución tres fue necesario agregar 12.5g de EDTA, 1.2475g de FeSO₄ 7H₂O, 0.3925g de CuSO₄ 5H₂O y 0.275g de (NH₄)₆Mo₇O₂₄ en 200mL de agua aforando a 500mL. Cada una de las soluciones fue envasada en un recipiente para su posterior uso. Para la alimentación de las microalgas con este medio de cultivo, se empleó una probeta de 1000mL, donde se mezclaban 25mL de la solución 1, 25mL de la solución 2 y 1mL de la solución 3, aforado al volumen indicado de la probeta. La aplicación de este medio se realizó durante 30 días, contando con condiciones de aireación y luz.

Ahora bien, dentro de los requerimientos químicos para un buen crecimiento de las microalgas en cultivo se encuentran el balance entre los macronutrientes y los micronutrientes. Un desbalance en la proporción suministrada de estos nutrientes invariablemente se manifiesta ya sea como un descenso en el crecimiento o hasta la detención del mismo (Hoff & Snell, 2001). Debido a esto, los microelementos y macroelementos excluidos del medio III (Sueoka, 1960) (Ácido bórico, cloruro de magnesio, cloruro de cobalto y el sulfato de zinc) generaron un déficit de nutrientes ocasionando un crecimiento lento de las microalgas. A su vez, otro de los factores que pudo interferir en el crecimiento algal fue la temperatura. Las condiciones ambientales del laboratorio de aguas variaron entre 32 y 35°. Sin embargo (Tan, Lam, & Uemura, 2018) establece que la temperatura óptima para la mayoría de las especies algales es de 20 a 30°; **(Ilustración 8)**.

Por otro lado, en la investigación realizada por (Velasco, Gómez, Ospina, Salazar, & Trujillo, 2009), demostró que la temperatura puede provocar efectos diferentes en la densidad algal dependiendo de la intensidad lumínica, los resultados obtenidos en cultivos con temperaturas de 28° mostraron mayor crecimiento algal; sin embargo en condiciones de baja intensidad y temperaturas de 22° hubo mayor crecimiento,

De acuerdo a lo anterior, el aumento del crecimiento de las células se asocia a temperaturas altas e iluminación según lo reportado por (James, Hinty, & Salman, 1989), quien establece que esto se debe a que en temperaturas elevadas se provoca el aumento de la fotosíntesis, respiración y crecimiento algal.

No obstante, una de las condiciones para que se genere crecimiento celular es la energía total y el carbón fijado en el proceso de fotosíntesis donde las microalgas deben exceder los

valores usados en la respiración logrando así tener un metabolismo adecuado; respecto a la tasa de producción fotosintética incrementa dependiendo de la intensidad de luz, sin embargo la exposición a intensidades altas puede provocar un retardo en la actividad fotosintética y a su vez una disminución por la inhibición en la producción. Así mismo la respiración de la microalgas cuando se exponen intensidades bajas pueden adaptarse y obtener un crecimiento considerable mediante su capacidad de captar luz por el incremento de clorofila (Velasco et al., 2009).

Ilustración 8: Soluciones para alimento del cultivo



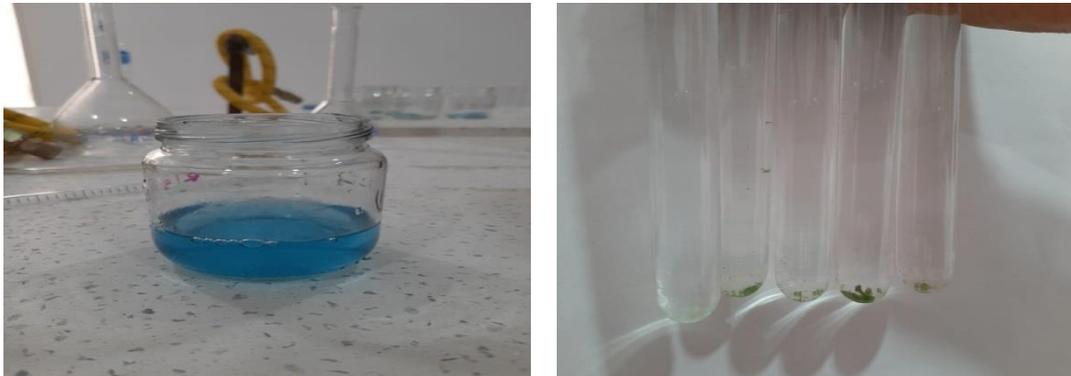
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se preparó el medio IV utilizando el fertilizante Irricol inicio compuesto por NPK (13-36-12), para suplir las necesidades de elementos mayores y microelementos de microelementos en los cultivos. La dosis recomendada para la preparación de este medio fue de 3g por L de agua en disolución. Primero se hicieron pruebas en cinco tubos de ensayo para evaluar el crecimiento de las microalgas a partir del uso del fertilizante, agregando 11mL de fertilizante y 1mL de la muestra de microalgas. Estas pruebas fueron eficientes, debido a que se presentó un crecimiento de las microalgas a los cinco días, por lo que se empleó este fertilizante para todas las muestras. Así mismo, los cultivos se

mantuvieron con las condiciones de aireación y luz constante permitiendo un mayor crecimiento.

El fertilizante Irricol inicio a comparación con los medios I, II y III, complemento los microelementos que no proporciono el fertilizante Triple 15, presento menos concentración de nitrógeno que el fertilizante Robusto F y suplemento los elementos del medio III (Sueoka, 1960) (zinc, boro y magnesio). Este fertilizante permitió tener un balance adecuado de macroelementos y microelementos, logrando el desarrollo adecuado de las microalgas.

Ilustración 9: Fertilizante Irricol



Fuente: Elaboración propia.

Varios de los factores a tener en cuenta para el establecimiento de un medio de cultivo son la temperatura, el pH, la aireación, condiciones de luz y CO₂. Las especies de microalgas toleran temperaturas entre 20 y 30°, el pH para la mayoría de las especies de algas cultivadas es entre 7 y 9, siendo el rango óptimo 8.2 - 8.7; la aireación es necesaria para prevenir la sedimentación de las algas y garantizar la transferencia de masa a todas las células (Camacho, Campos, Escalera, & González, 2012) y un suministro de luz que

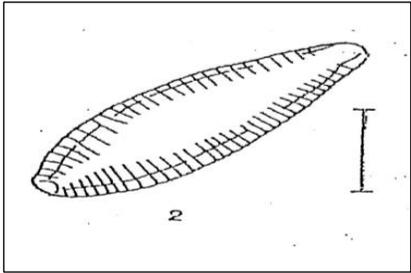
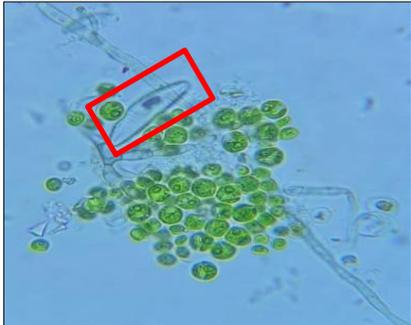
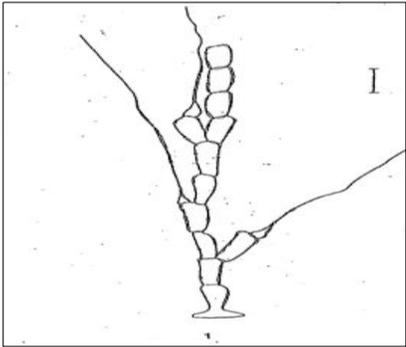
requieren de un ciclo luz-oscuridad entre 12:12 y 16:8 horas dependiendo de la especie (Andersen, 2005). El establecimiento de los medios de cultivos se realizó a temperatura ambiente, y cada uno de los recipientes reporto valores de pH 7. Además, estuvieron expuestos a luz solar y aireación constante; facilitando el proceso de adaptación, crecimiento y desarrollo de las microalgas.

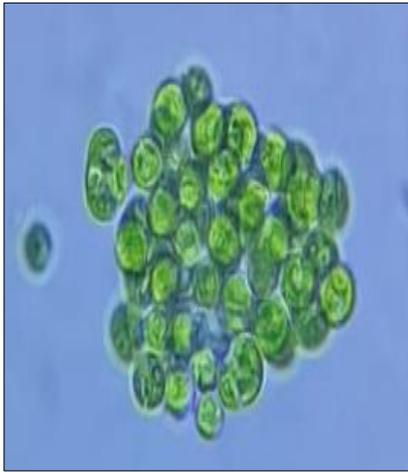
9.2. Determinación de las principales familias y géneros del cultivo mixto de microalgas

La identificación de las especies se realizó mediante el uso de la guía de “*Fitoplancton de agua dulce bases ecológicas, taxonómicas y sanitarias*” (John Jairo Ramírez Restrepo, 2000), y el documento “*Microalgas acuáticas: La otra escala de la biodiversidad en la Amazonia Colombiana del Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI) – 2008*”.

