

**DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTÓTROFO PARA EL SANEAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE PORQUERIZAS EN EL  
MUNICIPIO DE GIRARDOT (CUNDINAMARCA)**

DIANNE HELAIN RAMIREZ TOVAR

JOHAN FELIPE GUTIERREZ JIMENEZ

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA, FACULTAD DE CIENCIAS

AGROPECUARIAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

GIRARDOT CUNDINAMARCA

2022

**DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTÓTROFO PARA EL SANEAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE PORQUERIZAS EN EL MUNICIPIO DE  
GIRARDOT (CUNDINAMARCA)**

DIANNE HELAIN RAMIREZ TOVAR

JOHAN FELIPE GUTIERREZ JIMENEZ

Proyecto de grado para optar al título de

Ingeniero Ambiental

Director

DAYRO ARLEY TORRES VARGAS

Codirectora

DALIA XIOMARA SUAREZ PULIDO

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA, FACULTAD DE CIENCIAS

AGROPECUARIAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

GIRARDOT CUNDINAMARCA

2022

## TABLA DE CONTENIDO

Lista de tablas .....	5
Agradecimientos .....	8
Dedicatoria.....	9
Resumen.....	12
Introducción .....	14
Planteamiento del problema.....	18
Justificación .....	21
Objetivos .....	24
Objetivo General .....	24
Objetivos específicos.....	24
Marco referencial .....	25
Marco teórico .....	25
Marco conceptual .....	33
Marco Legal .....	35
Diseño metodológico .....	36
Siembra y mantenimiento de las cepas <i>Chlorella sp</i> y <i>Cyanobacteria</i> .....	38
Crecimiento del cultivo .....	40
Tratamiento de agua residual Porcícola .....	43
Análisis de los parámetros físico-químicos y biológicos .....	46
Resultados Y Discusión .....	52
Crecimiento celular .....	52
Remoción de materia orgánica (DBO y DQO) por <i>Chlorella sp</i> .....	54
Remoción de materia orgánica (DBO y DQO) por <i>Cyanobacteria</i> .....	56
Comparación de eficiencia de remoción de DBO y DQO entre las cepas <i>Cyanobacteria</i> y <i>Chlorella sp</i> .....	58
Remoción de nutrientes (NO <sub>3</sub> - y PO <sub>4</sub> ).....	60
Comparación de eficiencia de remoción de nutrientes entre las cepas <i>Cyanobacteria</i> y <i>Chlorella sp</i> .....	63
Remoción de la Turbidez por <i>Cyanobacteria</i> y <i>Chlorella sp</i> .....	65
Incremento de Oxígeno Disuelto por <i>Cyanobacteria</i> .....	66

Incremento de Oxígeno Disuelto por <i>Chlorella sp</i> .....	68
Porcentaje de remoción de solidos sedimentales para ambas cepas .....	70
Comportamiento del pH en el tratamiento del agua residual proveniente de porcícolas por las cepas <i>Cyanobacteria</i> y <i>Chlorella sp</i> .....	72
Comparación de parámetros máximos permisibles en resolución 1207 / 2014 y resolución 0631/2015 con el Agua residual tratada por <i>Chlorella sp</i> y <i>Cyanobacteria</i> .....	74
Conclusiones .....	78
Recomendaciones .....	79
Referencias Bibliográficas .....	80
Anexos .....	90

### Lista de tablas

Tabla 1. Cuantificaciones para el análisis de los parámetros Físico-químicos en cada una de las réplicas realizadas en las cepas <i>Chlorella sp</i> y <i>Cyanobacteria</i> .....	47
Tabla 2. Determinación de la demanda biológica de oxígeno DBO, preparación para la medición .....	50
Tabla 3. Crecimiento celular de <i>Chlorella sp</i> en medio BBM .....	52
Tabla 4. Medición de crecimiento de <i>Cyanobacteria</i> por medio de pesaje .....	53
Tabla 5. Porcentajes de remoción de DBO y DQO de <i>Chlorella sp</i> .....	55
Tabla 6. Porcentajes de remoción de la DBO Y la DQO de la cepa <i>Cyanobacteria</i> . .....	57
Tabla 7. Eficiencia de remoción de nitratos y fosfatos con la cepa <i>Cyanobacteria</i> de aguas residuales provenientes de porcícolas. ....	60
Tabla 8. Eficiencia de remoción de nitratos y fosfatos con la cepa <i>Chlorella sp</i> de aguas residuales provenientes de porcícolas.....	60
Tabla 9. Eficiencia de remoción de la turbidez para las cepas utilizadas en aguas residuales provenientes de porcícolas <i>Cyanobacteria</i> y <i>Chlorella sp</i> .....	65
Tabla 10. Eficiencia de remoción de solidos sedimentales cada una de las cepas <i>Chlorella sp</i> y <i>Cyanobacteria</i> . .....	70
Tabla 11. Comparación de las resoluciones para los parámetros máximos permisibles en vertimientos y de uso agrícola para la cepa <i>Chlorella sp</i> . .....	74
Tabla 12. Comparación de las resoluciones para los parámetros máximos permisibles en vertimientos y de uso agrícola para la cepa <i>Chlorella sp</i> . .....	76

### Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Toma de muestras aguas residuales provenientes de porcícolas .....	38
Ilustración 2. Sistema de cultivo de micro algas.....	40
Ilustración 3. Cuadrantes cámara de Neubauer.....	41
Ilustración 4. Orden de conteo en cada cuadrante .....	41
Ilustración 5. Sistema de tratamiento en equipo de estudio “TA-DB-001/PE” .....	44
Ilustración 6. Tratamiento de aguas residuales de porquerizas en reactor Biológico.....	46
Ilustración 7. Análisis de parámetros fisicoquímicos .....	51
Ilustración 8. <i>Cianobacteria</i> iniciales para replicar - <i>Cianobacteria</i> después de 5 días de crecimiento.....	53
Ilustración 9. Crecimiento Visual <i>Cianobacteria</i> .....	54
Ilustración 10. Comparación de la eficiencia de remoción de DQO entre las cepas <i>Cianobacteria</i> y <i>Chlorella sp.</i> .....	
Ilustración 11. Comparación eficiencia de remoción entre las cepas <i>Cianobacteria</i> y <i>Chlorella sp</i> en el parámetro DBO para aguas residuales provenientes de porcícolas.....	59
Ilustración 12. Comparación eficiencia de remoción entre las cepas <i>Cianobacteria</i> y <i>Chlorella sp</i> en el parámetro Fosfatos para aguas residuales provenientes de porcícolas .....	63
Ilustración 13. Comparación eficiencia de remoción entre las cepas <i>Cianobacteria</i> y <i>Chlorella sp</i> en el parámetro Nitratos para aguas residuales provenientes de porcícolas .....	64
Ilustración 14. Comparación eficiencia de remoción entre las cepas <i>Cianobacteria</i> y <i>Chlorella sp</i> en el parámetro de Turbidez .....	66
Ilustración 15. Porcentaje de eficiencia de incremento del OD para <i>Cianobacteria sp</i> para la réplica 1.....	66
Ilustración 16. Porcentaje de eficiencia de incremento del OD para <i>Cianobacteria sp</i> para la réplica 2.....	67
Ilustración 17. Porcentaje de eficiencia de incremento del OD para <i>Chlorella sp</i> para la réplica 1 .....	68
Ilustración 18. Porcentaje de eficiencia de incremento del OD para <i>Chlorella sp</i> para la réplica 2 .....	68

Ilustración 19. Comparación de porcentaje de remoción de solidos sedimentales para cada una de las cepas utilizadas .....	70
Ilustración 20. Comportamiento del pH en el tratamiento del agua residual proveniente de porcícolas con la cepa Cyanobacteria .....	73
Ilustración 21. Comportamiento del pH en el tratamiento del agua residual provenientes de porcícolas con la cepa Chlorella sp.....	74

## **Agradecimientos**

Queremos agradecer principalmente a nuestras familias y amigos quienes nos han apoyado incondicionalmente a lo largo de diferentes procesos durante nuestras vidas, sin el apoyo de aquellas personas que nos aman nunca habríamos logrado la metas que algún prometimos.

De igual manera, agradecemos a la Universidad de Cundinamarca por brindarnos los espacios y recursos necesarios para el desarrollo de nuestra carrera de manera satisfactoria, formando profesionales con principios y valores destacables para dar inicio a una nueva etapa en nuestra vida. Permitiéndonos, además, conocer diferentes personas que marcaron huella en nuestra vida con diversos recuerdos y experiencias. También a la universidad Nacional de Colombia por brindarnos apoyo y recursos en el proceso de la investigación.

El presente trabajo es el resultado del esfuerzo realizado día a día, durante un año, el cual no se habría podido culminar de manera satisfactoria sin la ayuda y empeño de nuestros directores de trabajo de grado Arley Torres y Dalia Suarez, por tal razón nos sentimos inmensamente agradecidos con ellos, quienes más que maestros se han convertido en nuestros amigos y guías con el pasar de los meses, por tal razón nos sentimos agradecidos con ellos.

Infinitas gracias a todos quienes nos acompañan y quienes nos han dejado durante el camino.

**Johan Felipe Gutiérrez Jiménez & Dianne Helain Ramírez Tovar**

## Dedicatoria

Dedico este trabajo primordialmente a mis dos madres Marlene Jiménez y Merly Gutiérrez, que me han brindado todo en esta vida con su valentía, esfuerzo y amor, quienes nunca necesitaron la ayuda de nadie para sacar a la familia adelante durante mi infancia y que hoy son mi ejemplo más grande de vida, no hay nadie como ustedes.

A mi familia entera, mi tío Enrique Gutiérrez quien siempre nos ha acompañado en buenas y malas, a mi padrastro Never De Alba, quien es mi figura paterna desde hace más de una década y mi mayor ejemplo de lo que un hombre debe ser siempre, a mi hermano Esteban a quien quiero inmensamente y espero ser un ejemplo a seguir en su vida.

También dedico esto a todos los amigos que me han acompañado en mi crecimiento a lo largo de los años y circunstancias, aquellos a quienes conozco desde el colegio Oscar Torres, Santiago Carvajal, Emanuel Tovar, Sebastián Peña, Juan Rodríguez, Julián Alcalá y demás que no menciono con los cuales he vivido y compartido en mi vida; también a todos los amigos que hice dentro de la universidad, a todos los integrantes de la manada, a Laura Sánchez compañera incondicional y fundamentalmente a Paola Arias quien sin su apoyo y conocimiento no hubiera logrado encaminar este proyecto.

Y como no agradecer a quien se esforzó intensamente para que este trabajo resultara lo mejor posible, mi compañera de tesis y querida amiga Dianne Ramírez. Sin su perseverancia nada de esto sería posible.

Por último, agradezco con toda mi consciencia y corazón a mi pareja Camila Cabal quien me llena de aliento para esforzarme constantemente en lo que hago y sobrellevar el día a día, mi mente no estaría del todo bien sin su ayuda y escucha, mil gracias a ella.

Un abrazo para el más allá, donde se encuentra mi hermosa madre Marlene Jiménez, quien nos dejó en el camino, todo esto es por y para ti.

*Johan Felipe Gutiérrez Jiménez*

Quiero dedicarle este trabajo a mi madre Yaneth Tovar Rodríguez, la cual me ha brindado su amor y apoyo incondicional en cada uno de mis logros y mis fracasos, quien es una mujer fuerte, la cual ha logrado cumplir los sueños de ella y sus tres hijas sin ayuda de nadie, mi admiración y amor es para ella, mi sol, mi vida y mi primavera.

A mis hermanas Chavelly Ramírez Tovar y Marianne Ramírez Tovar, quienes me han apoyado y me han enseñado desde la distancia el amor y la unidad de la familia, son mi ejemplo a seguir de mujeres fuertes e inteligentes, son el amor más bonito que tengo en mi vida, junto a mi madre las voy a amar toda la eternidad.

A Jhonsito “papito”, quien me ha brindado su apoyo y cariño desde muy pequeña, a pesar de que no llevo su apellido, llevo su enseñanza, su amor por el campo, los animales y las ganas de salir adelante a pesar de las circunstancias, un hombre maravilloso que acompaña a mi madre por el resto de sus días, gracias por ser parte de mi caminar.

A mi tía Nasly Argenis Tovar; mi segunda mamá, quien me ha apoyado incondicionalmente a mí y a mi familia, una mujer, que ha logrado sus sueños gracias a su fuerza y perseverancia, también le dedico este trabajo a mi abuelita por estar en cada uno de mis pasos, por cuidarme y brindarme su amor.

A mi familia que es parte de mi proceso personal y profesional, por el apoyo, el cariño y los consejos.

A mis amigos los cuales han estado durante este proceso, Brahyam Torres, Allison Camargo, Joseph Zuluaga, Andrés Ramírez y los que siempre me han brindado una voz de aliento, por ofrecerme la mano desde el día en que nos conocimos, por apoyarme en mis momentos malos, por estar en mis alegrías, por los consejos, las risas, son personas que siempre llevare en mis recuerdos y en mi corazón, a todas esas personas que algún momento fueron parte de este proceso y me apoyaron les dedico esta parte de vida, espero que la vida los brinde de amor en cada paso que den.

Finalmente, a mi compañero y amigo de trabajo de investigación Felipe Gutiérrez quien estuvo en los altos y bajos del proceso, quien me animo en algunos momentos de decadencia, por su apoyo incondicional, sin su ayuda no se habría podido culminar este grandioso proyecto.

Todo es por y para ustedes.

***Dianne Helain Ramírez Tovar***

## Resumen

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo evaluar la eficiencia de un sistema autótrofo como alternativa para el tratamiento de aguas residuales provenientes de porquerizas en el municipio de Girardot (Cundinamarca), mediante el uso de dos cepas de microalgas, *Chlorella sp* y *Cianobacteria*, las cuales se introdujeron en un equipo para estudio de depuración biológica a pequeña escala. Se trabajaron 2 fases, un reactor biológico, y una etapa de clarificación o decantación con un tiempo de retención hidráulica de 4 días. Se analizaron parámetros fisicoquímicos como turbidez, pH, temperatura, sólidos sedimentables, OD, DQO, nitratos y fosfatos; además de la demanda biológica de oxígeno (DBO). Los parámetros fueron monitoreados cada día durante los 4 días de tratamiento y la DBO, DQO, nitratos y fosfatos fueron analizados en la muestra inicial y al postratamiento. Se calculó el porcentaje de remoción de cada cepa a partir de la ecuación establecida por Sandoval, S y colaboradores. Obteniendo con *Chlorella sp* y *Cianobacteria*, remociones para DBO del 98% - 95%, DQO del 48% - 69%, fosfatos del 97% - 46%, y nitratos del 88% - 85% respectivamente. Una posible razón de la baja remoción de nitratos que presentan las dos cepas es la gran presencia de amonio en el agua residual, debido a que la mayoría de las especies de microalgas utilizan como fuente de nitrógeno el amonio presente en el medio, ya que dicho compuesto inhibe la asimilación de nitratos en las células. Se logró evidenciar por medio de la DBO, una alta degradación de la carga orgánica contaminante, demostrando la efectividad de las cepas para su uso en tratamientos de aguas residuales de origen porcícolas, con esto, el proyecto presenta a la comunidad rural del municipio de Girardot una alternativa viable para el tratamiento de las aguas residuales porcícolas producidas, logrando disminuir la contaminación en el área de influencia del proyecto productivo

y garantizando el cumplimiento de los niveles máximos permisibles establecidos por las autoridades correspondientes.

**Palabras Clave:** Biorremediación, Microalgas, Aguas Residuales.

## Introducción

Un sistema de tratamiento busca acelerar el proceso de descontaminación del agua, el cual se realiza de manera natural en cuerpos hídricos; el primer sistema de tratamiento de aguas que la humanidad utilizó fue en 1887, el cual fue un pozo séptico en la ciudad de Urbana, Illinois, Estados Unidos. (Aldana, *et al.* 2011). En Colombia, para 1933 se construyó la primera planta de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Bogotá (Asociación Nacional de Empresas de Servicios Públicos y Comunicaciones de Colombia 2017). Existen tratamientos que con base en su fundamento se clasifican en, físicos, químicos y biológicos y que pueden alternarse bien sea como preliminares, primarios, secundarios y terciarios de acuerdo con su objetivo. (Lizarazo, & Orjuela, 2013).

Los procesos físicos remueven material en suspensión de distintos tamaños, por medio de acciones mecánicas e hidráulicas implementando diversos equipos o instrumentos tales como, aireadores, rejillas, filtros, entre otros. (Salamanca, 2016). Mientras que los procesos de carácter químico se realizan mediante acciones de adsorción, precipitación, y desinfección, esto debido al uso de productos químicos, un ejemplo de esto es el uso sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) como coagulante (Lizarazo & Orjuela. 2013). Por último, los procesos biológicos degradan contaminantes orgánicos, y a su vez eliminan nutrientes tales como nitrógeno y fósforo, quienes realizan la remoción son los microorganismos presentes en el agua, principalmente bacterias, que se encargan de utilizar la materia orgánica como fuente de carbono, generando de esta manera la biomasa para después eliminarla por medio de decantación, debido a que tiene un peso mayor al del agua (López, C. Buitrón, G. García, H. Cervantes, F. 2017).

Estos tratamientos biológicos han demostrado eficiencias de remoción de más del 80% de contaminantes orgánicos e inorgánicos como nutrientes (Aldana. *et al.* 2011). Dentro de los sistemas Biológicos se han explorado diversidad de organismos, pero recientemente el uso de microalgas ha tomado especial relevancia por la capacidad que presentan diferentes especies para degradar materia orgánica, asimilar nutrientes y bioacumular metales pesados presentes en el agua, además de poseer un rápido crecimiento y poder utilizar la biomasa que generan para la elaboración diferentes subproductos como biofertilizantes o biocombustibles (Hernández & Labbé, 2014).

De acuerdo con lo expuesto previamente, es claro que los sistemas de tratamiento representan una alta complejidad y, por lo tanto, elevados costos de operación y mantenimiento. Sin embargo, algunos sistemas biológicos han demostrado ser eficientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas, de origen agrícola, ganadero e industriales, sin la implementación de procesos fisicoquímicos como pretratamientos.

Al respecto, las aguas residuales porcícolas se han considerado de alto impacto por su alta carga contaminante asociada al exceso de materia orgánica y algunos nutrientes como nitrógeno y fosforo. En Colombia, la actividad porcícola se ramifica en tres sistemas de producción: sistemas tecnificados, tradicional o semi-tecnificado y artesanal o de traspatio. El sistema tecnificado, utiliza avances tecnológicos, de manejo, nutrición, sanitarios y genéticos. Estas granjas tienden a mejorar su inocuidad a través de sistemas de calidad y prácticas eficientes de producción, (INTAGRI, 2019). El sistema semi-tecnificado trata de reproducir ciertas condiciones del sistema tecnificado, pero con recursos económicos limitados. Las medidas sanitarias presentes en este sistema son variables dependiendo de las condiciones de tecnificación, (Montero L., 2015). Mientras que el sistema artesanal, rural o de traspatio, consiste

en granjas que tienen entre una y 50 reproductoras. Este tipo de productores pueden localizarse en traspatios de zonas urbanas o periurbanas, en condiciones rurales. El principal problema de este tipo de porcicultura es la falta de acceso a tecnologías adecuadas y que, en su mayoría, no cumplen los estándares medioambientales para operar, ni permisos o licencias para llevar a cabo correctamente este tipo de producción. Del total de predios porcinos 3.465 en Colombia se estima que el 34,34% son granjas traspatio.

