

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

Desarrollo de estrategias para el manejo de floraciones algales en una planta  
potabilizadora de agua.

**INGE-2711**

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Químico**

Presentado por:

**Steven Eduardo Bohorquez Jiménez**

**Steven Xavier Freire Guzmán**

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

**Dedicatoria**

---

El presente proyecto lo dedico a Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino, por darme la sabiduría y el valor para superar cada desafío. A mi familia, por su amor incondicional, por ser mi fortaleza en los momentos más difíciles y mi alegría en los días felices. A mis profesores y mentores, por su guía, sus enseñanzas y por inspirarme a dar siempre lo mejor de mí. A Kimberly, quien estuvo presente en los inicios de esta travesía. Gracias por creer en mí y por ser parte especial de este camino, dejando una huella que siempre recordare con gratitud. Y a todos aquellos que creyeron en mí cuando más lo necesite, gracias por ser el motor que me impulsó a alcanzar este logro.

*Steven Eduardo Bohorquez Jimenez*

## **Dedicatoria**

---

Quiero dedicar este trabajo principalmente a Dios y a mis padres, Ricardo y Alicia, que, con su amor incondicional, apoyo y sacrificio han sido pilares fundamentales que me han dado la fuerza para seguir adelante y nunca rendirme. A mis abuelos, que desde el cielo velan por cada uno de mis pasos. A mi Abuela, por sus enseñanzas y amor que me brindó desde la niñez.

A mi hermano Andrés, que con su ejemplo me inspira a ser mejor cada día y a perseguir mis sueños con determinación.

*Steven Xavier Freire Guzmán*

## **Agradecimientos**

---

A lo largo de este camino, muchas personas han sido parte fundamental de mi crecimiento personal, académico y profesional. Es gracias a su apoyo, guía y compañía que hoy puedo compartir este logro. A mis amigos, Robert, Diego, Danilo y Alfredo quienes fueron mi refugio en los días complicados y mi alegría en los momentos de descanso. Quiero agradecer a Gillian y Abel, me acompañaron como hermanos durante la carrera, aunque ya culminaron esta etapa, su ejemplo y apoyo han sido una gran motivación para mí. A Bercelio, quien se gradúa conmigo y compartirá la satisfacción de ser colegas. Gracias por estar en los momentos buenos y malos y demostrar que podemos alcanzar cualquier meta. Finalmente, a Eddy, quien me acompañó incansablemente en largas madrugadas de trabajo. Tu ayuda y paciencia fueron clave para superar esta etapa. Este logro también lleva tu esfuerzo.

*Steven Eduardo Bohorquez Jimenez*

---

## **Agradecimientos**

Agradezco principalmente a Dios por haberme dado la sabiduría y fortaleza necesaria para cumplir esta meta. Mi más sincero agradecimiento a la Ing. Andrea y a Jhon por sus guías y consejo que han enriquecido este proyecto. A Danny y Xavier por creer en mí y se convirtieron en amigos entrañables. A mis compañeros de carrera que hicieron más amena esta etapa, en especial a Bryan, que lo conozco desde el principio de esta etapa quién se gradúa conmigo.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que de una u otra manera, han contribuido a la culminación exitosa de este proyecto.

*Steven Xavier Freire Guzmán*

**Declaración Expresa**

---

Nosotros Steven Eduardo Bohorquez Jimenez y Steven Xavier Freire Guzmán acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

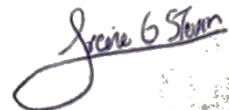
En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 10 de octubre del 2024.



---

Steven Eduardo  
Bohorquez Jimenez



---

Steven Xavier Freire  
Guzmán

## **Evaluadores**

---

**María Verónica Ordoñez Pazmiño**

Profesor de Materia

---

**Luis Elvin Domínguez Granda**

**Ph.D.**

Tutor de proyecto

## Resumen

La presencia de floraciones algales (Bloom) en una planta de tratamiento de Agua potable representan un desafío para la calidad del agua, generando problemas como el taponamiento de los filtros y aumento de costos operativos. El proyecto se centra en analizar los factores que favorecerían la proliferación de estas microalgas en un caso real, evaluando la incidencia de factores como la intensidad lumínica y concentraciones de nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) en el crecimiento algal, justificando así la necesidad de estrategias para su control. La metodología comprendió de una revisión de datos históricos para un periodo de dos años, una caracterización de la calidad de agua y de la abundancia de algas en áreas claves del proceso de potabilización. También se realizaron experimentos a escala de laboratorio con intensidades de luz de 600-1800 luxes e incrementos en las concentraciones de Nitrógeno y Fósforo total para explorar su impacto en el desarrollo algal. Adicionalmente, se analizó el material floculante empleado en la planta mediante un ICP óptico. Los resultados sugieren un potencial incremento en la abundancia de *Synedra ulna* posterior al proceso de clarificación. Se determinó que la intensidad de la luz juega un papel importante el florecimiento algal, junto con concentraciones elevadas de Nitrógeno. Finalmente, la caracterización del floculante evidenció trazas de elementos que serían una fuente indirecta de nutrientes para las microalgas. El presente trabajo es ejecutado en el marco del proyecto AlgaePredict, financiado por el Consejo de Universidades Flamencas de Bélgica (VLIR) y co-ejecutado por Ho-Gent y ESPOL.

**Palabras Clave:** microalgas, nutrientes, clarificación, mitigación, *Synedra ulna*

## ***Abstract***

*The presence of algal blooms in a drinking water treatment plant represents a challenge for water quality, generating problems such as filter blockages and increased operating costs. The project focuses on analyzing the factors that favor the proliferation of these microalgae by evaluating the impact of factors such as light intensity and nutrient concentrations (Nitrogen and Phosphorus) on algal growth, justifying the need for strategies for their control. The methodology included a review of historical data, monitoring of algae abundance in key areas of the process along with a physicochemical analysis of the water. Laboratory-scale experiments were also carried out with light intensities of 600-1800 lux and total Nitrogen and Phosphorus concentrations to analyze their impact on algae development. In addition, aluminum sulphate was analyzed using an optical ICP. The results revealed an increase in *Synedra Ulna* after the clarification process. It is estimated that light intensity plays an important role in algal blooming along with high concentrations of Nitrogen and traces of elements were found in the flocculant that would be an indirect source of nutrients for the microalgae. The present work is executed within the framework of the AlgaePredict project, funded by the Council of Flemish Universities of Belgium (VLIR) and co-executed by Ho-Gent and ESPOL.*

*Keywords: Microalgae, nutrients, clarification, mitigation, *Synedra ulna**

## Índice general

Evaluadores .....	7
Resumen .....	8
<i>Abstract</i> .....	9
Índice general .....	10
Abreviaturas .....	12
Simbología .....	12
Índice de figuras .....	13
Índice de tablas .....	14
Capítulo 1 .....	16
1.1 Introducción .....	16
1.2 Descripción del Problema .....	18
1.3 Justificación del Problema .....	19
1.4 Objetivos .....	21
<i>1.4.1 Objetivo general</i> .....	21
<i>1.4.2 Objetivos específicos</i> .....	22
1.5 Marco teórico .....	22
1.1.1 El Agua potable y su proceso de potabilización. ....	22
1.1.2 Biodisponibilidad del fosforo en ecosistemas. ....	24
1.1.3 Las microalgas.....	24
1.1.4 Proliferación de algas en ecosistemas acuáticos. ....	25
1.1.5 Métodos de cuantificación de algas. ....	27
1.1.6 Floración algal en plantas de tratamiento de agua. ....	28
1.1.7 ICP-OES.....	29
Capítulo 2 .....	31
2. Metodología. ....	32
2.1 Registros históricos.....	33
2.2 Recolección de Muestras. ....	34
2.3 Diseño experimental .....	34

2.3.1	Caracterización de las muestras de agua de la planta.....	34
2.3.2	Monitoreo de abundancia de algas en el proceso de la planta .....	35
2.3.3	Experimentación.....	35
2.3.4	Preparación del medio Algae Culture Broth NutriSelect Plus .....	36
2.3.5	Preparación del medio Zarruk .....	36
2.4	Análisis de macronutrientes y micronutrientes del floculante.....	39
2.5	Análisis de posible solución .....	39
2.6	Análisis Económico para la implementación de coberturas .....	41
Capítulo 3 .....		43
3. Resultados y análisis .....		44
3.1	Análisis de registros históricos de la planta de tratamiento.....	45
3.1.1	Dinámica de la calidad de agua en la fuente. ....	45
3.1.2	Dinámica de poblaciones algales .....	51
3.1.3	Dinámica en el proceso de potabilización.....	53
3.1.4	Condiciones al interior de la planta.....	58
3.2	Ensayos exploratorios de laboratorio .....	62
3.2.1	Evaluación de crecimiento de microalgas bajo diferentes intensidades de luz... ..	62
3.2.2	Evaluación de crecimiento de microalgas bajo diferentes condiciones de nutrientes. 63	
3.3	Análisis de micro y macroelementos del floculante.....	64
Capítulo 4 .....		67
4.1 Conclusiones y recomendaciones.....		68
4.1.1 Conclusiones .....		68
4.1.2 Recomendaciones.....		69
Referencias .....		71
Apéndice A.....		74

## **Abreviaturas**

NT	Nitrógeno Total
PT	Fósforo Total
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
BDL	Bajo del Límite de Detección
ICP-OES	Espectroscopia de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente
OMS	Organización Mundial de la Salud

## **Simbología**

m	Metro
mg	Miligramo
kg	Kilogramo
ml	Mililitro
rpm	Revoluciones por minuto
Ni	Nitrógeno
P	Fósforo
kg	Kilogramo
pH	Potencial de Hidrógeno
NTU	Unidades nefelométricas
Pt-Co	Platino-Cobalto
Ca	Calcio
Mg	Magnesio
K	Potasio
Fe	Hierro
Na	Sodio
B	Boro
Zn	Zinc
Co	Cobalto
Ni	Niquel
Mn	Manganeso
Cu	Cobre
Mo	Molibdeno
Pt	Platino

## Índice de figuras

Figura 1 <i>Planta de tratamiento de Agua Potable que alimenta a la ciudad de Guayaquil y sus alrededores</i> .....	23
Figura 2 <i>Fotografía de microscopio de Diatomeas</i> .....	26
Figura 3 <i>Fotografía de microscopio de Cianobacterias</i> .....	26
Figura 4 <i>Diagrama de Flujo de Proceso de la planta potabilizadora en Guayaquil</i> .....	33
Figura 5 <i>Diseño 3D de la zona de clarificadores vista desde arriba</i> .....	40
Figura 6 <i>Diseño 3D del techado de los clarificadores</i> .....	40
Figura 7 <i>Mapa Geográfico de los puntos de muestra del Rio Daule</i> .....	45
Figura 8 <i>Relación de Fosforo Total en mg/L y Nitrógeno Total en la muestra del Rio Daule a la altura de Nobol desde el año 2021 hasta el 2023</i> .....	46
Figura 9 <i>Relación de Nitrógeno Amoniacal en la muestra agua cruda, del Rio Daule en Planta La Toma, desde el 2022-2025</i> .....	47
Figura 10 <i>Relación de Parámetros de Color y Turbidez desde el año 2022-2024</i> .....	48
Figura 12 <i>Relación de observaciones de análisis sensorial en verano desde el año 2022-2024</i> .	49
Figura 13 <i>Serie de tiempo de la temperatura del agua 2022-2025</i> .....	50
Figura 14 <i>Composición porcentual de las microalgas encontradas desde 2022 a 2024</i> .....	52
Figura 15 <i>Conteo histórico de las 3 microalgas con mayor abundancia encontradas desde 2022 a 2024</i> .....	53
Figura 16 <i>Dosificación de Sulfato de Aluminio desde el año 2022-2024</i> .....	54
Figura 17 <i>Análisis sensorial del año 2022-2023</i> .....	55
Figura 18 <i>Serie de tiempo de las objeciones generales reportadas del año 2022-2023</i> .....	55
Figura 19 <i>Análisis sensorial reportadas del año 2022-2023</i> .....	56
Figura 20 <i>Imagen de muestra de agua Polimixus Coronalis</i> .....	61
Figura 21 <i>Imagen de muestra de agua Clarificada</i> .....	63

### **Índice de tablas**

Tabla 1. <i>Reactivo para preparar el medio Algae Culture Broth NutriSelect Plus</i> .....	36
Tabla 2. <i>Macronutrientes y micronutrientes en 250 mL</i> .....	37
Tabla 3. <i>Volúmenes para la preparación de la solución de micronutrientes en 1L de agua tipo</i> 138	

Tabla 4. Volúmenes para la preparación del medio zarruk en 1L de agua tipo 1 .....	38
Tabla 5. Análisis de Costos para la implementación de Cobertores en la planta de tratamiento de agua potable La Toma. ....	41
Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua .....	58
Tabla 7. Conteo Abundancia de Algas primer muestreo .....	59
Tabla 8. Conteo Abundancia de Algas Segundo muestreo AGUA CRUDA.....	60
Tabla 9. Conteo Abundancia de Algas Segundo muestreo CLARIFICADOR CA4.....	60
Tabla 10. Conteo Abundancia de Algas Segundo muestreo CLARIFICADOR CB4 .....	61
Tabla 11. Abundancia final de algas luego de 7 días de cultivo bajo distintas intensidades de luz .....	62
Tabla 12. Crecimiento de Algas bajo distintas condiciones de Nutrientes luego de 5 días .....	63
Tabla 13. Determinación porcentual de macroelementos en el floculante .....	64
Tabla 14. Determinación de microelementos en el floculante .....	64
Tabla 15. Otros microelementos en el floculante.....	65

# Capítulo 1

## 1.1 Introducción

El acceso a agua potable de calidad es fundamental para el desarrollo y la salud de las comunidades. En Guayaquil, la ciudad más grande del Ecuador, el abastecimiento de agua potable depende de un complejo sistema de plantas de potabilización que tratan el agua extraída del río Daule. Este tratamiento es esencial para garantizar que el agua distribuida cumpla con las normas de calidad exigidas por la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA) en base a la norma INEN 1108, y a las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS)

(World Health Organization, 2023). Sin embargo, la planta enfrenta un desafío importante, la proliferación de microalgas dentro del proceso de tratamiento dado los cambios de uso de suelo y del clima que ocurren en la cuenca.

Las floraciones algales, también conocidas como “blooms”, han ocurrido esporádicamente en los últimos años, ocasionando problemas operativos en la planta. Estas algas pueden obstruir filtros, disminuir la eficacia en los procesos de clarificación e inclusive producir compuestos tóxicos (Palani, 2019). La proliferación algal puede tener diversas causas, entre ellas la concentración de nutrientes presentes en el agua del río Daule y las condiciones específicas de los procesos internos de tratamiento, como el uso de sulfato de aluminio y/o polímeros empleados. Estos eventos, cuando ocurren, afectan la operación de la planta, incrementando los costos necesarios para entregar agua de calidad.

El contexto ambiental del río Daule influye considerablemente en el problema. Este río, que es la principal fuente de agua para la planta y por ende para la ciudad, está expuesto a diversos factores que pueden fomentar el crecimiento de microalgas, tales como nutrientes provenientes de agricultura, vertidos urbanos con nulo o limitado tratamiento, y cambios en el régimen hidrológico. Además, las condiciones climáticas, como las altas temperaturas, las precipitaciones intensas y la mayor radiación solar, pueden acelerar el crecimiento algal tanto en el río como dentro de las instalaciones de la planta.

En este sentido, el desafío consiste en diseñar estrategias sostenibles y efectivas que controlen la proliferación de microalgas sin afectar la eficiencia de la planta ni comprometer el equilibrio ecológico del entorno. Esto requiere de un enfoque integral que abarque la caracterización de los compuestos químicos utilizados en el tratamiento, el monitoreo del agua cruda y el análisis de procesos internos que contribuyan al crecimiento algal.

Este proyecto busca emitir recomendaciones para el manejo de poblaciones algales en sistemas de tratamiento de agua potable, contribuyendo a mejorar la calidad del agua potable que llega a millones de habitantes, asegurando que sea no solo segura para el consumo humano, sino también optimizando los costos de producción del agua. El propósito principal del trabajo es

diseñar estrategias para manejar las floraciones algales en la planta potabilizadora mediante la identificación de elementos que puedan contribuir a la ocurrencia de estos eventos, tales como la caracterización de los compuestos del floculante, y el análisis de la composición de nutrientes del agua y los sedimentos del río, y la simulación de procesos de tratamiento en condiciones controladas. Los resultados buscarán optimizar el proceso de potabilización, mejorar la eficiencia operativa y garantizar un suministro de agua de alta calidad, respetando los principios de sostenibilidad y salud pública.