Tabla 5: Identificación de especies de microalgas

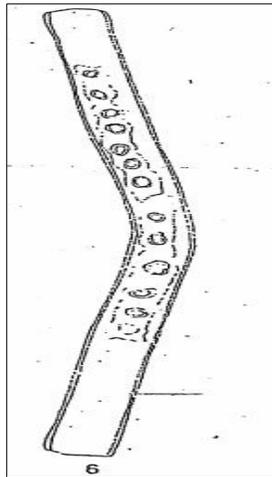
IMAGEN	DESCRIPCIÓN
--------	-------------

 	<p>Nombre de la especie: <i>Gomphonema</i> Agardh (sp 1) ^a</p> <p>Presenta válvulas en forma de claviformes con extremos ampliamente redondeados, a veces más afilados en el polo de la cabeza y el polo del pie redondeado. Frústulas en forma de faja o de cuña. Simetría Heteropolar, bilateralmente simétrica; especie con un área axial estrecha y lineal (Jüttner, 2016).</p>
 	<p>Nombre de la especie: <i>Bulbochaete</i> C. A. Agardh (sp 2) ^a</p> <p>La célula basal de fijación de esta microalga, es mucho más voluminosa que las otras del filamento, redondeada y tiene en la parte inferior, una estructura de adherencia, en contacto con el sustrato. Las células intermediarias también son polarizadas, es decir, presentan un polo distal (en relación con el sustrato) nítidamente más largo que el proximal. La célula basal es, generalmente, redonda y modificada en una estructura de adherencia, dotada de numerosos procesos con forma de ganchos diminutos de fijación (Marciales, 2008).</p>



Nombre de la especie: *Chlorella vulgaris*
a

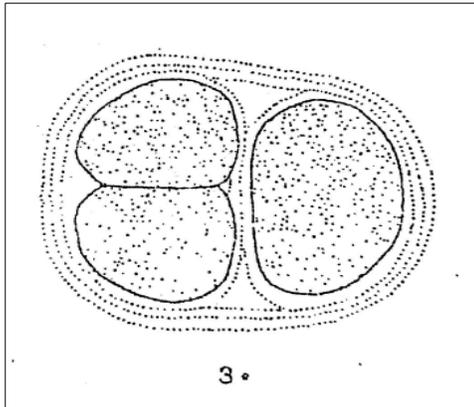
Es un alga verde unicelular perteneciente al reino Protista. Tiene forma esférica, su diámetro es de 2 a 10 μm , no posee flagelo y se encuentra presente en la mayoría de los cuerpos de agua dulce. La *Chlorella* conocida popularmente como Clorela contiene los pigmentos verdes fotosintetizadores clorofila a y b en su cloroplasto. Mediante la fotosíntesis se multiplica rápidamente, requiriendo sólo luz solar, dióxido de carbono, agua y pequeñas cantidades de minerales (Klötze, 2017).



Nombre de la especie: *Gonatozygon monotaenium* de Bary (sp5)^a

Es un alga de transición, pero es fácil de reconocer. *Gonatozygon monotaenium* vive en aguas ácidas y soporta concentraciones medias de materia orgánica. (Agua, 2010).

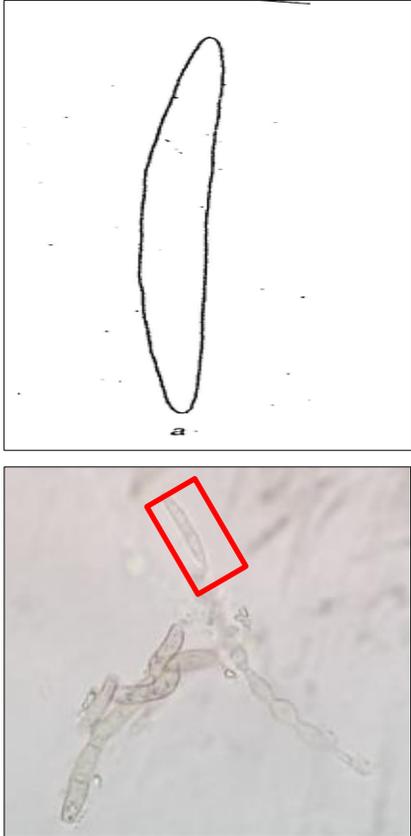
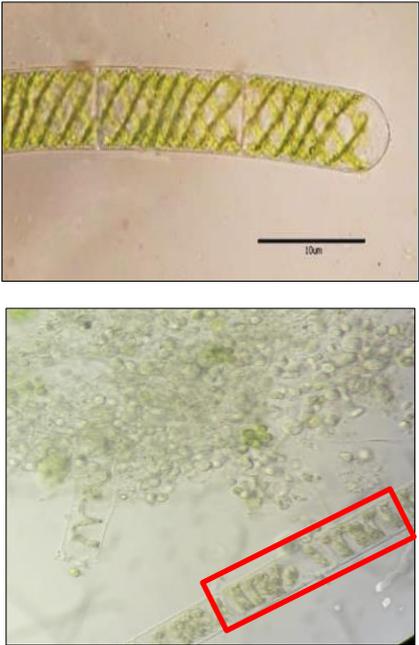


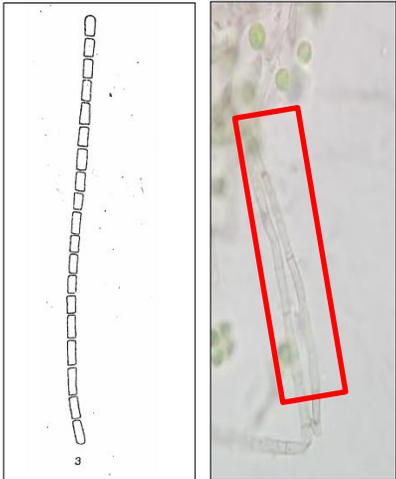
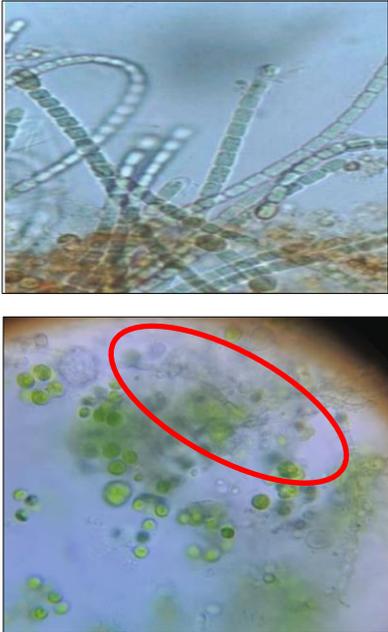


Nombre de la especie: *Chroococcus turgidus* (sp6) ^a

Algas que forman colonias microscópicas, normalmente de 2 - 8 células, aunque en ocasiones alcanzan las 32 y más raramente solitarias, con la vaina más externa transformada en el margen de la colonia, normalmente diferente al resto. Las células son esféricas, subesféricas, ovoides o hemisféricas (tras la división), entre 8 - 32 μ s. Las capas de la vaina son diferentes y se desarrolla cada vez que hay una división, aunque en ocasiones se pueden observar más capas; éstas son incoloras, pero en ocasiones pueden ser pardas.

Es una especie que vive en hábitats terrestres húmedos, en ocasiones entre musgos del género *Sphagnum*, entre macrófitos emergidos en lagos poco profundos y charcas, más frecuentemente en aguas oligotróficas y mesotróficas, aparentemente ausente de aguas eútrofas (Asturnatura.com, 2009).

	<p>Nombre de la especie: <i>Closterium aciculare</i> (sp7)^a</p> <p>Es un alga esbelta, es fundamentalmente planctónica, la gran superficie de su cuerpo la mantiene a flote con suma facilidad de tal manera que aún en zonas de corriente y oleaje siempre toma el sol en primera línea de agua, es considerada un alga luna, alga de la mueca o de la sonrisa abierta, con su núcleo siempre centrado y sus dos cloroplastos de verde intenso repartidos entre las dos mitades de su cuerpo. En los extremos, haciendo de balancín y ajustando con precisión el equilibrio necesario para flotar. (agua, 2006).</p>
	<p>Nombre de la especie: <i>Spirogyra</i> (sp7)^b</p> <p>Spirogyra es un alga verde que está representada por cerca de cuatrocientas especies y todas ellas se caracterizan por presentar cloroplastos en forma de cinta, que se disponen enrollados en una perfecta espiral, pegados a la pared de las células cilíndricas y alargadas que los contienen. Los tallos de Spirogyra crecen y crecen en longitud, pero nunca se ramifican. Con frecuencia son filamentos flotantes, que junto a otros forman densas marañas verdes y sedosas que asoman como islotes sobre la superficie del agua. La reproducción asexual ocurre por fragmentación de los filamentos. También puede reproducirse de manera sexual (Guillén, 2013).</p>

	<p>Nombre de la especie: <i>Oscillatoria vaucher</i> sp2^b</p> <p>Es un alga que presenta un talo plano, macroscópico, liso, en capas, arreglado en tapetes, muy rara vez en tricomas solitarios. Los tricomas son rectos o ligeramente cilíndricos, a veces enrollado en los extremos, móviles deslizándose o de forma oscilante. Usualmente más anchos de 6,8 μm, hasta los 70 μm, sin constricciones o constricciones en las paredes, está presente en tapetes en diferentes sustratos (fango, plantas, rocas, arena) en pequeños cuerpos de agua, marismas y pantanos y la división celular sucede transversalmente al eje del tricoma. La reproducción es por medio de la desintegración del tricoma en pequeños hormogonios móviles con la ayuda de células necridiales (Guamán & González, 2016).</p>
	<p>Nombre de la especie: <i>Cylindrospermum</i>^b</p> <p>Es una alga que en su forma celular puede ser Cilíndricas o cuadradas, con algunos gránulos, su tricoma se presenta de forma isopolar, recto, curvo o irregular torcido y envuelto en una vaina (Tolivia & Boltovskoy, 2008).</p>

^a: Fitoplancton de agua dulce bases ecológicas, taxonómicas y sanitarias.