Las granjas tradicionales y los predios traspatio característicos del municipio de Girardot corresponden a 15 granjas de cría, 3 granjas de ciclo completo y 4 granjas de levante y ceba todas ellas no tecnificadas y un total de 84 predios porcinos, de los cuales 73,8% corresponden a predios traspatio (DATMA, 2019), estas unidades de producción no cuentan con sistemas de tratamiento de residuos líquidos o cuentan con sistemas no convencionales, que no alcanzan eficiencias de remoción de contaminantes óptimas en los afluentes tratados, a consecuencia de esto, el mal manejo de las aguas residuales provenientes de estas porquerizas produce un deterioro a largo plazo de los suelos y cuerpos hídricos tanto superficiales como subterráneos, por medio de escorrentía, esta carga orgánica presente en las aguas residuales altera directamente las propiedades físicas y químicas del suelo y agua (Vilanoba, *et al*, 2017).

Para el tratamiento de efluentes provenientes de porcícolas, se han tomado alternativas de tipo biológico, siendo este el más favorable, debido a las altas cargas orgánicas presentes. Estos sistemas corresponden a lagunas de tipo aerobio y anaerobio, que requieren grandes extensiones de terreno, y tiempos de retención hidráulicos amplios, generando malos olores, proliferación de vectores, carroñeros, entre otros (Aguirre, 2000).

Existen sistemas de tratamiento que buscan reemplazar a los tratamientos convencionales en eficiencia de remoción de contaminantes entre los cuales se encuentran a la vanguardia los

procesos de oxidación avanzada y de filtración por membrana (Clemente, A. et al., 2013). Sin embargo, estos procesos tienen costos elevados que impiden su implementación; solo en el municipio de Girardot, más del 50% de las fincas porcícolas no son tecnificadas, lo cual explica la ausencia de sistemas de tratamiento en las granjas de la región, debido a sus costos de producción y falta de conocimiento por parte de los propietarios de los predios; por tal razón, la investigación se enfoca en la implementación de un sistema autótrofo utilizando microalgas como alternativa para el tratamiento de aguas residuales porcícolas, la cual logre ser más eficiente y económica que los sistemas de tratamientos convencionales, con el fin de que los productores porcícolas puedan acceder a esta solución para la descontaminación de las aguas generadas en sus fincas.

Los cultivos de microalgas son considerados una tecnología de mediana complejidad, con desarrollo en escala de plantas pilotos (Flotats, *et al.* 2011). Al tratarse de organismos vivos involucran una serie de parámetros (nutrientes, OD, luz) que deben ser considerados, evaluados, determinados y medidos para realizar con éxito un cultivo. Además, cambian las eficiencias según la especie cultivada (Grobbelaar 2004, Richmond 2004, Park *et al.* 2011a). De la misma manera se busca que el tratamiento de aguas residuales porcícolas sea altamente eficiente, económicamente sostenible y de bajo impacto para el medio ambiente, generando de esta manera la posibilidad de reutilizar el recurso tratado, de tal forma que se garantice el cumplimiento de lo establecido en la resolución 1207 del 2014.

## Planteamiento del problema

El crecimiento acelerado de la industria porcícola, como cualquier otra actividad antrópica, origina diversos impactos ambientales negativos, asociados al mal manejo de las aguas residuales (AR) que son vertidas sin un tratamiento previo, a los cuerpos de agua y suelo (Arias. *et al.* 2010); las AR de esta actividad productiva están formadas por desperdicios sólidos y líquidos acarreados por el agua de lavado, principalmente excretas, restos de alimentos, y desechos producidos durante el parto.

Específicamente, las características de las aguas residuales generadas por la actividad porcícola en los municipios de la provincia del Alto Magdalena están directamente relacionadas con la temperatura y la humedad relativa en el ambiente, las cuales generalmente tienden a ser elevadas, ocasionando que el cerdo consuma menos alimento y más líquido, incrementando el volumen de orina generado. Así mismo, los sistemas de limpieza ocasionan un mayor gasto del recurso hídrico; especialmente, las granjas a pequeña escala no tecnificadas generan una cantidad de AR por unidad animal, casi tres veces mayor que el utilizado en granjas medianas y grandes, ya que los sistemas de limpieza son poco eficientes (Pérez. *et al.* 2001); sumado a esto, la concentración de contaminantes de los efluentes depende también de la edad del animal, su madurez fisiológica, y la calidad del alimento consumido (Escalante & Garzón, 2011).

Durante el desarrollo de las actividades en los diferentes ciclos de producción porcícola (cría, engorde, crecimiento y cebo), se generan vertimientos que no son tratados y van directo a los suelos y los cuerpos hídricos superficiales. Estos vertimientos poseen elevadas concentraciones de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y azufre, los cuales fluctúan constantemente en composición y cantidad (Smith, *et al.* 2001), esto dependiendo de las

condiciones mencionadas en el apartado anterior; dicho material contaminante, por lo general se oxida bioquímicamente, produciendo un consumo de oxígeno (Aguirre, 2000); si la carga orgánica es muy alta, el oxígeno presente en los cuerpos de agua será agotado paulatinamente, alterando los diversos procesos biológicos presentes allí, dando como resultado una afectación a las interacciones físico-químicas y biológicas del medio acuático, y por ende, generando un cambio en las condiciones iniciales del ecosistema, la pérdida de las formas de vida y de la calidad del recurso.

Para disminuir los impactos generados al recurso hídrico, existe la implementación de tratamientos secundarios de aguas residuales, especialmente basados en procesos biológicos. Sin embargo, en las granjas a pequeña escala, las condiciones físicas y espaciales no permiten la construcción de lagunas de estabilización; y de acuerdo con los ingresos es difícil la implementación de sistemas mecánicos de separación y sedimentación de líquidos por los elevados costos de construcción, operación y mantenimiento (Rodríguez & Pedreros, 2019); por lo cual es casi nula la presencia de sistemas de tratamiento en fincas de pequeños productores. Si la actividad porcícola sigue creciendo en la región, sin la implementación de métodos de depuración de sus aguas residuales, los niveles de contaminación aumentarán, afectando el recurso suelo y agua en las zonas rurales del municipio.

Es claro que el sector porcícola presenta una problemática tanto ambiental como económica a nivel regional y nacional, debido a esto, se opta por alternativas de tratamiento biológico aprovechando las capacidades de degradación de las microalgas, apuntando a lograr una sostenibilidad ambiental en el sector pecuario de la región del Alto Magdalena. De acuerdo con esto se plantea la siguiente pregunta:

¿Las microalgas y *Cyanobacteria* son una alternativa eficiente para el tratamiento biológico de aguas residuales porcícolas?

## Justificación

El proyecto de investigación se orienta a la reducción de los impactos causados por la generación de vertimientos directos de aguas residuales porcícolas al suelo y los cuerpos de agua superficial, con el fin de dar cumplimiento a los requerimientos establecidos por las Corporaciones Autónomas Regionales y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en temas de control ambiental. En la actualidad, el sector porcícola presenta una serie de retos en cuanto a la economía circular, la cual promueve la disminución de costos de producción; el manejo de olores; la eficiencia en el uso del recurso hídrico, la energía y materias primas; el tratamiento de la biomasa residual y su aprovechamiento.

Por tal razón, la investigación se enmarca en el objetivo seis de desarrollo sostenible (ODS), relacionado con agua y saneamiento, específicamente en la meta que establece que “a 2030, se mejorará la calidad del agua, minimizando la contaminación, eliminando el vertimiento, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización”.

La meta presente en el objetivo 6 mencionada anteriormente, genera en el sector porcícola una ruta hacia la implementación de estrategias que transformen los procesos tradicionales del sistema de producción, para la generación de grandes beneficios ambientales, económicos y sociales. De ahí la importancia de la investigación, la cual evalúa la eficiencia y factibilidad de un sistema de Tratamiento de aguas residuales con una unidad biológica a base de microalgas, que permita el reúso de aguas tratadas en el proceso productivo y demás procesos que se realicen en las granjas porcícolas que requieran del recurso, de esta manera, contribuyendo a la disminución de la demanda hídrica y huella hídrica del sector pecuario, que

para el 2018 constituían el 16% y el 32% respectivamente del consumo del recurso hídrico total en el país (ENA, 2018).

El proyecto se enmarca a su vez al objetivo doce (12) de los ODS, enfocado a la producción y consumo responsable, haciendo énfasis en las metas que pretenden lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales, y alentar a las empresas a que adopten prácticas sostenibles; lo cual se pretende lograr a través del cumplimiento de la normatividad de carácter ambiental presente en el territorio, puntualmente, enfocada al uso y gestión del recurso hídrico.

De esta forma la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH), expedida en el año 2010, sirve como documento base, la cual establece como estrategia el uso eficiente y sostenible del agua, ejerciendo de tal manera lo estipulado en el artículo 80 de la constitución de 1991 donde se resalta que se debe planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, y/o restauración.

Se emplea también la resolución 1207 de 2014 la cual adopta disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas y los criterios de calidad que cada uso requiere; estos usos pueden ser específicamente de origen agrícola y/o industrial (cada uso presenta sus respectivos criterios); adicionalmente se busca cumplir con lo estipulado en la resolución 0631 de 2015, la cual dicta los parámetros de vertimientos, tomando así el documento como herramienta para evaluar la eficiencia del sistema de tratamiento.

Con el fin de lograr el cumplimiento a lo establecido en la normatividad anteriormente mencionada, se realizaron procesos de degradación de la materia orgánica y asimilación de

nutrientes presentes en el agua residual, por medio de la implementación de microalgas, específicamente con: *Chlorella sp* y *Cyanobacteria* en biorreactores, proyectando este método a su uso en zonas rurales; esto debido a la capacidad que poseen estos organismos fotosintéticos de depurar las aguas con elevada presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos, además de demostrar una óptima adaptabilidad a distintas condiciones de los medios, y brindar la posibilidad de aprovechar su biomasa para elaborar otros productos de interés agrícola como biofertilizantes. Diversos autores han demostrado resultados prometedores para el tratamiento de aguas residuales de diferentes fuentes, tal como lo muestran Henna *et al.*, (2015) y Su *et al.*, (2011) resaltando la importancia de las microalgas y cianobacterias, con eficiencias de remoción de materia orgánica de hasta 98% y 99.1% respectivamente. Además, Mustafá *et al.*, (2012) en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios obtuvo remociones de 91%, a su vez, Kumar & Goyal (2008) y Rengifo *et al.*, (2012) implementaron microalgas para el tratamiento de metales pesados, evidenciando remociones de Cr(IV) 86,16% y Pb(II) 87% respectivamente. Lo anterior evidencia el potencial que presentan las microalgas para la disminución de los contaminantes (materia orgánica y nutrientes) presentes en los vertimientos de las fincas porcícolas de la región del Alto Magdalena.

## Objetivos

### Objetivo General

Evaluar el sistema autótrofo para el tratamiento de aguas residuales provenientes de porquerizas en el municipio de Girardot (Cundinamarca)

### Objetivos específicos

- Determinar la eficiencia de remoción de materia orgánica de las cepas *Chlorella sp* y *Cianobacteria* en aguas residuales porcícolas.
- Comparar la capacidad de asimilación de fosfatos y nitratos presentes en el agua residual de porquerizas por parte de *Chlorella sp* y *Cianobacteria*.

## Marco referencial

### Marco teórico

#### Tratamiento de aguas

El tratamiento de aguas residuales consiste en la disminución de agentes contaminantes, esto ha conllevado a la utilización de múltiples alternativas que permiten la remoción de estos a niveles permisibles para determinados fines, tales como uso urbano, agrícola e industrial.

En el caso del uso agrícola, uno de los mayores contaminantes en sus vertimientos son las excretas producto de los animales que se crían en los predios, lo cual genera una gran carga orgánica en el agua, para eliminar esto se han implementado una variedad de métodos para el tratamiento del agua residual por medio de procesos físicos, químicos, biológico o una combinación de ellos, y obtener un efluente que se pueda devolver al ambiente sin causar daños. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *et al.*, 2002).

Los tratamientos de agua residual se suelen clasificar en pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y terciarios o avanzados, Sin embargo, algunos textos explican que la distinción entre estos tratamientos es arbitraria. El tratamiento químico mediante procesos biológicos se considera tratamiento terciario, pero luego de la separación física se considera tratamiento primario (San Martín, 2000).

El tratamiento físico incluye detección, precipitación, separación, filtrado, etc.; mientras que el tratamiento biológico (aeróbico o anaeróbico) implementa filtración biológica y lodos activados, logrando estabilizar altas concentraciones de residuos orgánicos. El tratamiento químico por otra parte añade sustancias las cuales conducen a los siguientes procesos: Coagulación, precipitación, intercambio iónico, etc. (San Martín, 2000).

Una de las metodologías de tratamiento más promisorias actualmente es la biorremediación, que se ha centrado en la utilización de la diversidad genética y metabólica que caracteriza a los microorganismos para transformar contaminantes en productos inocuos o, en su defecto, menos tóxicos, que pueden integrarse en los ciclos biogeoquímicos naturales.

La Biorremediación de aguas residuales con microorganismos consiste en un tratamiento por lo general secundario donde se utilizan los microorganismos para eliminar la materia orgánica del agua, siendo esta su fuente de alimento, que al ser digerida desprende dióxido de carbono y metano. La digestión puede hacerse de forma aerobia o anaerobia. (Cartagena & Malo, 2017). Esta biorremediación microbiana actúa transformando los contaminantes para disminuir el riesgo ambiental.

### **Microalgas**

La mayoría de las microalgas son microorganismos eucariotas, pero también se han identificado variedades unicelulares y filamentosas, las cuales cambian de tamaño y forma; se encuentran en todos los hábitats, de preferencia en los acuáticos, bien sean marinos o dulceacuícolas (Abalde, 1999).

Las proliferaciones algales son propias de ambientes eutróficos, presentando altas tasas de remoción de material orgánico, prestando una importante labor ecológica en la purificación y reutilización del agua dentro de los diferentes ecosistemas. Las microalgas, utilizan factores promotores de crecimiento producidos por bacterias inherentes a dichos ambientes eutróficos, además de ciertos metabolitos como biotina, prolina, ácido glicólico y sobre todo mineral y

carbono oxidado proveniente de moléculas orgánicas en descomposición en general, formando biopelículas en donde se lleva a cabo las interacciones (Watanabe, et al., 2005). Sumado a lo anterior, estos organismos autótrofos dependen de diferentes variables ambientales determinantes de su crecimiento, tales como la luz, temperatura, pH, salinidad, oxígeno disuelto y nutrientes disponibles (Viveros, 2014).

Existen diversos géneros y especies de microalgas identificadas y seguramente muchas más sin ser clasificadas, su distribución depende directamente del medio en que se encuentren, bien sea en ecosistemas terrestres o acuáticos, oceánicos o continentales (lóticos y lénticos), en ecosistemas lénticos la literatura identifica las siguientes: *Cocconeis sp*, *Amphora sp*, *Tribonema sp*, *Fragilaria sp*, etc; mientras que en ríos o arroyos es común la presencia de especies tales como: *Spirogyra sp*, *Ulothrix sp*, *Scenedesmus sp*, *Oedogonium sp*, *Chlorella sp*, entre otras. (Gómez, 2007).

En la actualidad son ampliamente utilizadas en diferentes sectores tanto científicos, como industriales, principalmente se emplean como fuente de fertilizantes, biocombustibles, medicamentos y en la industria alimentaria, además de presentar un amplio estudio en el tratamiento de aguas residuales producto de diferentes fuentes de vertimiento, esto debido a su capacidad depuradora de contaminantes. (Cartagena & Malo. 2017).

### ***Chlorella sp***

Es una micro alga de forma circular, posee una tonalidad verde intenso, esto debido a la presencia de cloroplastos, es frecuentemente utilizada como bioindicador debido a su alta sensibilidad a sustancias tóxicas (Ma, J. *et al.* 2004), posee un diámetro entre 100 y 1000 veces menor a un milímetro, se reproduce aceleradamente y de manera asexual; por lo general se

encuentra en cuerpos hídricos de agua dulce; dichos microorganismos logran resistir temperaturas de hasta 36°C, Esta constituida principalmente por proteínas, carbohidratos y lípidos, mencionados de mayor a menor respecto a su presencia dentro del organismo. (Wang, 2009).

**Taxonomía:**

**Reino:** Protista, **División:** Chlorophyta, **Clase:** Chlorophyceae, **Orden:** Chlorococcales, **Familia:** Oocystaceae, **Género:** *Chlorella* (Flores, E & Mamani, D. 2015)

***Cianobacteria***

Las cianofíceas o *cianobacterias*, son unos de los seres vivos más primitivos presentes en la tierra, se estima que su origen proviene de hace unos 3500 millones de años (Roset, J. Aguayo, M. Muñoz, M. 2001); son organismos procariotas, autótrofos y aerobios, obtienen la energía por medio del proceso fotosintético. Se pueden encontrar en ecosistemas terrestres y acuáticos, en su gran mayoría en cuerpos hídricos dulceacuícolas con aguas neutras o alcalinas con pH entre 6 a 9, logran soportar un rango de temperatura entre 16 a 30°C, a su vez, requieren de una alta concentración de nutrientes, en específico, fósforo y nitrógeno. En ambientes eutrofizados se puede presenciar floraciones algales de *cianobacteria*, las cuales en la mayoría de los casos presentan una alta toxicidad. (Bonilla. *et al.* 2015).

## **Asimilación de nutrientes**

En las microalgas, los nutrientes se asimilan por difusión pasiva, por medio de sistemas enzimáticos específicos, los cuales requieren de energía para que se ejecute la absorción y el proceso es limitado por la membrana. (Candela, 2016).

Se necesita de macro y micronutrientes para el desarrollo microalgal, los cuales se dividen así, dependiendo de la cantidad requerida, los macronutrientes son: carbono (C), oxígeno (O), hidrógeno (H), nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S) principalmente, sin embargo, dependiendo de la especie se pueden considerar también el silicio (Si), magnesio (Mn), calcio (Ca), sodio (Na) y potasio (K). Mientras que los micronutrientes requeridos por lo general son el hierro (Fe), manganeso (Mn), boro (B), molibdeno (Mo), cobalto (Co), zinc (Zn), cobre (Cu) y vitaminas (biotina, tiamina y B12), dichos nutrientes forman parte de enzimas o son utilizadas como cofactores de las mismas; en los medios de cultivo tienen una concentración de 10-1ug, o menor a esta. Los macronutrientes fundamentales en los cultivos de microalgas son el carbono, nitrógeno y fósforo. (Fidalgo. 1995).

