



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES

CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE FITORREMEDIACIÓN MEDIANTE
LA ESPECIE BERRO (*Nasturtium officinale*) PARA
CONTAMINANTES PRESENTES EN LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL CANTÓN
SANTIAGO DE PILLARO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA”**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de
Ingenieros Ambientales

Autores:

Ayala Martínez, Jefferson Stalin

Lema Sánchez Valentina Adelaida

Tutor:

Agreda Oña José Luis

LATACUNGA – ECUADOR

Marzo 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Ayala Martínez Jefferson Stalin, con cédula de ciudadanía No. 0550577894 y Lema Sánchez Valentina Adelaida, con cédula de ciudadanía No. 1726821232, declaramos ser autores del presente Proyecto de Investigación: **“DISEÑO DE UN SISTEMA DE FITORREMEDIACIÓN MEDIANTE LA ESPECIE BERRO (*Nasturtium officinale*) PARA CONTAMINANTES PRESENTES EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL CANTÓN SANTIAGO DE PILLARO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA”**, siendo el Ingeniero José Luis Agreda Oña, Mgs. Tutor del presente trabajo; y, eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 02 de febrero del 2026

Ayala Martínez Jefferson Stalin
C.C: 0550577894
ESTUDIANTE

Lema Sánchez Valentina Adelaida
C.C: 1726821232
ESTUDIANTE

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **AYALA MARTÍNEZ JEFFERSON STALIN**, identificado con cédula de ciudadanía **0550577894** de estado civil soltero, a quien en lo sucesivo se denominará **EL CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - **EL CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado “**DISEÑO DE UN SISTEMA DE FITORREMEDIACIÓN MEDIANTE LA ESPECIE BERRO (*Nasturtium officinale*) PARA CONTAMINANTES PRESENTES EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL CANTÓN SANTIAGO DE PILLARO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA**”, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Abril 2022 - Agosto 2022

Finalización de la carrera: Octubre 2025 – Marzo 2026

Tutor: Ing. José Luis Agreda Oña, Mgs.

Tema: “**DISEÑO DE UN SISTEMA DE FITORREMEDIACIÓN MEDIANTE LA ESPECIE BERRO (*Nasturtium officinale*) PARA CONTAMINANTES PRESENTES EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL CANTÓN SANTIAGO DE PILLARO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA**”

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **EL CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - **OBJETO DEL CONTRATO:** Por el presente contrato **EL CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b) La publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.

- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **EL CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **EL CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - LA CESIONARIA podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **EL CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 02 días del mes de febrero del 2026.

Jefferson Stalin Ayala Martínez

EL CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.

LA CESIONARIA

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **LEMA SÁNCHEZ VALENTINA ADELAIDA**, identificada con cédula de ciudadanía **1726821232** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado “**DISEÑO DE UN SISTEMA DE FITORREMEDIACIÓN MEDIANTE LA ESPECIE BERRO (*Nasturtium officinale*) PARA CONTAMINANTES PRESENTES EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL CANTÓN SANTIAGO DE PILLARO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA**”, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Abril 2022 - Agosto 2022

Finalización de la carrera: Octubre 2025 – Marzo 2026

Tutor: Ing. José Luis Agreda Oña, Mgs

Tema: “**DISEÑO DE UN SISTEMA DE FITORREMEDIACIÓN MEDIANTE LA ESPECIE BERRO (*Nasturtium officinale*) PARA CONTAMINANTES PRESENTES EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL CANTÓN SANTIAGO DE PILLARO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA**”

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - OBJETO DEL CONTRATO: Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b) La publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.

- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - LA CESIONARIA podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 02 días del mes de febrero del 2026.

Valentina Adelaida Lema Sánchez

LA CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.