## **1.2 Descripción del Problema**

El crecimiento del agro, la urbe y la industria que ha experimentado la cuenca del Daule en las últimas décadas ha tenido repercusiones en los ecosistemas naturales que la rodean, siendo uno de estos el río Daule que es una fuente vital de agua para la ciudad de Guayaquil y sectores aledaños. El crecimiento de las urbes, la industria y la expansión agrícola ha provocado el aumento de las descargas de efluentes en el río. Estos efluentes poseen altas cargas de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, lo cual sumado al limitado o a la falta de tratamiento de aguas residuales provoca un incremento significativo de los nutrientes del río, lo cual junto con el incremento de la temperatura y la radiación debido al cambio climático provee un entorno propicio para el florecimiento de algas.

La ciudad de Guayaquil podría enfrentar una problemática crítica relacionada con la calidad y el suministro de agua potable debido a la proliferación de microalgas en una de sus principales plantas de tratamiento, que procesa agua extraída del río Daule. En los últimos años, el crecimiento de las poblaciones de estas microalgas ha provocado con frecuencia el taponamiento de los filtros utilizados en los procesos de purificación, lo que amenaza significativamente los costos de producción de agua potable. Esto afectaría a miles de personas en Guayaquil y cantones aledaños, generando no solo una reducción en el suministro de agua, sino también un aumento en los costos operativos de la planta debido a la necesidad constante de mantenimiento y limpieza de los filtros.

La causa principal de este fenómeno parece estar vinculada a la eutrofización, un proceso en el que un exceso de nutrientes, como fósforo y nitrógeno, fomenta el crecimiento masivo de microalgas. Estos nutrientes pueden tener diversas fuentes: el propio río Daule, donde los sedimentos naturales actúan como depósito de nutrientes, los efluentes agrícolas, o (al interior de la planta) los productos químicos utilizados en el proceso de potabilización, como los floculantes. Sin embargo, hasta el momento no se ha determinado con precisión cuál de estos factores está impulsando el crecimiento de las algas en el proceso de potabilización, lo que dificulta la implementación de medidas correctivas efectivas.

Esta situación genera preocupación tanto por la afectación directa a la capacidad de suministro de agua potable como por sus implicaciones a nivel de salud pública, operativa y económica. Si no se aborda adecuadamente, podría comprometer la capacidad de la ciudad para garantizar un abastecimiento continuo de agua potable, además de imponer elevados costos de operación debido a la necesidad de limpiar y reemplazar los equipos filtrantes con mayor frecuencia. A esto se suma la necesidad de incluir carbon activado como parte del proceso a fin de remover sustancias no deseadas que son liberadas por las microalgas y que en ocasiones generan un sabor no deseable en el agua. Por tanto, explorar las causas precisas y los factores de esta proliferación de algas es fundamental para mejorar la eficiencia del tratamiento de agua potable y garantizar la sostenibilidad del suministro en el mediano y largo plazo.

### **1.3 Justificación del Problema**

El agua es un recurso vital para cualquier actividad por lo que se debe garantizar su acceso a toda la población. En la conferencia de la ONU sobre el Agua de 1997 se estableció por primera vez de manera global el derecho universal al agua potable de calidad, independientemente de las condiciones socioeconómicas. (Valdés De Hoyos & Uribe Arzate, 2016). Además, se enfatizó en la importancia de gestionar los recursos hídricos. Gracias a esto se sentó los cimientos para considerar el agua como un derecho humano esencial para el desarrollo.

En Guayaquil, uno de los principales centros urbanos del Ecuador, la calidad y abastecimiento del agua potable son factores críticos para el bienestar de su población. La planta

de tratamiento que abastece a Guayaquil y sus cantones aledaños se enfrenta a una problemática creciente relacionada con la proliferación de microalgas en su proceso de potabilización que emplea como materia prima el agua extraída del río Daule. Este fenómeno ha ocasionado en ocasiones complicaciones operativas importantes, como el desgaste de los filtros empleados en el proceso de purificación. Esta situación no solo puede comprometer el suministro de agua potable, sino que también incrementa los costos operativos debido a la necesidad de mantenimiento, reemplazo frecuente de los filtros afectados y en la necesidad de realización de retro-lavados más seguidos.

La proliferación masiva de microalgas en ecosistemas acuáticos como el río Daule está frecuentemente asociada con el proceso de eutrofización, el cual se produce cuando hay una sobrecarga de nutrientes, principalmente fósforo y nitrógeno. Estos nutrientes pueden provenir de fuentes naturales, sedimentos acumulados o actividades antropogénicas como la descarga de efluentes agrícolas, urbanos e industriales. Aunque aún no se ha determinado con precisión la causa principal de esta proliferación dentro de los procesos de la planta de potabilización de Guayaquil, es necesario investigar si los nutrientes presentes en el río, los sedimentos acumulados en el sistema, las características de la infraestructura, o incluso los agentes químicos utilizados en el proceso de tratamiento del agua, como los floculantes y polímeros, contribuyen a este crecimiento de las microalgas.

Este proyecto se centra en analizar los posibles factores causales de esta problemática, siendo crucial para dilucidar el origen de la proliferación de microalgas, ya que estas no solo reducen la eficiencia operativa de la planta, sino que también comprometen la capacidad de la ciudad para satisfacer la creciente demanda de agua potable, o podrían conllevar a la necesidad de una inversión significativa en tecnologías innovadoras para prevenir la recurrencia de esta problemática en el futuro cercano, a pesar de los considerables costos que esto pueda implicar. Esta situación afecta a una población considerable en Guayaquil, cuyas actividades cotidianas dependen de un suministro constante y seguro de agua de calidad. La identificación de los factores que impulsan este fenómeno permitirá a los gestores de la planta de tratamiento

implementar estrategias más efectivas para controlar la proliferación algal, lo que a su vez garantizará la sostenibilidad del suministro de agua potable a largo plazo.

Adicionalmente a escala global, las plantas de tratamiento de agua se enfrentan a desafíos similares debido a la contaminación por nutrientes y la proliferación de algas donde algunas de estas pueden ser tóxicas afectando a la calidad del agua y a la salud pública. El estudio de este caso específico en Guayaquil podría proporcionar conocimientos valiosos aplicables a otras plantas de tratamiento de agua potable de otras regiones que han sido afectadas por problemáticas análogas. Asimismo, el desarrollo de posibles soluciones para mitigar este problema contribuirá al avance del conocimiento científico en los campos de la ingeniería ambiental y el tratamiento de aguas, beneficiando a comunidades más allá de las fronteras ecuatorianas.

En resumen, este proyecto busca dar recomendaciones sobre esta problemática local de floración algal (Bloom) que influye en la calidad y disponibilidad del agua potable en Guayaquil, demandando procesos en el tratamiento que incrementan sus costos de producción. El agua potable es un recurso fundamental, y garantizar su disponibilidad de manera sostenible constituye una prioridad tanto para el bienestar de la población como para el avance científico en el ámbito del tratamiento de agua para consumo humano.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo general***

Analizar los factores que favorecen la proliferación de microalgas en sistemas de potabilización que provocan la obstrucción del medio filtrante, evaluando las condiciones de alta luminosidad y elevadas concentraciones de nitrógeno y fósforo dentro de una planta potabilizadora, a fin de promover la eficiencia del proceso de filtración y la reducción de los costos de mantenimiento a través del monitoreo sistemático de estas variables y la implementación de pruebas experimentales.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

- Evaluar el potencial impacto de las condiciones de calidad del agua fuente sobre la abundancia de microalgas a través de un monitoreo ejecutado en un periodo de dos años.
- Identificar fuentes potenciales de macro y micronutrientes a lo largo del proceso de potabilización que podrían contribuir a la formación de floraciones de algas en las diferentes etapas del tratamiento.
- Evaluar si las características químicas del agua cruda y los productos químicos aplicados a lo largo del proceso de tratamiento pueden promover la formación de floraciones de algas basándose en experimentos diseñados a escala de laboratorio.

## **1.5 Marco teórico**

Para tratar esta problemática sobre la proliferación de (micro)algas en plantas potabilizadoras se abordarán conceptos asociados a este fenómeno como el proceso de potabilización, biodisponibilidad del fosforo en ecosistemas acuáticos que es uno de los nutrientes que favorecen su crecimiento, las algas y su proliferación además de métodos de cuantificación y los problemas que causan en plantas de tratamiento de agua y métodos de análisis químicos como ICP óptico.

### **1.1.1 El Agua potable y su proceso de potabilización.**

## Figura 1

*Planta de tratamiento de Agua Potable que alimenta a la ciudad de Guayaquil y sus alrededores*



*Nota.* Ilustración tomada del diario El Universo, 30 de mayo 2023.

El acceso al agua potable es un derecho fundamental que garantiza la disponibilidad de agua suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible para uso personal y doméstico, aspectos esenciales para una vida digna. Este derecho incluye tanto libertades como derechos, asegurando el acceso continuo y sin discriminación a servicios de agua, además de proteger la calidad y sostenibilidad del recurso. (Valdés De Hoyos & Uribe Arzate, 2016)

El proceso comienza con un pretratamiento, en el que se eliminan los residuos de gran tamaño y los sólidos en suspensión. A continuación, se aplica la coagulación y la floculación, utilizando productos químicos (como floculantes) a fin de agregar partículas más pequeñas en otras más grandes, lo que facilita su remoción. La sedimentación es el siguiente paso, que permite que las partículas más pesadas se depositen en el fondo del tanque este proceso remueve las partículas en suspensión de manera gravitacional se lleva a cabo en decantadores, donde los flóculos se depositan en el fondo formando lodos, se recoge el agua de la parte superior que tiene

menor turbidez, en la Figura 1 se puede apreciar el proceso de sedimentación. El agua restante pasa luego por un proceso de filtración que es clave para obtener agua potable de alta calidad, el cual elimina los sólidos suspendidos y coloidales mediante un medio poroso a menudo utilizando arena, capas de grava y antracita, para eliminar las partículas más finas. Después de la filtración, el agua se desinfecta, normalmente con cloro, para eliminar las bacterias o los patógenos restantes. Por último, el agua se almacena y se distribuye a través de la red de suministro, lo que garantiza que llega a los consumidores en forma limpia y potable (Calle Chimborazo, 2017).

### **1.1.2 Biodisponibilidad del fósforo en ecosistemas.**

El fósforo es esencial para la productividad de los ecosistemas, ya que puede estar presente en sedimentos en forma de compuestos inorgánicos, orgánicos o microbianos. Su biodisponibilidad depende de procesos químicos y biológicos. La fracción de fósforo disponible para las algas, llamada *P* biodisponible, es un indicador importante de la posible liberación interna desde los sedimentos hacia la columna de agua. (Younis et al., 2022) El fósforo es el nutriente limitante para la proliferación de algas y una baja relación de hierro sugiere una limitada disponibilidad de este para formar compuesto con el fósforo influyendo en su biodisponibilidad. En este contexto el hierro forma compuestos que captura el fósforo mediante adsorción superficial o coprecipitación haciéndolo menos disponible para las algas.

La fracción de fósforo biodisponible, es decir, la que puede ser utilizada por organismos como las algas, es especialmente relevante porque puede promover el crecimiento de estas cuando se libera del sedimento hacia el agua. La identificación de las diferentes formas de fósforo, mediante técnicas de fraccionamiento químico, permite evaluar su potencial para contribuir a fenómenos como la eutrofización (Younis et al., 2022).

### **1.1.3 Las microalgas.**

Las microalgas, conocidas colectivamente como fitoplancton, constituyen un diverso grupo de microorganismos capaces de realizar fotosíntesis. Estos organismos microscópicos pueden existir de diferentes maneras: como células individuales, formando colonias o en

estructuras filamentosas. El valor de estas microalgas en los ecosistemas es fundamental, ya que al ser organismos autótrofos actúan como productores primarios en la cadena alimenticia.

Además, representan una valiosa fuente nutricional rica en proteínas, vitaminas y minerales, que sirve de sustento para diversos organismos acuáticos como los cladóceros, los copépodos, así como para las etapas larvarias de ciertos insectos y peces (Rodas-Pernillo & Vasquez-Moscoso, 2020).

Estas obtienen su energía del proceso de fotosíntesis y durante el cual la luz se convierte en energía aprovechable por estos organismos. De hecho, la exposición a la luz es fundamental para los procesos vitales de estos organismos, incluyendo la reproducción de estas. Un ejemplo de esto son las diatomeas, ya que durante un período iluminado se reproducen asexualmente y forman esporas durante la oscuridad (Rodas-Pernillo & Vasquez-Moscoso, 2020).

#### **1.1.4 Proliferación de algas en ecosistemas acuáticos.**

Las floraciones de algas resultan de la adición de nutrientes antropogénicos en los ecosistemas acuáticos produciendo el crecimiento de manera excesiva de varias especies de fitoplancton, protistas, cianobacterias, macroalgas, microalgas y albas bentónicas en los cuerpos de agua (Deng et al., 2017).

Las microalgas son organismos fotosintéticos unicelulares que forman la base de la cadena trófica acuática y desempeñan un papel clave en la producción de oxígeno y la fijación de carbono. Entre ellas, las diatomeas destacan por su pared celular compuesta de sílice, llamada frústula, que les confiere resistencia y formas características como se puede apreciar en la Figura 2. Estas algas son sensibles a las condiciones ambientales, como los niveles de nutrientes, luz y temperatura, lo que las convierte en indicadores de la calidad del agua. Sin embargo, su proliferación excesiva, impulsada por la eutrofización, puede generar problemas en sistemas de tratamiento de agua, como obstrucción de filtros y alteración del sabor y olor del agua tratada, especialmente en plantas que trabajan con agua cruda rica en nutrientes (Synch, 2023; Smol & Stoermer, 2010).

## Figura 2

*Fotografía de microscopio de Diatomeas*



Nota. Fuente adaptada de (*Las Diatomeas, Algas Esenciales Para La Tierra y Con Potencial En La Agricultura - Jardinería, 2020.*)

## Figura 3

*Fotografía de microscopio de Cianobacterias*



Nota. Fuente adaptada de (Geoinnova. (s.f.). *La simbiosis en los ecosistemas acuáticos* [Imagen]. Recuperado el 25 de enero de 2025, de <https://geoinnova.org/blog-territorio/simbiosis/>)

Entre las microalgas, las cianobacterias, comúnmente llamadas algas verde azules como se puede ver en la Figura 3, son microorganismos que realizan fotosíntesis y tienen un papel esencial en los ecosistemas acuáticos. Aunque su apariencia es similar a la de las algas, estas pertenecen al dominio de las bacterias y cuentan con heterocistos, estructuras especializadas que les permiten fijar nitrógeno del ambiente. Bajo condiciones de eutrofización, estas bacterias pueden experimentar un crecimiento descontrolado conocido como "blooms", el cual libera

toxinas perjudiciales para los ecosistemas y la salud humana. Estas proliferaciones también deterioran la calidad del agua, causando olores y sabores no deseados. Entre las cianobacterias más asociadas a este fenómeno destacan *Microcystis*, *Anabaena* y *Oscillatoria* (Paerl & Otten, 2013).

El crecimiento de algas en ecosistemas acuáticos se ve favorecido principalmente por la alta concentración de nutrientes como fósforo y nitrógeno, provenientes de fuentes antropogénicas como aguas residuales y escorrentías agrícolas. Además, factores como temperaturas cálidas, abundante luz solar y la estabilidad de la columna de agua contribuyen al desarrollo de floraciones algales. Estas pueden crecer de manera excesiva si hay nutrientes e insolación suficiente. Estos elementos crean condiciones óptimas para la proliferación de algas (Aleksova et al., 2023).

El proceso de eutrofización altera las características fisicoquímicas del agua, lo que consecuentemente afecta a los organismos que viven en ese ambiente. Esto produce un crecimiento excesivo de ciertos organismos del fitoplancton, particularmente las cianobacterias. Estas últimas prosperan especialmente cuando se combinan ciertas condiciones ambientales específicas: aguas cálidas, abundancia de nutrientes y un pH que tiende hacia lo alcalino. Bajo estas circunstancias, las cianobacterias pueden formar floraciones masivas, lo que les permite dominar sobre otros grupos de fitoplancton, demostrando así su capacidad superior para competir en estos entornos alterados.

### **1.1.5 Métodos de cuantificación de algas.**

El conteo celular es uno de los mejores métodos para determinar la concentración de microalgas y dar seguimiento a su crecimiento a lo largo del tiempo. La clorofila-a se utiliza como un indicador de la biomasa algal, lo que ayuda a calcular el índice de estado trófico de los lagos, mientras que la ficocianina se emplea para monitorear floraciones de cianobacterias. Los métodos incluyen pasos como la recolección de muestras, filtración, molienda y extracción de los filtros, maceración y, finalmente, el análisis de las muestras mediante fluorimetría. Estos

procedimientos permiten evaluar la calidad del agua y monitorear posibles floraciones algales nocivas, denominadas HABs (Harmful Algal Bloom) (Deng et al., 2017).