### **Carbono (C)**

La mitad de biomasa microalgal seca consta de carbono, este nutriente puede asimilarse como sustrato orgánico presente en la materia orgánica, o inorgánico como dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  gaseoso, carbonato  $\text{CO}_3$  o bicarbonato  $\text{HCO}_3$ . Las proporciones de las formas de carbono inorgánico en el agua dependen directamente del pH, si este factor aumenta, también lo harán  $\text{CO}_3$  y  $\text{HCO}_3$ , en relación con el  $\text{CO}_2$ ; este último es la fuente de carbono más utilizado por la mayoría de las microalgas, debido a que se difunde rápidamente del exterior en el medio al

interior de la célula, donde se utiliza directamente en los procesos de fijación. Mientras que para incorporar el  $\text{HCO}_3$  se necesita ser disociado por la anhidrasa carbónica, por tal razón no todas las microalgas son capaces de utilizar el bicarbonato (Piñera, 2002).

### **Nitrógeno (N)**

El nitrógeno es un elemento fundamental para la formación de ácidos nucleicos, aminoácidos y proteínas fundamentales para el crecimiento microalgal; por lo general, estos microorganismos asimilan el nitrógeno proveniente de distintas fuentes, tanto orgánicas (urea), como inorgánicas ( $\text{NH}_4+$ ), ( $\text{NO}_3^-$ ), ( $\text{NO}_2^-$ ), siendo estas últimas las más utilizadas, con preferencia por el amonio ( $\text{NH}_4+$ ) como fuente de N.

La incorporación del amonio no requiere energía metabólica, para esto participan tres enzimas específicas, la glutamina sintetasa (GS), glutamato sintetasa (GOGAT), y glutamina deshidrogenasa (GDH); y sus niveles de actividad dependen de la concentración de la fuente de nitrógeno (Fidalgo, 1995), la alta presencia de amonio puede llegar a alterar el pH del medio en el que se encuentren las microalgas, acidificándolo, esto ocurre después del cuarto día de cultivo; sin embargo, la mayoría de cepas poseen mejor absorción de amonio que las demás fuentes de nitrógeno, esto se debe probablemente a que el  $\text{NH}_4+$  inhibe la asimilación del  $\text{NO}_3^-$  en las células.

Para asimilar el nitrógeno por medio de la absorción del nitrato, este se debe reducir a amonio, dicho proceso se realiza en 2 etapas, que son catalizadas por 2 enzimas distintas, una de ellas es el nitrato reductasa (NR) la cual cataliza la reducción de nitrato  $\text{NO}_3$  a nitrito  $\text{NO}_2$ , después de esto el nitrito reductasa (NiR) reduce el nitrito generado anteriormente a amonio

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, para después asimilarlo por medio de las enzimas específicas para dicha labor y que fueron mencionadas anteriormente (Pedreros & Rodríguez, 2019).

### **Fósforo (P)**

La fuente de fósforo que utilizan las microalgas únicamente es el fosfato inorgánico, y su asimilación depende de diversos factores, como la concentración de P en el medio, intensidad lumínica, nivel de pH, y en el caso de cepas específicas, la disponibilidad de K, Mg y Na presente en el medio (Solís, 2018). Las células microalgales logran usar ciertos fosfatos orgánicos por medio de hidrólisis, la cual realizan las fosfoterasas y fosfatasas, enzimas exocelulares, dando como resultado el fosfato inorgánico que sí es asimilable por las microalgas (Gómez, 2004).

El fósforo es requerido por las microalgas, debido a que es fundamental en la biosíntesis de ácidos nucleicos y la transferencia de energía, este nutriente es incorporado en metafosfatos y polifosfatos, siendo estos, el principal tipo de reserva de fósforo en las microalgas, debido a su capacidad de acumular y almacenar fosfatos para utilizar en periodos de baja concentración de fósforo en el ambiente (Abalde, 2000); estas polifosfatos también regulan los niveles de ATP y ADP.

## **Sistema de cultivo**

En los sistemas de cultivos existen dos diseños básicos en la producción de organismos foto autótrofos (sistemas abiertos y sistemas cerrados), uno permite un control más preciso del entorno que el otro, por medio de distintos parámetros de cultivo, el sistema cerrado disminuye algunos problemas que se presentan notablemente en los sistemas abiertos, los sistemas cerrados permiten generar cultivos con mayores concentraciones sin importar si son mixtos o monoalgales, obteniendo por tal razón, una alta densidad celular.

Los sistemas de cultivo abiertos, por otra parte, son más comunes por su facilidad de gestión y su economía, este es un sistema rentable, debido a que puede ser utilizado para el tratamiento de aguas residuales de distintas fuentes (Abdel-Raouf. *et al.* 2012).

Los diseños varían desde una capacidad de unos cuantos litros a grandes reactores capaces de albergar varios metros cúbicos, existiendo de esta forma un gran número de posibles sistemas de cultivo (Viveros, 2014). Estos diseños tienden a variar según los criterios que se requieren para su aplicación; forma de cultivo, requerimientos nutricionales, especies a cultivar, resistencia de estrés, relación de la superficie iluminada/volumen del reactor, velocidad de crecimiento, regulación de temperatura, capacidad de escalado, entre otros (Contreras. *et al.* 2003).

## Marco conceptual

**Porcicultura:** Es una actividad ganadera que consta en términos generales en la cría, engorde, sacrificio y distribución de porcinos, se generan distintos tipos de productos y también existen diferencias entre fincas que se dediquen a dicha actividad entre tecnificadas y no tecnificadas.

**Agua residual:** Es la combinación de los residuos líquidos, o aguas portadoras de residuos, procedentes tanto de residencias como de instituciones públicas y establecimientos industriales, agrícolas y comerciales, a los que pueden agregarse, eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales (Blázquez & Montero, 2010).

**Biorremediación:** se refiere a un conjunto de metodologías que utilizan organismos biológicos o partes de ellos seleccionados naturalmente o por modificaciones de la ingeniería genética para degradar sustancias que se han trasladado a un lugar que no corresponde o están en cantidades no recomendables como resultante de un proceso productivo mal manejado o de un incidente natural. (Arias. et al. 2010).

**Fitorremediación:** Es una práctica de limpieza pasiva y estéticamente agradable que aprovecha la capacidad de las plantas y la energía solar para el tratamiento de una gran variedad de contaminantes del medio ambiente (Velasco, 2003).

**Sistema autótrofo:** Sistema el cual por medio de facultades propias transforma compuestos inorgánicos u orgánicos en moléculas necesarias para su metabolismo a través de procesos fotosintéticos y quimio sintéticos.

**Tratamiento biológico:** Supone la remoción de contaminantes presentes en el agua por medio de la actividad biológica; disminuyendo principalmente sustancias orgánicas biodegradables, coloidales o disueltas; nitrógeno y fósforo de las aguas residuales. (Romero, 2000).

**Demanda Biológica de Oxígeno (DBO):** Es la cantidad de oxígeno que los microorganismos necesitan para oxidar y estabilizar la materia orgánica del agua en condiciones aerobias. Es el parámetro más usado para medir la calidad de las aguas residuales. (Navarro, O. IDEAM. 2007).

**Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Es un parámetro utilizado para medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica que puede ser oxidada químicamente mediante un agente oxidante fuerte. (Romero, 2000).

## Marco Legal

La investigación se regirá bajo las premisas normativas nacionales establecidas en el Decreto 2811 del 1974 por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables de Protección al Medio Ambiente el cual tiene como objeto preservar y restaurar el ambiente, mejorando el uso racional de los recursos naturales renovables. Así mismo, se rige a la Ley 99 de 1993 que ejerce las funciones de evaluación, control y seguimiento ambiental de los usos del agua, el suelo, el aire y los demás recursos naturales renovables, lo cual comprenderá el vertimiento, emisión o incorporación de sustancias o residuos líquidos, sólidos y gaseosos, a las aguas en cualquiera de sus formas, así como los vertimientos o emisiones que puedan causar daño o poner en peligro el normal desarrollo sostenible de los recursos naturales renovables o impedir u obstaculizar su empleo para otros usos, también considerando el decreto 1076 del 2015 el cual encarga al ministerio de ambiente y desarrollo sostenible orientar y regular el ordenamiento ambiental del territorio y de definir las políticas y regulaciones a las que se sujetarán la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales presentes en el territorio.

El proyecto toma como referente la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH), expedida en el año 2010, que establece como estrategia el uso eficiente y sostenible del agua. En este sentido se acoge a las disposiciones relacionadas con los criterios de calidad para el uso de aguas residuales tratadas descritas Resolución 1207 de 2014 y la Resolución 631 de 2015 por la cual se regulan y establecen los parámetros máximos permisibles para los vertimientos de aguas residuales a cuerpos de agua superficial.

## **Diseño metodológico**

El proyecto de Investigación se realizó en el laboratorio de aguas de la Universidad de Cundinamarca Seccional Girardot, junto con el apoyo de la Universidad Nacional de Colombia y el laboratorio de cultivo de algas de la misma, el cual suministró las cepas de *Chlorella sp* y *Cianobacteria*, utilizados para el tratamiento de las aguas residuales de origen porcícola.

### **Ubicación y Características de la zona de estudio**

El área de estudio corresponde a una granja de traspatio de ciclo completo ubicada en la vereda Guabinal Cerro, perteneciente al municipio de Girardot, Cundinamarca. La granja, trabaja con 50 individuos porcinos, galpones y entre 3 a 5 equinos y no posee ningún sistema de tratamiento para sus aguas residuales, vertiendo las aguas residuales directamente al suelo de una ladera cercana al predio.

### **Toma de Muestras**

Para el proyecto se requirió tomar 6 réplicas con una cantidad de agua residual de 20 litros y otras 6 réplicas de 1 litro, cada una con el fin de utilizarlas en las diferentes réplicas para obtener mayor exactitud en los resultados; estas se recolectaron en la ubicación mencionada en el apartado anterior. Se tomó como base la norma técnica NTC 5667-2. Específicamente se usaron para:

1. Análisis preliminar en balones dentro del sistema de cultivo. Con 3 réplicas por cepa.

2. Montaje del sistema de tratamiento en el reactor biológico. Con 3 réplicas por cepa.

Para la primera toma de muestras del efluente residual se realizaron muestras discretas, donde se utilizaron 6 litros de agua residual, un solo día a la semana, repitiendo este proceso en 3 ocasiones; dicho muestreo ocurrió en el punto de vertimiento de la granja al momento de lavado de los corrales donde se encuentran los porcinos, posteriormente, las muestras fueron trasladadas al laboratorio de aguas de la Universidad de Cundinamarca siguiendo los estándares estipulados en la norma técnica NTC 5667-3.

Una vez se dispuso a trabajar con el reactor en el sistema de tratamiento, se recolectaron muestras de 20 litros en un bidón plástico de la misma capacidad previamente desinfectado, este muestreo se repitió en 6 ocasiones, todas en distintas semanas con el fin de poder realizar las seis (6) réplicas correspondientes de tratamiento, para cada cepa se realizó 3 réplicas. Siempre se manipularon las muestras siguiendo los lineamientos establecidos en los apartados 2 y 3 de la norma técnica mencionada anteriormente.

**Ilustración 1.**

Toma de muestras aguas residuales provenientes de porcícolas



Fuente: Base de datos de la investigación

**Siembra y mantenimiento de las cepas *Chlorella sp* y *Cyanobacteria***

Una vez llegaron los inóculos de *Chlorella sp* y *Cyanobacteria* al laboratorio de aguas de la Universidad de Cundinamarca, se procedió a realizar la respectiva siembra para proliferar o multiplicar las microalgas.

Previamente, se esterilizaron los materiales requeridos para realizar la siembra (probetas, pipetas, balones, tapones, filtros, mecheros); luego se procedió a preparar el medio de cultivo con los nutrientes requeridos para un óptimo crecimiento en el cultivo, específicamente se escogió como medio el Bold's Basal Medium (BBM) (**Ver anexo 1.** Composición del medio modificado para 200ml); el cual se preparó siguiendo los pasos establecidos en el documento guía de la colección de cultivo de algas de la Universidad de Texas (2019).

Una vez realizado el medio de cultivo, se desinfectó la zona de siembra para disponer una mezcla de inóculo con medio de cultivo en 6 balones de fondo plano con capacidad de 1000 ml

(3 balones para cada cepa); el volumen de la mezcla a utilizar dentro de dichos balones fue de 700 ml, donde 10% de este volumen constituye la cantidad de inóculo aplicado, es decir: 70 ml, por lo cual, se utilizaron 630 ml de medio de cultivo en cada balón.

Para el estudio en cuestión se optó por implementar un sistema de cultivo cerrado, donde se pueda controlar la aireación, temperatura, y fotoperiodo luz/oscuridad, por tal motivo, se procedió a adecuar un cuarto dentro del laboratorio de aguas para instalar el sistema de cultivo, el cual, desde la realización del proyecto, brinda servicio a todo el programa de ingeniería ambiental de la seccional, con fines de investigación. El sistema cuenta con 2 estanterías de metal de 6 divisiones cada una, se ancló en la parte superior un aireador conectado a tubos de PVC de ½ pulgada para el transporte del oxígeno hacia los balones, los cuales se conectan por medio de mangueras plásticas, las llaves metálicas incrustadas en el PVC permiten abrir o cerrar el paso de aire hacia las mangueras anteriormente mencionadas, cada manguera cuenta con un filtro conectado antes de la entrada hacia las botellas donde se encuentran las microalgas. En la parte posterior de cada estantería del sistema se encuentran 4 luminarias led de 12W y 960 lúmenes, las cuales están vinculadas a un temporizador digital de uso interior marca Halux, que permite manejar y controlar el fotoperiodo de horas luz/oscuridad establecida de 12/12 respectivamente. Por último, en el cuarto se instaló un aire acondicionado a fin de controlar la temperatura ambiente a 25°C, generando de esta manera las condiciones óptimas para el crecimiento de las cepas en el sistema. (**Ilustración 2**).

## Ilustración 2.

*Sistema de cultivo de micro algas*



Fuente: Base de datos de la investigación

### Crecimiento del cultivo

El crecimiento de las microalgas en el sistema fue determinado mediante inspección visual, realizando conteo celular a través de un microscopio, utilizando cámara de Neubauer, y micropipeta para la recolección de la muestra (10  $\mu\text{L}$ ). La preparación de la muestra, dilución, puesta en cámara, conteo y cálculo de la densidad celular se llevó a cabo siguiendo la metodología establecida por Arredondo & Voltolina (2007).

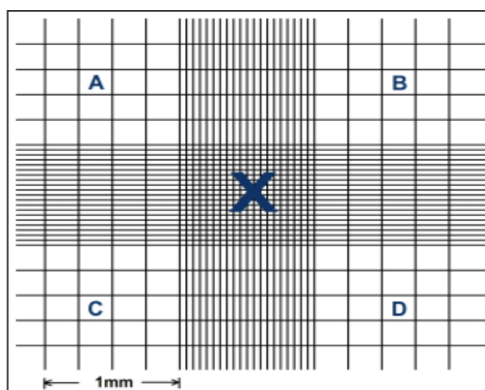
24 horas después de sembrar los inóculos en los medios de cultivo y por los siguientes 3 días, se separaron 3 ml de cada balón para poder tomar las microalgas con la micro pipeta sin correr el riesgo de contaminar el cultivo; se realizó una dilución al 1%, donde a 100 $\mu\text{L}$  de medio con microalgas se le añadieron 900 $\mu\text{L}$  de agua destilada; después, se tomaron 10 $\mu\text{L}$  de la dilución y se procedió a llenar la cámara Neubauer, para su posterior montaje en el microscopio. Cada día se realizaron 3 réplicas de los conteos para la cepa *Chlorella sp.*

Una vez en el microscopio, se cuentan las células en los cuadros pertenecientes a los cuadrantes A, B, C y D (ver ilustración 3). Se contaron todos los cuadros, siguiendo el orden de

las filas horizontales de los mismos, el cual inicia en la fila superior, de izquierda a derecha, al pasar a la segunda fila ahora el orden va de derecha a izquierda, hasta pasar a la siguiente fila donde se realiza el conteo de igual manera que en las dos filas anteriores; esto se realiza de igual manera en cada cuadrante (**Ver ilustración 4**). La metodología de conteo indica que se debe tener en cuenta al momento del conteo las células que están sobre las líneas de arriba y la izquierda de cada cuadro, pero no se cuentan aquellas sobre la línea inferior y de la derecha del cuadro.

### Ilustración 3.

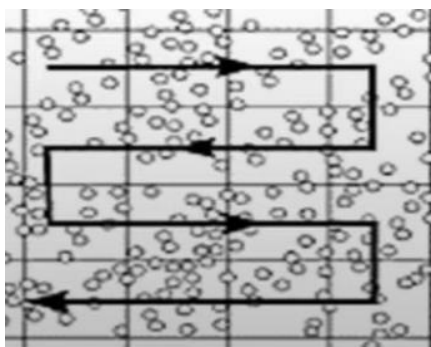
*Cuadrantes cámara de Neubauer*



Fuente: Arredondo & Voltolina. (2007)

### Ilustración 4.

*Orden de conteo en cada cuadrante*



Fuente: Universidad Miguel Hernández de Elche

Al obtener el número total de células en cada cuadrante, estos se sumaron y se procedió a calcular la concentración celular usando la ecuación utilizada por Solís (2018).

$$\text{Concentración} \left( \frac{\text{cel}}{\text{mL}} \right) = \frac{\# \text{ de células} \times 10.000}{\# \text{ de cuadrantes}}$$

Donde # de células es la suma de todas las células contadas en cada cuadrante, 10.000 es una constante a multiplicar, mientras que el #de cuadrantes es el total de cuadrantes de la cámara en los que se realizó el conteo, en este caso, siempre será 4. Si para poder desarrollar el conteo a la muestra se le hizo alguna dilución, este debe añadirse a la fórmula como factor de dilución, ese factor fue 1 en este caso.

$$\text{Concentración} \left( \frac{\text{cel}}{\text{mL}} \right) = \frac{\# \text{ de células} \times 10.000}{\# \text{ de cuadrantes} \times \text{factor de dilución}}$$

Una vez se obtiene la concentración celular en las 3 réplicas realizadas en *Chlorella sp*, se promedian para obtener un solo dato diario para cada una, al contar con la concentración de cada día se realiza una curva de crecimiento para identificar el comportamiento de las especies dentro del sistema de cultivo; seguido a esto, se procedió a sembrar las cepas en las muestras de aguas residuales y repetir todo el proceso de cultivo, conteo para determinar su crecimiento en el nuevo medio.

### **Pesaje de *Cyanobacteria***

Se realizó el pesaje en balanza analítica de *Cyanobacteria* para observar su crecimiento de manera cuantitativa, se tuvo en cuenta la misma botella para llevar un dato controlado.