^b: Guía Microalgas acuáticas: La otra escala de la biodiversidad en la Amazonia colombiana.

En los biomas de aguas dulces existe abundante nutrición y minerales. Las cianobacterias o algas azules y verdes se encuentran en la mayoría de estos biomas y muchos animales dependen de estos organismos para su alimento y crecimiento en este entorno (Biopedia, 2017).

Ahora bien, en el territorio Colombiano se encuentran cepas de microalgas nativas capaces de acumular altos niveles de lípidos, que se caracterizan por su crecimiento y la adaptación a las condiciones climatológicas del país. Dentro de estas especies se encuentran: *Botryococcus braunii*, *Nannochloropsis sp.*, *Chlorella vulgaris*, *Isochrysis sp.* y *Scenedesmus sp* (Chisti, 2007). Por su parte, Donato (2015) indicó que en los ríos del departamento del Meta se encontraban algunos taxones como *Scenedesmus sp.* (Actualmente separado en los géneros *Scenedesmus* y *Desmodesmus*), *Pediastrum sp.*, *Navicula sp.*, *Euglena sp.*, *Oscillatoria sp.* Y *Spyrogira sp.*, entre otros, resistentes a los efectos residuales de los biocidas en ríos como el Humea, el Guayuriba y el Meta, mientras que algas como *Cyclotella sp.* y algunas *Desmidias* del río Ariari en el sector de piedemonte fueron características de condiciones oligotróficas.

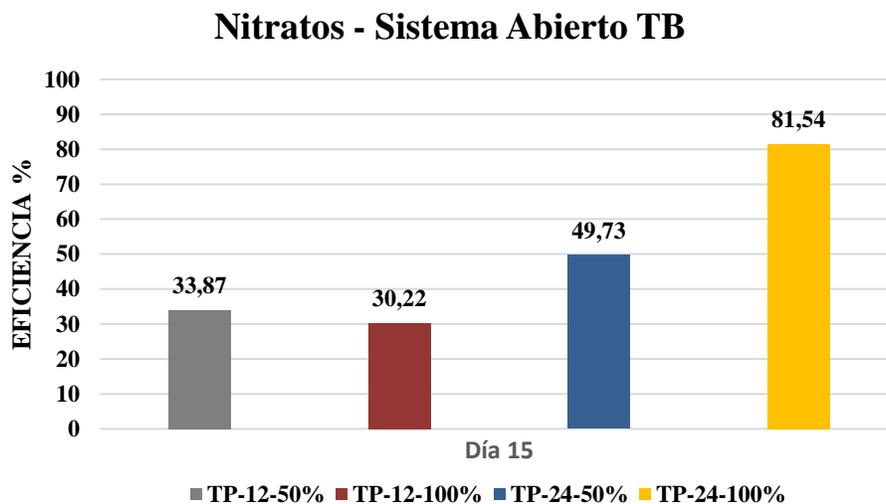
Por otro lado, el cuerpo de agua dulce de la quebrada La Cajita se conecta con otras fuentes hídricas del municipio y presenta diferentes especies de microalgas como las mencionadas en la tabla 5.

Algunas de las especies identificadas en este trabajo, han demostrado ser eficientes en la remoción de contaminantes. Por ejemplo, (Polo & Vargas, 2019) mediante un sistema de fotobiorreactores verticales con columna de burbujeo a escala piloto, se evaluaron los parámetros de nitratos y fosfatos, empleando un cultivo de *Chlorella sp.* Para el tratamiento

terciario de agua residual; logrando remociones superiores al 95% en concentraciones de nitratos y del 65.5% para fosfatos. En un cultivo de *Spirulina* sp. En el tratamiento de aguas residuales porcinas por medio de un proceso semicontinuo con la implementación de un reactor UASB se reportaron remociones del 81,9% para nitratos y 80% para el fósforo (Borrego, 2012). Por lo que se puede inferir que las especies identificadas para este estudio, tienen el potencial para presentar una alta tasa de crecimiento y degradación de contaminantes en el agua residual. Por lo que se establece que las especies identificadas para este estudio, tienen el potencial para presentar una alta tasa de crecimiento y degradación de contaminantes en el agua residual.

9.3. Remoción de NO_3^- en el sistema abierto TB

Gráfica 1: Remoción de NO_3^- – sistema abierto TB



Fuente: Elaboración propia.

La determinación de parámetros en el día 8 y el día 15 se realizó por cromatografía iónica. La disparidad en las técnicas usadas puede asociarse con las diferencias significativas que se dieron entre los valores reportados para la muestra inicial y los valores obtenidos en el día 8 y 15. Los valores obtenidos en la caracterización de la muestra 0 de este trabajo, son muy bajos frente a los reportados por (Cadena, 2017) quien estableció en su investigación que para las aguas residuales porcinas la concentración de nitratos es <5 mg/L por el método Espectroscopia ultravioleta-visible y fosfatos reporto valores de 15 mg/L con el mismo método. Por lo anterior y teniendo en cuenta que la muestra de agua residual del Fondo Ganadero del Tolima proviene de las etapas de maternidad, destete y engorde de cerdos, se esperaría que la concentración de nitratos y fosfatos hubiese sido mayor. Uno de los posibles factores que hayan hecho que las concentraciones iniciales de estos parámetros fueran menores, es por la alimentación de purina que se les proporciona a los porcinos; además, el mantenimiento de las cocheras ayuda a reducir la concentración de contaminantes en el efluente.

Del tiempo 0 al día 8 de tratamiento, el incremento de nitratos pudo atribuirse en primera instancia a la acumulación de nitrógeno en el medio. Cada litro de medio preparado contenía en promedio 390 mg/L de Nitrógeno total, que no eran consumidos en su totalidad por las microalgas dispuestas en los recipientes. Por lo tanto, la concentración inicial de nitrógeno del medio más el aporte generado por el agua residual porcina, probablemente ocasiono este incremento.

En segundo lugar, las microalgas tienen la capacidad de sintetizar y secretar algunos metabolitos. De esta manera, las microalgas pueden llegar a secretar del 60 al 100% amonio

al medio por un exceso de nitrógeno dentro de las rutas metabólicas dado por el consumo de moléculas nitrogenadas.

Durante el periodo de tiempo comprendido entre el día 0 y el día 8 se puede establecer que no hubo eficiencias de remoción de NO_3^- , atribuyendo esto a la saturación en las muestras de oxígeno disuelto generado por los aireadores y el producido por las células. Muchas especies de microalgas no son capaces de sobrevivir en un medio saturado de oxígeno más de dos o tres horas, por ello quizás durante los periodos de oxigenación constante se daba una disminución de microalgas y cuando se apagan se reactivaba el crecimiento. Es importante mencionar que el nivel de saturación varia siendo para algunas especies el 120% de saturación mientras que para otras es $> 200\%$ (Malgas, 2013). No se evaluó el crecimiento o reducción de microalgas por el efecto de la saturación de oxígeno.

Por otra parte, según (Velazco, Gómez, Ospna, & Trujillo, 2009) demostraron que la exposición continua de las microalgas a la luz tiene un efecto inhibitorio sobre su capacidad fotosintética dependiendo de la especie. Sin embargo, las microalgas necesitan de un periodo de luz y oscuridad, siendo importante el tiempo de exposición a la luz y su intensidad. Durante este ensayo experimental, los sistemas de tratamiento estuvieron expuestos a dos periodos de luz/oscuridad; uno sometido a la luz durante todo el día (24 horas) y el otro con disponibilidad de luz durante doce horas. Esto se asocia con los reportado por Drapcho, Nhuan, Walker (2008) quien establece que cuando algunos cultivos de microalgas se exponen a un cierto nivel elevado de irradiación, los componentes celulares internos encargados de la absorción de energía lumínica, comúnmente denominados antenas, sufren daño debido al exceso de energía; conocido como el punto de

saturación lumínica, y por encima de él la velocidad de fotosíntesis se puede ver reducida; este fenómeno se conoce como fotoinhibición.