La densidad celular de algas o la biomasa algal es crucial para el monitoreo y manejo de estas floraciones. Tradicionalmente, el recuento celular ha sido el estándar para la medición de biomasa, aunque se considera un proceso tedioso. En cambio, la clorofila-*a* se utiliza comúnmente como un indicador de biomasa algal, pero su fiabilidad ha sido cuestionada debido a la influencia de múltiples factores, así como a la presencia de clorofila en otras plantas acuáticas y terrestres. En los últimos estudios, se ha propuesto el uso de bioindicadores como los *n*-alcanos, lo que ha permitido una diferenciación más precisa de las fuentes biogénicas y el monitoreo de algas en cuerpos de agua (He et al., 2022).

#### **1.1.6 Floración algal en plantas de tratamiento de agua.**

Estas floraciones suponen un riesgo cada vez mayor para la salud pública, ya que entre las microalgas se pueden encontrar las cianobacterias que son capaces de generar toxinas como microcistinas, anatoxina-*a* y BMAA ( $\beta$ -methylamino-L-alanine), contaminando las fuentes de agua potable. Aunque muchas plantas de tratamiento de agua se consideran de bajo riesgo frente a los HABs, las cianobacterias pueden acumularse en estas instalaciones, lo que podría resultar en niveles de toxinas superiores a los encontrados en el agua fuente. Esto demuestra que la ausencia de floraciones visibles en la fuente no garantiza la seguridad del agua tratada, subrayando la importancia de mejorar las prácticas de monitoreo y gestión en las plantas de tratamiento (Almuhtaram et al., 2018).

Las floraciones algales deterioran significativamente la calidad del agua y representan riesgos para la salud pública, especialmente cerca de plantas potabilizadoras donde causan dos problemas principales: el aumento de turbidez y la liberación de compuestos orgánicos indeseables, incluyendo toxinas resistentes a tratamientos convencionales. De los más de cincuenta géneros de cianobacterias existentes, se conoce que aproximadamente el 25-30% producen toxinas, siendo *Microcystis*, *Anabaena* y *Oscillatoria* los géneros más problemáticos

por sus metabolitos tóxicos que afectan tanto a ecosistemas acuáticos como a la salud humana (Deng et al., 2017).

Estas floraciones o HABs, que suelen ocurrir en condiciones ambientales específicas, pueden liberar toxinas y compuestos que afectan la calidad del agua, generando problemas de sabor y olor. En Egipto, donde el agua del Nilo y sus sistemas de irrigación son las principales fuentes de agua para consumo humano, la presencia de algas se convierte en un problema crítico, especialmente durante las temporadas de floración, las cuales ocurren en los meses de octubre a diciembre y han sido asociadas a las diatomeas que se propagan en temporadas invernales (Mahmoud et al., 2021).

Los métodos tradicionales de coagulación y sedimentación, que dependen de coagulantes como el sulfato de aluminio, a menudo son insuficientes para manejar la alta carga de algas, lo que resulta en un aumento en la frecuencia de lavado de filtros y una disminución en la eficiencia del tratamiento de agua. En la planta de purificación de agua en Nazlet Abdallah, Egipto, se llevó a cabo la combinación de sulfato de aluminio con caolinita y bentonita como coagulantes auxiliares. Esto aumentó la capacidad de eliminación de algas y mejoró la formación de flóculos reduciendo la carga en los filtros (Mahmoud et al., 2021).

### **1.1.7 ICP-OES.**

La Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) es una técnica analítica avanzada que permite el análisis simultáneo de múltiples elementos químicos. Esta metodología puede detectar y cuantificar casi todos los elementos de la tabla periódica, desde concentraciones porcentuales hasta niveles de partes por billón, con excepción de C, N, O, H, F, gases nobles y algunos elementos raros (Pérez Esteve & Gómez Llorente, 2020).

Esta técnica destaca por su versatilidad y precisión en el análisis químico, ya que utiliza un plasma de argón a alta temperatura (aproximadamente 10,000 K) para ionizar las muestras. El proceso implica la transformación de la muestra en un aerosol que es introducido en el plasma, donde los átomos son excitados y emiten luz a longitudes de onda características de cada

elemento. Esta emisión es posteriormente detectada y cuantificada por un espectrómetro, permitiendo análisis rápidos y precisos en diversos campos como la química ambiental, la industria farmacéutica, la metalurgia y la investigación geológica. Además, su alta sensibilidad y capacidad para analizar múltiples elementos simultáneamente la convierten en una herramienta indispensable en laboratorios modernos de análisis químico (Pérez Esteve & Gómez Llorente, 2020).

## **Capítulo 2**

## 2. Metodología.

El presente estudio tuvo como objetivo analizar las causas del florecimiento de algas en una planta de tratamiento de agua potable ubicada en la ciudad de Guayaquil, cuyo abastecimiento y captación es el río Daule. Este fenómeno, conocido como bloom algal, genera problemas operativos dentro de la planta, tales como el taponamiento y la saturación de los filtros, lo que incrementa los costos de mantenimiento y operación al necesitar realizar retro-lavados o recambio del medio filtrante. Con base en estas problemáticas, se diseñó un estudio integral para identificar las variables que favorecerían la floración de algas y recomendar un plan de manejo que permita prevenir y controlar esta proliferación dentro de la planta potabilizadora.

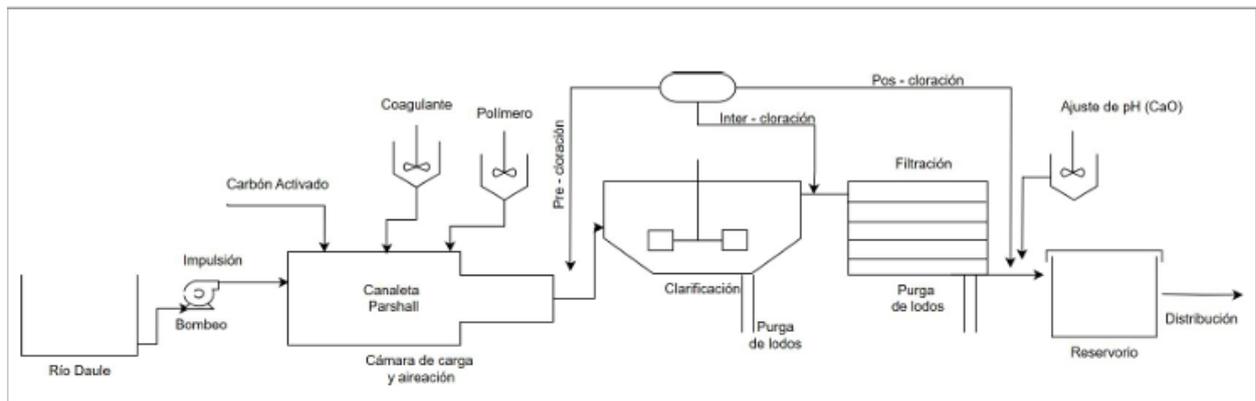
Para abordar esta problemática, se formularon varias alternativas. En primer lugar, se evaluaron las condiciones históricas del río Daule para determinar si el bloom algal tiene su origen en el agua captada, analizando variables clave como la concentración de nutrientes y la medición de la abundancia de microalgas presentes en muestras del río. En segundo lugar, se analizó el sistema de tratamiento y el comportamiento de las algas dentro de las etapas de purificación del agua dentro de la planta para evaluar cómo los procesos internos podrían estar contribuyendo al florecimiento algal. Finalmente, se diseñó un experimento de laboratorio controlado para analizar el impacto de diferentes variables fisicoquímicas y ambientales sobre el crecimiento de algas, incluyendo la intensidad de luz, el nitrógeno total y fósforo total. Adicionalmente, se realizó un análisis del floculante utilizado en los procesos que realiza la planta potabilizadora, el sulfato de aluminio, para identificar si su composición pudiera estar proporcionando micronutrientes que favorecieran el bloom algal.

La planta de tratamiento en estudio, la cual es una de las más grandes de la región, tiene una capacidad total de procesamiento de 952,000 m<sup>3</sup>/día, con su planta principal alcanzando más 800,000 m<sup>3</sup>/día. Está equipado con tecnología avanzada de monitoreo en tiempo real, ubicada en el área de bombeo, que permite evaluar los parámetros de calidad del agua antes de su ingreso al

sistema de tratamiento. Esto facilita la detección temprana de contaminantes, la optimización del uso de productos químicos y el aseguramiento de la calidad del agua tratada. Gracias a estas características, el complejo puede garantizar un suministro confiable de agua potable, incluso frente a variaciones en las condiciones del río, como altas turbidez o cambios en la carga orgánica, asegurando su eficiencia y sostenibilidad. En la figura 4 podemos ver un diagrama de flujo del proceso de potabilización del agua en la planta La Toma, ubicada en la vía a Daule, Ecuador.

**Figura 4**

*Diagrama de Flujo de Proceso de la planta potabilizadora en Guayaquil*



Tomada, de Coronel Mateo, Molina Gillian, (2024), Diseño de Estrategias para Mitigar la Presencia de Algas en Plantas de Tratamiento de Agua Potable [Tesis de Pregrado no publicada]. ESPOL.

## 2.1 Registros históricos

Se analizaron los registros históricos del río Daule tanto del punto Nobol como del agua cruda de la planta. La primera base de datos se centra en los parámetros fisicoquímicos del agua del río en el punto de Nobol, donde se revisaron aspectos como la turbidez, el nitrógeno total (NT), fósforo total (PT) etc. Para el proyecto, los datos más relevantes fueron las concentraciones de nitrógeno y fósforo total, medidos mensualmente desde el año 2021 hasta el 2023. La segunda base de datos fue provista por la planta de tratamiento de aguas, de la cual se

extrajerón datos históricos sobre la abundancia de algas, así como mediciones de nitrógeno amoniacal del agua cruda, turbidez, color, dosificación del floculante desde el año 2022 hasta el 2024 medidos diariamente, y análisis sensorial del agua potable recopilados entre 2022 y 2023. Esta información es crucial para comprender la dinámica de la población algal, la calidad del agua y su relación con la proliferación de microalgas.

## **2.2 Recolección de Muestras.**

La recolección de muestras se realizó en dos áreas clave: el río Daule, en el punto de captación, y dentro de la planta potabilizadora en cada una de las etapas del proceso de tratamiento. Estas etapas incluyeron la captación, el pretratamiento, la floculación, la sedimentación, la filtración y la desinfección final. En el río, las muestras se recolectaron en frascos de vidrio de 1 litro previamente esterilizados, asegurando condiciones adecuadas para evitar la contaminación externa. Posteriormente, las muestras fueron transportadas al laboratorio bajo estrictas condiciones de conservación, manteniendo una temperatura constante y evitando la exposición a la luz ya que fue usada en los experimentos. Las muestras recolectadas en la planta también se conservaron de igual manera para su uso en las pruebas de laboratorio estas permitieron evaluar la abundancia de algas en cada etapa y determinar en qué parte del proceso existe una mayor abundancia de algas o si estas se mantienen relativamente constante a lo largo del proceso de potabilización.

## **2.3 Diseño experimental**

### **2.3.1 Caracterización de las muestras de agua de la planta**

Se tomaron las muestras de agua y se analizaron los parámetros de pH, turbidez, nitrógeno y fósforo totales, tanto del agua cruda como de los clarificadores. Parte de la muestra se empleó para determinar el pH utilizando un pH-metro calibrado previamente. Para la turbidez, se preparó un vial con 50 mL de muestra y se midió en unidades NTU utilizando un

turbidímetro. Para la determinación de nitrógeno y fósforo totales, se utilizaron kits específicos, realizando un proceso de digestión de los viales según las instrucciones del fabricante y tomando la lectura de los resultados en un espectrofotómetro.

### **2.3.2 Monitoreo de abundancia de algas en el proceso de la planta**

Se recolectaron muestras del agua cruda y del proceso de clarificación. En estas muestras, se filtraron aproximadamente 100 mL de agua y se identificaron las microalgas presentes antes y después de la clarificación. Además, se realizó el conteo respectivo de células por mililitro (cel/mL) utilizando un microscopio.

### **2.3.3 Experimentación**

La muestra recolectada del río Daule se incubó con un ciclo de luz-oscuridad de 12 horas cada uno hasta alcanzar una densidad celular de  $10^6$  células/L. Posteriormente, las muestras se sometieron a centrifugación en tubos de 50 mL a 3500 rpm durante 5 minutos. Se retiró el sobrenadante y se realizaron tres lavados con agua tipo 1 para eliminar los nutrientes iniciales. Las muestras se trasladaron a frascos de cultivo de 20 mL que contenían 15 mL del medio Zarruk y 5 mL de muestra. Luego, se incubaron a 24 °C con diferentes niveles de luz: 600 lux y 1200 lux, y se evaluó el crecimiento de microalgas a los 5 días mediante conteo en el microscopio.

Otro procedimiento se llevó a cabo con muestras provenientes de la planta de tratamiento, incubándolas bajo una intensidad de luz constante de 1800 lux y a temperatura ambiente. Se tomaron tres muestras distintas: una del río que abastece a la planta, otra del clarificador A y una del clarificador B. Estas muestras se filtraron al vacío utilizando una malla para obtener un concentrado de algas. Se prepararon nueve frascos de vidrio autoclavados de 250 mL, dividiéndose en tres grupos:

- Tres frascos con 25 mL del concentrado de algas de agua cruda.
- Tres frascos con 25 mL del concentrado del clarificador CA4.
- Tres frascos con 25 mL del concentrado del clarificador CB4.

A cada frasco se le agregó 25 mL de un nuevo medio Algae culture y se midió el crecimiento de las microalgas mediante un microscopio. Las muestras se incubaron bajo las siguientes condiciones:

- Tres frascos con medio original Algae Culture.
- Tres frascos con medio enriquecido en nitrógeno.
- Tres frascos con medio enriquecido en fósforo.

### 2.3.4 Preparación del medio Algae Culture Broth NutriSelect Plus

Para la realización del experimento se procedió a la preparación de este medio es necesario suspender 1.87 g en 1 litro de agua destilada. Hervir hasta disolver completamente en el medio. Proceder a esterilizar en autoclave a 121 grados centígrados durante 15 minutos. La preparación detallada del medio se lo ve en la tabla 1.

**Tabla 1.**

*Reactivo para preparar el medio Algae Culture Broth NutriSelect Plus*

<b>Algae Culture Broth NutriSelect Plus</b>	
<b>Reactivos</b>	<b>[g/L]</b>
NaNO <sub>3</sub>	1
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.25
Mg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.513
NH <sub>4</sub> Cl	0.05
CaCl <sub>2</sub>	0.058
FeCl <sub>3</sub>	0.003

### 2.3.5 Preparación del medio Zarruk

Para la realización del experimento se necesitó la preparación del medio de cultivo ampliamente usado para las microalgas que es el medio Zarruk, se aseguró que los materiales estén esterilizados, para realizar la preparación se elaboró las soluciones stock de

macronutrientes y micronutrientes se pesó los reactivos para su dilución en 250 ml con agua tipo 1 en frascos de plástico de 250 ml siguiendo los pesos de la tabla 2.

Una vez preparadas las soluciones stock, se procedió a la preparación del medio Zarrouk final para un volumen de 1 litro. Para ello, se añadieron volúmenes específicos de cada solución de macronutrientes y micronutrientes, mezclándolos en agua destilada tipo 1 y completando hasta alcanzar el litro total. Los volúmenes necesarios de las soluciones de micronutrientes están indicados en la Tabla 3, mientras que la cantidad requerida en volumen de cada solución stock de macronutrientes y micronutrientes para la preparación del medio zarruk está detallada en la Tabla 5.

**Tabla 2.**

*Macronutrientes y micronutrientes en 250 mL*

<b>Macronutrientes en 250 mL</b>	
<b>Reactivos</b>	<b>Peso teórico [g]</b>
NaNO <sub>3</sub>	12.5
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	1.25
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5
NaCl	5
MgSO <sub>4</sub>	1
CaCl <sub>2</sub>	1
FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0.25
Na-EDTA	2
NaHCO <sub>3</sub>	21
<b>Micronutrientes en 250 mL</b>	
<b>Reactivos</b>	<b>Peso teórico [g]</b>
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	7.15
MnSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O	7.7
ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	5.55
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	0.4425
CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	1.975

Nota. Datos tomados de Evaluación de tecnologías alternativas para la recuperación de nutrientes de instalaciones porcinas comunitarias en la subcuenca del río Daule, por Tumbaco y Romo, 2022, p. 23.

**Tabla 3.**

*Volúmenes para la preparación de la solución de micronutrientes en 1L de agua tipo 1*

<b>Micronutrientes en 1 L de agua tipo 1</b>	
<b>Reactivos</b>	<b>Volumen [ml]</b>
H3BO3	50
MnSO4.H2O	50
ZnSO4.7H2O	10
Na2MoO4.2H2O	10
CuSO4.5H2O	10

Nota. Datos tomados de Evaluación de tecnologías alternativas para la recuperación de nutrientes de instalaciones porcinas comunitarias en la subcuenca del río Daule, por Tumbaco y Romo, 2022, p. 25.