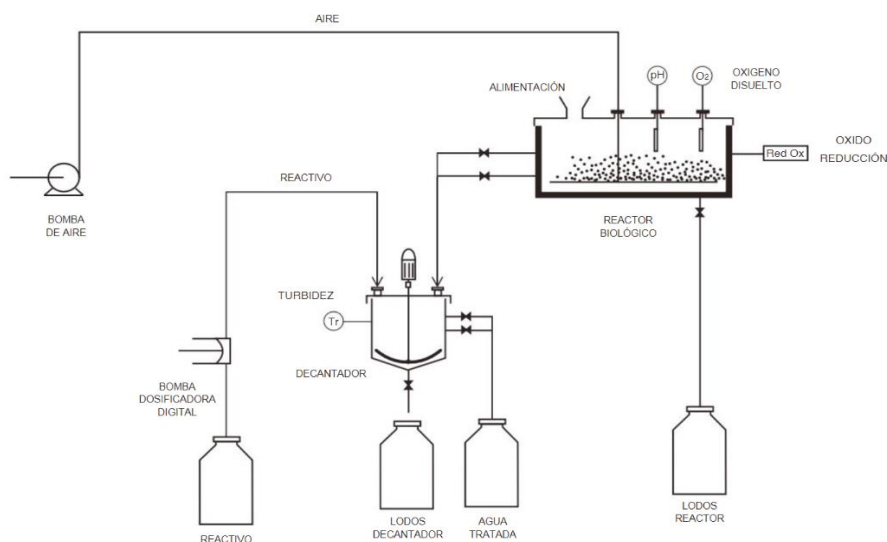
### **Tratamiento de agua residual Porcícola**

Primero se realizó una prueba piloto en el laboratorio de aguas en los balones de 1000 ml, se tomó 630 ml de agua residual al 100%, 70% y al 50% y 70 ml de inóculo (*Cyanobacteria* o *Chlorella sp*), se trasladan al sistema de cultivo, con una temperatura de 25 °C y un fotoperiodo de 12 horas luz/oscuridad. Para el seguimiento del crecimiento se tuvo en cuenta el análisis de parámetros fisicoquímicos y biológicos durante 5 días de prueba para obtener resultados en porcentajes de remoción.

Una vez obtenidos datos positivos en la prueba piloto se proceden a realizar el tratamiento de agua residual porcícola en el equipo para estudio de depuración biológica a pequeña escala modelo “TA-DB-001/PE” que se encuentra en el laboratorio de aguas de la Universidad de Cundinamarca Seccional Girardot. Esta unidad piloto a pequeña escala nos permite recrear las funciones de una PTAR contando con 2 fases, 1 de estas es un proceso biológico (reactor biológico) y el otro físico (clarificador); buscando remover contaminantes orgánicos e inorgánicos; Este sistema cuenta con diferentes tanques, difusores, conexiones, y electrodos (**ver ilustración 5**), sumado a esto, a la unidad piloto se instaló un reflector de luz led de 50W y 4250 lúmenes, también se controló la temperatura del cuarto en donde se ubica a 25°C; de igual forma que en la prueba piloto se realizó el análisis de parámetros físico-químicos durante 5 días de tratamiento.

### Ilustración 5.

Sistema de tratamiento en equipo de estudio "TA-DB-001/PE"



Fuente. Generatoris S.A.

El sistema inicia con el reactor biológico, que es un tanque de 35 litros con alimentación directa, el cual está conectado a un tanque o balde para recepción de biomasa, sensor de pH, sensor de oxígeno disuelto OD, que brinda la opción de variar a diferentes rangos la inyección de oxígeno, y sensor de óxido-reducción REDOX. Se debe resaltar que dichos sensores al momento del montaje del sistema se encontraban descalibrados, por lo cual el monitoreo de OD y pH se realizó con electrodos portátiles específicos para cada parámetro presentes en el laboratorio de aguas.

En primera instancia, se realizó una prueba piloto aplicando la cepa de *Chlorella sp* en medio bold (BBM) para observar su crecimiento en un espacio mucho mayor que el de los balones de 1000 ml, ya que el reactor posee una capacidad alrededor de 35 litros como se mencionó anteriormente, una vez observados buenos resultados de crecimiento, se procedió a preparar el reactor para el tratamiento del agua residual, agregando 18 litros de agua proveniente

de porcícolas y 2 litros de inóculo (*Chlorella sp* o *Cianobacteria*), estableciendo un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 4 días y tomando parámetros físicos (diariamente) y químicos (una medición Inicial y una final) para obtener resultados de remoción de contaminantes orgánicos y nutrientes.

Una vez agregado el inóculo se inyectó aire continuamente al agua por medio del compresor y los difusores, satisfaciendo así, la demanda de oxígeno en el agua. Se estableció nuevamente un control de fotoperiodo de 12 horas luz/oscuridad y una temperatura continua en el cuarto de 25° C con el fin de garantizar condiciones óptimas de crecimiento y remoción.

Para finalizar el tratamiento, una vez pasados los 4 días del proceso biológico, el agua residual porcícola que estaba en el reactor fue transportado hacia el clarificador o decantador, donde se realizó una sedimentación por 3 horas; este tanque tiene una capacidad de 20 litros, y cuenta con un agitador de velocidad variable con motor, y un sensor de turbidez. El clarificador permite reducir sólidos en suspensión presentes en el agua, dicha reducción se monitorea mediante el uso de un turbidímetro externo al sistema debido a que el sensor del sistema se encuentra descalibrado. Posteriormente, se recolectó la biomasa generada por las microalgas para su recolección y extracción en un tanque de recepción de biomasa con capacidad de 20 litros, el cual se encuentra conectado con el sistema; una vez el proceso ha culminado con su tiempo de retención de 4 días y 3 horas (99 horas), el flujo sigue hacia el tanque de recepción de agua tratada que posee la misma capacidad del tanque de biomasa, este tanque está conectado directamente al clarificador por dos salidas de aguas ubicadas en este a diferentes alturas (**ver ilustración 5 y 6**). Después de que el agua residual termina su recorrido por todo el tren de tratamiento se procede a realizar los análisis finales de parámetros fisicoquímicos y biológicos

seleccionados para el estudio. El proceso descrito anteriormente se realizó en 4 ocasiones, determinando 2 réplicas de tratamiento utilizando *Chlorella sp* y 2 usando *Cianobacteria*.

#### **Ilustración 6.**

*Tratamiento de aguas residuales de porquerizas en reactor Biológico*



Fuente: Base de datos de la investigación

*Nota: Funcionamiento del reactor biológico para el tratamiento de aguas residuales en el laboratorio de aguas de la Universidad de Cundinamarca, seccional Girardot.*

#### **Análisis de los parámetros físico-químicos y biológicos**

Los parámetros físicos (turbidez, pH, temperatura, sólidos sedimentables y OD), químicos (DQO, nitratos y fosfatos) y DBO, fueron cuantificados y analizados, utilizando los electrodos y equipos disponibles en el laboratorio de aguas de la Universidad de Cundinamarca seccional Girardot. Cabe resaltar que para cada muestra realizada se tuvo en cuenta la medición diaria con los equipos como el pH metro, medidor de oxígeno disuelto, Cono imhoff de

sedimentación; además de una medición inicial y final con el Fotómetro multiparámetro y el Oxitop.

Para los análisis de los parámetros fisicoquímicos se tuvieron en cuenta los siguientes datos para cada una de las réplicas por cepa a tratar en este caso *Chlorella sp* y *Cianobacteria* (ver tabla 1).

**Tabla 1.**

*Cuantificaciones para el análisis de los parámetros Físico-químicos en cada una de las réplicas realizadas en las cepas Chlorella sp y Cianobacteria*

Tratamiento	Parámetro	Método	Rango de Medición
<b>3 réplicas <i>Chlorella sp</i></b>	DQO	Fotómetro	0- 15000 mg/L (alto Rango)
	DBO	Oxitop	0-4000 mg/L
	Nitratos	Fotómetro	0-30 mg/L (NO <sub>3</sub> --N)
<b>3 réplicas <i>Cianobacteria</i></b>	Fosfatos	Fotómetro	0-30 mg/L (PO <sub>3</sub> -)
	Turbiedad	Turbidímetro	0- 1000 NTU
	OD	Oxímetro	0 - 110 %
	pH	pH metro	6,5 - 9,5
	Solidos sedimentales	Cono Imhoff	0- 1000 mg/L

Fuente: Base de datos de la investigación

**Nota.** La tabla hace referencia a cada uno de los métodos usados para el seguimiento de los parámetros físico químicos que se han nombrado en el presente documento, junto con ello su rango de medición en cada uno de los ítems.

A lo anterior el Uso de los equipos se realizó de la siguiente manera:

Para medir niveles de nitratos y fosfatos se realizó por medio de colorimetría y a la vez, se utilizó el fotómetro para mayor exactitud, se tomaron 12 ml de muestra (al 100%) en tubos plásticos de graduación, una vez la muestra en cada tubo, se sometieron a una fuerza centrífuga,

pasado el tiempo designado de 10 minutos, se tomaron 200 $\mu$ L de la muestra de agua residual porcícola para medir en el fotómetro, y 10 ml con el fin de realizar la medición por colorimetría de los dos parámetros ya nombrados, para esto, se depositaron los 10 ml en dos recipientes de a 5 ml en cada uno, después se utilizaron papeletas que contienen reactivos necesarios que se aplican para cada parámetro, seguido a esto, se agitó de manera circular y al pasar 5 minutos se realiza su medición de manera visual; junto con ello, los 200 $\mu$ L se pasaron a dos de los tubos circulares que nos permiten la medición en el fotómetro, el equipo calcula 37 parámetros fundamentales sobre la calidad del agua, utilizando 60 métodos diferentes; en la lectura se muestra la unidad apropiada de medida, junto con la forma química, en este caso para nitratos y fosfatos la unidad se da en mg/l; finalmente se realizó el mismo procedimiento a los cinco días con la muestra ya tratada por las microalgas para realizar las respectivas comparaciones y análisis.

Para la medición inicial de sólidos sedimentables, se procedió a tomar la muestra de agua recolectada y agregar 1000 ml en el cono Imhoff para la respectiva sedimentación por gravedad de la muestra, siguiendo la metodología establecida por el IDEAM en el “instructivo de determinación de sólidos sedimentables”, se optó por dejar sedimentando la muestra alrededor de 40 minutos, luego de esto, se realizó una inspección visual de la graduación del cono, y se determinaron los mililitros de sólidos sedimentables por un litro de muestra (equivalentes al nivel de los lodos en el reactor), registrando el dato obtenido inicial en ml/L, de igual manera se realiza este procedimiento el quinto día de tratamiento, pero con el efluente del reactor, obteniendo un resultado inicial y final para realizar el análisis de la disminución de sólidos sedimentables que presentó el sistema.

De igual manera, se realizó la medición de DQO por medio del fotómetro, donde se tomaron dos viales de la cubeta de test DQO, el cual contiene un reactivo pre dosificado que nos

permite la medición del parámetro en el equipo, cuentan con un rango de medición bajo: 0 a 150 mg/L ; rango medio : 0 a 1500 mg/L ; rango alto: 0 a 15000 mg/L; según el rango a medir se toman los micro litros para su lectura, esto se encuentra en la guía que viene incluida en el fotómetro para un mejor uso y efectividad de resultados, en el caso de las aguas porcícolas se midió en un rango alto por la carga de materia orgánica que esta contenía, se tomaron 200  $\mu$ L de muestra (al 100%) y se agregaron a uno de los viales, al otro se le agregó 200  $\mu$ L de agua destilada para verificar que no hubiese alguna alteración en el fotómetro al medir directamente la muestra real; posteriormente, se llevaron los dos viales a la plancha de digestión durante dos horas a 150°C, después de ello se realizó la medición en el fotómetro para la toma de datos inicial, para los datos finales se desarrolló el mismo procedimiento pero con la muestra ya tratada por las microalgas.

Para DBO se tomó el resultado inicial de la DQO y el 80% de este dato se utilizó como valor inicial para determinar el volumen a introducir en las botellas del “OXITOP-i IS 6/12”, esto se calcula mediante una tabla de indicaciones presentes en el manual del equipo; junto con el volumen, también se determina la cantidad específica de gotas inhibidoras de nitrificación y de perlitas de NaOH (las cuales impiden que aumente la presión en el equipo por el CO<sub>2</sub> que contiene y generará la muestra) (**Ver Tabla 2**); una vez listo el contenido de cada botella, se tomaron los cabezales para configurarlos (toda la configuración se encuentra en la guía del oxitop) y empezar a medir durante 5 días con una temperatura de 25°C, una vez pasados los días se tomaron los resultados y se realizó el mismo procedimiento con el agua residual ya tratada para registrar datos y realizar el respectivo análisis de remoción de materia orgánica por parte de las cepas.

**El valor previsto de la demanda biológica de oxígeno DBO corresponde aproximadamente al 80% del valor de la demanda química de oxígeno DQO**

**Tabla 2.**

*Determinación de la demanda biológica de oxígeno DBO, preparación para la medición*

<b>Volumen de la muestra (mg/l)</b>	<b>Rango de medición (mg/l)</b>	<b>Factor</b>	<b>Cantidad NTH 600 (Cantidad de gotas por botella para muestras)</b>
432	0-40	1	9
365	0 – 80	2	7
250	0 - 200	5	5
164	0 – 400	10	3
97	0 – 800	20	2
43,5	0 – 2000	50	1
22,7	0 – 4000	100	1

**Fuente:** Manual de Operación Oxitop

**Nota:** Manual para determinar el valor previsto de la DQO tomado de la pág. 100 - 101.

En cuanto a los parámetros físicos (pH, Turbidez, OD, temperatura), se llevaron a cabo las respectivas mediciones diarias durante los 5 días de tratamiento, utilizando los equipos que se encuentran en el Laboratorio de aguas, este seguimiento permitió observar los cambios de los organismos durante el tratamiento de las aguas residuales, así mismo se recolectaron los resultados de cada medición para su respectivo análisis y comparación.

Para determinar los porcentajes de remoción que presenta el sistema en cada parámetro se implementó la fórmula establecida por Sandoval, *et al* (2018); la cual es la siguiente:

$$\% \text{Remoción} = \frac{\text{Entrada (agua cruda)} - \text{Salida (agua tratada)}}{\text{Entrada (agua cruda)}} \times 100\%$$

Al obtener los porcentajes de remoción de cada parámetro se puede concluir cuál es la eficiencia de las cepas (*Cyanobacteria* y *Chlorella sp*) para reducir contaminantes orgánicos y nutrientes presentes en el agua residual provenientes de porcícolas.

Por último, todos los datos recolectados de los parámetros fisicoquímicos y biológicos, junto con los resultados de los porcentajes de remoción de cada cepa en el sistema, se tabularon en un formato Excel, agilizando de tal manera los cálculos pertinentes, dando orden a la información relevante del proyecto y sirviendo como evidencia de los resultados obtenidos

#### **Ilustración 7.**

*Análisis de parámetros fisicoquímicos*



Fuente: Base de datos de la investigación

## Resultados Y Discusión

### Crecimiento celular

Para conocer el nivel de adaptabilidad de *Chlorella sp* a las condiciones establecidas en el sistema de cultivo y en el reactor biológico se buscó determinar el crecimiento celular que presentaba la cepa durante 4 días, esto por medio del conteo celular en cámara de Neubauer como se describió en la metodología, obteniendo específicamente en el reactor biológico el siguiente resultado (**ver tabla 3**).

**Tabla 3.**

*Crecimiento celular de Chlorella sp en medio BBM*

---

#### Crecimiento celular diario de *Chlorella*

#### *sp* en reactor biológico

Día	Crecimiento celular (cel/ml)
1	1,05x10 <sup>6</sup>
2	1,45x10 <sup>6</sup>
3	3,59x10 <sup>6</sup>
4	6,91x10 <sup>6</sup>

---

Fuente: Base de datos de la investigación

Se evidencia un crecimiento significativo desde el día 2 hasta el día 4, donde el cultivo llegó a su punto más alto dentro de su fase exponencial, sin evidenciar dentro de este rango de tiempo el inicio de una declinación del crecimiento o muerte de la cepa, lo cual coincide con lo

descrito por Candela (2016) en su revisión bibliográfica sobre microalgas; este aumento en la densidad celular de la cepa demuestra una buena capacidad de adaptación al medio de cultivo.

**Tabla 4.**

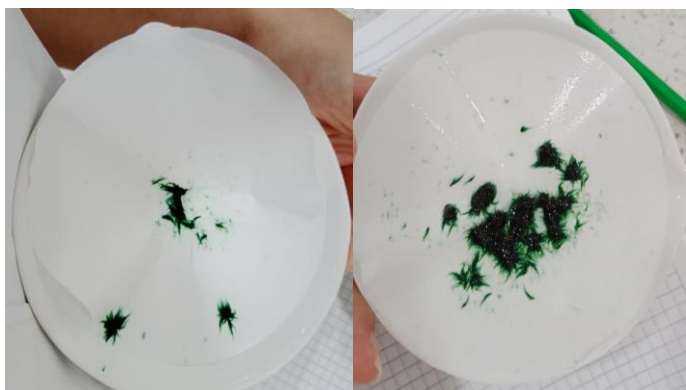
*Medición de crecimiento de Cianobacteria por medio de pesaje*

INÓCULO	Peso de <i>Cianobacteria</i> (g)	
	Peso inicial	Peso final
<i>Cianobacteria R1</i>	2,2202	3,4262
<i>Cianobacteria R2</i>	1,6783	3,283

Fuente: Base de datos de la investigación

**Ilustración 8.**

*Cianobacteria iniciales para replicar – Cianobacteria después de 5 días de crecimiento*



Fuente: Base de datos de la investigación

### Ilustración 9.

#### *Crecimiento Visual Cianobacteria*



Fuente: Base de datos de la investigación

El crecimiento de la cepa *cianobacteria* es perceptible a simple vista, en el medio BBM, estas crecen de manera significativa al pasar los días, de igual manera como la cepa *Chlorella sp*, demuestra que pueden adaptarse de manera adecuada al tratamiento de aguas residuales porcícolas. Según Brenan, la productividad de las microalgas está determinada principalmente, por la alcalinidad del medio, el pH, la temperatura, el tipo de nutrientes, la disponibilidad e intensidad de la luz, entre otros parámetros que se requieren para su crecimiento, duplicando en 24 horas su biomasa (Brenan & Owende, 2010); al determinar que las cepas presentan un crecimiento óptimo se procedió a iniciar la fase de tratamiento del agua residual recolectada.