LA CESIONARIA

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación con el título:

“DISEÑO DE UN SISTEMA DE FITORREMEDIACIÓN MEDIANTE LA ESPECIE BERRO (*Nasturtium officinale*) PARA CONTAMINANTES PRESENTES EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL CANTÓN SANTIAGO DE PILLARO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA”, de Ayala Martínez Jefferson Stalin y Lema Sánchez Valentina Adelaida, de la carrera de Ingeniería Ambiental, considero que el presente trabajo investigativo es merecedor del Aval de aprobación al cumplir las normas, técnicas y formatos previstos, así como también han incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la Pre defensa.

Latacunga, 02 de febrero del 2026

Ing. José Luis Agreda Oña, Mgs.
C.C: 0401332101
DOCENTE TUTOR

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprobamos el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi; y, por la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; por cuanto, los postulantes: Ayala Martínez Jefferson Stalin y Lema Sánchez Valentina Adelaida, con el título del Proyecto de Investigación: **“DISEÑO DE UN SISTEMA DE FITORREMEDIACIÓN MEDIANTE LA ESPECIE BERRO (*Nasturtium officinale*) PARA CONTAMINANTES PRESENTES EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL CANTÓN SANTIAGO DE PILLARO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA”**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 02 de febrero del 2026

Dra. Kalina Marcela Fonseca Largo, Ph.D.

C.C: 1723534457

LECTOR 1 (PRESIDENTE)

Lcdo. Manuel Patricio Clavijo Cevallos, Ph.D.

C.C: 0501444582

LECTOR 2 (MIEMBRO)

Lcdo. Jaime Rene Lema Pillalaza, Mg.

C.C: 1713759932

LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

*En el proceso de mi formación académica y personal, he aprendido que la gratitud es un principio esencial que fortalece el crecimiento integral. Por ello, deseo expresar mi profundo agradecimiento a la **Universidad Técnica de Cotopaxi**, institución que me brindó la oportunidad de formarme en un entorno de excelencia, compromiso y responsabilidad social.*

*De manera particular, extiendo mi reconocimiento a mis docentes de la **Facultad CAREN** en especial a mi tutor de tesis Ing. José Luis Agreda Oña, Mg. a mis queridos lectores Dra. Kalina Marcela Fonseca Largo, Ph.D.; Lcdo. Patricio Clavijo Cevallos, Ph.D.; y Lcdo. Jaime Rene Pillalaza, Mg.; quienes con profesionalismo, vocación y entrega compartieron sus conocimientos y experiencias, contribuyendo significativamente a mi desarrollo académico. Su orientación, apoyo constante y exigencia formativa fueron pilares fundamentales en mi proceso de profesionalización, permitiéndome adquirir no solo competencias técnicas, sino también valores éticos y humanos que guiarán mi desempeño futuro.*

Jefferson Stalin Ayala Martínez

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más profundo y sincero agradecimiento a mi familia, quienes han sido el soporte fundamental a lo largo de mi formación académica y personal. Su apoyo incondicional, comprensión y confianza han sido determinantes para alcanzar esta meta tan significativa en mi vida.

A mis padres, José Lema y Trinidad Sánchez, les agradezco por cada sacrificio realizado, por su esfuerzo constante y por el amor infinito con el que me han guiado. Su ejemplo de trabajo, responsabilidad y perseverancia ha sido la base sobre la cual he construido mis sueños y aspiraciones profesionales. Gracias por creer en mí, por motivarme en los momentos de dificultad y por enseñarme que la constancia y la dedicación son el camino hacia el éxito.

A mi hermana, Valeria Lema, le agradezco por su cariño sincero, su alegría y su apoyo permanente. Aunque es pequeña, su presencia ha sido una fuente de inspiración y fortaleza para continuar avanzando y superándome cada día.

Este logro no es únicamente personal, sino el resultado del respaldo, los valores y el amor que mi familia me ha brindado a lo largo de toda mi vida. A ustedes, mi gratitud eterna por ser mi motivación constante y el motor que impulsa cada uno de mis esfuerzos.

Valentina Adelaida Lema Sánchez

DEDICATORIA

Este logro representa no solo el cumplimiento de una meta académica, sino también el resultado del amor, la entrega y el respaldo incondicional de toda mi familia y en especial mis queridos padres. Su ejemplo de esfuerzo, honestidad y perseverancia ha sido la base sobre la cual he construido cada paso de mi formación. En los momentos de dificultad, su confianza y palabras de aliento me brindaron la fortaleza necesaria para continuar.