**Tabla 4. Volúmenes para la preparación del medio zarruk en 1L de agua tipo 1**

<b>Medio Zarrouk en 1 L de agua tipo 1</b>	
<b>Reactivos</b>	<b>Volumen [ml]</b>
NaNO <sub>3</sub>	50
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	100
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	50
NaCl	50
MgSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O	50
CaCl <sub>2</sub>	10
FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	10
Na-EDTA	10

NaHCO <sub>3</sub>	200
Solución	1
micronutrientes	

---

*Nota.* Datos tomados de Evaluación de tecnologías alternativas para la recuperación de nutrientes de instalaciones porcinas comunitarias en la subcuenca del río Daule, por Tumbaco y Romo, 2022, p. 25.

#### **2.4 Análisis de macronutrientes y micronutrientes del floculante.**

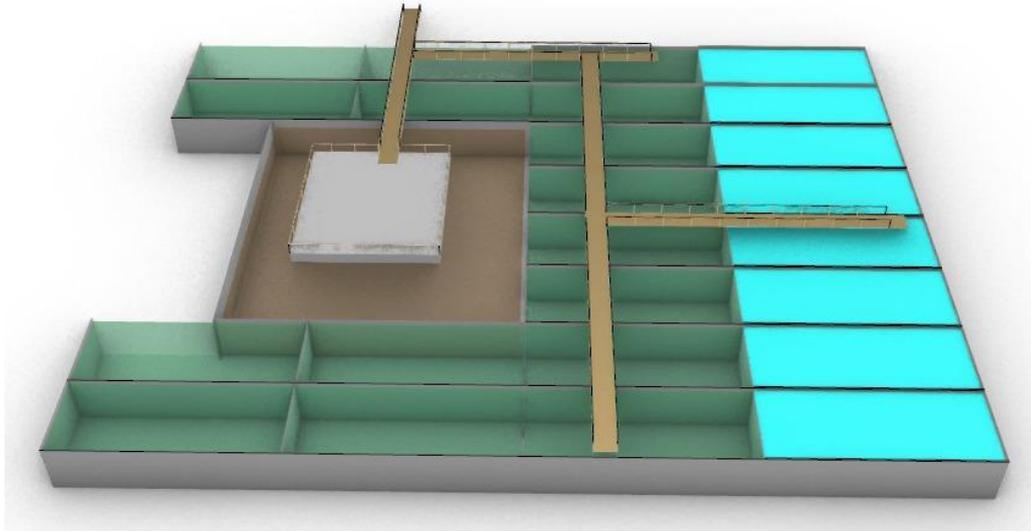
Para el análisis de los posibles macro y micronutrientes que pudieran favorecer el Bloom de algas se realizó una caracterización química del sulfato de aluminio en solución utilizado como floculante en la planta. Este análisis se llevó a cabo mediante un espectrómetro de plasma acoplado inductivamente (ICP óptico), con el objetivo de identificar la presencia de micronutrientes como hierro, fósforo, calcio y magnesio, los cuales podrían estar contribuyendo a la proliferación de algas dentro de la planta ocasionando los problemas de obstrucción de los filtros.

#### **2.5 Análisis de posible solución**

En base a los resultados obtenidos, se propone la implementación de techos o cubiertas para evitar la exposición solar en etapas sensibles del tratamiento como lo son las etapas de sedimentación y floculación, logrando reducir significativamente la proliferación de algas y mejorando la eficiencia del proceso.

## Figura 5

*Diseño 3D de la zona de clarificadores vista desde arriba*

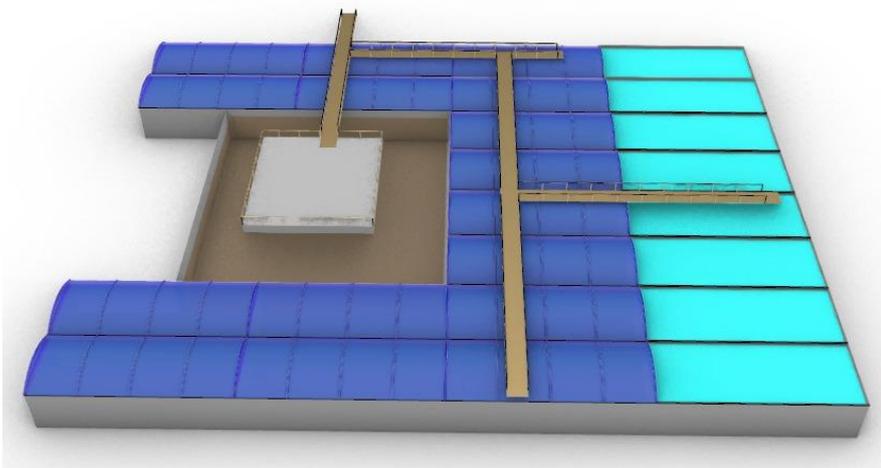


*Nota.* La ilustración muestra la zona del proceso de clarificación- Filtración que se desea techar.

La proliferación de microalgas en las etapas de sedimentación y floculación de la planta de tratamiento de agua potable de Daule representa un desafío técnico y ambiental. Este fenómeno, agravado por la exposición a la luz solar, favorece el crecimiento de algas mediante la fotosíntesis, lo que complica los procesos de clarificación y taponamiento de filtros. Ante este escenario, una solución viable es implementar coberturas o estructuras que bloqueen la luz solar directa en los tanques de sedimentación.

## Figura 6

*Diseño 3D del techado de los clarificadores*



*Nota.* La ilustración muestra la zona del proceso de clarificación techado.

Estudios realizados en plantas de tratamiento de agua en diversos contextos han demostrado que limitar la luz solar reduce significativamente la proliferación de algas. La cobertura de tanques de sedimentación crea un entorno oscuro que dificulta la fotosíntesis, disminuyendo el crecimiento algal. Además, esta solución es considerada sostenible, ya que actúa sobre el factor principal que fomenta las floraciones algales sin la necesidad de químicos adicionales, lo que minimiza el impacto ambiental. (*Sunlight-Blocking Covers Control Algae, Reduce Operational Costs at California Utility, 2024.*)

Una de las ventajas de la implementación de cubiertas es que al eliminar o disminuir la luz disponible en los tanques de sedimentación, las algas tienen menos oportunidades para proliferar. También se tendría una mejor eficiencia operativa, ya que la disminución de la obstrucción de filtros y otros equipos clave reduce los costos de operación y mantenimiento de la planta lo que provoca la prolongación de la vida útil de los sistemas. Esta estrategia evita la introducción de nuevos productos químicos, respetando el equilibrio del ecosistema local, como el río Daule. Por otra parte, la instalación de coberturas es una solución flexible que puede integrarse con la infraestructura existente sin necesidad de cambios drásticos.

La implementación de coberturas se combina con otras medidas como lo es la optimización de coagulantes, al ajustar la dosis de sulfato de aluminio para minimizar los nutrientes que favorecen las algas.

## **2.6 Análisis Económico para la implementación de coberturas**

Un análisis económico para la implementación de coberturas en los tanques de sedimentación de la planta de tratamiento de agua potable en Daule debe considerar los costos iniciales, los beneficios operativos, y el ahorro a largo plazo debido a la reducción de problemas operativos por las microalgas.

### **Tabla 5.**

*Análisis de Costos para la implementación de Cobertores en la planta de  
tratamiento de agua potable La Toma*

<b>Concepto</b>	<b>Costo Estimado</b>	<b>Descripción</b>
<b>Materiales de los Cobertores</b>	<b>\$20-\$40/ m<sup>2</sup></b>	El PVC es más económico que materiales metálicos como aluminio y acero, ofrece sombra total.
<b>Instalación de Cobertores</b>	<b>\$95 000</b>	La instalación de PVC requiere menos tiempo y herramientas reduciendo los costos operacionales.
<b>Mantenimiento Anual</b>	<b>1%-2% del costo inicial</b>	Inspección, limpieza y reparaciones de los cobertores.
<b>Reducción de costos operativos (Filtros y limpieza)</b>	<b>\$10 500 anuales</b>	Ahorro por reducción de uso de químicos como coagulantes y carbón activado, limpieza de filtros y otros equipos afectados por las algas.
<b>Reducción de costos de productos químicos</b>	<b>\$25 000 anuales</b>	Ahorro estimado debido a la reducción de alguicidas para el control de proliferación de algas.
<b>Mayor eficiencia operativa</b>	<b>\$15 000-\$40 000 anuales</b>	Menor tiempo de inactividad de la planta y optimización del proceso de tratamiento

Nota, datos tomados de “Santa Clara Valley Water District. (2021). *Mitigating Algae Growth in Sedimentation Basins with Covers*. Retrieved from Water Environment Federation.”

Costo total de Implementación es de aproximadamente \$95 000 que incluye materiales, instalación y ajustes adicionales. En ahorros anuales los valores rondan entre \$ 25 000 aproximadamente ya que se reduce el uso de productos químicos, limpieza o cambio de filtros y habría mayor eficiencia operativa. Se espera un ROI (Periodo de Retorno de la inversión) estimado de menos de 3.7 años basado en los ahorros anuales y la inversión inicial.

La implementación de coberturas es una inversión, que, aunque conlleva costos iniciales considerables, tiene beneficios operativos y económicos a largo plazo que superan los gastos

iniciales. Este análisis puede refinarse con un estudio detallado de las dimensiones específicas de los tanques y materiales disponibles en el mercado ecuatoriano.

Al incluir la protección de los filtros como parte del beneficio, la inversión en cubrir el área de clarificación se recuperaría en menos de 4 años, además de garantizar una operación más eficiente y prolongar la vida útil de los componentes clave de la planta. Este ajuste refuerza la viabilidad económica de la implementación y resalta su impacto positivo en la sostenibilidad operativa.

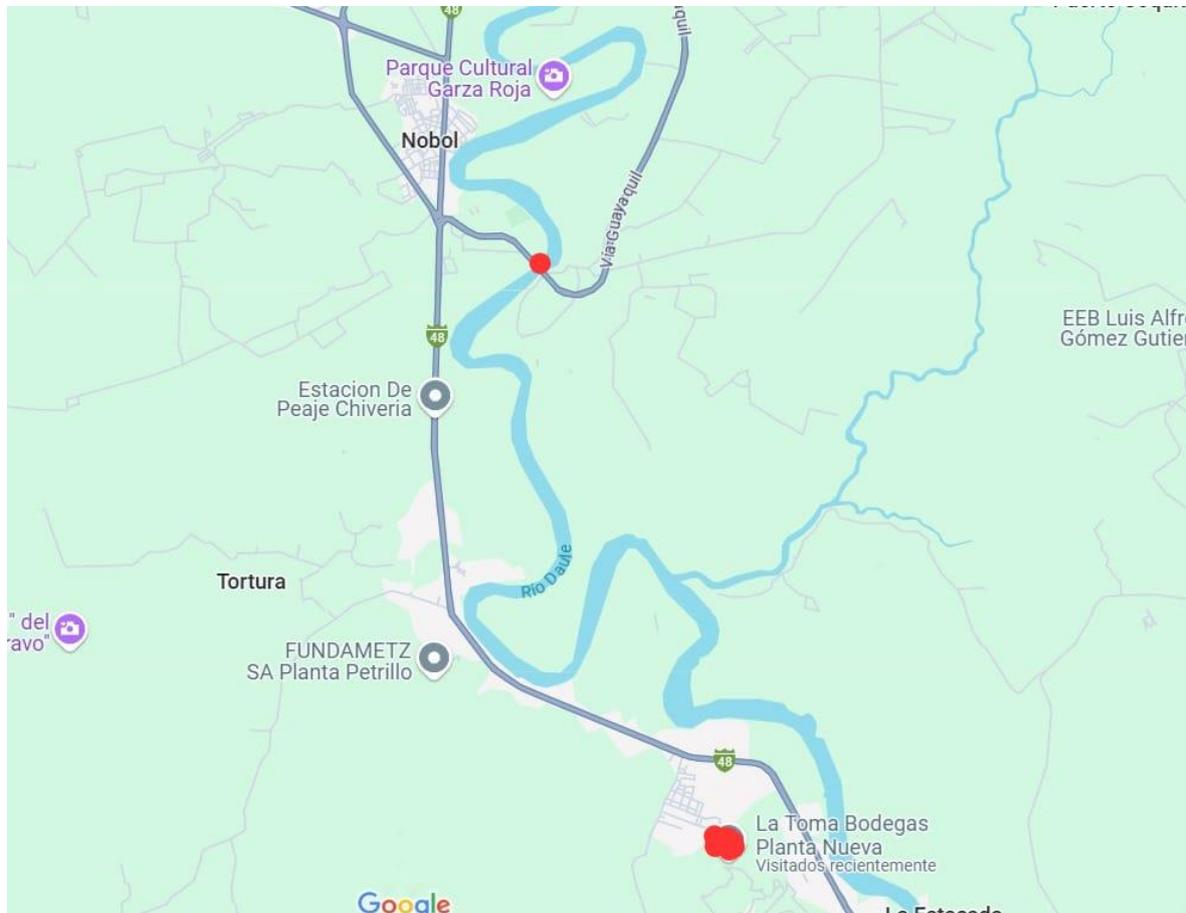
## **Capítulo 3**

### **3. Resultados y análisis**

El río Daule es, al momento, la única fuente de agua cruda utilizada para el abastecimiento de la ciudad de Guayaquil. Este análisis compara las características del agua en dos puntos clave: **Nobol**, ubicado río arriba y fuera de la influencia directa de la planta de tratamiento, y **Agua Cruda**, en la entrada a la planta. El objetivo principal es evaluar si existen diferencias en parámetros físicos, químicos y biológicos, como la presencia de algas y compuestos asociados, para identificar posibles factores que influyen en la calidad del agua tratada y el desempeño de los procesos de la planta.

## Figura 7

### Mapa Geográfico de los puntos de muestra del Rio Daule



Nota. Tomado de Google Maps

### 3.1 Análisis de registros históricos de la planta de tratamiento.

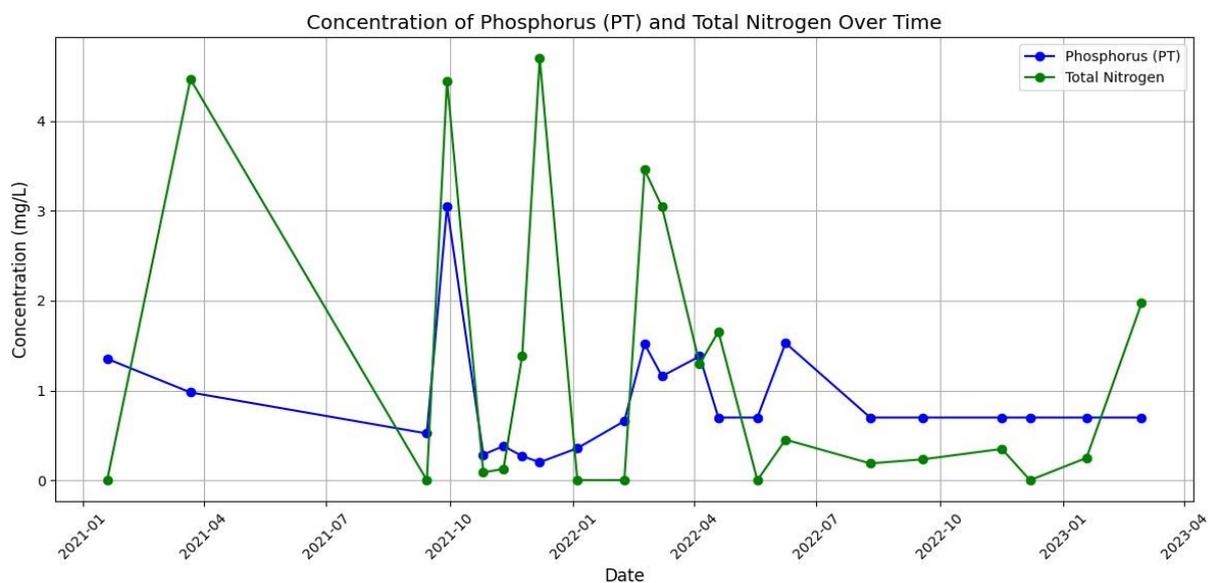
#### 3.1.1 Dinámica de la calidad de agua en la fuente.

En base a la información histórica provista por la empresa, es posible explorar la dinámica de la calidad del agua del río Daule y su potencial influencia sobre los eventos de floraciones algales adversos que resultaron en una mayor demanda de recursos para el tratamiento. La Figura 8 muestra los registros históricos de Nitrógeno Total (NT) y Fósforo Total (PT) presentes en el agua fuente a la altura de Nobol para el periodo 2021-2023. La gráfica

muestra incrementos importantes de N en marzo, septiembre y diciembre del 2021. Así también, se observan incrementos importantes de P en octubre del 2021. Estos incrementos alcanzaron concentraciones máximas de 3.05 mg/L para el caso del fósforo y 4.70 mg/L para el caso del nitrógeno. Se observa que en ocasiones los incrementos de N y P ocurren simultáneamente, pero que la mayoría del tiempo sus concentraciones no superan 1 mg/L.