Las aguas residuales porcinas además de contener excesos de nutrientes como el nitrógeno en 925,6 mg/L y el fosforo en 525,1 mg/L, en promedio tiene una carga orgánica o DBO de aproximadamente 8027 mg/L, (Romero, 2018). Al agregar la muestra del agua residual del Fondo Ganadero a los sistemas, el medio incremento la concentración de sustrato orgánico y este pudo inhibir el crecimiento de los organismos. Existen una serie de sustancias orgánicas e inorgánicas que, a ciertas concentraciones, inhiben o impiden los procesos biológicos. Este tipo de sustancias, entre las que se encuentran los metales pesados, ejercen un efecto perjudicial sobre los microorganismos encargados de depurar el agua y, por tanto, no deben de entrar en las plantas depuradoras con el agua residual, o si entran deben de hacerlo en concentraciones muy bajas (AEROBIOS, 2018).

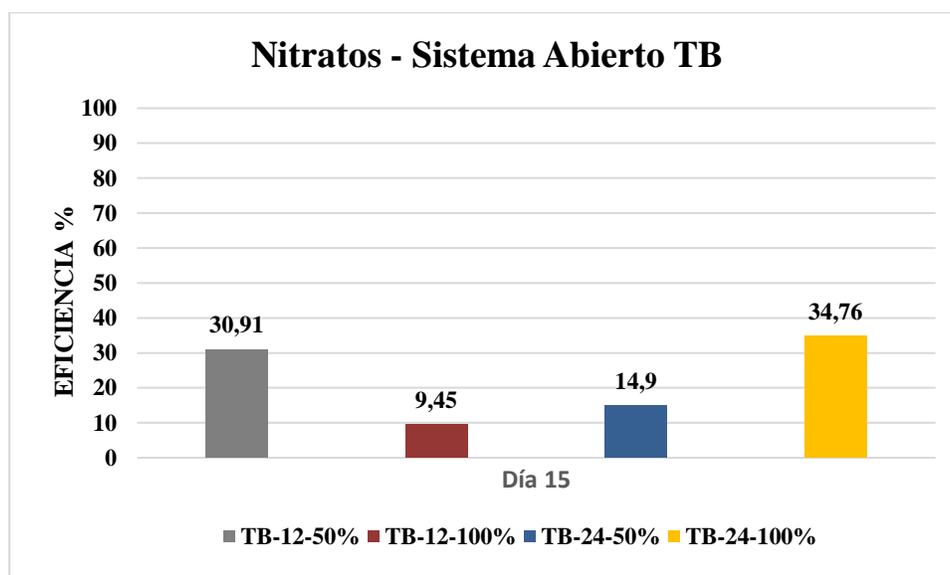
Las eficiencias de remoción se lograron calcular a partir del día 8. En la remoción de nitratos para el tratamiento del sistema abierto TP de agua residual porcina, se evidencio una eficiencia de 33,87%; 30,22%; 49,73% obteniendo un mayor porcentaje de 81,54 en el día 15 para el tratamiento TP-24-100%. Los valores obtenidos en esta investigación fueron superiores a lo reportado por Tafur y Estrada., (2015) quienes obtuvieron porcentajes de remoción para nitratos de 50,1% en un tratamiento de agua residual sin diluir, por medio de un cultivo monoalgal con *Chlorella sp*, a una temperatura de 30°, un fotoperiodo 12:12 luz/oscuridad, aireación constante. A su vez, según lo reportado por Hernández., (2004) se logró una remoción del 94% y 84% utilizando cultivos co-inmovilizados de dos especies del género *Chlorella* (*C. vulgaris* y *C. sorokiniana*) con *Azospirillum brasilense* en esferas de alginato y sistemas con la microalga en agua residual doméstica, obteniendo valores

inferiores comparados con esta investigación. Cuando *C. vulgaris* cuando ambos se encontraban co-inmovilizadas en esferas de alginato. Este tipo de cultivo inmovilizado presenta ventajas que facilitan las operaciones de cosecha, mayores concentraciones por unidad de volumen de medio, reducción o ausencia de células en el efluente, menor necesidad de energía y mayor eficiencia en el empleo de la radiación recibida por unidad de superficie de suelo (Fernández, Girela, Mosquera, & Curt, 2014).

Los porcentajes eficiencia de remoción, en los sistemas abiertos tanto TP como TB se atribuye principalmente a que el nitrógeno amoniacal NH_3 (NH_4^+ cuando se encuentra soluble en agua a $\text{pH} < 8.5$) es la fuente preferida de Nitrógeno por las algas, y la asimilación de NO_3^- o NH_4^+ , está relacionada con el pH del medio de cultivo (Grobbelaar, 2004).

9.4. Remoción de NO_3^- en el sistema abierto TB

Gráfica 2: Remoción de NO_3^- – sistema abierto TB



Fuente: Elaboración propia.

Para el tratamiento en el día 15 con los sistemas abiertos TB en nitratos se evidencio porcentajes de remoción de 30,9%; 14,9%; 9,4% y 34,7% siendo el valor máximo de remoción con el tratamiento TB-24-100%. Por otro lado, se puede establecer que, para mejorar las eficiencias de remoción de los contaminantes en las aguas residuales porcinas, es necesario incrementar el tiempo de retención o tratamiento.

Comparando los dos diseños de sistemas abiertos TP y TB usados en el tratamiento de nitratos por medio de un cultivo mixto de microalgas, el más eficiente para este caso fue el TP con agua residual al 100% (TP-24-100%) con un porcentaje de remoción del **81,5%**.

Los porcentajes de remoción se deben a que posiblemente en el proceso de asimilación de nitrato este fue transformado a nitrito y luego a amonio mediante tres etapas de reducción que requieren energía las cuales son: absorción, reducción de nitrato a amonio e incorporación del amonio a esqueletos carbonados para la síntesis de aminoácidos. De acuerdo a lo anterior; en una primera reacción, el nitrato es reducido a nitrito por la enzima del nitrato reductasa. Dicha reacción requiere dos electrones suministrados por una molécula de piridín nucleótido reducido. Seguido, el nitrato es reducido a amonio por la encima de nitrato reductasa, en una reacción que requiere seis electrones donados por la ferredoxina reducida. La reducción del nitrato a amonio consume un total de ocho electrones (Foyer & Noctor, 2003). Las vacuolas constituyen el principal sitio de almacenamiento de nitrato (Maldonado, 2008).

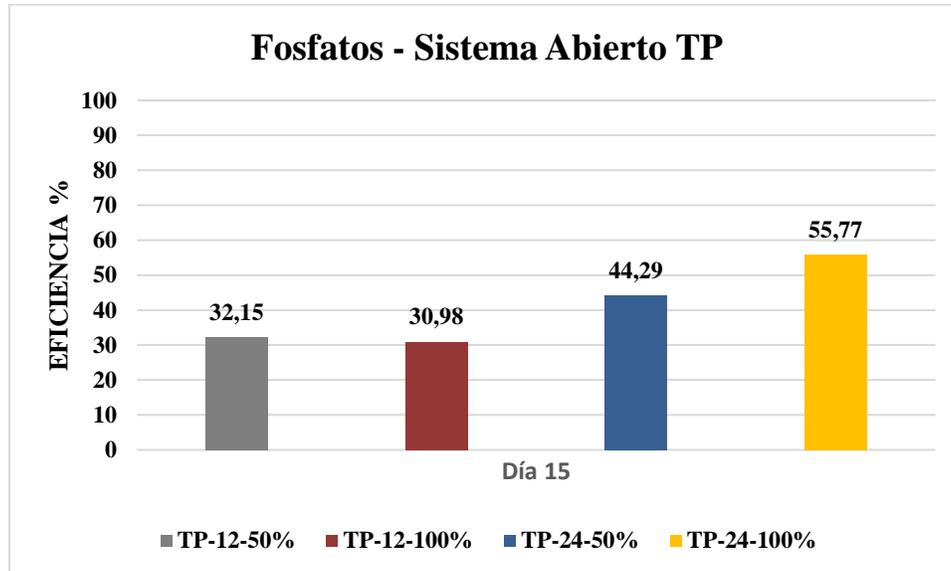
La nitrificación es el proceso de conversión biológica del amonio a nitrato por parte de microorganismos aerobios nitrificantes, suspendidos en el agua o situados en las biopelículas de las superficies sumergidas. El proceso se realiza en dos fases; la primera es

la oxidación del amonio a nitrito por bacterias del género *Nitrosomona*, y la segunda, la del nitrito a nitrato por bacterias del género *Nitrobacter*. La velocidad del proceso depende del pH y la temperatura. Se requieren condiciones aerobias del orden de 4.3 g de O₂ son necesarios para oxidar 1 g de nitrógeno amónico a nitrato- y suficiente alcalinidad del orden de 7.14 g CaCO₃⁻. El ión nitrato, al contrario que el amonio, no se inmoviliza en el sustrato, sino que permanece en el agua; de allí puede ser absorbido por plantas o microorganismos, o ser reducido (desnitrificación) (Férrandez, Beascochea, Muñoz, & Mora, 2015).