Con sincera gratitud y profundo respeto, les dedico este triunfo, reconociendo que su guía constante ha sido esencial en mi crecimiento personal y profesional. Aspiro a seguir honrando su apoyo con nuevos logros y a continuar compartiendo juntos cada conquista alcanzada.

Jefferson Stalin Ayala Martínez

DEDICATORIA

Este logro se lo dedico, en primer lugar, al Ing. José Luis Agreda Oña, por su valiosa orientación académica, su exigencia profesional y su acompañamiento constante durante el desarrollo de este proyecto. Su guía metodológica, sus aportes técnicos y su compromiso con la excelencia fueron fundamentales para la culminación exitosa de esta investigación. Expreso mi sincero agradecimiento por su apoyo y dedicación en cada etapa del proceso.

Con profundo amor y gratitud, dedico también este logro a mis padres, José Lema y Trinidad Sánchez, quienes han sido el soporte incondicional de mi vida personal y académica. Gracias por cada sacrificio, por cada esfuerzo realizado y por el apoyo constante que me han brindado. Todo lo que he alcanzado es el reflejo de los valores, la perseverancia y el ejemplo que me han inculcado. Este logro es también suyo, porque hicieron, hacen y harán todo lo necesario para ver a sus hijas cumplir sus sueños y alcanzar sus metas.

De manera muy especial, dedico este trabajo a mi hermana, Valeria Lema, quien, a pesar de su corta edad, ha sido una fuente de motivación y alegría en los momentos más desafiantes. Su apoyo sincero y su cariño han sido un impulso constante para continuar avanzando.

Finalmente, me dedico este logro a mí misma, por la constancia, el esfuerzo y la determinación demostrados a lo largo de este proceso académico. Por cada obstáculo superado, por cada momento de duda transformado en aprendizaje y por no rendirme ante las dificultades. Este trabajo representa el resultado de horas de dedicación, compromiso y disciplina, y simboliza el crecimiento personal y profesional alcanzado durante esta etapa.

Con respeto, gratitud y orgullo, presento esta investigación como fruto del esfuerzo conjunto y del compromiso firme con mi formación profesional.

Valentina Adelaida Lema Sánchez

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TÍTULO: “DISEÑO DE UN SISTEMA DE FITORREMEDIACIÓN MEDIANTE LA ESPECIE BERRO (*Nasturtium officinale*) PARA CONTAMINANTES PRESENTES EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL CANTÓN SANTIAGO DE PÍLLARO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA”

Autores:

Ayala Martínez Jefferson Stalin
Lema Sánchez Valentina Adelaida

RESUMEN

La presente investigación evaluó la eficiencia de fitorremediación utilizando la especie (*Nasturtium officinale*) para la remoción de tensoactivos aniónicos y demanda química de oxígeno (DQO) de aguas residuales domésticas tratadas en la (PTAR) de la comunidad de Yacupamba, Cantón Santiago de Píllaro, Tungurahua. La problemática del estudio se fundamenta en las limitaciones operativas de plantas convencionales en zonas rurales, que genera descargas con alta carga orgánica hacia cuerpos de agua superficiales, la investigación tiene un enfoque cuantitativo y cualitativo, considerando dos tratamientos: un tanque testigo sin vegetación y otro con (*Nasturtium officinale*). El sistema fue monitoreado durante un periodo de 52 días, registrándose parámetros fisicoquímicos como pH neutro (de 7,5 a 7,4), y temperatura de manera diaria que bajó apenas un grado (de 17°C a 16°C), así como análisis periódicos de DQO, tensoactivos aniónicos en laboratorio acreditado. Los resultados evidenciaron una reducción significativa en los tensoactivos aniónicos del 94.1% (mg/L) en el sistema con Berro, en la demanda química de oxígeno se observó una remoción del 58,6 % (mg/L) de los contaminantes evaluados en el sistema con berro, manteniéndose condiciones fisicoquímicas favorables para el desarrollo vegetal y la actividad microbiana asociada a la rizósfera. La disminución de la DQO y tensoactivos aniónicos demostró la capacidad depuradora del (*Nasturtium officinale*) como alternativa sostenible, de bajo costo y fácil implementación. Se concluye que la fitorremediación con berro constituye una opción viable para complementar los sistemas de tratamiento existentes en comunidades rurales, contribuyendo a la mejora de la calidad del agua para los contaminantes mencionados, la protección de los ecosistemas acuáticos y el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible relacionados con agua limpia y saneamiento.