### Figura 8

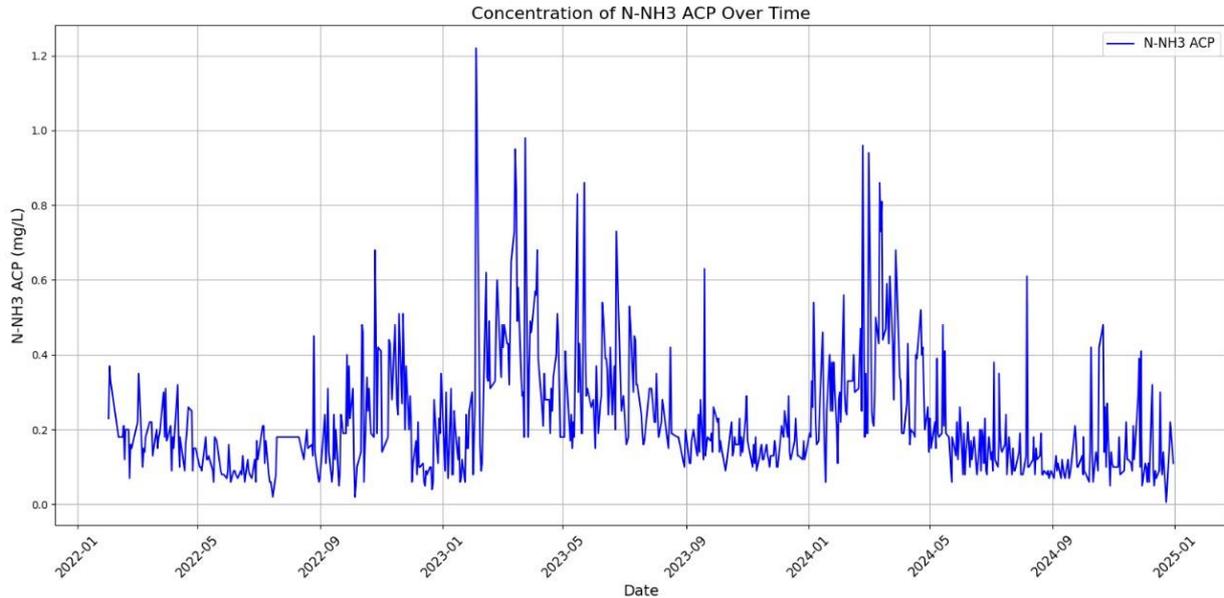
*Relación de Fosforo Total en mg/L y Nitrógeno Total en la muestra del Rio Daule a la altura de Nobol desde el año 2021 hasta el 2023*



La figura 9 muestra las concentraciones de nitrógeno amoniacal registradas al ingreso de la planta. Se observa que en la mayoría del periodo de estudio las concentraciones no superaron los 0,4 mg/L. Sin embargo, se observan incrementos importantes para las fechas 3/02/2023 y 24/03/2023, los cuales alcanzaron niveles de 1.22 mg/L y 0.98 mg/L respectivamente.

## Figura 9

*Relación de Nitrógeno Amoniacal en la muestra agua cruda, del Rio Daule en Planta La Toma, desde el 2022-2025*

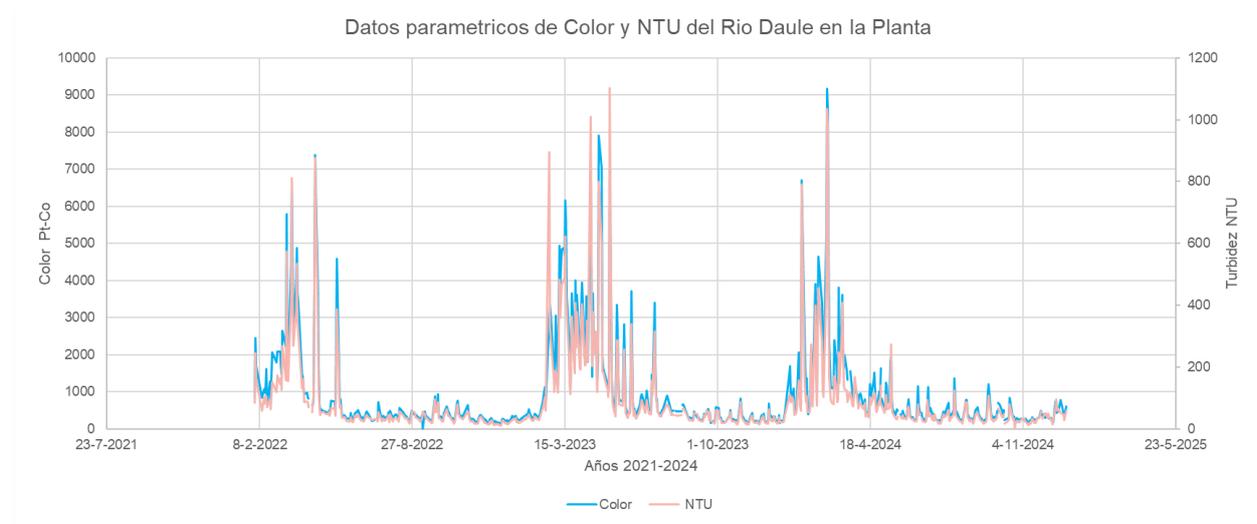


La figura 11 muestra la evolución de los parámetros Color y Turbidez del agua cruda del río Daule en la planta de tratamiento. Se observan picos significativos de ambos parámetros, especialmente durante los periodos lluviosos (invierno), cuando el aporte de sedimentos y materia orgánica aumenta por las lluvias. Los valores máximos de turbidez (NTU) superan los 9000, mientras que el color también registra aumentos significativos, lo que refleja una alta carga de sólidos suspendidos y compuestos orgánicos. En los periodos secos (verano), ambos parámetros disminuyen considerablemente, mostrando una estabilización en la calidad del agua. Este comportamiento estacional resalta la necesidad de ajustar los procesos de coagulación y floculación en la planta durante el invierno para manejar las variaciones extremas y garantizar la eficiencia del tratamiento. La comparación entre los puntos de muestreo en Nobol y Agua Cruda evidencia una reducción parcial de nutrientes como el nitrógeno total y el fósforo a lo largo del trayecto del río Daule hacia la planta, posiblemente debido a procesos naturales de sedimentación y dilución. Sin embargo, el nitrógeno amoniacal persiste en concentraciones significativas en el agua cruda, indicando la necesidad de un tratamiento más intensivo en la planta. Los picos más altos de nutrientes en Nobol durante el invierno reflejan el impacto de la

escorrentía agrícola y descargas puntuales, mientras que el agua cruda presenta una menor variabilidad, pero aún contiene nutrientes que pueden favorecer el crecimiento de algas. Esto resalta la importancia de un monitoreo constante y ajustes en los procesos de tratamiento para mitigar los efectos de los nutrientes remanentes en la calidad del agua potable. En la figura 8 se observa la concentración de nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_3$ ), el cual muestra un patrón estacional claro, con picos más altos en invierno (enero-abril) debido posiblemente a una mayor escorrentía de nutrientes causada por lluvias intensas y actividades agrícolas, lo que favorece la eutrofización y el posible crecimiento de algas. En verano (mayo-diciembre), sus concentraciones son más bajas y estables, probablemente debido a la menor entrada de nutrientes, lo que reduce el riesgo de proliferaciones algales durante este periodo.

### Figura 10

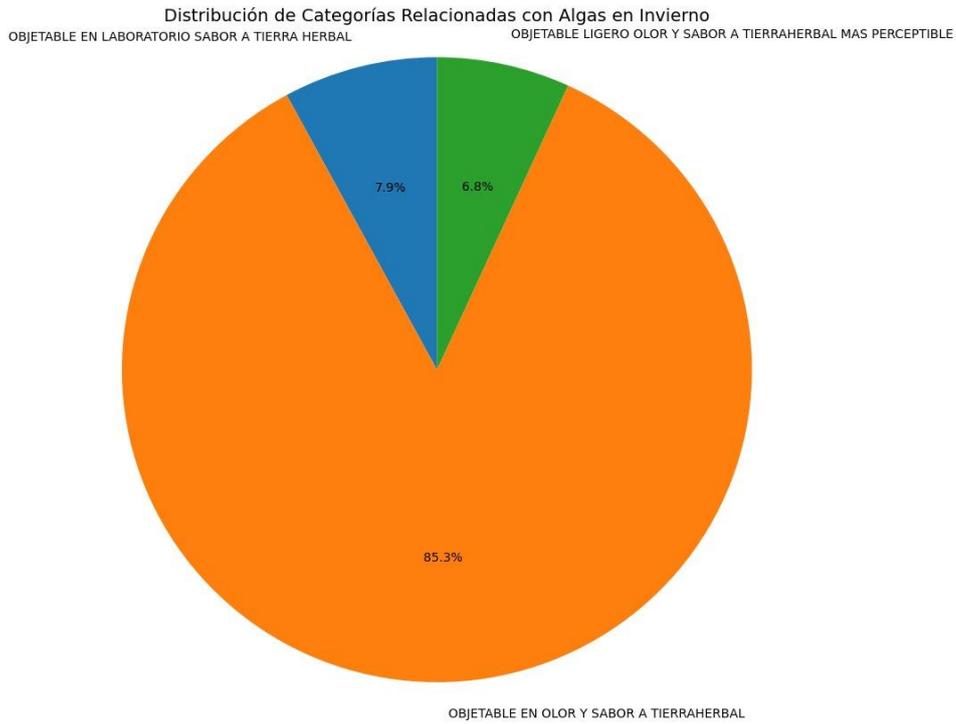
*Relación de Parámetros de Color y Turbidez desde el año 2022-2024*



La Figura 10 muestra la evolución de los parámetros de Color (Pt-Co) y Turbidez (NTU) en el agua cruda del río Daule a lo largo del periodo de estudio. Ambos parámetros presentan picos significativos durante los periodos lluviosos (invierno), destacándose valores de color superiores a 6000 Pt-Co y turbidez por encima de 1000 NTU, lo cual coincide con la mayor carga de sedimentos y materia orgánica arrastrada por las lluvias. Durante los periodos secos (verano), estos valores disminuyen notablemente, manteniéndose en rangos más estables y bajos.

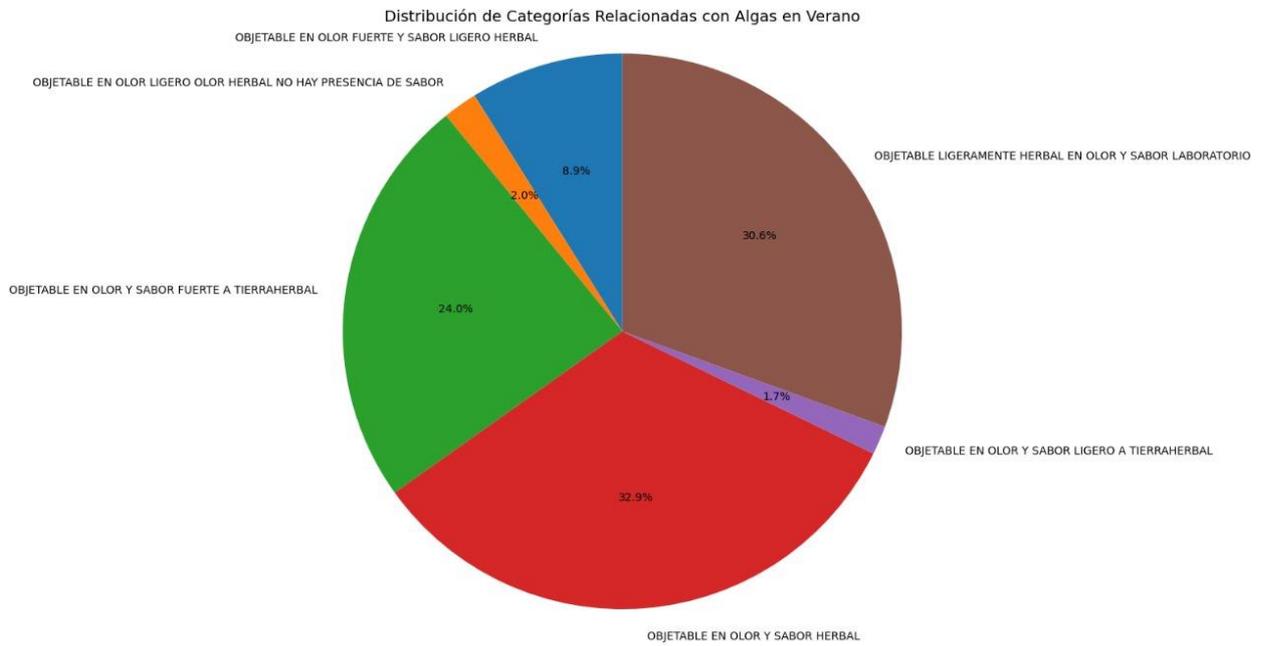
### Figura 11

*Relación de observaciones de análisis sensorial en invierno desde el año 2022-2024*



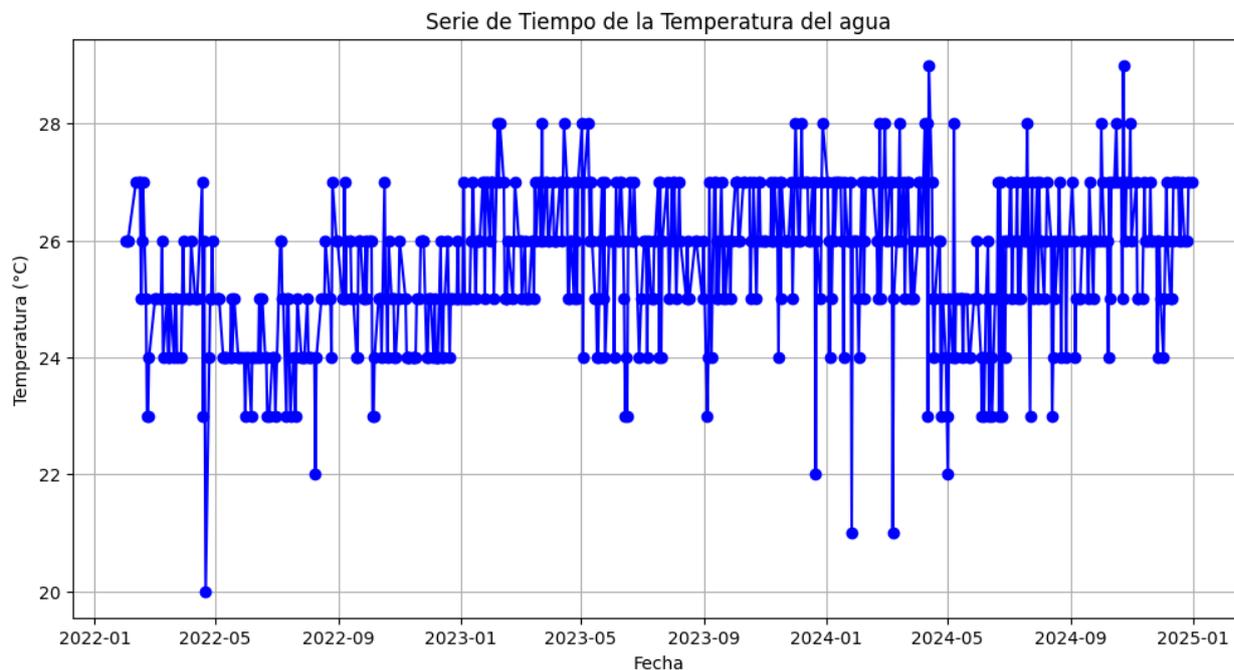
**Figura 12**

*Relación de observaciones de análisis sensorial en verano desde el año 2022-2024*



**Figura 13**

*Serie de tiempo de la temperatura del agua 2022-2025*



El análisis de las gráficas de pastel sobre la distribución de categorías relacionadas con algas en invierno (**figura # 11**) y verano (**figura # 12**) nos da pistas importantes sobre cómo las condiciones climáticas impactan la calidad del agua y la presencia de algas. Durante el invierno, que incluye los meses de diciembre a mayo, y verano que incluye los meses de junio a noviembre, la gráfica destaca una categoría que sobresale con claridad: "Objetable en olor y sabor a tierra/herbal", que representa más del 85% de las observaciones. Esto sugiere que, en esta temporada, el entorno favorece la aparición de este tipo de olor y sabor, posiblemente debido a una acumulación más prolongada de materia orgánica, temperaturas más frías y una menor renovación del agua, todo influido por las características propias del clima invernal.