#### **Remoción de materia orgánica (DBO y DQO) por *Chlorella sp***

Una vez obtenidos los resultados de la investigación se observa que tanto *Cianobacteria* como *Chlorella sp* tienen una amplia capacidad de remover materia orgánica, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

**Tabla 5.**

Porcentajes de remoción de DBO y DQO de *Chlorella sp.*

<b>Réplica (R)</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Concentración Inicial</b>	<b>Concentración Final</b>	<b>Eficiencia</b>
<i>Chlorella sp R1</i>	DBO (mg/l)	588,75	11,5	98%
<i>Chlorella sp R2</i>	DBO (mg/l)	834	127	85%
<i>Chlorella sp R3</i>	DBO (mg/l)	2143	39	98%
<i>Chlorella sp R1</i>	DQO (mg/l)	788	413	48%
<i>Chlorella sp R2</i>	DQO (mg/l)	985	112	89%
<i>Chlorella sp R3</i>	DQO (mg/l)	1454	181	88%

Fuente: Base de datos de la investigación

**Nota:** (R1, R2, R3: réplicas 1, 2 y 3).

La demanda biológica de oxígeno (DBO) muestra la cantidad de materia orgánica que es oxidada biológicamente en el agua, mientras que la demanda química de oxígeno (DQO) nos permite conocer la cantidad de materia orgánica que puede ser oxidada químicamente, la DQO siempre es mayor que la DBO (Cisterna & Peña, 2014), y entre más se reduzcan estos parámetros menor carga orgánica habrá presente en el agua, por tal razón es fundamental el análisis de DQO/DBO en los tratamientos biológicos para determinar la eficiencia del mismo.

En la tabla 5, se logra observar una gran capacidad de *Chlorella sp* para degradar materia orgánica. presentando altos porcentajes de remoción en ambos parámetros, mayores del 80%, los cuales son similares a los alcanzados en otra investigación donde utilizaron *Chlorella vulgaris* para el tratamiento de aguas residuales de la PTAR Salitre, en la cual se informó sobre remociones entre 73,19% y 81,80% para DQO (Cartagena & Malo, 2017). Mientras que la implementación de *Chlorella sp* para el tratamiento de agua residual proveniente de una empresa

textil, generó remociones de DBO y DQO de 95,4% y 94,6% respectivamente (Vacca. *et al.* 2017).

La primera réplica muestra una baja eficiencia de remoción de DQO, de tan solo 48%, esto puede ser explicado debido a fallas del compresor de aire del reactor biológico en el primer día de tratamiento, dejando sin oxigenación constante el agua durante 24 horas seguidas, donde posiblemente se presentó un proceso de degradación de la materia por parte de las bacterias presentes en el agua residual, quienes utilizaron únicamente el oxígeno producido por las microalgas para dicha tarea durante el tiempo en que el reactor no tuvo aireación.

Se debe tener en cuenta que el consorcio entre microalgas y bacterias permite una mayor degradación de la materia orgánica, donde las primeras brindan el oxígeno necesario para que las bacterias realicen la transformación de compuestos carbonados a CO<sub>2</sub>, el cual posteriormente es utilizado por las microalgas en su proceso fotosintético (Filipigh. 2021), esto explica la remoción del 98% obtenida para DBO que presentó la réplica 1 y 3, mientras que la DQO en la réplica 1 no alcanzó una remoción mayor al 50% por la misma falta de oxígeno suficiente en el agua para la oxidación de la materia orgánica, en comparación de la remoción de DQO obtenida en la réplica 2 y 3 que fue de 88% y 89% respectivamente, esto atribuyéndose a que en estas no hubo ninguna falla en la aireación constante en el reactor.

### **Remoción de materia orgánica (DBO y DQO) por *Cianobacteria***

El agua residual recolectada para la réplica 2 con *Cianobacteria* contenía grandes concentraciones de materia orgánica según los parámetros iniciales analizados de DQO y DBO

siendo 1567 mg/l y 1234 mg/l respectivamente, lo cual pudo verse reflejado en los siguientes porcentajes de remoción:

**Tabla 6.**

*Porcentajes de remoción de la DBO Y la DQO de la cepa Cyanobacteria.*

<b>Réplica</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Concentración Inicial</b>	<b>Concentración Final</b>	<b>Eficiencia</b>
<b>Cyanobacteria R1</b>	DBO (mg/l)	717,87	39,1	95%
<b>Cyanobacteria R2</b>	DBO (mg/l)	1234	342	72%
<b>Cyanobacteria R3</b>	DBO (mg/l)	832	38,4	95%
<b>Cyanobacteria R1</b>	DQO (mg/l)	895	281	69%
<b>Cyanobacteria R2</b>	DQO (mg/l)	1567	565	64%
<b>Cyanobacteria R3</b>	DQO (mg/l)	1338	206	85%

Fuente: Base de datos de la investigación

**Nota:** R1, R2, R3 es igual a Replica1, Replica2, Replica3.

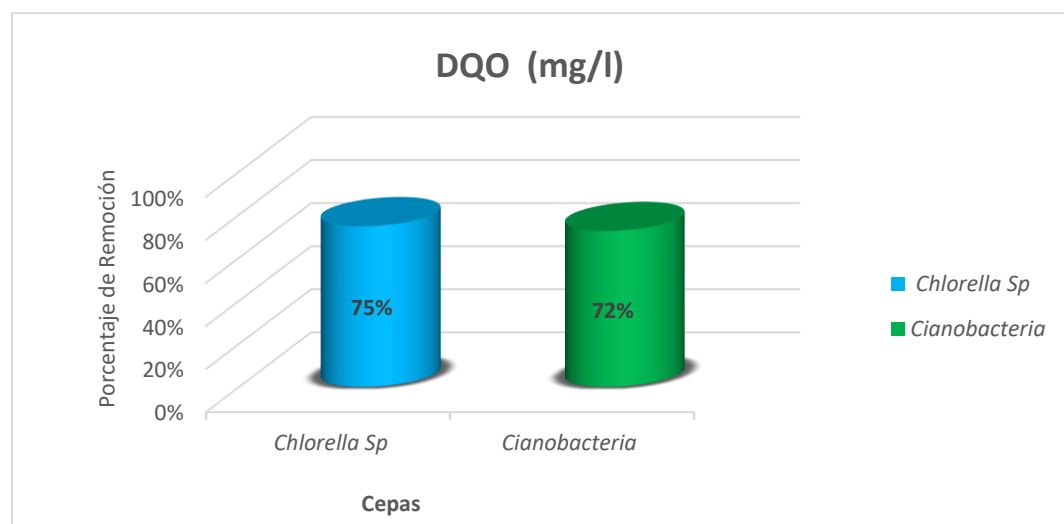
En la **tabla 6** se logra evidenciar porcentajes significativos de remoción de DBO y DQO para la *Cyanobacteria* superando siempre el 60% de remoción en cada una de las réplicas realizadas, cabe resaltar que en comparación con *Chlorella sp*, se presenta menor capacidad de remoción o degradación de la materia orgánica. Estos resultados contrastan con datos informados en otras investigaciones en las cuales utilizan diferentes géneros de *Cyanobacteria* como *Spirulina sp*, implementadas en biofiltros para tratar aguas residuales con una carga inicial de DQO de 82 mg/l donde se obtuvieron remociones de hasta el 92,5% (González. 2016). En otra investigación se utilizó la cepa *Nostoc commune* en lagunas de oxidación para el tratamiento de aguas residuales domésticas, las cuales contaban con cargas iniciales de DQO y DBO de 321 mg/l y 66.2 mg/l, obteniendo porcentajes de remoción de 81% y 70% respectivamente (Rodríguez, 2020); por otro lado, al utilizar *Arthrospira plantensis* para el tratamiento de aguas se hallaron remociones del 70% tanto para DQO como para DBO (Balaguera, 2022).

La anterior comparación indica que la eficiencia de remoción depende directamente de la especie o genero de *Cianobacteria* que se implemente, además de las condiciones iniciales del efluente a tratar, a mayor carga contaminante menor eficiencia de remoción se presentará en la *Cianobacteria*. Sin embargo, los resultados obtenidos en la presente investigación demuestran una alta eficiencia por parte de la cepa de *Cianobacteria* para remover materia orgánica susceptible a oxidación tanto química como biológicamente en el saneamiento de aguas residuales provenientes de porcícolas.

### Comparación de eficiencia de remoción de DBO y DQO entre las cepas *Cianobacteria* y *Chlorella sp*

#### Ilustración 10.

Comparación de la eficiencia de remoción de DQO entre las cepas *Cianobacteria* y *Chlorella sp*



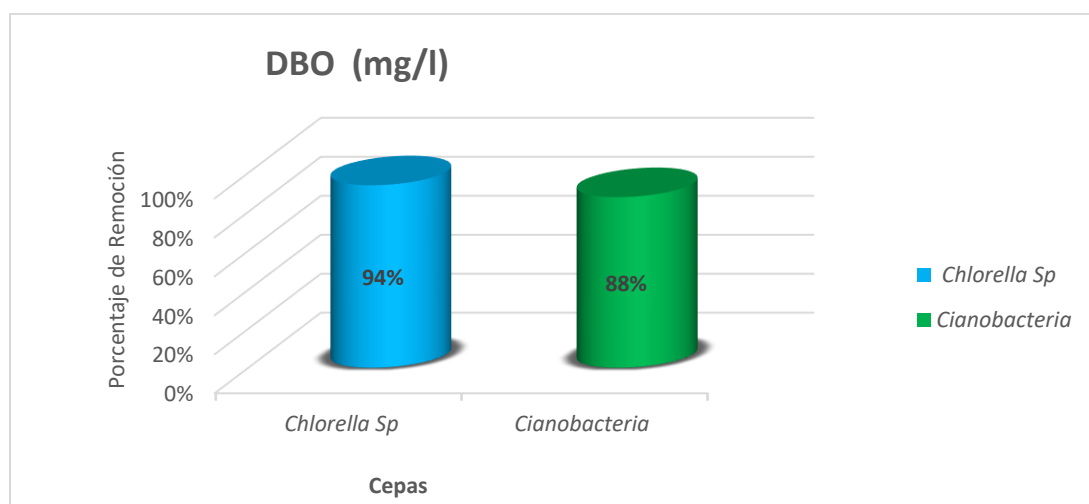
Fuente: Base de datos de la investigación

**Nota:** Se realizó un promedio de las réplicas presentes en la tabla 5 de las cepas *Cianobacteria* y *Chlorella sp*. (R1, R2, R3: réplica 1, réplica 2, réplica 3) para globalizar el resultado y lograr su comparación.

*Chlorella sp.* Presentó un mayor porcentaje de remoción en DQO con un 89% aunque en la primera réplica se haya presentado remoción baja del 48%, debido a complicaciones con el reactor biológico. En cuanto a *Cianobacteria* su porcentaje de remoción se encuentra sobre el 60%, demostrando que estas muestran un alto rango de remoción ya que inicialmente los valores de concentración de DQO fueron más altos comparados con la de *Chlorella sp.*

### Ilustración 11.

Comparación eficiencia de remoción entre las cepas *Cianobacteria* y *Chlorella sp* en el parámetro DBO para aguas residuales provenientes de porcícolas



Fuente: Base de datos de la investigación

**Nota:** Se realizó un promedio de las réplicas presentes en la tabla 6 de las cepas *Cianobacteria* y *Chlorella sp.* (R1, R2, R3: réplica 1, réplica 2, réplica 3) para globalizar un resultado y lograr su comparación.

### Remoción de nutrientes (NO<sub>3</sub>- y PO<sub>4</sub>)

**Tabla 7.**

*Eficiencia de remoción de nitratos y fosfatos con la cepa Cyanobacteria de aguas residuales provenientes de porcícolas.*

<b>Réplica</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Concentración Inicial</b>	<b>Concentración Final</b>	<b>Eficiencia</b>
<i>Cyanobacteria R1</i>	Nitrato (mg/l)	30	4,5	85%
<i>Cyanobacteria R2</i>	Nitrato (mg/l)	30	10,3	66%
<i>Cyanobacteria R3</i>	Nitrato (mg/l)	30	8,4	72%
<i>Cyanobacteria R1</i>	Fosfato (mg/l)	30	16,3	46%
<i>Cyanobacteria R2</i>	Fosfato (mg/l)	30	15,6	48%
<i>Cyanobacteria R3</i>	Fosfato (mg/l)	30	1,96	93%

Fuente: Base de datos de la investigación

**Nota:** (R1, R2, R3: replica 1, replica 2, replica 3).

**Tabla 8.**

*Eficiencia de remoción de nitratos y fosfatos con la cepa Chlorella sp de aguas residuales provenientes de porcícolas.*

<b>Réplica</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Concentración Inicial</b>	<b>Concentración Final</b>	<b>Eficiencia</b>
<i>Chlorella sp. R1</i>	Nitratos (mg/l)	20,5	2,4	88%
<i>Chlorella sp. R2</i>	Nitratos (mg/l)	30,5	10,9	64%
<i>Chlorella sp. R3</i>	Nitratos (mg/l)	30	7,4	75%
<i>Chlorella sp. R1</i>	Fosfatos (mg/l)	30	0,9	97%
<i>Chlorella sp. R2</i>	Fosfatos (mg/l)	30	12,2	59%
<i>Chlorella sp. R3</i>	Fosfatos (mg/l)	30	9,4	69%

Fuente: Base de datos de la investigación

**Nota:** (R1, R2, R3: replica 1, replica 2, replica 3).

Para *Cyanobacteria*, de igual forma que las microalgas el nitrógeno es fundamental para la creación de proteínas; estas pueden obtener nitrógeno empleando NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>+</sup> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup> siendo

amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) la forma nitrogenada preferida tanto por *Cianobacteria* como por microalgas (Marzo et al., 2014), sin embargo, la asimilación de nitrato se realiza reduciéndolo por medio de enzimas a amonio, esto explica el porcentaje de remoción de nitratos del 85%, 66% y 72% obtenidos.

En cuanto a fosfatos, su deficiencia provoca un descenso en la síntesis de ácidos nucleicos, ATP y clorofila en las microalgas y *Cianobacteria* (Piñera, 2002). Los resultados alcanzados en la presente investigación demuestran que la remoción de estos por parte de *Cianobacteria* fue variable, con un 46%, 48% y 93% respectivamente, lo cual podría atribuirse a la forma en que la especie asimila el fósforo, debido a que las células microalgales utilizan como fuente de fósforo el fosfato inorgánico  $\text{H}_2\text{PO}_4^+ + \text{HPO}_4^{-2}$  (Abalde, 1995) lo que difiere con la medición de fosfatos realizada en el proyecto, donde se utilizó un fotómetro multipropósito el cual mide únicamente fosfatos orgánicos; compuestos los cuales *Cianobacteria* logra también remover, pero para que esto suceda el organismo debe transformarlos a fosfatos inorgánicos por medio de las enzimas fosfoterasa y/o fosfatasa, acción que requiere mayor energía para ser asimilados (Fidalgo, 1994), por ende, estos microorganismos asimilarán fosfatos orgánicos gracias a la transformación de las enzimas, pero únicamente hasta que los inorgánicos hayan sido consumidos totalmente en el medio, lo cual explicaría los bajos niveles de remoción de fosfatos por parte de *Cianobacteria* en la réplica 1 y 2. Así mismo, el tiempo influye directamente en la asimilación de nutrientes por parte de las microalgas (Cartagena & Olaya, 2022), esto afirma que implementando un tiempo de retención hidráulico mayor a los 4 días utilizados en el reactor pudo haberse logrado una mayor eficiencia en la remoción de fosfatos.

Se debe resaltar la importancia de remover los fosfatos inorgánicos de las aguas residuales debido a que dichos compuestos pueden presentar mayores impactos tanto al suelo

como al agua debido a su composición química la cual dificulta más su degradación en el medio o asimilación por organismos, por lo tanto, para futuros estudios es recomendable realizar mediciones específicamente de fosfatos inorgánicos en las aguas y el porcentaje de remoción alcanzado para este.

Por otro lado, la alta remoción presentada en la réplica 3 puede atribuirse al consorcio microbiano el cual logró asimilar los fosfatos orgánicos presentes en el agua residual, debido a que es común que la tasa de consumo de nutrientes incremente cuando se aumenta la concentración de microorganismos como se describe en el modelo cinético de Michaelis – Menten (Cifuentes & Rodríguez, 2020).

Los porcentajes de remoción de nitratos y fosfatos presentados en la **tabla 8** demuestran una eficiencia mayor al 60%, lo cual demuestra la importancia que tienen dichos nutrientes en el crecimiento de la biomasa y desarrollo metabólico en las microalgas (Markou & Georgakakis 2011). Las microalgas han demostrado gran capacidad en la asimilación de nutrientes en distintos efluentes de aguas residuales como lo mostraron Abdel-Raouf y su equipo en 2012, obteniendo eficiencias de remoción de 86% para N inorgánico y 70% para P inorgánico respectivamente; siendo estos porcentajes similares a los obtenidos en la presente investigación con una remoción para nitratos en las réplicas 1, 2 y 3 de 88%, 64% y 75%, mientras que en fosfatos fue de 97%, 67% y 59% respectivamente.

La remoción de fosfatos solubles en el agua se debe a procesos de asimilación microbiana y de precipitación por procesos de mineralización en el agua (González, Cañizares, & Baena. 1997), y *Chlorella sp* demuestra una óptima capacidad para asimilar fosfatos presentes en las aguas residuales, en comparación con los resultados obtenidos por Pedreros y Rodríguez (2019)

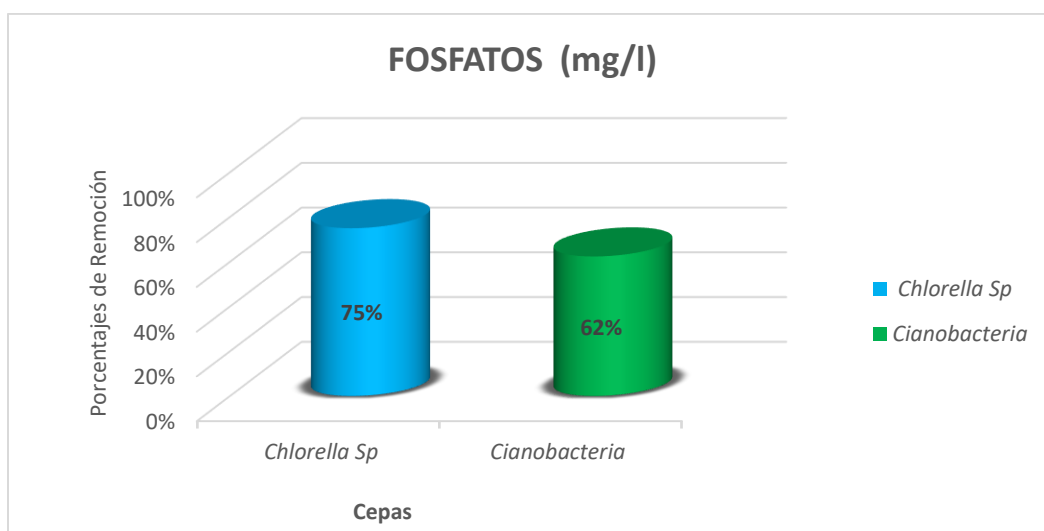
quienes implementaron un sistema abierto de cultivo mixto de microalgas para el tratamiento de aguas porcícolas, reportaron remociones de fosfatos de solo el 55,7%, evidenciando que el sistema de tratamiento con *Chlorella sp* implementado en la presente investigación es altamente eficiente.