Palabras clave: aguas residuales domésticas, demanda química de oxígeno (DQO), fitorremediación, *Nasturtium officinale* (berro), tensoactivos.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCES AND NATURAL RESOURCES

TITLE: “DESIGN OF A PHYTOREMEDIATION SYSTEM USING WATERCRESS (*Nasturtium officinale*) FOR CONTAMINANTS PRESENT IN THE WASTEWATER TREATMENT PLANT IN SANTIAGO DE PÍLLARO CANTON, TUNGURAHUA PROVINCE”.

Authors:

Ayala Martínez Jefferson Stalin
Lema Sánchez Valentina

ABSTRACT

This research evaluated the efficiency of phytoremediation using the species (*Nasturtium officinale*) for the removal of anionic surfactants and chemical oxygen demand (COD) from domestic wastewater treated at the wastewater treatment plant (WWTP) of the Yacupamba community, Santiago de Píllaro canton, Tungurahua province. The research problem is based on the operational limitations of conventional treatment plants in rural areas, which generate effluents with high organic loads discharged into surface water bodies. The study adopted a quantitative and qualitative approach, considering two treatments: a control tank without vegetation and another containing (*Nasturtium officinale*). The system was monitored over a 52-day period, during which physicochemical parameters were recorded daily, including pH, which remained neutral (from 7.5 to 7.4), and temperature, which decreased slightly (from 17 °C to 16 °C). Periodic laboratory analyses of COD and anionic surfactants were also conducted in an accredited laboratory. The results showed a significant 94.1% reduction in anionic surfactants in the system with watercress. Regarding chemical oxygen demand, a 58.6% removal of the evaluated contaminants was observed in the same system, while maintaining physicochemical conditions favorable for plant growth and microbial activity associated with the rhizosphere. The reduction of COD and anionic surfactants demonstrated the treatment capacity of (*Nasturtium officinale*) as a sustainable, low-cost, and easily implementable alternative. It is concluded that phytoremediation with watercress constitutes a viable option to complement existing treatment systems in rural communities, contributing to the improvement of water quality concerning the aforementioned contaminants, the protection of aquatic ecosystems, and compliance with the Sustainable Development Goals related to clean water and sanitation.

Keywords: domestic wastewater, chemical oxygen demand (COD), phytoremediation, *Nasturtium officinale* (watercress), surfactants.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR.....	iii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR.....	v
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	vii
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	viii
AGRADECIMIENTO	ix
AGRADECIMIENTO	x
DEDICATORIA.....	xi
DEDICATORIA.....	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	xv
ÍNDICE DE ILUSTRACION.....	xx
ÍNDICE DE ECUACIONES	xxi
ÍNDICE DE ANEXOS	xxii
1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
3. JUSTIFICACIÓN	3
3.1 Justificación científica	4
3.2 Justificación técnica.....	5
3.3 Justificación social	6
3.4 Justificación ambiental	6
4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO	7
5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	8
6. OBJETIVOS.....	12