Por otro lado, en el verano (junio a noviembre), la distribución de las categorías se diversifica. Aunque sigue habiendo una categoría dominante, esta solo abarca el 32.9% de las observaciones, lo que abre espacio a una mayor variedad de características sensoriales relacionadas con algas. En este caso, surgen categorías como "Objetable en olor y sabor fuerte a tierra/herbal" y "Objetable en olor y sabor ligero a tierra/herbal", que juntas tienen una presencia

considerable. Este cambio parece estar vinculado al incremento en las temperaturas, que fomenta un crecimiento más activo de distintas especies de algas y, a su vez, aumenta la actividad biológica en el agua. Esto puede intensificar la presencia de compuestos que generan estos olores y sabores.

Al relacionar estas observaciones con las estaciones del año, se puede interpretar que el invierno, con sus temperaturas bajas y menor exposición al sol, podría frenar el desarrollo de algunas especies de algas, pero al mismo tiempo facilita que ciertos compuestos orgánicos permanezcan en el agua, provocando olores y sabores específicos. En contraste, el verano, con sus altas temperaturas y una radiación solar más intensa, estimula un crecimiento algal más variado, lo que resulta en una mayor complejidad de características sensoriales en el agua.

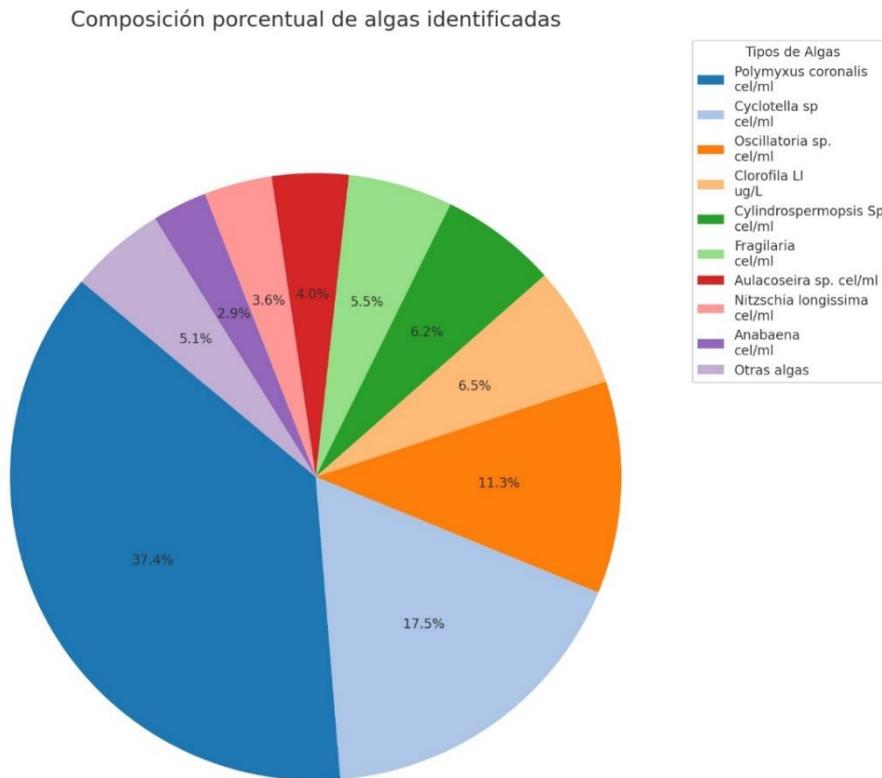
Estos hallazgos sugieren que las estaciones influyen directamente en el comportamiento de las algas, actuando como reguladores clave. Reconocer esta conexión es fundamental para desarrollar estrategias efectivas de tratamiento y manejo del agua, especialmente en áreas donde las condiciones climáticas tienen un impacto significativo en la calidad de este recurso vital.

### **3.1.2 Dinámica de poblaciones algales**

Los registros históricos de conteo de algas permiten comprender la composición y dominancia en las poblaciones de microalgas presentes en el agua fuente. La Figura 14 muestra que, para el referido periodo, *Polymyxus coronalis* domina completamente la población de microalgas con un 37.4 % seguida de *Cyclotella sp* (17.5 %) y de la cianobacteria *Oscillatoria sp.* (11.3 %). En menor cantidad se ubican la cianobacteria *Cylindrospermopsis sp.* (6.2 %), *Fragilaria* (5.5 %), *Aulacoseira sp.* (4.0 %) y *Nitzschia longissima* (3.6 %).

## Figura 14

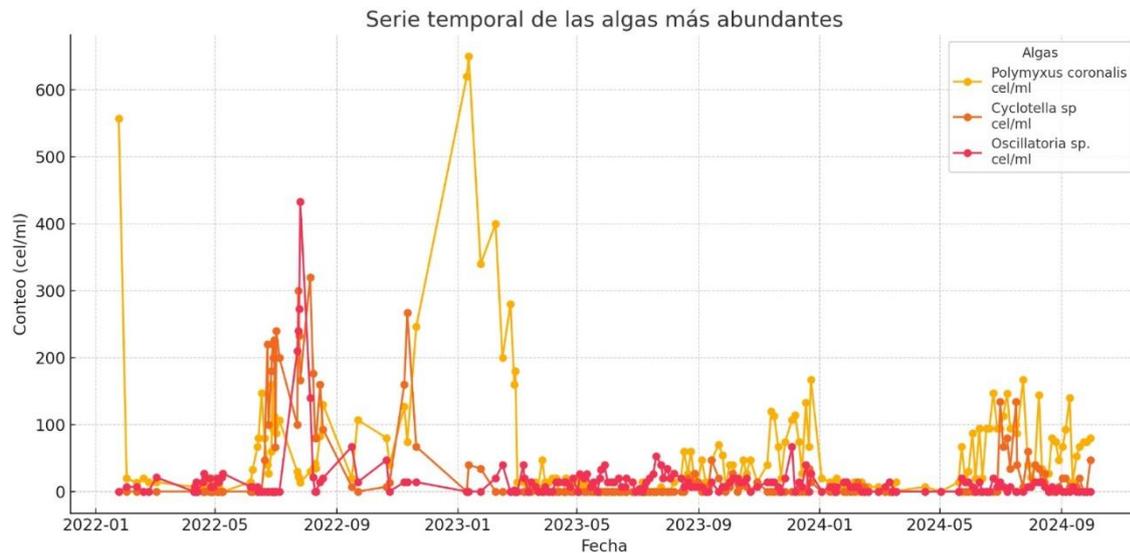
Composición porcentual de las microalgas encontradas desde 2022 a 2024



La Figura 15 muestra a continuación la serie de tiempo de abundancia (cel/ml) de las tres algas dominantes. En ella se observa que durante la temporada invernal se presentan picos significativos de abundancia particularmente en los meses de febrero y marzo, esto coincide con un incremento en la disponibilidad de nutrientes debido al aumento de nitrógeno amoniacal en dichos meses presentados en la **Figura 9**. Aunque las especies tienen picos en fechas similares, la magnitud de estas es diferente lo que indica una respuesta diferente a las condiciones ambientales. Esto resalta la importancia de controlar la dinámica algal, concentración de nutrientes, temperatura y otros factores que detonen su proliferación.

**Figura 15**

*Conteo histórico de las 3 microalgas con mayor abundancia encontradas desde 2022 a 2024*

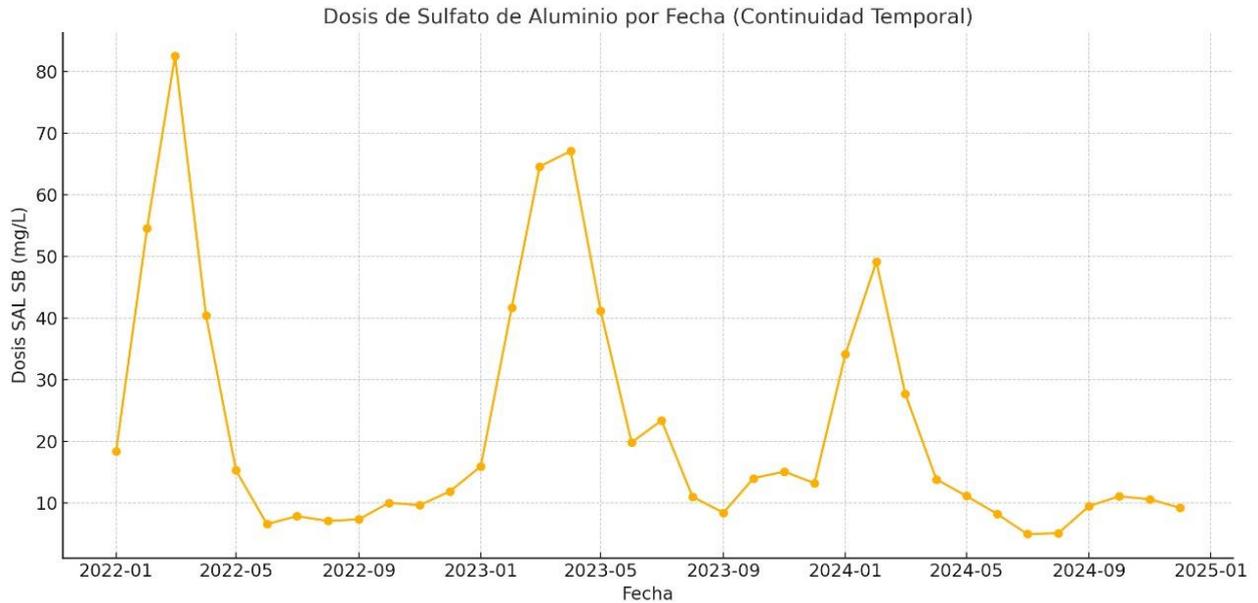


El análisis de los registros de conteo de microalgas muestra que el crecimiento algal varía significativamente entre estaciones, con un predominio de *Polymyxus coronalis* en invierno, probablemente debido al aumento de nutrientes y turbidez generados por las lluvias. En verano, especies como *Cyclotella sp.* y *Oscillatoria sp.* mantienen su presencia gracias a su adaptabilidad a condiciones más estables. Estas variaciones estacionales indican que el tratamiento del agua enfrenta mayores desafíos en la época lluviosa debido a la mayor carga algal, mientras que en la época seca el impacto es menor pero aún relevante por la persistencia de ciertas especies. Este comportamiento resalta la necesidad de estrategias específicas según la estación para mitigar la proliferación algal.

### 3.1.3 Dinámica en el proceso de potabilización

**Figura 16**

*Dosificación de Sulfato de Aluminio desde el año 2022-2024*

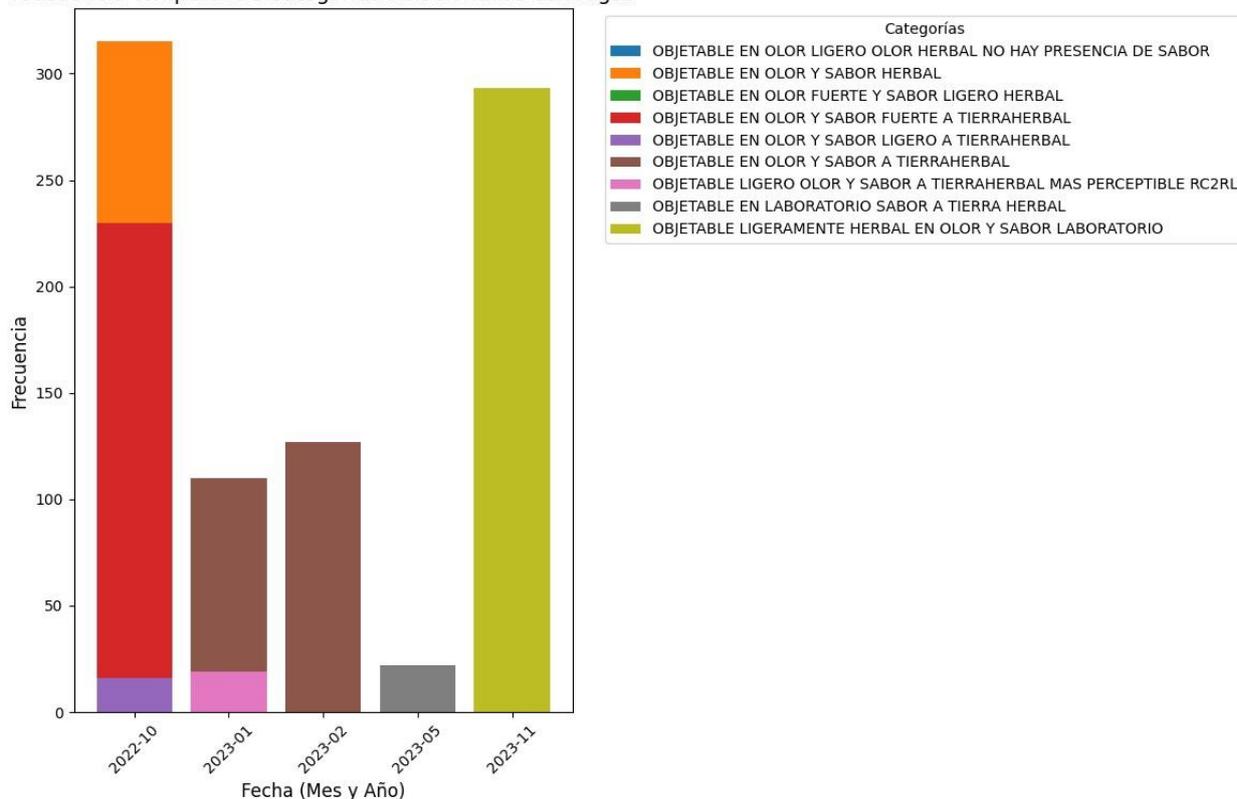


Las variaciones en calidad de agua y en torno a las poblaciones de microalgas tienen su impacto en el proceso de potabilización del agua. Esto se ve reflejado en las tasas de aplicación de químicos necesarios para su tratamiento. La figura 16 muestra el histórico de la dosificación de sulfato de aluminio (SAL) en la planta. Se muestra una clara variación estacional, con incrementos significativos en invierno debido al aumento de turbidez y color por las lluvias (alcanzando picos de entre 50 y 80 mg/L), mientras que en verano se mantiene más estable y baja (por debajo de 20 mg/L). Este patrón refuerza la importancia de monitorear constantemente la calidad del agua cruda para ajustar la dosificación de coagulante de manera eficiente y evitar sobredosificaciones innecesarias durante los meses secos.

**Figura 17**

*Análisis sensorial del año 2022-2023*

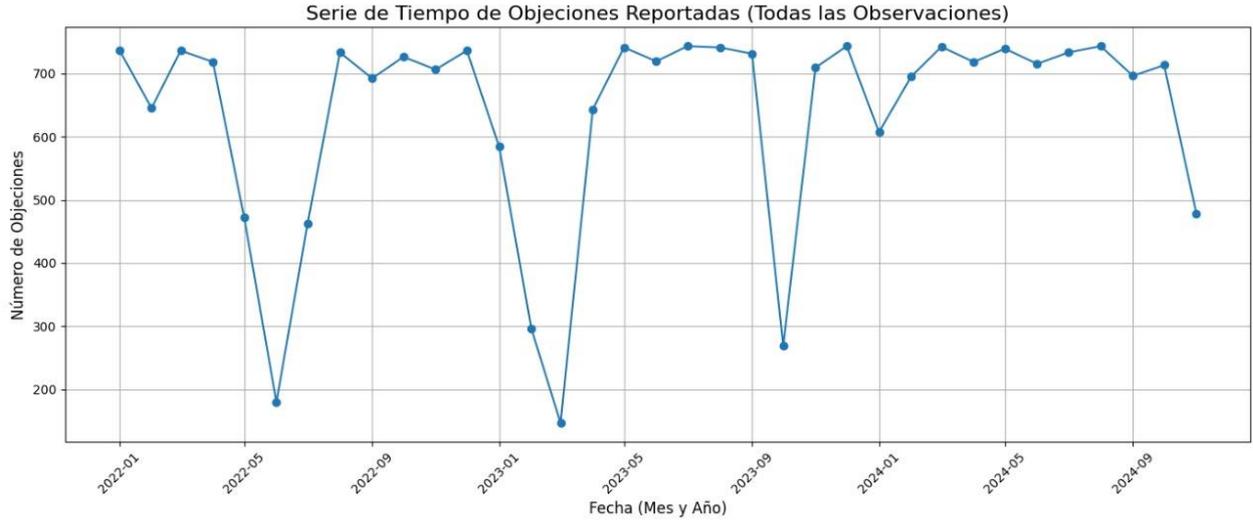
Frecuencia Temporal de Categorías Relacionadas con Algas



A fin de documentar los eventos adversos en la planta potabilizadora, se recurrió a los registros de evaluación sensorial para el periodo de estudio. Los periodos con mayor percepción de sabores y olores relacionados con algas coinciden con los meses de mayor actividad biológica, posiblemente influenciados por la escorrentía de compuestos desde la cuenca (debido a las lluvias) y la entrada de nutrientes al río. Esto refuerza la importancia de monitorear las condiciones del agua cruda y ajustar los procesos de tratamiento, como la dosificación de carbón activado (solución adoptada al momento y de alto costo), para mitigar estos impactos sensoriales en el agua potable. A continuación, la **figura 18 muestra** la serie de tiempo de las objeciones reportadas.