Ahora bien, la implementación de estos dos diseños de sistemas de tratamiento TP y TB estuvo expuesta a condiciones de aireación intermitente. La concentración de oxígeno disuelto en procesos con biodegradación de materia orgánica, como es el tratamiento de aguas, es baja debido al consumo de este por parte de las bacterias heterótrofas y nitrificantes. Cuando los contaminantes (Nitrógeno y Fósforo) han sido eliminados, la concentración de oxígeno disuelto aumenta rápidamente, por lo que este parámetro puede ser empleado como indicador de la eficiencia del proceso de asimilación de nitrato (Muñoz & Guieysse, 2006). Así, en fotobiorreactores cerrados operados a bajas cargas orgánicas, la concentración de O₂ puede aumentar hasta un 400% respecto a la concentración de saturación, lo que provoca que el crecimiento celular tanto de microalgas como de bacterias se inhiba. Estas concentraciones elevadas de O₂ generan un daño foto-oxidativo a las células de microalgas, que cesan en su producción fotosintética de O₂ (Muñoz & Guieysse, 2006).

9.5. Remoción de PO_4^{3-} en el sistema abierto TP

Gráfica 3: Remoción de PO_4^{3-} – sistema abierto TP

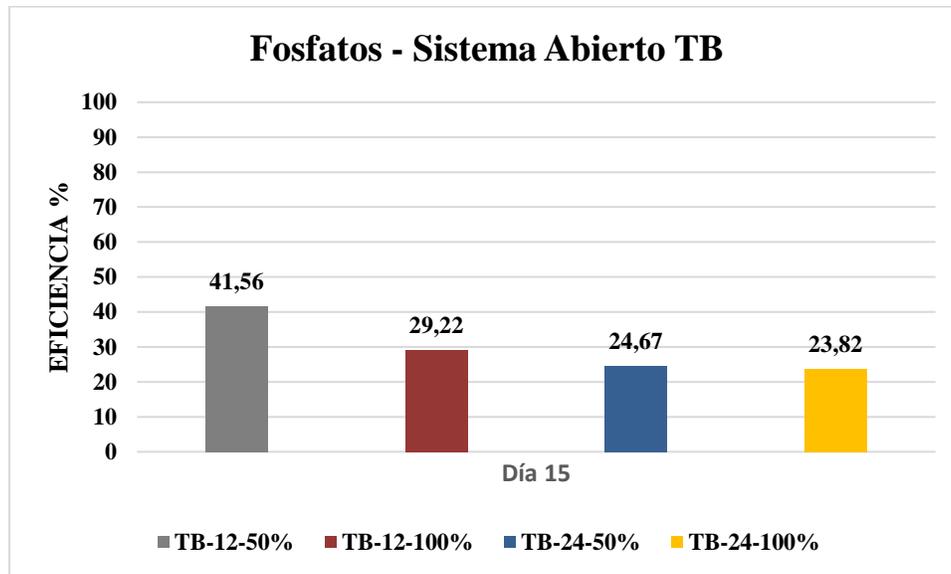


Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la remoción de fosfatos en el día 15 la mayor eficiencia se logró evidenciar en el tratamiento de TP-24-100% con un valor máximo de 55,7%; Seguido se presentó una remoción del 44,2% para el tratamiento TP-24-50%. El tratamiento TP-12-50% removió el 32,1% y el tratamiento TP-12-100% el 30,9%; no se presentaron diferencias considerables entre los dos sistemas. En consecuencia, en el tratamiento de TP-24-100% el valor de remoción fue inferior a lo reportado por Tafur et al., (2015) teniendo porcentajes de remoción para fosfatos de 87,0% en un tratamiento de 75% de agua residual diluida en 25% de agua purificada, por medio de un cultivo monoalgal con *Chlorella sp*, temperatura de 30°, fotoperiodo 12:12 luz/oscuridad, aireación constante.

9.6. Remoción de PO_4^{3-} en el sistema abierto TB

Gráfica 4: Remoción de PO_4^{3-} – sistema abierto TB



Fuente: Elaboración propia.

En comparación con el sistema abierto TB la mayor remoción de fosfatos fue de 41,5% en el tratamiento TB-12-50% sin embargo, se obtuvieron otros porcentajes correspondientes a 29,2%; 24,6% y 23,8%.

Los porcentajes de remoción se pudieron determinar debido a que el fósforo al encontrarse en el agua residual porcina en formas fosfatadas (ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos (Romero, Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y principios de diseño. Bogotá D.C., 2000) Pueden formar complejos compuestos con la materia orgánica, que en un principio no son asimilables por las microalgas, por lo cual estas en acción con otros microorganismos (bacterias) hidrolizan de alguna manera estos compuestos convirtiéndolos en formas fosfatadas más simples y asimilables para las microalgas. En

consecuencia, se generó una liberación de fosfatos permitiendo la asimilación por parte del cultivo mixto de microalgas durante el día 8 al 15 del transcurso del tratamiento.

Tabla 6: Concentración y porcentajes de remoción

	SISTEMA DE TRATAMIENTO	Día 8	Día 15	% Remoción
Nitratos (NO₃⁻)	TP-12-50%	307	203	33,8
	TP-12-100%	268	187	30,2
	TP-24-50%	372	187	49,7
	TP-24-100%	428	79	81,5
	TB-12-50%	207	143	30,9
	TB-12-100%	148	134	9,4
	TB-24-50%	161	137	14,9
	TB-24-100%	210	137	34,7
Fosfatos (PO₄⁻³)	TP-12-50%	1306	886	32,1
	TP-12-100%	1223	844	30,9
	TP-24-50%	1551	864	44,2
	TP-24-100%	1818	804	55,7
	TB-12-50%	871	509	41,5
	TB-12-100%	852	603	29,2
	TB-24-50%	701	528	24,6
	TB-24-100%	785	598	23,8

Fuente: Elaboración propia.

Los sistemas abiertos presentan menor necesidad de inversión y mantenimiento, de fácil escalado pero son un sistema de control más dificultoso, la producción es menor y con baja eficiencia, además de ser más susceptibles a la contaminación. Por otro lado, los reactores cerrados son más seguros, con mejor control de operación, siendo el coste su principal inconveniente (Algaefix, 2012). En esta investigación, se determinó que el tratamiento más eficiente fue en el sistema abierto TP, alcanzando el mayor valor de remoción de 81,5% frente a un sistema abierto TB, esto se debe a que posiblemente las microalgas pudieron

adaptarse fácilmente a las condiciones de estos medios con agua 100% residual porcina y expuestas a luz durante 24 horas. A su vez, los sistemas TB presentaron bajos porcentajes de remoción porque probablemente dificultó el intercambio de gases.

Es importante mencionar que las algas no fueron aclimatadas ni al agua residual a tratar ni a la exposición a la luz, razón por la cual pudieron sufrir un periodo de estrés del día 0 al día 8. Al permanecer bajo esta condición durante ocho días el cultivo de microalgas pudo adaptar su metabolismo al suministro constante de luz y de nutrientes e iniciar el proceso de depuración.

9.7. Análisis estadístico

Para la investigación se desarrolló un análisis estadístico utilizando el test de Wilcoxon el cual consiste en emplear dos muestras pareadas, establecer dos posibles hipótesis y la variable de respuesta puede ser ordinal o cuantitativa. De acuerdo a lo anterior, mediante este análisis se quiso determinar si un tratamiento es efectivo usando microalgas para la reducción de contaminantes en aguas residuales porcinas.

Hipótesis:

H0: No hay eficiencia en la remoción de contaminantes empleando un tratamiento con microalgas.

H1: Si hay eficiencias de remoción de contaminantes empleando tratamientos con microalgas.

Ilustración 10: Análisis estadístico – Paired tests

Dia 8		Dia 15	
N:	8	Mean:	150,88
Mean:	262,63	Median:	140
Median:	239		
t test:			
t:	2,891	p(same mean):	0,0233
Sign test:			
r:	8	p(same median):	0,007813
Wilcoxon test			
W:	36	p(same median):	0,011719
Normal approx. z:	2,521	p(same median):	0,00802
Monte Carlo (n=100000):			

Fuente: Elaboración propia.

Podemos decir que, como el valor de p es menor que 0,05, entonces se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay evidencias suficientes para plantear que el tratamiento con microalgas, es efectiva en la reducción contaminante con un nivel de significación del 5%.

10. CONCLUSIONES

Las microalgas encontradas en las muestras del agua de la quebrada la cajita corresponden a los géneros *Gomphonema Agardh* de la clase bacillariophyceae, *Gonatozygon monotaenium de Bary* de la clase Conjugatophyceae, *Bulbochaete C. A. Agardh*, *Spirogyra* y *Closterium aciculare* de la división clorofíceas, *Chroococcus turgidus*, *Chlorella vulgaris* y la *Oscillatoria vaucher* pertenecientes a la división cianobacteria.

El fertilizante Irricol inicio fue la fuente de nutriente más indicada para la producción masiva del cultivo mixto de microalgas, por los porcentajes de concentración mínimos de los macroelementos y microelementos que requieren para su crecimiento y desarrollo; además fue de bajo costo y fácil manejo.

El incremento de las concentraciones del tiempo 0 al día 8 se debió principalmente a la posible acumulación en la concentración inicial de nitrógeno del medio más el aporte generado por el agua residual porcina. Además, en este tiempo no se presentaron remociones por la saturación de oxígeno disuelto en las muestras.