### Comparación de eficiencia de remoción de nutrientes entre las cepas *Cianobacteria* y

#### *Chlorella sp*

#### Ilustración 12.

Comparación eficiencia de remoción entre las cepas *Cianobacteria* y *Chlorella sp* en el parámetro Fosfatos para aguas residuales provenientes de porcícolas



Fuente: Base de datos de la investigación

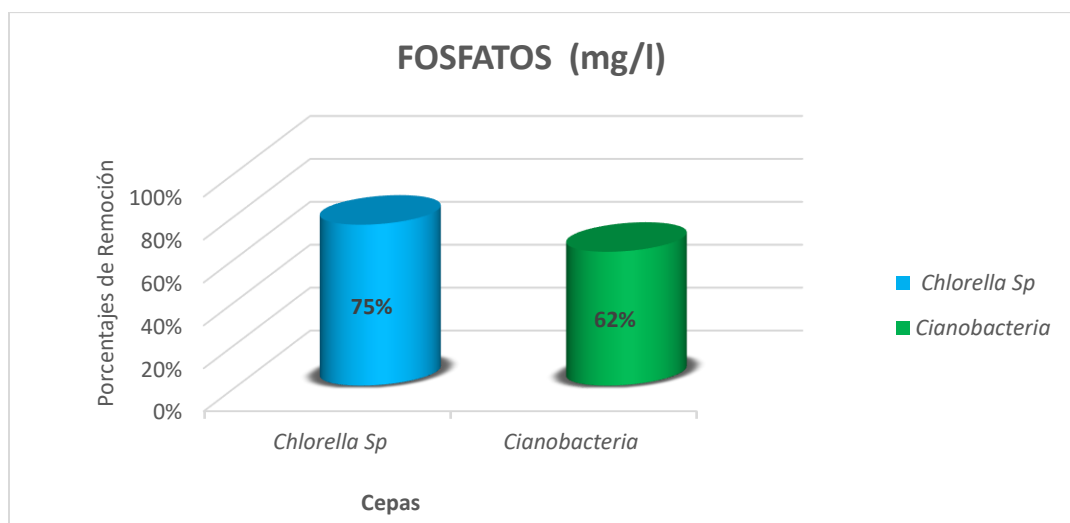
**Nota:** Se realizó un promedio de las réplicas presentes en la tabla 7 de las cepas *Cianobacteria* y *Chlorella sp*. (R1, R2, R3: réplica 1, réplica 2, réplica 3) para globalizar un el resultado y lograr su comparación.

Se logra evidenciar que *Chlorella sp* presenta mayor remoción de fosfatos con un 75 % en comparación con *Cianobacteria* que su porcentaje de eficiencia es de 62% de remoción, las microalgas por lo general son buenas removiendo fosfatos ya que estos hacen parte del consumo

de nutrientes esenciales para su crecimiento, en cambio en *Cianobacteria* requiere un proceso donde gasta más energía para realizar el cambio de fosfato orgánico e inorgánico para la asimilación de estos.

### Ilustración 13.

Comparación eficiencia de remoción entre las cepas *Cianobacteria* y *Chlorella sp* en el parámetro Nitratos para aguas residuales provenientes de porcícolas



Fuente: Base de datos de la investigación

**Nota:** Se realizó un promedio de las réplicas presentes en la tabla 8 de las cepas *Cianobacteria* y *Chlorella sp*. (R1, R2, R3: réplica 1, réplica 2, réplica 3) para globalizar un resultado y lograr su comparación.

Para la **ilustración 13** se logra evidenciar una remoción alta de nitratos para ambas cepas, superando el 70% de remoción, de igual forma como los fosfatos, los nitratos son esenciales para el crecimiento de la biomasa de las microalgas y *Cianobacteria*, por tal razón, estos microorganismos juegan un rol importante en la asimilación de nutrientes presentes en los ecosistemas acuáticos, capacidad la cual puede ser aprovechada para la eliminación de estos contaminantes de las aguas residuales agrícolas.

## Remoción de la Turbidez por *Cianobacteria* y *Chlorella sp*

**Tabla 9.**

*Eficiencia de remoción de la turbidez para las cepas utilizadas en aguas residuales provenientes de porcícolas *Cianobacteria* y *Chlorella sp*.*

<b>Réplica</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Concentración Inicial</b>	<b>Concentración Final</b>	<b>Eficiencia</b>
<i>Chlorella sp R1</i>	Turbidez (NTU)	>1000	19,7	98%
<i>Chlorella sp R2</i>	Turbidez (NTU)	>1000	12	99%
<i>Chlorella sp R3</i>	Turbidez (NTU)	>1000	30,9	97%
<i>Cianobacteria R1</i>	Turbidez (NTU)	>1000	9,01	99%
<i>Cianobacteria R2</i>	Turbidez (NTU)	>1000	29,5	97%
<i>Cianobacteria R3</i>	Turbidez (NTU)	>1000	199	80%

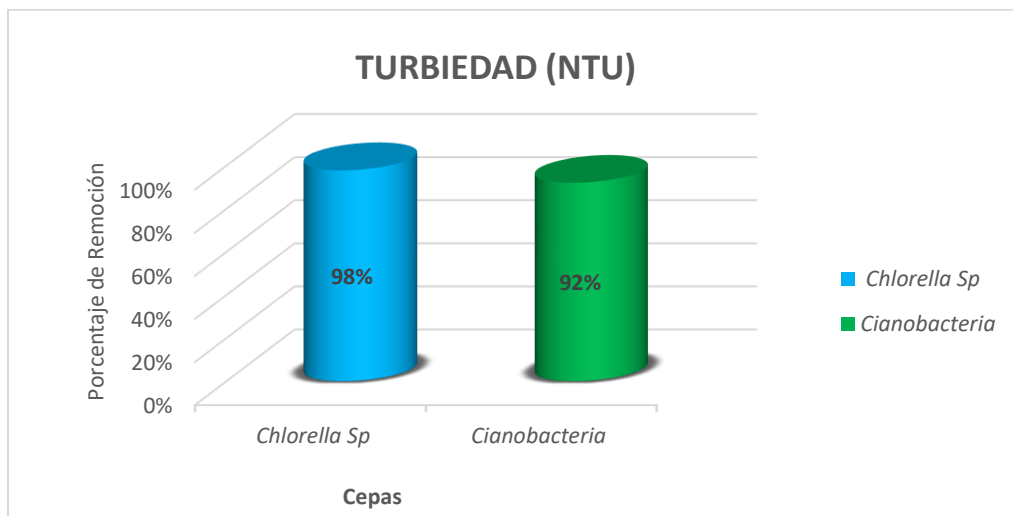
Fuente: Base de datos de la investigación

Se observa inicialmente que la turbidez en todas las réplicas de tratamiento con ambas cepas *Chlorella sp* y *Cianobacteria* tienen un porcentaje de remoción mayor al 80%, indicando un alto rango de eficiencia en el proceso de sedimentación del sistema de tratamiento; esta afirmación es explicada por Quintero quien comenta que en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia evaluaron la DQO presente en el agua residual doméstica donde afirman que la turbiedad no es una variable directamente atribuible a la materia orgánica, pero sí es directamente proporcional a la cantidad de sólidos en suspensión, esto debido a que se eliminaron en procesos físicos como sedimentación. (Quintero. et al 2021).

Cabe resaltar que en cuanto al olor *Cianobacteria* lo disminuye de forma significativa, en cambio *Chlorella sp* su olor es un poco más notorio al momento de realizar el saneamiento de aguas residuales provenientes de porcícolas.

**Ilustración 14.**

*Comparación eficiencia de remoción entre las cepas Cianobacteria y Chlorella sp en el parámetro de Turbidez*



Fuente: Base de datos de la investigación

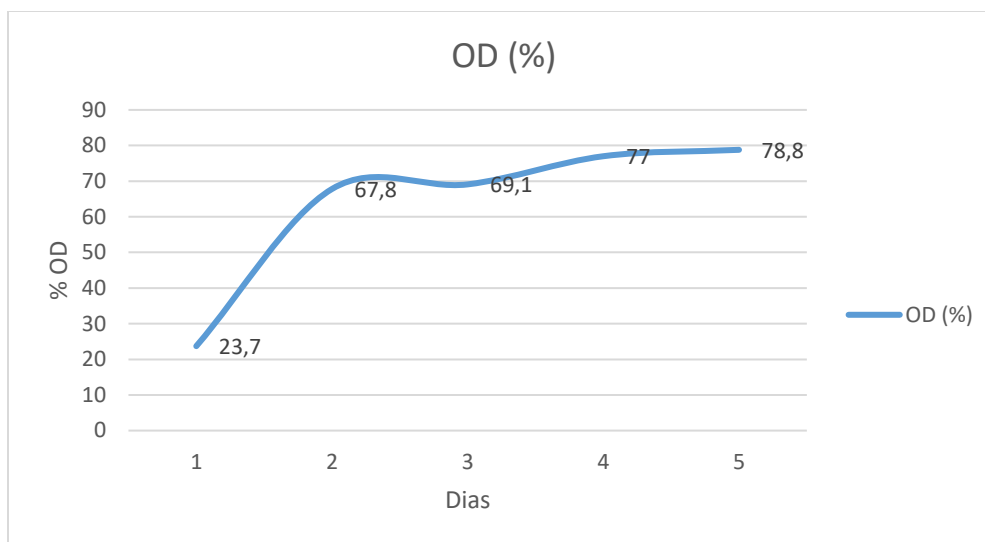
**Nota:** Se realizó un promedio de las réplicas presentes en la tabla 9 de las cepas Cianobacteria y *Chlorella sp*. (R1, R2, R3: réplica 1, réplica 2, réplica 3) para globalizar un resultado y lograr su comparación.

En la **ilustración 14** se presentan eficiencias de remoción altas, mayores al 90% esto es gracias a la sedimentación de las partículas suspendidas en el agua residual, dando paso a la luz para el crecimiento de las microalgas, mostrando altos porcentajes de remoción en cada parámetro a analizar.

### **Incremento de Oxígeno Disuelto por *Cianobacteria***

**Ilustración 15.**

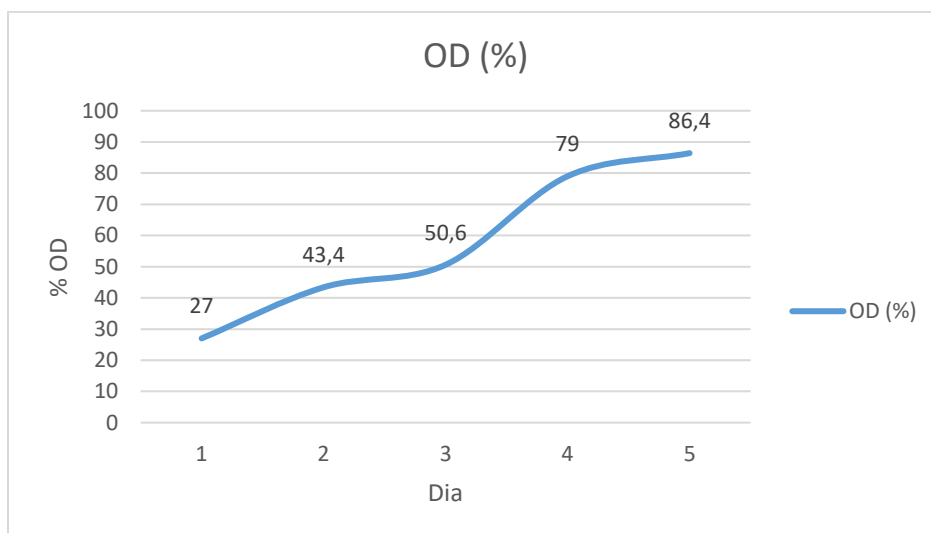
*Porcentaje de eficiencia de incremento del OD para Cianobacteria para la réplica 1*



Fuente: Bases de la investigación

#### Ilustración 16.

*Porcentaje de eficiencia de incremento del OD para Cyanobacteria para la réplica 2*



Fuente: Base de datos de la investigación

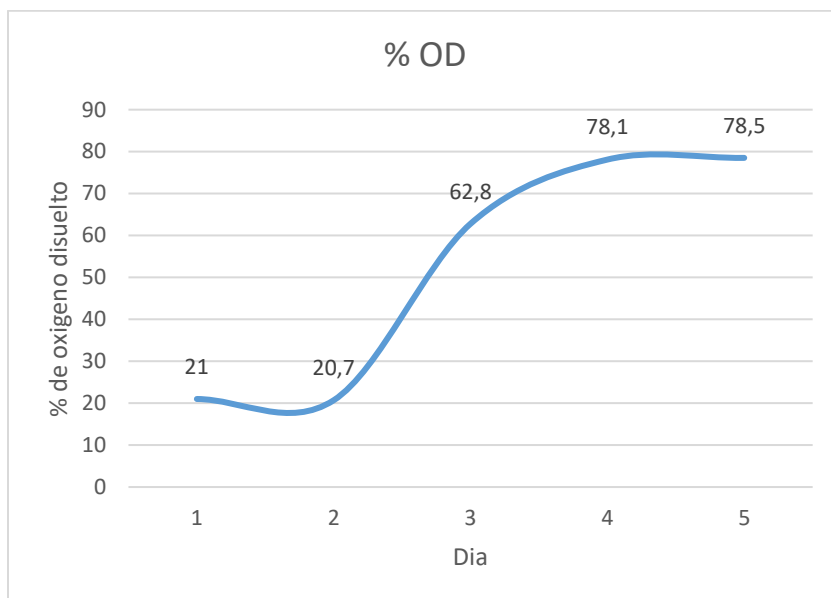
Se evidencia un incremento mayor de oxígeno disuelto en el agua presente en el reactor para la réplica 2 utilizada con *Cyanobacteria*, lo cual podría deberse a una mejor adaptación por

parte de la cepa a las condiciones presentes en esta segunda muestra de agua residual porcícola, lo que significaría un mayor crecimiento de la cepa y un proceso fotoheterótrofo más eficiente.

### Incremento de Oxígeno Disuelto por *Chlorella sp*

#### Ilustración 17.

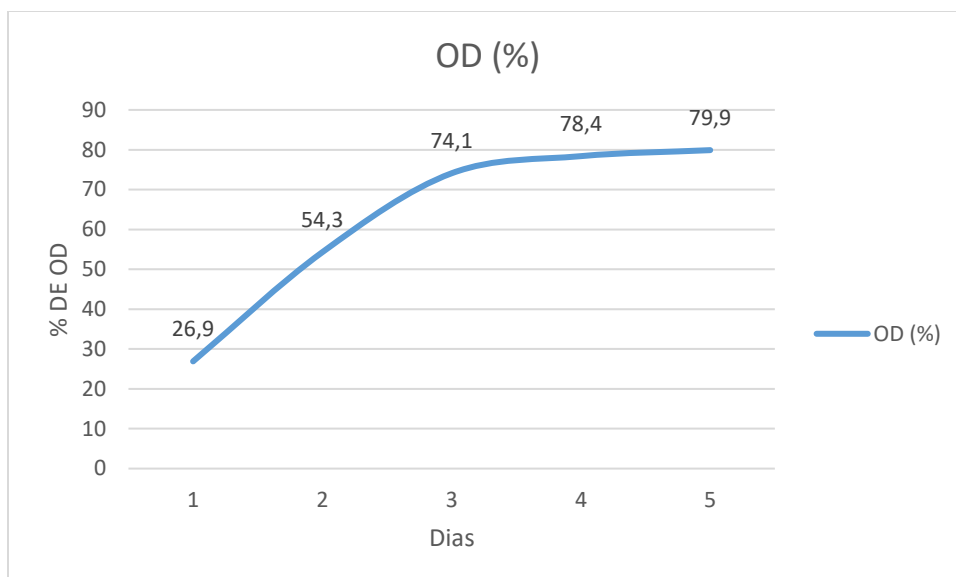
Porcentaje de eficiencia de incremento del OD para *Chlorella sp* para la réplica 1



Fuente: Base de datos de la investigación

#### Ilustración 18.

Porcentaje de eficiencia de incremento del OD para *Chlorella sp* para la réplica 2



Fuente: Base de datos de la investigación

Las dos ilustraciones anteriores demuestran resultados similares de oxígeno disuelto en el agua residual utilizando *Chlorella sp*, demostrando una buena capacidad de adaptación a medios con alta presencia de cargas orgánicas y nutrientes, sin embargo, se debe tener en cuenta la aireación constante a la que se encuentra sometida el reactor, la cual seguramente infirió en el porcentaje de oxígeno disuelto en el agua, sin embargo estas cepas de micro algas también adicionan una considerable cantidad de oxígeno al medio gracias al proceso fotosintético que realiza.

## Porcentaje de remoción de sólidos sedimentables para ambas cepas

Tabla 10.

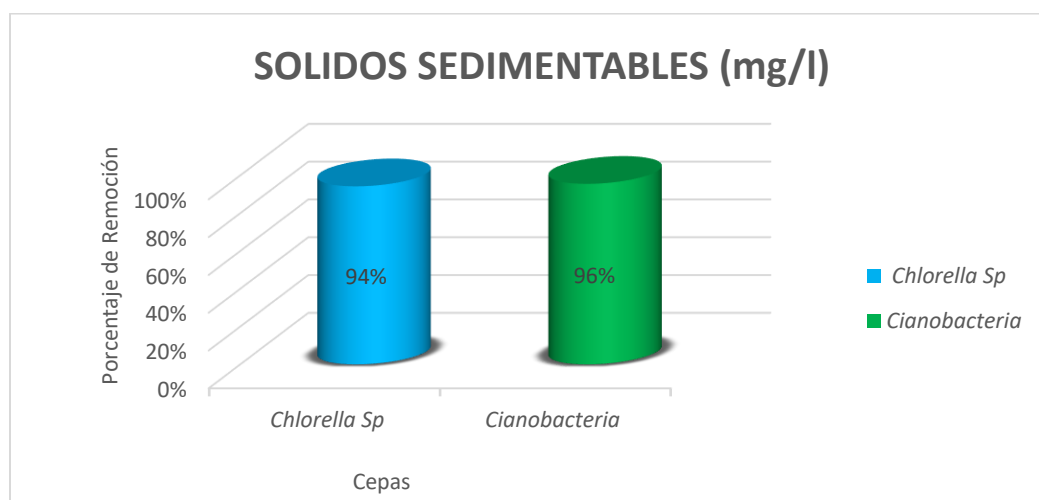
Eficiencia de remoción de sólidos sedimentables cada una de las cepas *Chlorella sp* y *Cianobacteria*.

Réplica	Lectura Inicial	Lectura Final	Eficiencia de remoción
<i>Chlorella sp</i> R1	5,5	0	100%
<i>Chlorella sp</i> R2	15,8	0,1	99%
<i>Chlorella sp</i> R3	12	2	83%
<i>Cianobacteria</i> R1	20	0	100%
<i>Cianobacteria</i> R2	15	2	87%
<i>Cianobacteria</i> R3	26	0	100%

Fuente: Base de datos de la investigación

Ilustración 19.