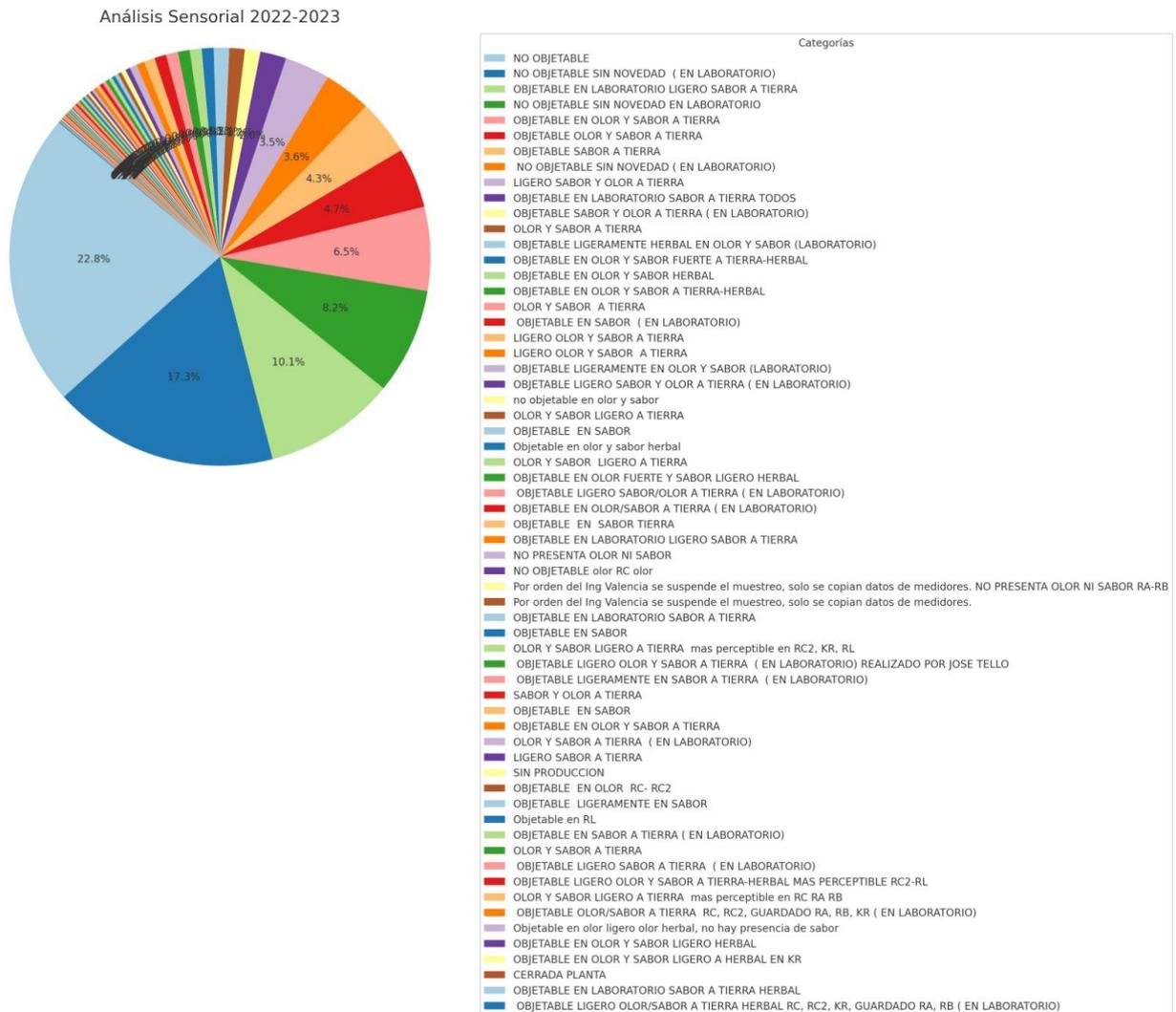
**Figura 18**

*Serie de tiempo de las objeciones generales reportadas del año 2022-2023*



**Figura 19**

*Análisis sensorial reportadas del año 2022-2023*



El análisis del gráfico de pastel de la figura 19 se evidencia que la mayoría de las muestras evaluadas en la planta de potabilización son clasificadas como “No objetable” con un 22.8% o “No objetable sin novedad (en laboratorio)” con un 17.3%, lo que refleja una calidad sensorial mayoritariamente aceptable. Sin embargo, objeciones relacionadas con olor y sabor a tierra representan un porcentaje significativo, superando el 20% del total, destacando la necesidad de optimizar los procesos de tratamiento, ya que estos problemas podrían estar relacionados con la proliferación algal y compuestos presentes en el agua cruda. Las objeciones menores por sabor y olor herbal también indican áreas específicas de mejora, aunque en menor escala. Esto subraya la importancia de reforzar el control en etapas críticas como la clarificación y el uso de carbón activado para garantizar una calidad sensorial más consistente.

La serie temporal específica de objeciones relacionadas con algas también refleja esta estacionalidad, aunque con un patrón más marcado. Durante el invierno, el aumento de las lluvias y las temperaturas favorece el crecimiento de comunidades de algas, intensificando su impacto en el sabor y olor del agua. Esto coincide con estudios que han demostrado que los climas cálidos y húmedos son propicios para la proliferación de algas debido al incremento de la temperatura del agua y la disponibilidad de nutrientes (Paerl & Huisman, 2008). En verano, cuando las precipitaciones disminuyen y las temperaturas son más frescas, la actividad de las algas se reduce considerablemente, como se evidencia en el descenso de las objeciones reportadas.

La comparación entre las dos gráficas pone en evidencia una relación directa entre las objeciones generales y las relacionadas con algas, especialmente durante el invierno. Sin embargo, las objeciones generales incluyen otros factores además de las algas, como la acumulación de contaminantes durante las lluvias o problemas en la infraestructura de tratamiento, lo que explica su mayor volumen y variabilidad. Por el contrario, las objeciones

relacionadas con algas son más específicas y están claramente influenciadas por las condiciones climáticas de la estación lluviosa.

En conclusión, las características particulares de las estaciones en Guayaquil determinan el comportamiento de las objeciones reportadas, con el invierno lluvioso y cálido propiciando un mayor impacto en la calidad del agua debido al crecimiento de algas y otros factores asociados. Este análisis refuerza la necesidad de estrategias de manejo adaptadas al contexto local, con énfasis en medidas preventivas y correctivas durante el invierno, cuando los riesgos para la calidad del agua son mayores.

### 3.1.4 Condiciones al interior de la planta

Las muestras de agua colectadas al interior de la planta permitieron conocer las condiciones de calidad de agua y de microalgas presentes en las etapas de ingreso a la planta (agua cruda), y clarificación. Se analizaron las muestras de agua para determinar los parámetros fisicoquímicos relevantes, incluyendo pH, turbidez, NT y PT. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 6.**

*Parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua*

<b>Muestra</b>	<b>pH</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>	<b>NT (mg/L)</b>	<b>PT (mg/L)</b>
<b>Agua Cruda</b>	7.57	23.7	0.502	0.026
<b>Clarificador CA4</b>	7.35	4.27	0.106	<0.025
<b>Clarificador CB4</b>	7.33	4.88	0.333	<0.025

Los análisis fisicoquímicos reflejan que el proceso de clarificación de la planta es eficaz en la reducción de turbidez y nutrientes, como nitrógeno y fósforo. La turbidez se redujo en aproximadamente un 81.98 %, en tanto que el nitrógeno en un 78.88%. El fósforo estuvo muy cercano al límite de cuantificación en el agua fuente. Esta remoción de nutrientes es fundamental para prevenir la proliferación de algas en las etapas posteriores del tratamiento. En particular, los clarificadores CA4 y CB4 evaluados mostraron una eficiencia notable en la disminución de estos parámetros.

Como parte del proceso de monitoreo se realizó el conteo de microalgas para determinar posibles cambios de densidad a lo largo del proceso. y que luego termine afectando al proceso de filtración por esa razón se tomaron muestras antes y después de la clarificación y se procedió al conteo como se puede apreciar en la siguiente tabla:

**Tabla 7.**

*Conteo Abundancia de Algas primer muestreo*

<b>Microalga</b>	<b>Conteo Antes del clarificador 1A (células/ml)</b>	<b>Conteo Después del clarificador 1A (células/ml)</b>
<i>Polymyxus coronalis</i>	231000	17000
<i>Synedra ulna</i>	4000	28000

Como se puede apreciar en la tabla 7 antes del clarificador 1A *Polymyxus coronalis* presenta una concentración de 231,000 cel/ml, mientras que *Synedra ulna* tiene una concentración de 4,000 cel/ml. Después del clarificador, *Polymyxus coronalis* disminuye a 17,000 cel/ml y *Synedra ulna* aumenta a 28,000 cel/ml. Estos resultados evidencian que el proceso de clarificación influye de manera diferenciada en las especies de algas presentes debido a que *Synedra ulna* tuvo un aparente aumento de densidad luego del proceso de Clarificación.

Las células de *Synedra* acus, conocidas por su forma alargada y de agujas, pueden atravesar los poros de los filtros de arena debido a su geometría particular. Aunque no son lo suficientemente rígidas o abrasivas para dañar directamente el material del filtro, su acumulación

en la superficie y dentro del lecho filtrante puede obstruir los poros y aumentar la presión diferencial. Esto lleva a una mayor frecuencia de retrolavados, lo que, con el tiempo, desgasta el material filtrante y reduce su vida útil. (Joh, Choi, Shin, & Lee, 2011)

Se realizó un segundo muestreo de agua cruda y del clarificador para comparar con lo mencionado anteriormente y se realizó el conteo que se visualiza en las siguientes tablas:

**Tabla 8.**

*Conteo Abundancia de Algas Segundo muestreo AGUA CRUDA*

<b>Microalga</b>	<b>Abundancia (cel/ml)</b>
<i>Polimixus coronalis</i>	21794
<i>Synedra ulna</i>	427
<i>Nostocales</i>	427
<i>Euglenophyta</i>	85
<i>Closterium</i>	85
<i>Synedra sp</i>	85
<i>Coscinodiscus</i>	1965
<i>Phormidium</i>	170
<i>Synedra acus</i>	85
<i>Navicula</i>	85
<b>TOTAL</b>	<b>25213</b>

**Tabla 9.**

*Conteo Abundancia de Algas Segundo muestreo CLARIFICADOR CA4*

<b>Microalga</b>	<b>Abundancia (cel/ml)</b>
<i>Polimixus coronalis</i>	1623
<i>Synedra ulna</i>	256
<i>Clorella</i>	85
<i>Closterium sp</i>	85
<i>Synedra goulardii</i>	85
<i>Nostocales</i>	341

<i>Phacus</i>	85
<i>Aulacoseira</i>	85
<i>Mougeotia sp</i>	85
<b>TOTAL</b>	<b>2735</b>

**Tabla 10.**

*Conteo Abundancia de Algas Segundo muestreo CLARIFICADOR CB4*

<b>Microalga</b>	<b>Abundancia (cel/ml)</b>
<i>Polimixus coronalis</i>	341
<i>Synedra ulna</i>	854
<i>Nostocales</i>	427
<i>Synedra goulardii</i>	170
<i>Phormidium</i>	85
<i>Aulacoseira</i>	85
<b>TOTAL</b>	<b>1965</b>

**Figura 20**

*Imagen de muestra de agua Polimixus Coronalis*



Hubo una disminución de abundancia de microalgas significativa luego del proceso de clarificación, sin embargo, para el clarificador CB4 hubo un aumento de *Synedra ulna* luego del proceso de clarificación pasando de 427 a 855 cel/ml.

### **3.2 Ensayos exploratorios de laboratorio**

#### **3.2.1 Evaluación de crecimiento de microalgas bajo diferentes intensidades de luz**

A fin de explorar la posibilidad de ejecutar ensayos de laboratorio que permitan comprender los factores que favorecen la reproducción de las algas de interés antes mencionadas, se llevó a cabo un ensayo de cultivo de algas obtenidas del agua fuente variando las condiciones de concentración de nutrientes y de luz. Se evaluó el efecto de la intensidad de luz sobre el crecimiento de microalgas con cultivos en frascos de 20 mL. Se incubaron los pellets de algas con medio zarruk a dos intensidades de luz (600 y 1200 lux). Los resultados sugieren un crecimiento superior bajo intensidades más altas.

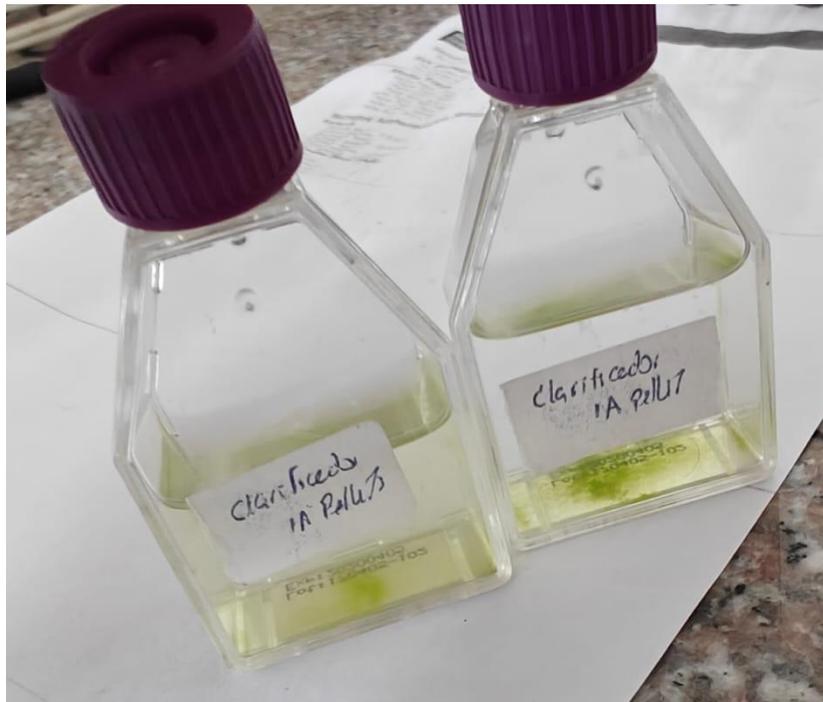
**Tabla 11.**

*Abundancia final de algas luego de 7 días de cultivo bajo distintas intensidades de luz.*

<b>Intensidad de luz (luxes)</b>	<b>Abundancia (cel/ml)</b>
<b>600</b>	24000
<b>1200</b>	65000

## Figura 21

Imagen de muestra de agua Clarificada



### 3.2.2 Evaluación de crecimiento de microalgas bajo diferentes condiciones de nutrientes.

Se evaluó el crecimiento de microalgas en frascos de 250 mL con un nuevo medio de cultivo, con un medio de cultivo enriquecido con Nitrógeno y con Fósforo un 20%. Las microalgas mostraron un mayor crecimiento en medios enriquecidos con nitrógeno.

**Tabla 12.**

*Crecimiento de Algas bajo distintas condiciones de Nutrientes luego de 5 días*

Muestra	Abundancia (cel/ml) con Medio Original	Abundancia (cel/ml) con Medio enriquecido con N	Abundancia (cel/ml) con Medio enriquecido con P
Agua Cruda	19829	23333	20427
Clarificador CA4	4102	3076	2991

<b>Clarificador</b>	2905	2649	2478
<b>CB4</b>			

En cuanto a la intensidad de luz, se observó que niveles intermedios (1200 lux) y altos (1800 lux) favorecen un crecimiento acelerado de las microalgas, mientras que intensidades bajas 600 lux limitan su desarrollo. Además, se determinó que en el Agua Cruda existió un mayor crecimiento de Algas con los tres tipos de nutrientes y en medios enriquecidos con Nitrógeno también tuvo su crecimiento. Eso resalta la importancia del control de nutrientes durante el proceso de tratamiento de agua. Este hallazgo es clave para el diseño de estrategias de mitigación en plantas de tratamiento, ya que la luz y los nutrientes juegan un papel crucial en el control del crecimiento algal.

### 3.3 Análisis de micro y macroelementos del floculante.

Se realizó un análisis al floculante mediante espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) a fin de detectar elementos a nivel de traza que estuvieran presentes y que pudieran favorecer el crecimiento algal. Las tablas 13 y 14 muestran los resultados de estos análisis.