El tratamiento más eficiente para la remoción de nitratos y fosfatos fue el sistema abierto, con condiciones de luz expuestas a 24 horas y 100% agua residual porcina con eficiencias de remoción de 81,5% para nitratos y 55,7% para fosfatos. A su vez, en el tratamiento del sistema cerrado, con un fotoperiodo de luz 12:12 y 100% agua residual porcina presento la menor remoción de nitratos con 9,46%; mientras que para fosfatos la menor remoción fue de 23, 8% en el sistema cerrado, con condiciones de luz expuestas a 24 horas y 100% agua residual porcina.

11. RECOMENDACIONES

Es importante que las microalgas tengan una fase inicial para que sus células se adapten a las nuevas condiciones del medio para tener una alta tasa de crecimiento y tolerancia a los contaminantes del agua residual. Asimismo, se deben adaptar las microalgas al grado de exposición de luz evitando el efecto inhibitorio sobre su capacidad fotosintética y un posible estrés durante el proceso de tratamiento.

Para llevar a cabo un tratamiento de aguas residuales porcinas por medio de microalgas se recomienda emplear un cultivo monoalgal ya que es más fácil optimizar sus condiciones de crecimiento en comparación a un cultivo mixto.

La cantidad de oxígeno debe estar regulada por la implementación de los sistemas de cultivo de microalgas que permitan el control y la eliminación de oxígeno del medio, evitando un exceso de gas disuelto que puede provocar la inhibición de la fijación de carbono a partir del CO₂ disuelto.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abellán, H. (26 de febrero de 2017). *Mundo Microscopico*. Obtenido de <https://www.biodiversidadvirtual.org/micro/Oedogonium-sp.-img2401.html>
- AEROBIOS, P. B. (19 de marzo de 2018). *Ingeniería de aguas residuales/Procesos biológicos aerobios*. Obtenido de https://es.wikibooks.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_de_aguas_residuales/Procesos_biol%C3%B3gicos_aerobios
- Agricultura, O. d. (2017). *Cultivos de microalgas*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/ab473s/AB473S02.htm>
- agua, p. (26 de junio de 2006). *CLOSTERIUM ACICULARE*. Obtenido de <https://www.flickr.com/photos/microagua/3665309255>
- Agua, P. (10 de enero de 2010). *GONATOZYGON MONOTAENIUM, ALGA DE TRANSICIÓN*. Obtenido de <https://www.flickr.com/photos/microagua/4262650664>
- Alberto, J. (2009). *Los organismos y el ambiente. Los factores ecológicos*. Obtenido de Los organismos y el ambiente. Los factores ecológicos.: http://hum.unne.edu.ar/academica/departamentos/dptogeog/catedras/biogeografia/fac_eco_luz.pdf
- Alejandro, H. P. (2010). *Utilización de la microalga chlorella vulgaris en la remoción de contaminantes orgánicos provenientes de las aguas residuales de la empresa conalsebos a escala laboratorio*. Obtenido de Utilización de la microalga chlorella vulgaris en la remoción de contaminantes orgánicos provenientes de las aguas residuales de la empresa conalsebos a escala laboratorio: <http://biblos.uamerica.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=31161>
- Alfonzo Gutiérrez, C. R.-M.-G.-M.-S.-R. (2015). USO POTENCIAL DE AGUAS RESIDUALES DE CRIADEROS DE CERDO EN LA PRODUCCIÓN DE Capsicum chinense. *Rev. Fitotec. Mex.*, 383-384-385.
- Algaefix. (8 de agosto de 2012). *Cultivo de microalgas: sistemas abiertos vs sistemas cerrados*. Obtenido de <https://www.co2algaefix.es/?q=node/56>
- Andersen. (2005). *Algal culturing techniques*. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=-qWHAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Algal+culturing+techniques&ots=Xpso>

EjyoN_&sig=pvtCgeT5sPdfDKEM1og-
whG9MIA#v=onpage&q=Algal%20culturing%20techniques&f=false

- Angélica Evelin Delgadillo Lopez, C. A. (2011). *FITORREMEDIACIÓN: UNA ALTERNATIVA PARA ELIMINAR LA CONTAMINACIÓN*. Obtenido de FITORREMEDIACIÓN: UNA ALTERNATIVA PARA ELIMINAR LA CONTAMINACIÓN: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>
- Arias, B. G. (2010). *Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas*. Obtenido de Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas.:
<file:///C:/Users/DuVaN/Downloads/Dialnet-FitorremediacionConHumedalesArtificialesParaElTrat-3638734.pdf>
- Asturnatura.com. (28 de marzo de 2009). *Descripcion Chroococcus turgidus*. Obtenido de <https://www.asturnatura.com/especie/chroococcus-turgidus.html>
- Biopedia. (2017). *Aguas dulces*. Obtenido de <https://www.biopedia.com/aguas-dulces/>
- Borrego. (abril de 2012). *Cultivo de Spirulina platensis empleando aguas residuales de cerdo en un proceso semicontinuo*. Obtenido de https://www.academia.edu/24174020/Cultivo_de_Spirulina_platensis_empleando_aguas_residuales_de_cerdo_en_un_proceso_semicontinuo
- Briceño, G. (2013). *Agua Dulce*. Obtenido de <https://www.euston96.com/agua-dulce/>
- Cadena. (1 de marzo de 2017). *Planta de tratamientos de aguas residuales mediante un sistema combinado aerobio, anaerobio, y fitorremediación para el programa porcino del IASA*. Obtenido de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12818/1/T-ESPE-053795.pdf>
- Cádiz, U. d. (2012). *NUEVO PROCEDIMIENTO DE ELIMINACIÓN DE NUTRIENTES DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE FOTOBOTRATAMIENTO CON MICROALGAS*. Obtenido de NUEVO PROCEDIMIENTO DE ELIMINACIÓN DE NUTRIENTES DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE FOTOBOTRATAMIENTO CON MICROALGAS:
<http://cth.uca.es/gestion/contenidos/patentes/archivos/microalgas.pdf>
- Cai, Park, & Li. (2013). *Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Camacho, Campos, Escalera, & González. (2012). *Cultivo y elaboración de un producto comestible de Chlorella vulgaris*. Obtenido de

<https://www.yumpu.com/es/document/view/37706563/cultivo-y-elaboracion-de-un-producto-comestible-de-chlorella-vulgaris>

- Cañas, P. P. (18 de Mayo de 2017). *Importancia de la eliminación de NITRÓGENO y FÓSFORO en las EDAR*. Obtenido de Importancia de la eliminación de NITRÓGENO y FÓSFORO en las EDAR: <https://www.aguasresiduales.info/expertos/tribuna-opinion/importancia-de-la-eliminacion-de-nitrogeno-y-fosforo-en-las-edar-eQTd5>
- Carrera, A. (17 de Marzo de 2014). *Produccion pecuaria*. Obtenido de Produccion pecuaria: <https://prezi.com/qjijq0lyaykr/produccion-pecuaria/>
- Chacón, Andrade, Cárdenas, Araujo, & Morales. (8 de Julio de 2004). *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*. Obtenido de <https://produccioncientificaluz.org/index.php/boletin/article/view/26>
- Chisti. (junio de 2007). *Biodiesel from microalgae*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734975007000262>
- Colombia, S. A. (2002). *Guía Ambiental para el Subsector Porcícola*. Obtenido de <https://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com/2012/09/guc3ada-ambiental-para-el-subsector-porcc3adcola.pdf>
- Contreras. (2003). Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia*. *Scielo*, 450- 456.
- CORTOLIMA. (2004). *AGENDA AMBIENTAL DEL MUNICIPIO DE MELGAR*. Obtenido de https://cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/estudios/agendas/2004_Agenda_Ambiental_del_Municipio_de_Melgar.pdf
- Cubillos. (agosto de 2010). *DETERMINACIÓN DE CALIDAD HÍDRICA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN PORCINA CON CERO VERTIMIENTOS, EN RESERVA FORESTAL DE LOS CERROS ORIENTALES DE BOGOTÁ, D.C.* Obtenido de <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/publicaciones-e-investigacion/article/view/581/1291>
- Dominic. (2009). Phycoremediation efficiency of three algae *Chlorella vulgaris*, *Synechocystis salina* and *Gloeocapsa gelatinosa*. *Scielo*, 138-146.
- Dossier, J. F. (2013). *Gestión Integrada de los recursos hídricos: nuevas orientaciones para preparar el futuro*. Obtenido de Gestión Integrada de los recursos hídricos: nuevas orientaciones para preparar el futuro: <http://www.solidaritat.ub.edu/observatori/esp/itinerarios/agua/agua.htm#recursos>