Comparación de porcentaje de remoción de sólidos sedimentables para cada una de las cepas utilizadas



Fuente: Base de datos de la investigación

**Nota:** Se realizó un promedio de las réplicas presentes en la tabla 9 de las cepas *Cianobacteria* y *Chlorella sp*. (R1, R2, R3: réplica 1, réplica 2, réplica 3) para globalizar un resultado y lograr su comparación.

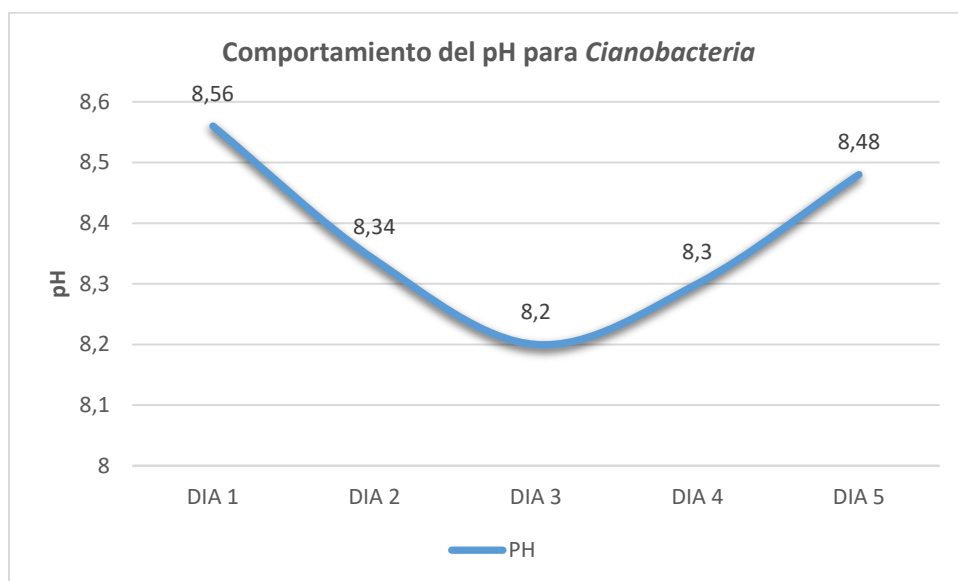
El sistema de tratamiento demostró una alta eficiencia para remover sólidos sedimentables del agua residual según lo indica la tabla, sin embargo en la réplica 3 de *Chlorella sp* se aprecia una menor disminución que en el resto de réplicas, esto implicaría que el tiempo de

retención hidráulico (TRH) que se implementó en la unidad de sedimentación no fue suficiente para la carga de sólidos sedimentables que poseía el agua residual antes de ingresar al sistema, lo cual contrasta con los resultados obtenidos con la réplica de *Cyanobacteria* quien recibió mayor concentración de sólidos sedimentables y logró disminuir a totalidad la carga con el mismo tiempo de retención hidráulico (TRH), lo que indicaría que la biomasa generada por *Chlorella sp* atribuye al aumento de sólidos sedimentables en el agua, lo cual concuerda con la investigación realizada por Nava en la cual se utilizó biomasa algal para el tratamiento de aguas residuales en dos tipos de reactores, uno de biomasa suspendida y otro de biomasa adherida, donde determinó que el reactor de biomasa suspendida presentaba mayores valores de sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos sedimentables (SSED) que el reactor de biomasa adherida (Nava. et al, 2014), lo que demuestra que el tipo de biomasa influye en la cantidad de sólidos sedimentables presentes en el medio. A su vez, se logra deducir que *Cyanobacteria* no altera drásticamente los sólidos sedimentables con la generación de su biomasa, la cual tiende a aglomerarse entre sí, a comparación de la generada por *Chlorella sp*.

## Comportamiento del pH en el tratamiento del agua residual proveniente de porcícolas por las cepas *Cianobacteria* y *Chlorella sp*

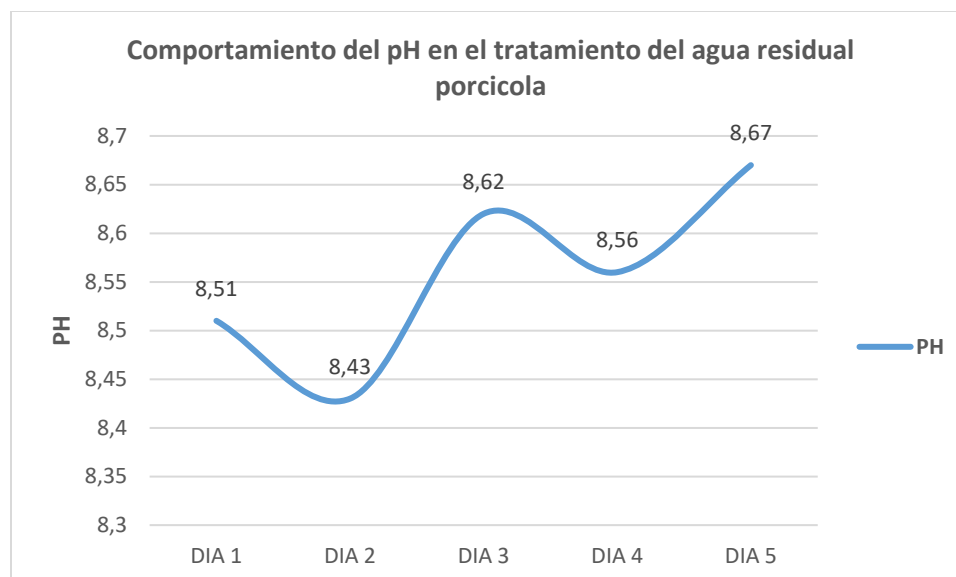
### Ilustración 20.

Comportamiento del pH en el tratamiento del agua residual proveniente de porcícolas con la cepa *Cianobacteria*



### Ilustración 21.

Comportamiento del pH en el tratamiento del agua residual provenientes de porcícolas con la cepa *Chlorella sp*



El pH en el tratamiento del agua residual Porcicola para ambas cepas varía entre 8 y 8,6 niveles que son característicos entre las microalgas *Chlorella* sp. Manteniendo estables los desarrollos de las células Fito planctónicas en las aguas residuales (Candela, 2016).

Este pH presentado se encuentra establecido en el rango apropiado, favoreciendo la absorción de nutrientes presentes en el agua residual. . Dentro de la literatura, se encuentran estudios realizados por Sutherland et al. (2015) y Zheng et al. (2019) donde mostraron que un rango de pH de 5 - 8.5 favorece la remoción de elementos orgánicos e inorgánicos. Por otra parte, un pH superior a 11 puede causar inhibición de la actividad microalgal (Posadas et al., 2014).

De igual manera, en el estudio realizado por posada (2014). Presentaron un un pH de 9, mostrando una mayor eficiencia en remoción de nitrógeno (89%), mientras que el fósforo tuvo una deficiencia en remoción (33%). Estas variaciones de remoción indican una tendencia a mayor remoción con un pH más

alto, sin embargo, hay un rango óptimo entre 6.5 - 8.5 que puede variar entre especies. Asimismo, sugieren que la remoción de nutrientes podría ser regulada controlando el pH. Igualmente, Zheng et al. (2019) observaron la remoción de nutrientes por *C. vulgaris* en aguas residuales de porcicultura con valores de pH de 5, 7 y 9, también obtuvieron la mayor remoción de nutrientes al operar a un pH de 7.

### Comparación de parámetros máximos permisibles en resolución 1207 / 2014 y resolución 0631/2015 con el Agua residual tratada por *Chlorella sp* y *Cianobacteria*

**Tabla 11.**

*Comparación de las resoluciones para los parámetros máximos permisibles en vertimientos y de uso agrícola para la cepa Chlorella sp.*

<b>Parámetros evaluados</b>	<b>Agua residual proveniente de Porcícolas sin tratamiento</b>	<b>Parámetros máximos permisibles por la resolución 1207 /2012 (USO AGRÍCOLA)</b>	<b>Parámetros máximos permisibles por la resolución 0631/2015</b>	<b>Agua residual provenientes de porcícolas tratada con <i>Chlorella sp</i> R1</b>
<b>Sólidos sedimentables (mg/L)</b>	5,5	-	5	0
<b>DQO (mg/L)</b>	788	-	450	413
<b>DBO (mg/L)</b>	588,75	-	900	11,5
<b>Nitratos (mg/L)</b>	20,5	5,0	Análisis y reporte	2,4
<b>Fosfatos (mg/L)</b>	30	-	Análisis y reporte	0,9
<b>pH</b>	8,61	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0	7,85 - 8,56

Fuente: Base de datos de la investigación

Se tomaron datos de la primera réplica realizada para el tratamiento de aguas residuales porcícolas con la cepa *Chlorella sp* con el fin de realizar una comparación según la normatividad respectiva en parámetros máximos permisibles, en este caso con la norma 1207 del 2012 para el reúso del agua tratada con fines agrícolas, la cual no contempla la mayoría de los parámetros analizados en la presente investigación, sin embargo se resalta los valores en cuanto a nitratos

con una reducción de 2,6 mg/L en su tratamiento, cumpliendo con los parámetros establecidos; junto con ello su pH no varía en sus resultados iniciales como finales, oscilando entre lo establecido en la resolución mencionada; sin embargo, es importante resaltar que los resultados de remoción obtenidos con las réplicas 2 y 3 de *Chlorella sp* no alcanzan a cumplir con el máximo permisible de nitrato estipulado en la resolución, por lo cual no es posible realizar un reúso con fines agrícolas de dicho efluente mientras que con la réplica 1 si se podía implementar el reúso.

La resolución 0631 del 2015 estipula algunos parámetros máximos permisibles para vertimientos directos de aguas residuales provenientes de la producción porcícola en aguas superficiales, datos los cuales son de gran importancia, debido a que permiten corroborar si el tratamiento está siendo eficiente y está cumpliendo con la normatividad pertinente para minimizar o mitigar cualquier impacto al recurso hídrico que puedan generar los vertimientos producto de la actividad porcícola.

Los resultados de esta primera réplica de tratamiento con *Chlorella sp* cumplen con lo establecido en la resolución, a su vez, en las otras dos replicas realizadas los niveles de contaminación después de pasar por el tratamiento se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles estipulados por la 0631, estos datos se pueden observar en las **tablas (5, 8 y 10)**. Los datos iniciales antes del tratamiento oscilan desde 588 mg/L a 2143 mg/L para DBO y en la DQO se encuentran entre 788 mg/L a 1454 mg/L, luego de ser tratados su carga orgánica disminuye de manera significativa oscilando sus valores 11,5 mg/L hasta 127,3 mg/L para DBO y DQO 112 mg/L hasta 413 mg/L respectivamente. En solidos sedimentables se logra una remoción notable oscilando su reducción de casi un 100%, finalmente para pH de igual forma que el párrafo anterior no varía y se encuentra entre el rango establecido en la normatividad. Por

ende, el efluente tratado es apto para ser vertido a cuerpos de agua superficial sin representar mayor riesgo o problemática a los ecosistemas.

**Tabla 12.**

*Comparación de las resoluciones para los parámetros máximos permisibles en vertimientos y de uso agrícola para la cepa *Chlorella sp.**

<b>Parámetros evaluados</b>	<b>Agua residual proveniente de Porcícolas sin tratamiento</b>	<b>Parámetros máximos permisibles por la resolución 1207 /2012 (USO AGRÍCOLA)</b>	<b>Parámetros máximos permisibles por la resolución 0631/2015</b>	<b>Agua residual provenientes de porcícolas tratada con microalgas <i>Cyanobacteria R1</i></b>
<b>Sólidos sedimentables (mg/L)</b>	20	-	5	0
<b>DQO (mg/L)</b>	895	-	450	281
<b>DBO (mg/L)</b>	717,87	-	900	39,1
<b>Nitratos (mg/L)</b>	30	5,0	Análisis y reporte	4,5
<b>Fosfatos (mg/L)</b>	30	-	Análisis y reporte	16,3
<b>pH</b>	8,7	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0	8,3 - 8,8

Fuente: Base de datos de la investigación

De igual forma que la anterior cepa, se tomó la réplica 1 de las 3 realizadas en el tratamiento con *Cyanobacteria*, y, se compararon los resultados de esta con la normatividad vigente. Los parámetros que cumplen con lo establecido en la resolución 1207 del 2012 son nitratos y pH, las otras 2 réplicas realizadas no se encuentran en el rango establecido limite, presentando concentraciones de 8,4 mg/l y 10,3 mg/l para nitratos (**ver tabla 7**), lo cual impide que el agua tratada en estas dos réplicas pueda ser reutilizada.

La réplica 1 y 3 del tratamiento con *Cyanobacteria* presenta valores menores de DQO, DBO, sólidos sedimentables y pH a los niveles máximos permisibles estipulados en la

resolución 0631 de 2015, exceptuando por la réplica 2 de tratamiento la cual presenta una DQO de 565 mg/l lo cual supera el nivel máximo de este parámetro presente en la resolución, esto indica que el agua tratada en 2 de las 3 réplicas con *Cyanobacteria* pueden ser vertidas a cuerpos de agua superficiales, mientras que el agua tratada en las 3 réplicas de *Chlorella sp* puede ser vertida directamente sin ningún inconveniente.

## Conclusiones

Se determina que las dos cepas implementadas en el tratamiento de aguas residuales porcícolas presentan una alta eficiencia de remoción de la materia orgánica para DBO se observa un porcentaje mayor al 70% para *Cianobacteria* y en cuanto a *Chlorella sp* mayor al 85% , para DQO 60% y 80% , nitratos 64 y 66%, y fosfatos 62 y 75% mientras que disminuyen la turbidez y sólidos sedimentables. Permitiendo establecer este sistema de tratamiento como una alternativa viable para su uso en el sector porcícola no tecnificado presente en el municipio de Girardot, y en la región del Alto Magdalena.

*Chlorella sp* demostró ser la cepa más eficiente en la remoción de los nutrientes en el agua residual con valores que oscilaron entre el 88%-64%, y 97-69% para nitratos y fosfatos respectivamente. Por lo tanto, se considera como una alternativa viable para prevenir procesos de eutrofización en cuerpos de agua cercanos a las fincas productoras.

*Cianobacteria*, presentó menores eficiencias en comparación con *Chlorella sp*, sin embargo, las remociones alcanzadas de 88% para DBO, 72% de DQO, 74% para nitratos y 62% de fosfatos, son suficientes para cumplir con los niveles máximos permisibles establecidos por la resolución 0631 de 2015, lo que determina la viabilidad que posee las aguas residuales porcinas tratadas para ser vertidas a cuerpos hídricos superficiales.

El agua residual porcícola una vez es sometida al tratamiento con microalgas o *Cianobacterias* no es apta para ser reutilizada dentro de los predios con ningún fin, debido a que se deben realizar análisis de diferentes parámetros para determinar la presencia y concentración

de organismos patógenos, hidrocarburos, metales pesados y cloruros, los cuales contempla la resolución 1207 de 2014 para establecer la viabilidad del reúso de un agua residual tratada.

### **Recomendaciones**

Para posteriores análisis del sistema, puesta en marcha en campo o futuras investigaciones implementando las cepas utilizadas en el presente trabajo, se realizan las siguientes recomendaciones:

Es pertinente realizar un estudio de la capacidad de remoción de contaminantes que podrían presentar las dos cepas al introducirlas al tiempo en el reactor biológico, con el fin de determinar si su implementación de esta manera resulta más eficiente que utilizando las cepas por separado para el saneamiento de aguas.

Para reducir la carga contaminante de las aguas residuales provenientes de porquerizas podría ser factible implementar un sedimentador primario, con el fin de facilitar la adaptación de las cepas al medio contaminado, logrando mejores remociones de los contaminantes estudiados.

Se debe tener en consideración para futuros estudios con las cepas, la variación del nivel de oxigenación en el reactor biológico y los tiempos de retención hidráulica en todo el sistema, obteniendo de esta manera diferentes resultados para la comparación de la mejor combinación de variables para conseguir los mejores niveles de remoción.

Establecer un tiempo de adaptación de las cepas dentro del agua residual antes de comenzar a monitorear los niveles de remoción, podría generar mejores resultados en el

tratamiento debido a la reducción del estrés generado por las nuevas condiciones a las que se enfrentan las microalgas.

### Referencias Bibliográficas

- Abalde, J., Cid, A., Fidalgo Paredes, P., Torres, E., Herrero, C. (1995). Microalgas: cultivo y aplicaciones. A Coruña: Universidade, Servizo de Publicacións. ISBN: 978-84-97497-69-5. DOI: <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497695>
- Alcaldía Municipal de Girardot. (2011). Plan de Ordenamiento Territorial Girardot. 2011.
- Andersen, R. (2004, 10 diciembre). Algal Culturing Techniques. Phycological Society of America. Prensa académica. 1a edición. ISBN: 9780080456508.
- Arias, S., Betancur, F., Gómez, G., Salazar, J., y Hernández, M. (2010). Phytoremediation with Wetlands for the Treatment of Swine Wastewater.
- Ariel, J. (2015). Estudio sobre los rendimientos de las decantaciones con aguas residuales con diferentes concentraciones de contaminación.pdf. [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/50505/1/tesis\\_margarita\\_jov\\_er\\_smet.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/50505/1/tesis_margarita_jov_er_smet.pdf)Artificial
- Balaguera, A. M. A. (2022, 20 octubre). Repositorio Institucional UCC: Uso de la Spirulina en el tratamiento de aguas residuales de la producción y transformación pecuaria. <http://www.knowledgecap.bigstarcreative.com/handle/20.500.12494/46803>

- Beltrán-Rocha, Julio C, Guajardo-Barbosa, Claudio, Barceló-Quintal, Icela D, López-Chuken, Ulrico J. (2017). Biotratamiento de efluentes secundarios municipales utilizando microalgas: Efecto del pH, nutrientes (C, N y P) y enriquecimiento con CO<sub>2</sub>. Revista de biología marina y oceanografía, 52(3), 417-427. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572017000300001>
- Blazquez, P. & Montero, C. (2010). Reutilización de agua en Bahía Blanca Plata 3era Cuenca. [http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/agua\\_reutilizacion.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/agua_reutilizacion.pdf)
- Candela, R. (2016). “Las Microalgas y El Tratamiento de Aguas Residuales Conceptos y Aplicaciones. Una Revisión Bibliográfica”. Monografía. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR]. (2019). Ajuste del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Bogotá. Fase de diagnóstico. Caracterización socioeconómica. Pp.296
- Cartagena, J y Orlando, B. (2017). Evaluación Del Uso De La Microalga *Chlorella Vulgaris* en la remoción de materia orgánica de las aguas residuales de la PTAR El Salitre a nivel de laboratorio.
- Cartagena, V, y Olaya, R. (2022). Evaluación preliminar de un consorcio microbiano proveniente del humedal el Yulo, en fotobiorreactores de bajo costo para el tratamiento de muestras de agua residual sintética y del río magdalena en el municipio de Girardot, Cundinamarca.
- Castrillón, O., Ricardo, Q., Jiménez, A., Oswaldo, P., Mejía, B. (2004). Porquinaza en la alimentación animal. Revista Lasallista de Investigación, 1(1), 72–76.