**Tabla 13.**

*Determinación porcentual de macroelementos en el floculante*

<b>Nombre de Muestra</b>	<b>S (% m/m)</b>	<b>Al (% m/m)</b>
<b>Floculante</b>	27.23	14.59

**Tabla 14.**

*Determinación de microelementos en el floculante*

<b>Muestra</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>K</b>	<b>P</b>	<b>Fe</b>	<b>Na</b>	<b>B</b>
	<b>(mg/kg)</b>						
<b>Floculante</b>	67.84	7.40	2.75	BDL	1.60	283.16	BDL

<b>Porcentaje%</b>							
<b>(m/m)</b>	0.006784	0.00074	0.000275	BDL	0.00016	28.3165	BDL

**Tabla 15.**

*Otros microelementos en el floculante*

<b>Muestra</b>	<b>Zn</b>	<b>Co</b>	<b>Ni (mg/kg)</b>	<b>Mn</b>	<b>Cu</b>	<b>Mo</b>
	<b>(mg/kg)</b>	<b>(mg/kg)</b>		<b>(mg/kg)</b>	<b>(mg/kg)</b>	<b>(mg/kg)</b>
<b>Sulfato de aluminio</b>	0.39	BDL	0.47	BDL	0.38	0.21
<b>Porcentaje</b>						
<b>%</b>	0.000039	BDL	0.000047	BDL	0.000038	0.000021
<b>(m/m)</b>						

Los resultados muestran que el floculante empleado en la planta de tratamiento de agua potable contiene microelementos como calcio, magnesio, sodio, zinc, níquel, cobre y molibdeno. Entre estos, el sodio destaca con una concentración de 283,165 mg/kg, mientras que otros elementos como el calcio y el magnesio podrían también tener relevancia en la disponibilidad de nutrientes como se puede observar en la tabla 14. Los microelementos presentes en el floculante, como sodio, calcio, magnesio, zinc, níquel, cobre y molibdeno, tienen roles esenciales en la química del agua y en el metabolismo de las algas. El sodio puede influir en la osmorregulación y en la interacción de nutrientes, mientras que el calcio y el magnesio son fundamentales para la estabilidad celular y la fotosíntesis. Por otro lado, elementos como zinc, níquel, cobre y molibdeno actúan como cofactores enzimáticos en procesos como la fijación de nitrógeno y el transporte de electrones. Aunque estos nutrientes son vitales para las algas, su exceso puede promover proliferaciones algales, lo que aumenta los desafíos en los procesos de clarificación y filtración (Paerl & Otten, 2013).

Elementos como el hierro, zinc y el cobre tienen valores de 1.60 mg/kg, 0.39 mg/kg y 0.38 mg/kg respectivamente. Estos son conocidos por ser nutrientes esenciales para el metabolismo de las microalgas, especialmente en la fotosíntesis y la producción de enzimas. Aunque los niveles de fósforo y manganeso no fueron detectados o se encontraron por debajo del límite de detección, las trazas de los demás microelementos podrían actuar como nutrientes clave que favorecer la proliferación de microalgas si las condiciones ambientales, como la luz y la temperatura, son adecuadas. Estos hallazgos sugieren que el floculante puede ser una fuente indirecta de micronutrientes para el crecimiento algal, razón por la cual es necesario comprender el potencial efecto de este sobre las poblaciones de algas.

El hierro (Fe) es esencial para la fotosíntesis y el metabolismo de las algas, participando en procesos como el transporte de electrones y la fijación de nitrógeno. La disponibilidad de hierro, especialmente en ecosistemas donde suele ser un factor limitante, puede favorecer el crecimiento de algas específicas, como cianobacterias (*Oscillatoria*, *Anabaena*, *Microcystis*, *Cylindrospermopsis*), diatomeas (*Cyclotella*, *Fragilaria*, *Pseudonitzschia*) y clorofitas (*Scenedesmus*, *Chlorella*). Este crecimiento se intensifica en condiciones de eutrofización (exceso de nitrógeno y fósforo) y en presencia de materia orgánica o sedimentos ricos en hierro, que movilizan este nutriente. Además, algunas algas, como *Microcystis* y *Pseudonitzschia*, utilizan el hierro para sintetizar toxinas, aumentando los riesgos ambientales y sanitarios. Estos hallazgos destacan la importancia de controlar la disponibilidad de hierro, especialmente en el contexto del coagulante utilizado en la planta, para evitar la proliferación algal y sus efectos negativos.

## **Capítulo 4**

## 4.1 Conclusiones y recomendaciones

### 4.1.1 Conclusiones

El proyecto se centró en analizar los factores que favorecerían la proliferación de microalgas en una planta potabilizadora, especialmente aquellas que serían las principales responsables del desgaste y obstrucción de filtros, afectando la eficiencia del proceso de filtración y consecuente potabilización. Se exploraron los registros históricos de calidad de agua y de microalgas presentes a lo largo de un periodo de dos años de operación. Se exploraron condiciones de alta luminosidad y concentraciones elevadas de nitrógeno y fósforo en ensayos de laboratorio, considerando su impacto en el crecimiento algal. Se caracterizó las condiciones de calidad de agua y microalgas presentes en el sistema de tratamiento. Para ello, se evaluaron ciertos parámetros antes y después de la clarificación que es la etapa crítica que luego pasa al proceso de filtración donde ocurre la obstrucción de filtro de manera eventual. Se realizó pruebas experimentales a escala de laboratorio. Estos esfuerzos se dirigieron a evaluar estos parámetros relacionados con la abundancia de algas y proponer estrategias para reducir costos de mantenimiento asociados a las floraciones algales. En base a los resultados obtenidos, se puede concluir que:

- El proceso de clarificación en la planta potabilizadora demostró ser efectivo en la reducción de turbidez, nutrientes y carga algal. Se observó que, aunque la mayoría de las especies de algas disminuyen después de esta etapa, se registró un incremento específico de la especie *Synedra ulna*. Este hallazgo resalta la necesidad de monitorear de forma específica estas especies que podrían afectar al proceso de purificación y la calidad del agua.
- Se analizó la composición química del floculante utilizado en el tratamiento mediante un ICP óptico para determinar la presencia de macroelementos y microelementos, identificándose como principales elementos el sodio, calcio y trazas de hierro. Estas trazas de elementos podrían contribuir al florecimiento algal llegando a ser esenciales

en el metabolismo de estas microalgas y se encuentran comúnmente en medios de cultivo tradicionales.

- Los experimentos realizados a escala de laboratorio confirmaron que la intensidad de luz es un factor determinante en el florecimiento algal. Las condiciones de alta luminosidad mayores de 1200 luxes favorecieron el crecimiento de diversas especies de microalgas, lo que subraya la importancia de implementar barreras físicas o estrategias que reduzcan la incidencia de luz en áreas críticas del tratamiento.
- Se monitoreó el proceso mediante un conteo de abundancia de algas directo bajo el microscopio. Esto permitió darnos cuenta de las reducciones significativas de densidad algal luego de la clarificación. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que estas pueden volver a proliferarse bajo ciertas condiciones de alta luminosidad por lo que hay que tener un control de ellas a lo largo del proceso de potabilización.

#### ***4.1.2 Recomendaciones***

- Para un futuro, se debe tomar en cuenta la dosis utilizada de defloculante y polímero en el proceso de tratamiento, ya que su presencia podría influir en el crecimiento de microalgas al proveer micronutrientes esenciales para el desarrollo algal. Se recomienda realizar estudios adicionales para evaluar cómo las concentraciones de estos productos afectan la proliferación algal, ya que, en algunos casos, su uso podría favorecer el desarrollo de algas dependiendo de las condiciones específicas del proceso (ej. luz, temperatura).
- Los estudios realizados en laboratorio pueden ampliarse a mayor escala para evaluar con mayor precisión cómo las condiciones reales de las plantas de tratamiento impactan en el crecimiento algal. Se sugiere investigar más a fondo la interacción entre los diferentes nutrientes y la luz en un entorno real de tratamiento de agua.

- Se recomienda la instalación de techos o estructuras que limiten la incidencia de luz solar directa en los clarificadores para reducir el crecimiento algal inducido por la exposición a la luz. Esta medida puede mejorar significativamente la eficiencia del proceso de clarificación y reducir la proliferación algal.

## Referencias

- Aleksova, M., Schneider, I., Velisha, S., & Prodanova, E. (2023). Management of the Risk of Blue Green Algae Blooms in the Iskar Dam for Drinking Water Quality of Sofia City. *Processes* 2023, Vol. 11, Page 2972, 11(10), 2972. <https://doi.org/10.3390/PR11102972>
- Almuhtaram, H., Cui, Y., Zamyadi, A., & Hofmann, R. (2018). Cyanotoxins and Cyanobacteria Cell Accumulations in Drinking Water Treatment Plants with a Low Risk of Bloom Formation at the Source. *Toxins*, 10(11), 430. <https://doi.org/10.3390/TOXINS10110430>
- Anderson, D. M., Glibert, P. M., & Burkholder, J. M. (2002). Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*, 25(4),704.
- Calle Chimborazo (2017). Repositorio Institucional Universidad de Cuenca: Comparación de los procesos de tratamiento de agua en las plantas Uchupucún Y Mahuarca y de la ciudad de Azogues. Retrieved October 24, 2024, from <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/26414>
- Coronel Mateo, Molina Gillian, (2024), Diseño de Estrategias para Mitigar la Presencia de Algas en Plantas de Tratamiento de Agua Potable [Tesis de Pregrado no publicada]. ESPOL.
- Deng, Y., Wu, M., Zhang, H., Zheng, L., Acosta, Y., & Hsu, T. T. D. (2017). Addressing harmful algal blooms (HABs) impacts with ferrate(VI): Simultaneous removal of algal cells and toxins for drinking water treatment. *Chemosphere*, <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2017.08.052> 186, 757–761.
- Falconer, I. R. (2005). Cyanobacterial toxins of drinking water supplies: Cylindrospermopsins and microcystins. CRC Press
- Geoinnova. (s.f.). La simbiosis en los ecosistemas acuáticos [Imagen]. Recuperado el 25 de enero de 2025, de <https://geoinnova.org/blog-territorio/simbiosis/>
- He, Y., Wang, X., & Xu, F. (2022). How reliable is chlorophyll-a as algae proxy in lake environments? New insights from the perspective of n-alkanes. *Science of The Total Environment*, 836, 155700. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.155700>

- Joh, G., Choi, Y. S., Shin, J. K., & Lee, J. (2011). *Problematic algae in the sedimentation and filtration process of water treatment plants*. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 60(4), 219-229. <https://doi.org/10.2166/aqua.2011.035>
- Las diatomeas, algas esenciales para la Tierra y con potencial en la agricultura - Jardinería*. (2020). Retrieved January 24, 2025, from <https://www.interempresas.net/Jardineria/Articulos/442325-Las-diatomeas-algas-esenciales-para-la-Tierra-y-con-potencial-en-la-agricultura.html>
- Mahmoud, E. A., Gad Mohamed, A. M., Farrag, A. E. H. A., & Aboeldahb, S. A. M. (2021). Evaluation of the most promising techniques overcoming the algal problems takes place during the purification of drinking water. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(32), 44239–44248. <https://doi.org/10.1007/S11356-021-13674-3/FIGURES/7>
- Paerl, H. W., & Otten, T. G. (2013). Harmful cyanobacterial blooms: Causes, consequences, and controls. *Microbial Ecology*, 65(4), 995-1010. <https://doi.org/10.1007/s00248-012-0159->
- Palani, V. (2019). *Evaluation of Cyanobacteria Removal in an Integrated Process of Electroflotation and Rapid Filtration Using Plastic Filter Media*. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2621011>
- Pérez Esteve, E., & Gómez Llorente, H. (2020). Técnicas de espectrometría atómica para el análisis de la composición elemental <https://riunet.upv.es/handle/10251/146349> de materiales nanoestructurados artificiales.
- Rodas-Pernillo, E., & Vasquez-Moscoso, C. A. (2020). Evaluación anual del fitoplancton y su respuesta a la calidad de agua en el lago de Amatitlán, Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 7(2), 170–188. <https://revistas.usac.edu.gt/index.php/cytes/article/view/708>
- Santa Clara Valley Water District. (2021). *Mitigating Algae Growth in Sedimentation Basins with Covers*. Retrieved from Water Environment Federation.
- Smol, J. P., & Stoermer, E. F. (2010). *The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences* (2<sup>a</sup> ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511763175>

Standard Operating Procedure Laboratory Procedures for Chlorophyll *a* and Phycocyanin

Analysis in Water. (2017).

Sunlight-Blocking Covers Control Algae, Reduce Operational Costs at California Utility. (n.d.).

Retrieved December 7, 2024, from <https://www.evoqua.com/en/case-studies/santa-clara-municipal-structurally-supported-cover/>

Synch, T. (2023). Microalgae and diatoms in water treatment systems: Roles, challenges, and

mitigation strategies. Water Research Institute Publications. Recuperado de <https://water-research-institute.org/microalgae>

Valdés De Hoyos, E. I. P., & Uribe Arzate, E. (2016). EL DERECHO HUMANO AL AGUA.

UNA CUESTIÓN DE INTERPRETACIÓN O DE RECONOCIMIENTO. *Cuestiones*

*Constitucionales*, 34, 3–25. <https://doi.org/10.1016/J.RMDC.2016.07.001>

Wan, L., Wang, X. H., & Peirson, W. (2022). Impacts of Climate Change and Non-Point-Source

Pollution on Water Quality and Algal Blooms in the Shoalhaven River Estuary, NSW,

Australia. *Water (Switzerland)*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/W14121914>

World Health Organization. (2023, September 13). *Agua para consumo humano*.

<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

Younis, A. M., Soliman, N. F., Elkady, E. M., & Mohamedein, L. I. (2022). Distribution and

ecological risk evaluation of bioavailable phosphorus in sediments of El Tamsah Lake,

Suez Canal. *Oceanologia*, 64(2), 287–298.

<https://doi.org/10.1016/J.OCEANO.2021.12.001>

## Apéndice A

**Figura A.1**

*Recolección de muestra del río Daule*



**Figura A.2**

*Toma de muestra del río Daule*



**Figura A.3**

*Luxómetro empleado para medición de intensidad de luz*



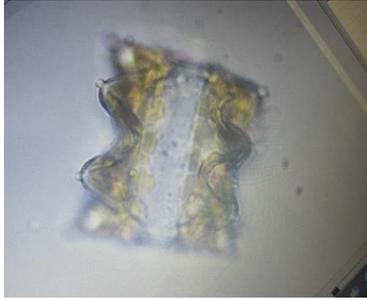
**Figura A.4**

*Microscopio empleado para identificación de algas y conteo de densidad celular*



**Figura A.5**

*Identificación de microalgas en el microscopio.*



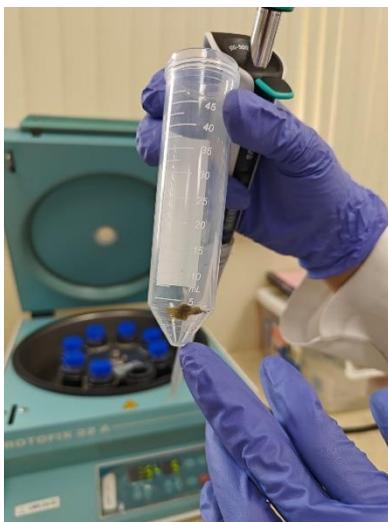
**Figura A.6**

*Centrifugadora empleada para el experimento.*



**Figura A.6**

*Formación del pellet de alga*



**. Figura A.7**

*Experimento a distintos niveles de nutrientes*



**. Figura A.8**

*Turbidímetro empleado en la medición de parámetros fisicoquímicos del agua*



**. Figura A.9**

*Digestor para análisis de muestras.*



**Figura A.10**

*Muestras listas para incubación*



**Figura A.11**

*Preparación de muestras para incubación y medios de cultivo*



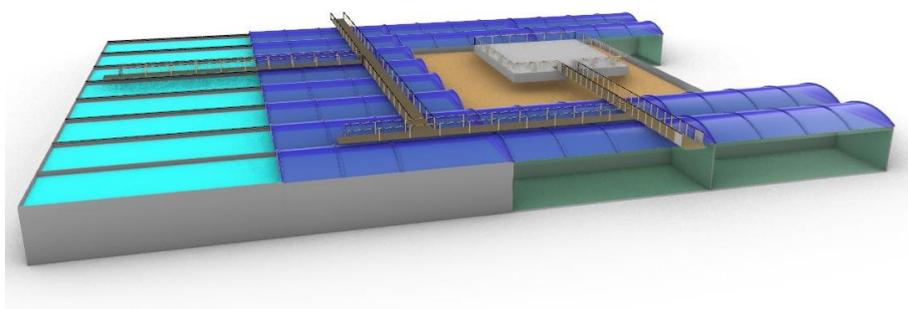
**Figura A.12**

*Equipo usado para lectura de Nitrógeno y Fósforo Total*



**Figura A.13**

*Diseño del cobertor para la planta de potabilización*



**Figura A.14**

*Diseño del cobertor vista desde otra perspectiva para la planta de potabilización*