6.1. General:.....	12
6.2. Específicos:.....	12
7. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO – TEÓRICA.....	14
7.1. La Contaminación.....	14
7.2. Análisis de los contaminantes del agua	14
7.3. Contaminantes emergentes en aguas residuales	15
7.4. Fitorremediación.....	16
7.5. Tratamiento de aguas grises mediante fitorremediación	16
7.6. Fitorremediación en aguas residuales: técnicas y perspectivas	17
7.7. Enfoques de fitorremediación para contaminantes orgánicos	17
7.8. Factores fisicoquímicos que afectan la eficiencia de la fitorremediación	19
7.9. Detección de DQO mediante técnicas espectrales.....	20
7.10. Rol de los microorganismos en la rizosfera.....	20
7.11. Sistemas comparativos de depuración natural	21
7.12. Nasturtium officinale (Berro)	22
7.13. Acumulación de níquel y su efecto sobre la biomasa, el contenido de proteínas y las enzimas antioxidantes en raíces y hojas del berro.....	23
8. HIPÓTESIS Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	24
8.1. Hipótesis	24
8.2. Pregunta de Investigación.....	24
9. ÁREA DE ESTUDIO.....	24
10. METODOLOGÍA.....	25
10.1. Técnica	25
10.2. Técnicas de campo	26
10.3. Identificación de puntos de muestreo.....	27
Ilustración 2 Tanques de la planta de tratamiento.....	27
10.4. Técnicas de laboratorio	27

10.5. Instrumentos utilizados	28
10.6. Evaluación de remoción	28
10.7. Variables de estudio	29
10.8. Diseño experimental.....	30
10.9. Análisis de datos.....	30
10.10. Toma de muestras por tanque.....	31
10.11. Seguridad y bioseguridad	31
10.12. Materiales y equipos.....	31
10.13. ANOVA	32
10.14 Fórmulas fundamentales del ANOVA	32
11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	40
11.1 Introducción al análisis de resultados	41
11.2 Análisis descriptivo de los datos.....	41
11.3 Análisis estadístico de tensoactivos aniónicos.....	41
11.3.1 Planteamiento de hipótesis	42
11.3.2 Estadísticos descriptivos	43
11.3.3 Interpretación descriptiva.....	43
11.3.4 Tabla ANOVA	43
11.3.5 Descomposición de la variabilidad	44
11.3.6 Estadístico F.....	44
11.3.7 Contraste de hipótesis.....	45
11.3.8 Magnitud del efecto (η^2).....	45
11.3.9 Interpretación técnica del proceso.....	46
11.4 Fundamento del análisis estadístico de la demanda química de oxígeno	46
11.4.1 Planteamiento de hipótesis	47
11.4.2 Estadísticos descriptivos	47
11.4.3 Descomposición de la variabilidad	48

11.4.4 Interpretación detallada de cada componente	49
11.4.5 Estadístico F	49
11.4.6 Contraste de hipótesis.....	50
11.4.7 Magnitud del efecto.....	50
11.4.8 Interpretación técnica aplicada al proceso	50
11.5 Análisis estadístico del PH y la temperatura	51
12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
12.1 Conclusiones	57
12.2 Recomendaciones	57
13. BIBLIOGRAFÍA	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Población total del Cantón de Pillaro y parroquia San Miguelito según el sexo (Censo 2022).....	7
Tabla 2 Actividades y sistema de tareas en relación con los objetivos planteados	13
Tabla 3 Límites permisibles (Desemboque a cuerpos de agua dulce LIBRO VI TULSMA) ..	38
Tabla 4 Tensoactivos aniónicos antes y después del tratamiento.....	42
Tabla 5 Estadísticos descriptivos de los grupos evaluados (n = 4)	43
Tabla 6 Análisis de varianza (ANOVA) para tensoactivos aniónicos	44
Tabla 7 Demanda química de oxígeno antes y después del tratamiento	47
Tabla 8 Análisis de varianza (ANOVA) para Demanda química de oxígeno.....	47
Tabla 9 Descomposición de la variabilidad mediante ANOVA.....	48
Tabla 10 Monitoreo diario de pH y temperatura	52
Tabla 11 Puntos de control	53
Tabla 12 Parámetros in situ	54
Tabla 13 Eficiencia de remoción de contaminantes de la planta.....	54
Tabla 14 Medidas de PTAR	55
Tabla 15 Tiempo de retención real	55