Cifuentes, M. & Rodríguez, P. (2020). Análisis De La Remoción De Amonio (Nh<sub>4</sub>) Y Fosfatos (Po<sub>4</sub>) Por Una Cepa De Microalga Filamentosa Dispuesta En Un Biorreactor Rotacional De Biopelícula Fija.

<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/24633/Rodr%C3%ADguezOspinaPedroAntonio2020.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Clemente, A; Chica, E; Peñuela, G. (2013). Procesos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes. Rev. Ambiente. Agua 8 (3). Dic 2013.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2016). Tercer Censo Nacional Agropecuario. Hay campo para todos. ISBN Tomo 2: 978-958-624-110-6

Dirección de Asistencia Técnica y de Medio Ambiente [DATMA]. (2019). Estadísticas Agropecuarias Municipales. Ministerio de Agricultura

de Bashan, L. E., & Bashan, Y. (2003). Bacterias promotoras de crecimiento de microalgas: una nueva aproximación en el tratamiento de aguas residuales. Revista Colombiana de Biotecnología, 5, 85–90.

de-Bashan, L. E., Antoun, H., & Bashan, Y. (2008). Involvement Of Indole-3-Acetic Acid Produced By The Growth-Promoting Bacterium Azospirillum Spp . In Promoting Growth Of *Chlorella* Vulgaris 1. Journal of Phycology, 44(4), 938–947.  
<https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2008.00533.x>

Delgadillo López, Angelica Evelin, César Abelardo González Ramírez, Francisco Prieto García, José Roberto Villagómez Ibarra, y Otilio Acevedo Sandoval. 2011. “Fitorremediación:

- Una Alternativa Para Eliminar La Contaminación”. Tropical and Subtropical Agroecosystems 597–612.
- Escalante-Estrada, Violeta E., Marco A. Garzón-Zúñiga, y Sergio Valle-Cervantes. 2012. Macronutrients Removal In The Treatment Of Swine Wastewater. Vol. 8.
- Fidalgo, J. (1995). Variabilidad Bioquímica de Microalgas Marinas En Cultivo En Función de La Fuente de Nitrógeno. Tesis doctoral. Departamento de Biología Celular y Molecular. Universidad de la Coruña. <http://hdl.handle.net/2183/12344>
- Fondo Nacional de la Porcicultura Porkcolombia, 2018. Informe de los proyectos de inversión desarrollados durante el año 2018, fondo nacional de la porcicultura. En <https://www.miporkcolombia.co/wp-content/uploads/2019/03/1.Informe-de-Gestion-2018.pdf>
- Garzón, M & Buelna, G. (2014). Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México. Revista internacional de contaminación ambiental, 30(1), 65-79. Recuperado en 26 de noviembre de 2022, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992014000100006&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000100006&lng=es&tlng=es).
- Giraldo, M. (2012). Aislamiento y caracterización de microalgas formadoras de tapetes microbianos asociados a un cultivo hidropónico de plantas halófitas Isolation and Characterization of The Microbial Mats Associated to a Hydroponic Culture of Halophytic Plants. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. [http://acceda.ulpgc.es/bitstream/10553/6792/4/0654092\\_00000\\_0000.pdf](http://acceda.ulpgc.es/bitstream/10553/6792/4/0654092_00000_0000.pdf)

- Godos Id, Blanco S, García-Encina PA, Becares E, Muñoz R. Operación a largo plazo de estanques de algas de alta tasa para la biorremediación de aguas residuales de cerdos a altas tasas de carga. *Tecnología Bioambiental*. 2009 octubre; 100 (19): 4332-4339. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.04.016. PMID: 19427783.  
<https://europepmc.org/article/med/19427783#impact>
- González, L. (2010). Influencia de La Deficiencia de Nitrógeno y Fósforo En Las Interacciones Competitivas Entre *Chlorella Vulgaris* y *Scenedesmus Acutus*.  
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8664>
- Grijalbo Fernández, Lucía. 2012. Universidad San Pablo-Ceu Facultad De Farmacia  
Departamento De Biología Taladrinas Procedentes De Actividades Industriales.
- Hena, S., Fatimah, S. and Tabassum, S., (2015),” Cultivation of algae consortium in a dairy farm wastewater for biodiesel production.”, *Water Resources and Industry*, 10, pp.1–14.
- Hernández-Pérez, Alexis, y José I. Labbé. 2014. “Microalgas, Cultivo y Beneficios”. *Revista de biología Marina y Oceanografía* 49(2):157–73.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2019). Estudio Nacional Del Agua 2018. Bogotá: Ideam: 452 pp.
- Imase, M., Watanabe, K., Aoyagi, H., & Tanaka, H. (2008). Construction of an artificial symbiotic community using a *Chlorella*-symbiont association as a model. *FEMS Microbiology Ecology*, 63(3), 273–282. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2007.00434>.

Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura [INTAGRI]. (2019). Sistemas de Producción Porcina. Serie Ganadería, Núm. 33. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 4 p.

Jean, O. (2020). Aplicación de microalgas para la remoción de nutrientes en efluentes agrícolas: Revisión de literatura. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/6d149154-7028-4753-abd3-ca241e816c6a/content>

Kumar, R. and Goyal, D., (2008), Comparative biosorption of Pb<sup>2+</sup> by live algal consortium and immobilized dead biomass from aqueous solution.”, Indian Journal of Experimental Biology, 47(8), pp.690–694.

Lee, Chang Soo, Sang Ah Lee, So Ra Ko, Hee Mock Oh, y Chi Yong Ahn. 2015. “Effects of Photoperiod on Nutrient Removal, Biomass Production, and Algal-Bacterial Population Dynamics in Lab-Scale Photobioreactors Treating Municipal Wastewater”. Water Research 68:680–91. doi: 10.1016/j.watres.2014.10.029.

Lizarazo Becerra, Jenny Milena, y Martha Isabel Orjuela Gutiérrez. 2013. Sistemas De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales En Colombia.

Markou, G., Vandamme, D., Muylaert, K., 2014b. Ammonia inhibition on *Arthrospira platensis* in relation to the initial biomass density and pH. Bioresour. Technol. 166, 259–65

Mayz, J. (2004). Fijación Biológica de Nitrógeno. Revista UDO Agrícola Vol. 4. pg. 1-20

Medrano-Barboza, Johanna, Alberto Alejandro Aguirre-Bravo, Paula Encalada-Rosales, Roberto Yerovi, y José Rubén Ramírez-Iglesias. 2021. “Slaughtering and Piggery Wastewater for

Cultivation and Biomass Generation of *Chlorella Vulgaris*". Bionatura 6(2):1824–31.

doi: 10.21931/RB/2021.06.02.24.

Mérida, Luis Guillermo Ramírez. 2020. Agrobiología. Mérida Publishers.

Ministerio de Agricultura. (2018). Cadena cárnica porcina.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Sociedad de Agricultores de Colombia & Asociación Colombiana de Porcicultores. (2002). Guía Ambiental Para el Subsector Porcicola. Sociedad de Agricultores de Colombia.

<https://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com/2012/09/guc3ada-ambiental-para-el-subsector-porcc3adcola.pdf>

Montero L. et al. (2015). Alternativas para la producción porcina a pequeña escala. Primera edición. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Coyoacán. ISBN: 978-607-02-6915-8

Mustafa, E.M., Phang, S.M. and Chu, W.L., (2012),” Use of an algal consortium of five algae in the treatment of landfill leachate using the high-rate algal pond system.”, Journal of Applied Phycology, 24(4), pp.953–963.

Nava, L. M., Gasperín, R. & Durán, A. (2014). Comparación de un reactor de un reactor de biomasa suspendida y un reactor de biomasa adherida para la biodegradación de compuestos tóxicos presentes en aguas residuales de refinerías de petróleo.

<https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v30n1/v30n1a9.pdf>

Noreña, J., Osorio, N., & Gómez, J. (2016). Manual de Uso de la Porcinaza en la Agricultura (Issue 1). <https://doi.org/10.16309/j.cnki.issn.1007-1776.2003.03.004>

Olivia, Bertha, Arredondo Vega, y Domenico Voltolina. 2007. Concentración, Recuento Celular Y Tasa De Crecimiento.

Ortiz, M., Cortés, C., Villarraga, J., Padilla, J., y Otero, A. (2012). Evaluación del crecimiento de la microalga *Chlorella sorokiniana* en diferentes medios de cultivo en condiciones autotroficas y mixotroficas. *ORINOQUIA*, 16(1), 11-20. Tomado en Noviembre 26, 2022, de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-37092012000100002&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-37092012000100002&lng=en&tlng=es).

Oscanoa, A., Cervantes, M., Flores, L., y Ruiz, A. (2021). Evaluación del potencial de *Desmodesmus asymmetricus* y *Chlorella vulgaris* para la remoción de nitratos y fosfatos de aguas residuales. *Revista Peruana de Biología*, 28(1), e18082. versión On-line ISSN 1727-9933 <https://dx.doi.org/10.15381/rpb.v28i1.18082>

Pedreros, M., & Rodríguez, D. (2019). Evaluación De Un Cultivo Mixto De Microalgas Para La Remoción De Nitrógeno (N) Y Fosforo (P) En Aguas Residuales Porcinas. Universidad de Cundinamarca

Pérez, T., Carrasco, T., y Núñez, L. (2005). “Dinámica de Las Características Fisicoquímicas de Aguas de Un Sistema En El Que Convergen Residuales Pecuarios y Urbanos”. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 39(3):339–42.

Piñera, A. (2002). Manual Para el Cultivo de Microalgas.  
<https://biblio.uabcs.mx/tesis/TE1366.pdf>

Posadas, E., Alcantara, C., García-Encina, P., Gouveia, L., Guieysse, B., Norvill, Z., . . . Muñoz, R. (2018). Microalgae cultivation in wastewater. En *Microalgae Based biofuel and bioproducts* (pp. 560). Woodhead Publishing. doi:10.1016/C2015-0-05935-4

- Posadas, E., Bochon, S., Coca, M., García-González, M., García-Encina, P. y Muñoz, R. (2014). Microalgae-based agro-industrial wastewater treatment: a preliminary screening of biodegradability. *Journal of Applied Phycology*(26), 2335-2345. doi:/10.1007/s10811-014- 0263-0
- Alcaldía Municipal de Girardot. (2011). Plan de Ordenamiento Territorial Girardot. 2011.
- PORKCOLOMBIA. (2017). Análisis de coyuntura del sector porcicultor del año 2017 y perspectivas 2018. Asociación Porkcolombia Fondo Nacional De La Porcicultura, 1–15. [https://asociados.porkcolombia.co/porcicultores/images/porcicultores/informes/2016/Inf\\_Economico\\_2016.pdf](https://asociados.porkcolombia.co/porcicultores/images/porcicultores/informes/2016/Inf_Economico_2016.pdf)
- Quintero, K., Rodríguez, D., González, M., y Arroyave, J. (2021). “Evaluación de La Remoción de Nitrógeno y Materia Orgánica a Través de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial, Acoplados a Reactores de Lecho Fijo Con Microalgas En La Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia”. *Ingeniería y Región* 25:82–94. doi: 10.25054/22161325.2921.
- Rengifo, A. L., Peña, E., & Benítez, N. (2012). Efecto de la asociación alga-bacteria *Bostrychia calliptera* (Rhodomelaceae) en el porcentaje de remoción de cromo en laboratorio. *Biología Tropical*, 60(September), 1055–1064
- Rodríguez, R. F. J. (2020, 1 diciembre). Diseño y planteamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales ubicada al noreste del pueblo de Coporaque-Caylloma usando murmunta (*Nostoc commune*) como tratamiento secundario. <https://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/10392>

- San Martín, R. (2000). Alternativa Química Para El Tratamiento De Aguas Residuales De Granjas Porcícolas. Universidad Virtual del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. <http://hdl.handle.net/11285/569355>
- Sandoval Herrera, J. A., Malo, B. O., Cartagena Arévalo, J.C. y Rubio Fernández, D. (2018). Evaluación a nivel laboratorio de la capacidad de remoción de materia orgánica de *Chlorella vulgaris* en las aguas residuales de la PTAR Salitre. Mutis, 8(1), 34-42, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1368>.
- Silva, J., Torres, P. y Madera, C. (2008). Reuso de aguas residuales domesticas en agricultura. Una revision. Agronomía Colombiana , 26 (2), 347–359. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/13521>
- Solís, C. (2018). Aplicación de *Chlorella Vulgaris* En Agua Residual Para Su Reúso. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/7379>
- Su, Y., Mennerich, A., & Urban, B. (2011). Municipal wastewater treatment and biomass accumulation with a wastewater-born and settleable algal-bacterial culture. Water Research, 45(11), 3351–3358. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.03.046>
- Universidad de Cundinamarca [UDEEC]. (2019). Plan de Desarrollo Universidad de Cundinamarca 2019.
- Velasco, J. (2003). El composteo: una alternativa tecnológica para la biorremediación de suelos en México. <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906604.pdf>

- Vilanova, R., Santín, I., & Pedret, C. (2017). Control y operación de estaciones depuradoras de aguas residuales: modelado y simulación. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 14(3), 217-233.
- Viveros, J. (2014). Evaluación de las aguas residuales domesticas de la Universidad Autónoma de Occidente como medio de cultivo natural para la microalga nativa *Chlorella sp* y simultáneamente su capacidad para remover nitrato Y DQO de dichas aguas. Universidad Autónoma de Occidente.
- Watanabe, K., Takihana, N., Aoyagi, H., Hanada, S., Watanabe, Y., Ohmura, N., Saiki, H., & Tanaka, H. (2005). Symbiotic association in *Chlorella* culture. *FEMS Microbiology Ecology*, 51(2), 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.femsec.2004.08.004>.

## Anexos

Guía de la Universidad de Texas para elaboración del medio de cultivo Bold's Basal Medium (BBM):

### Anexo 1. Medio Bold's Basal Medium (BBM) Modificado para 200 ml

BBM MEDIO			
COMPONENTES	SOLUCION STOCK (g*1 d H2O)		
Macro nutrientes	g*1	ml	Conversión para 200 ml
NaNO <sub>3</sub> (Nitrato de sodio)	25	10	5
CaCl <sub>2</sub> . 2H <sub>2</sub> O (Cloruro de Calcio)	2,5	10	0,5
MgSO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O (Sulfato de magnesio)	7,5	10	1,5

K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> (Fosfato Di potásico)	7,5	10	1,5
kH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (Fosfato Mono potásico)	17,5	10	3,5
NaCl (Cloruro de Sodio)	2,5	10	0,5
<b>Solución EDTA Alcalina</b>		1	
KOH (Hidróxido de potasio)	31		6,2
EDTA	50		10
<b>Solución de Hierro Acidificado</b>		1	
FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O (Sulfato de Hierro)	4,98		0,996
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (Ácido Sulfúrico)		1	
<b>Solución de Boro</b>		1	
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (Ácido Bórico)	11,42		2,284
<b>Solución de Trazas de Metal</b>		1	
ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O (Sulfato de Zinc)	8,82		1,764
MnCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O (Cloruro de Manganeso)	1,44		0,288
MoO <sub>3</sub> (Óxido de Molibdeno)	1,014		0,2028
CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O (Sulfato de Cobre)	1,57		0,314
Co (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O (Nitrato de Cobalto)	0,49		0,098

**Anexo 2.** Formato lista para el seguimiento de parámetros Fisicoquímicos *Chlorella sp*:

<b>LISTA DE CHEQUEO PARAMETROS PROYECTO <i>Chlorella sp</i></b>							
<b>N</b>	<b>PARAMETROS DIARIOS</b>	<b>DIA 1</b>	<b>DIA 2</b>	<b>DIA 3</b>	<b>DIA 4</b>	<b>DIA 5</b>	
<b>1</b>	<b>PH</b>	8,61	7,85	8,54	8,66	8,56	
<b>2</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>	25	23,4	25	25	25	
<b>3</b>	<b>OD (%)</b>	21	20,7	62,8	78,1	78,5	
	<b>INICIAL - FINAL</b>	<b>LECTURA INICIAL</b>		<b>LECTURA FINAL</b>		<b>Eficiencia de remoción</b>	
<b>4</b>	<b>SOLIDOS SEDIMENTABLES (mg/l)</b>	5,5			0		100%
<b>5</b>	<b>TURBIEDAD (NTU)</b>	1000			19,7		98%
<b>6</b>	<b>DQO (mg/l)</b>	788			413		48%
<b>7</b>	<b>DBO (mg/l)</b>	588,75			11,5		98%
		<b>Colorimetría</b>	<b>Fotómetro</b>	<b>colorimetría</b>	<b>Fotómetro</b>		
<b>8</b>	<b>NITRATOS (mg/l)</b>	20	20,5	10	2,4	88%	
<b>9</b>	<b>FOSFATOS (mg/l)</b>	5	30	2	0,9	97%	

**Anexo 3.** Formato lista de chequeo de parámetros para la cepa *Cianobacteria*.

<b>LISTA DE CHEQUEO PARAMETROS PROYECTO CIANOBACTERIA</b>						
<b>N</b>	<b>PARAMETROS</b>	<b>DIA 1</b>	<b>DIA 2</b>	<b>DIA 3</b>	<b>DI</b>	<b>DI</b>
<b>°</b>	<b>DIARIOS</b>				<b>A 4</b>	<b>A 5</b>
<b>1</b>	<b>PH</b>	8,7	8,39	8,54	8,7	8,8
					4	1
<b>2</b>	<b>TEMPERATURA</b>	25	21,1	21,8	20,	21
	<b>(°C)</b>				8	
<b>3</b>	<b>OD (%)</b>	23,7	67,8	69,1	77	78,
						8
	<b>INICIAL - FINAL</b>	<b>LECTURA INICIAL</b>	<b>LECTURA FINAL</b>	<b>Eficiencia</b>		
				<b>de</b>		
				<b>remoción</b>		
<b>4</b>	<b>SOLIDOS</b>	20		0		100%
	<b>SEDIMENTABLES</b>					
	<b>(mg/l)</b>					
<b>5</b>	<b>TURBIEDAD (NTU)</b>	1000		9,01		99%
<b>6</b>	<b>DQO (mg/l)</b>	895		281		69%
<b>7</b>	<b>DBO (mg/l)</b>	717,87		39,1		95%
		<b>Colorimetr</b>	<b>Fotómet</b>	<b>Colorimetr</b>	<b>Fotómetr</b>	
		<b>ía</b>	<b>ro</b>	<b>ía</b>	<b>o</b>	
<b>8</b>	<b>NITRATOS (mg/l)</b>	30	30	10	4,5	85%
<b>9</b>	<b>FOSFATOS (mg/l)</b>	5	30	4	16,3	46%