- Enrique, J. (2015). tratamiento de aguas residuales invitro por medio de la microalga *Chorella spp*, en el municipio de Barrancabermeja Colombia. *Citecsa*, 7-8.
- EPA. (2009). *USO SEGURO DE AGUAS RESIDUALES EN LA AGRICULTURA: EJEMPLO DE BUENAS PRACTICAS*. Obtenido de USO SEGURO DE AGUAS RESIDUALES EN LA AGRICULTURA: EJEMPLO DE BUENAS PRACTICAS: https://collections.unu.edu/eserv/UNU:5957/SafeUseOfWastewaterInAgriculture_ESP.pdf
- EPA. (2 de diciembre de 2016). *Contaminación por nutrientes*. Obtenido de <https://espanol.epa.gov/espanol/contaminacion-por-nutrientes>
- Espejo, R. P. (Enero de 2006). *GRANJAS PORCINAS Y MEDIO AMBIENTE Contaminación del agua en La Piedad, Michoacán*. Obtenido de GRANJAS PORCINAS Y MEDIO AMBIENTE Contaminación del agua en La Piedad, Michoacán: <https://core.ac.uk/download/pdf/129709979.pdf>
- Eva María Montero López, R. G. (2015). *Alternativas para la producción porcina a pequeña escala*. Obtenido de Alternativas para la producción porcina a pequeña escala.: http://www.fmvez.unam.mx/fmvz/publicaciones/archivos/Alternativas_Porcina.pdf
- FAO. (28 de Noviembre de 2014). *Cerdos y la producción animal*. Obtenido de Cerdos y la producción animal: <http://www.fao.org/ag/againfo/themes/es/pigs/production.html>
- FAO. (2017). *cultivo de microalgas*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/ab473s/AB473S02.htm>
- Farías. (2011). *Determinación de parámetros de la microalga Isochrysis aff. Galbana: Comparación de un fotobioreactor continuo versus un cultivo batch*. Obtenido de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2011/bpmfpe.78d/doc/bpmfpe.78d.pdf>
- Fernandez. (2014). *Ingeniería de Procesos aplicada a la Biotecnología de Microalgas*. Obtenido de Ingeniería de Procesos aplicada a la Biotecnología de Microalgas: <https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-3-nutrientes.html>
- Fernández, Beascochea, Muñoz, & Mora, F. d. (2015). *Manual de Fitodepuración*. Obtenido de <https://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes/documentacion/Cap%EDtulos%20Manual/Cap%EDtulos%201%20a%202.pdf>

- Fernández, J., Girela, M. M., Mosquera, F., & Curt, M. (24 de Noviembre de 2014). *USO DE MICROALGAS INMOVILIZADAS EN BIOFILM PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES*. Obtenido de http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2014/CT%202014/Paneles/1896712030_panel.pdf?fbclid=IwAR0rH0AwIKi9Ynsv36dPCrRaIOA-LkYDbBawJ8aTIL93XAKrF_JeOGXfhk
- Fernando, G. (17 de noviembre de 2015). *Fundación para el conocimiento madrid*. Obtenido de <http://www.madrimasd.org/blogs/espirlina/2015/11/17/40/>
- Flickr. (11 de febrero de 2009). *Oocystis tainoensis*. Obtenido de <https://www.flickr.com/photos/microagua/3497926831>
- Foyer, & Noctor. (2003). *Redox sensing and signalling asociated wiht reactive oxygen in chloroplasts, peroxisomes and mitochondria*. *PHYSIOL PLANTARUM*.
- GARCIA. (2010). *IMPATO AMBIENTAL PROVOCADO OR EFLUENTES DE INSTALACIONES DE BIOGÀS DE PEQUEÑA Y EDIANA ESCALA*. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542017000400009&fbclid=IwAR2KozSIOIGy70nN38ESSNzD2FLxoKc1W14UAUVwfbiQpkBt-n5J54PGJN8
- García, J. R. (Agosto de 2013). *El uso de la cama profunda como alternativa para reducir el impacto ambiental ocasionado por la porcicultura peri-urbana*. Obtenido de El uso de la cama profunda como alternativa para reducir el impacto ambiental ocasionado por la porcicultura peri-urbana: <http://www.acervoyucatan.com/cmrev/cm002.pdf>
- García, L. M. (2008). *ELIMINACIÓN DE CO2 CON MICROALGAS*. Obtenido de *ELIMINACIÓN DE CO2 CON MICROALGAS:* <https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/1414/2008ON-MART%25CDNEZ%20GARC%25CDA%2C%20LORENA.pdf?sequence=1>
- García, M. d. (septiembre de 2013). *PRODUCCIÓN DE MICROALGAS CON APLICACIONES NUTRICIONALES PARA HUMANO Y ANIMALES*. Obtenido de <http://www.publicacionescajamar.es/pdf/publicaciones-periodicas/cuadernos-de-estudios-agroalimentarios-cea/5/5-642.pdf>
- Garzón, & Zuñiga. (noviembre de 2013). *CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PORCINAS Y SU TRATAMIENTO POR DIFERENTES PROCESOS EN MÉXICO*. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v30n1/v30n1a6.pdf>

- Gil, V. d. (2010). *PRODUCCIÓN PORCINA Y EL MEDIO AMBIENTE*. Obtenido de PRODUCCIÓN PORCINA Y EL MEDIO AMBIENTE:
<http://www.eumed.net/cursecon/ecolat/cu/2010/vmrg.htm>
- Gomez. (2007). Microalgas: Aspectos ecológicos y biotecnológicos. *Revista cubana de química*, 3-20.
- Gonzalez, Canizares, & Baena. (1997). *Efficiency of ammonia and phosphorus removal from Colombian agroindustrial wastewater by the microalgae Chlorella vulgaris and Scenedesmus dimorphus*. . Bioresource Technology.
- Grobbelaar. (2004). . Algal nutrition: mineral nutrition. In: Richmond A (ed). Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology. *SciELO*, 97-115.
- Guamán, M., & González, N. (noviembre de 2016). *Catálogo de microalgas y cianobacterias de agua dulce del Ecuador*. Obtenido de <http://energia.org.ec/cie/wp-content/uploads/2017/09/Catlogo-de-Microalgas-y-Cianobacterias-del-Ecuador.pdf>
- Guillén, A. (15 de julio de 2013). *Spirogyra*. Obtenido de <https://www.biodiversidadvirtual.org/micro/Spirogyra-img1017.html>
- Hammouda. (2012). Microalgae and wastewater treatment. Ecotoxicology and Environmental Safety. *SciELO*, 205- 210.
- Hernández. (2000). *TRATAMIENTO DE EFLUENTES PORCICOLAS EN GRANJAS DE TRASPATIO*. Obtenido de TRATAMIENTO DE EFLUENTES PORCICOLAS EN GRANJAS DE TRASPATIO:
<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico13/013.pdf>
- Hernández, & Vásquez. (2016). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2631/263149506015.pdf>
- Hoff, & Snell. (2001). *Manual de cultura de plancton*. Obtenido de <http://biblio.uabcs.mx/tesis/TE1366.pdf>
- James, C., Hinty, S., & Salman, A. E. (1989). Crecimiento y ω 3 composición de ácidos grasos y aminoácidos de microalgas bajo diferentes regímenes de temperatura. *Aquaculture*, 77:337-351.
- Jimenez, M. (24 de Septiembre de 2014). *Fitodegradación de agentes contaminantes*. Obtenido de Fitodegradación de agentes contaminantes:
https://issuu.com/publicacionesfiad/docs/13_-_fitodegradaci__n_de_agentes_co

- Jüttner. (23 de noviembre de 2016). *Gomphonema minutum* (Agardh) Agardh; 1831; 34. Obtenido de <https://naturalhistory.museumwales.ac.uk/diatoms/browsespecies.php?-recid=2836>
- Kaplan, Richmond, Dubinsky, & Aronson. (1986). *Manual de cultivo de microalgas*. Obtenido de <http://biblio.uabcs.mx/tesis/TE1366.pdf>
- Klötze, R. (2017). *Chlorella vulgaris*. Obtenido de <https://www.algomed.de/es/chlorella-2/>
- Lopez. (2011). *Nutrición y Metabolismos*. Obtenido de Nutrición y Metabolismos: <http://cepa-losllanos.centros.castillalamancha.es/sites/cepa-losllanos.centros.castillalamancha.es/files/descargas/Tema%205%20nutrici%C3%B3n%20y%20metabolismo%201.pdf>
- Luna, L. M. (2007). *MICROALGAS: ASPECTOS ECOLÓGICOS Y BIOTECNOLÓGICOS*. Obtenido de MICROALGAS: ASPECTOS ECOLÓGICOS Y BIOTECNOLÓGICOS: https://www.researchgate.net/publication/268424391_MICROALGAS_ASPECTOS_ECOLOGICOS_Y_BIOTECNOLOGICOS
- MACHADO, F. C. (2013). *ANÁLISIS DE PREFACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS EN COLOMBIA*. Obtenido de ANÁLISIS DE PREFACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS EN COLOMBIA: https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/1463/CampilloMachado_Francisco_2013.pdf?sequence=1
- MADS. (2016). *Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos*. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistematicos/politica-nacional-de-biodiversidad#documentos>
- Maity, J. P. (2014). Microalgae for third generation biofuel production, mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: Present and future perspectives – A mini review. *ScienceDirect*, 104- 113.
- Maldonado. (2008). *Asimilación del nitrógeno y del azufre*. McGraw-Hill Interamericana de España.
- Malgas. (2013). *Aplicaciones de las microalgas: estado de la técnica*. Obtenido de <http://proyectomalgas.com/wp-content/uploads/2014/04/guiamalgas.pdf>

- Marciales. (2008). *Microalgas acuáticas: La otra escala de la biodiversidad en la Amazonia colombiana*. Obtenido de <https://www.sinchi.org.co/files/publicaciones/publicaciones/pdf/Microalgas%20relo ad.pdf>
- Markou, G. (2011). Cultivation of filamentous cyanobacteria (blue-green algae) in agro-industrial wastes and wastewaters: A review. *Applied Energy . Scielo*, 3389- 3401.
- Minambiente. (26 de Spetiembre de 2003). *RESOLUCIÓN 1045*. Obtenido de <http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/1045%20-%202003.pdf>
- Ministerio de Agricultura, a. y. (2014). Obtenido de Fitoplancton: http://portal.mapama.gob.es/id_tax/ficha/buscador/2/17291
- Montaño, S. A. (Junio de 2015). *MICROALGAS: APLICACIONES E INNOVACIONES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS Y LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES*. Obtenido de MICROALGAS: APLICACIONES E INNOVACIONES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS Y LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES: https://www.researchgate.net/publication/278676397_MICROALGAS_APLICACIONES_E_INNOVACIONES_EN_EL_TRATAMIENTO_DE_AGUAS_CONTAMINADAS_Y_LA_PRODUCCION_DE_BIOCOMBUSTIBLES
- Muñoz, & Guieysse. (agosto de 2006). *Procesos de algas y bacterias para el tratamiento de contaminantes peligrosos: una revisión*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135406003605?via%3Dihub>
- OEFA. (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. Obtenido de https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827
- Perez. (3 de abril de 2009). *CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS DEL NOROESTE, S.C.* Obtenido de https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/258/1/perez_r.pdf
- Pérez, D. M. (22 de Septiembre de 2015). *Metodología de alto rendimiento para evaluar contenido de lípidos y producción de biomasa en microalgas*. Obtenido de Metodología de alto rendimiento para evaluar contenido de lípidos y producción de biomasa en microalgas: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/5644/1/122855.pdf>
- pérez, G. (26 de Juino de 2016). *Microalgas y biocombustibles*. Obtenido de Microalgas y biocombustibles: <http://www.eoi.es/blogs/merme/microalgas-y-biocombustibles/>

- Polo, & Vargas. (2019). *ELIMINACIÓN DE NUTRIENTES UTILIZANDO CHLORELLA SP.* . Obtenido de <http://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/5297/Eliminaci%C3%B3n%20de%20fosfatos%20y%20nitratos%20de%20agua%20residual%20municipal%20mediante%20un%20in%20C3%B3culo%20optimizado%20de%20Chlorella%20sp.%20en%20un%20sistema%20de%20fotobiorreactores%20>
- PORCICULTORES, A. C. (2002). *Guia ambiental para el subsector porcicola Colombia.* Obtenido de Guia ambiental para el subsector porcicola Colombia.: <http://www.minambiente.gov.co/documentos/porc%C3%ADcola.Pdf>
- Posten, P. (2009). Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology* . *scielo*, 35-42.
- Prajapati. (2013). Phycoremediation coupled production of algal biomass, harvesting and anaerobic digestion: Possibilities and challenges. *Scielo*, 1408- 1425.
- Pütz, P. (16 de feberero de 2010). *Eliminacion y determinación de fosfato.* Obtenido de Eliminacion y determinación de fosfato: <http://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/37743-Eliminacion-y-determinacion-de-fosfato.html>
- Raouf, Homaidan, & Ibraheembc. (13 de Abril de 2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3), 257–275. doi:10.1016/j.sjbs.2012.04.005. Obtenido de Tratamiento de aguas residuales con microalgas: <https://agua.org.mx/tratamiento-de-aguas-residuales-con-microalgas/>
- Rhodes, C. J. (Febrero de 2009). *Oil from algae; salvation from peak oil?* Obtenido de Oil from algae; salvation from peak oil?: https://www.researchgate.net/publication/26309317_Oil_from_algae_salvation_from_peak_oil
- Rigano, D. M., Martello, Martino, D., & Rigano. (3 de abril de 1985). *Effect of CO, and phosphate deprivation on the control ot nitrate, nitrite and ammonium metabtolism in Chlorella.* *Physiologia Plantarum*. Obtenido de https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/258/1/perez_r.pdf
- Rivas, Montes, & Domínguez. (octubre de 2015). *Cajamar ADN Agro.* Obtenido de <https://www.cajamar.es/pdf/bd/agroalimentario/innovacion/investigacion/documentos-y-programas/microalgas-1444391623.pdf>
- Roa, & Cañizares. (2012). *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias.* Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/903/90326398006.pdf>

- Roa, C. (2012). *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/903/90326398006.pdf>
- Rodriguez, A. (28 de Septiembre de 2018). *METODO DE KJELDAHL*. Obtenido de <http://www.grupo-selecta.com/notasdeaplicaciones/sin-categoria/metodo-kjeldahl/>
- Rodriguez, H. (2015). *Las aguas residuales y sus efectos contaminantes*. Obtenido de <https://www.iagua.es/blogs/hector-rodriguez-pimentel/aguas-residuales-y-efectos-contaminantes>
- Rojas, J. A. (2018). *AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES*. Escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito.
- Romero. (2000). *Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y principios de diseño*. Bogotá D.C. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero. (2018). *AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES*. Escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito.
- Sergio Arias, F. B. (2010). fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/5/5, 5-7-10.
- Sociedad de Agricultores de Colombia - SAC. (2002). *Guía Ambiental para el Subsector Porcícola*. Obtenido de <https://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com/2012/09/guc3ada-ambiental-para-el-subsector-porcc3adcola.pdf>
- Soluciones Ambiente. (2014). *ILUMINACIÓN LED: AHORA LA EFICACIA LA MEDIMOS EN LÚMENES, TE ENSEÑAMOS COMO COMPRAR TUS BOMBILLAS PARA AHORRAR*. Obtenido de https://www.ambientesoluciones.com/sitio/contenidos_mo.php?it=1805&fbclid=IwAR3BY5dKzZveWCs2Dt2UcntlG_VfllP8ySkbW1NnN7ZV1ALbS-eLH9QpSvI
- Tafur, & Estrada. (18 de agosto de 2015). *TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES IN VITRO POR MEDIO DE LA MICROALGA CHLORELLA SP EN EL MUNICIPIO DE BARRANCABERMEJA, COLOMBIA*. Obtenido de <https://www.unipaz.edu.co/ojs/index.php/revcitecsa/article/view/94>
- Tan, Lam, & Uemura. (enero de 2018). *El cultivo de microalgas para la producción de biodiesel: Una revisión sobre el procesamiento de aguas arriba y aguas abajo*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1004954117304305?via%3Dihub>

- Tolivia, A., & Boltovskoy, A. (diciembre de 2008). *microalgas acuaticas La otra escala de la biodiversidad en la Amazonia colombiana* . Obtenido de <https://www.sinchi.org.co/files/publicaciones/publicaciones/pdf/Microalgas%20relo ad.pdf>
- Torzillo, & Vonshak. (2013). *□e microalgae cell with reference to mass cultures: Environmental stress physiology with reference to mass cultures*. Handbook of microalgal culture: applied phycology and biotechnology.
- UNESCO. (2003). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Colombia.
- Velandia, & Olarte. (2016). *EVALUACIÓN DEL USO DE LA MICROALGA Chlorella vulgaris EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES (VINAZAS)*. Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/bitstream/10596/5882/3/91535665.pdf>
- Velasco, L., Gómez, J., Ospina, Salazar, & Trujillo, C. (2009). EFECTO DE LA INTENSIDAD LUMÍNICA, TEMPERATURA Y SALINIDAD SOBRE EL CRECIMIENTO DE LA MICROALGA *Isochrysis galbana* (CLON T-ISO). *Intropica*, 3.
- Velazco, Gómez, Ospna, & Trujillo. (2009). *Efect of light intensity, temperature and salinity on the growth of Isochrysis galbana*. *Intropica* 4.
- VILCHEZ, C. T. (2001). *ESTUDIO DEL MÉTODO ANALITICO DE DETERMINACIÓN ESPECTROFOTOMÉTRIA DE NITRATOS Y NITRITOS, SU CONTROL DE CALIDAD MEDIANTE TÉCNICAS DE VALIDACIÓN Y APLICACIÓN EN LA EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE AGUA SUPERFICIAL DE RIO*. Obtenido de file:///D:/Downloads/toro_vc.pdf
- Wang, Y. L. (23 de julio de 2010). *Biogeosciences*. Obtenido de <https://www.biogeosciences.net/7/2261/2010/>
- Witt, & Borchardt. (1960). *The removal of nitrogen and phosphorus from sewage effluents through the use of algal culture*. *Journal of biochemical and microbiological technology and engineering*.
- Y. P. Wang, R. M. (23 de julio de 2010). *A global model of carbon, nitrogen and phosphorus cycles for the terrestrial biosphere*. Obtenido de <https://www.biogeosciences.net/7/2261/2010/bg-7-2261-2010.pdf>