ÍNDICE DE ILUSTRACION

Ilustración1 Ubicación relativa del área de estudio.....	25
Ilustración 2 Tanques de la planta de tratamiento	27

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	Media general	32
Ecuación 2	Suma de cuadrados total (SCT)	33
Ecuación 3	Suma de cuadrados entre grupos (SCB)	33
Ecuación 4	Suma de cuadrados dentro de los grupos (SCD)	34
Ecuación 5	Relación fundamental	34
Ecuación 6	Entre grupo:	35
Ecuación 7	Dentro de grupos:	35
Ecuación 8	Total:	36
Ecuación 9	Entre grupos:	37
Ecuación 10	Dentro de grupos:	37
Ecuación 11	Estadístico F	38

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Personal técnico de trabajo GAD Municipal del Cantón Santiago de Pillaro ..	¡Error! Marcador no definido.
Marcador no definido.	
Anexo 2 Primera visita técnica.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 3 Selección de las plantas de Berro.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 4 Recolección de las Plantas de Berro.	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 5 Limpieza de los filtros.	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 6 Organización del mallado.	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 7 Implementación de la especie vegetativa.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 8 Berro implementado en el filtro.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 9 Área seleccionada.	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 10 Toma de muestras primer monitoreo ALS.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 11 Puntos de muestreo.	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 12 Monitoreo de pH y temperatura.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 13 Medición de parámetros.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 14 Segundo Monitoreo ALS.	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 15 Punto de muestreo.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 16 Observación de los parámetros obtenidos.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 17 Descripción de valores y parámetros obtenidos.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 18 Toma de muestras tercer monitoreo LABCESTTA.	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 19 Toma de muestras de las plántulas seleccionadas LABCESTTA	¡Error! Marcador no definido.
no definido.	
Anexo 20 Resultado emitidos.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 21 Certificado de la especie	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 22 Permiso de estudio, extracción e investigación de la especie.	¡Error! Marcador no definido.
definido.	
Anexo 23 Aval del Traductor	¡Error! Marcador no definido.

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título

Diseño de un sistema de fitorremediación mediante la especie berro (*Nasturtium officinale*) para contaminantes presentes en la planta de tratamiento de aguas residuales en el Cantón Santiago de Píllaro, Provincia de Tungurahua.

Lugar de ejecución.

Comunidad de Yacupamba, Parroquia San Miguelito, Cantón Santiago de Píllaro, Provincia de Tungurahua.

Institución: Universidad Técnica de Cotopaxi

Facultad: Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales.

Carrera que Auspicia: Carrera De Ingeniería Ambiental.

Nombres de equipo de investigación:

TUTOR: Ing. José Luis Agreda Oña, Mgs.

LECTOR 1: Dra. Kalina Marcela Fonseca Largo, Ph.D.

LECTOR 2: Lcdo. Patricio Clavijo Cevallos, PhD.

LECTOR 3: Lcdo. Jaime René Lema Pillalaza, Mg.

ESTUDIANTES: Jefferson Stalin Ayala Martínez y Valentina Adelaida Lema Sánchez.

Área de Conocimiento.

Ciencias Naturales, Recursos Naturales, Ambiente.

Línea de investigación:

Gestión sostenible para los recursos hídricos y tecnologías de tratamiento de aguas residuales

Línea de Vinculación:

Saneamiento sostenible y gestión ambiental comunitaria.

2. INTRODUCCIÓN

La contaminación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos constituye una de las problemáticas ambientales a nivel mundial, asociada principalmente al vertido inadecuado de aguas residuales domésticas, industriales domésticas y municipales, sabiendo que estos efluentes alteran de manera significativa las características físicas, químicas y microbiológicas del agua, provocando diversos impactos negativos sobre los ecosistemas acuáticos y a la salud pública. Entre los efectos más evidentes podemos encontrar la eutrofización, mismo proceso que es originado por el incremento de carga orgánica y de nutrientes, que favorece el crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas, reduce el oxígeno disuelto y provoca la desaparición de organismos vivos en los cuerpos de agua receptores. lo que amerita aplicar un conjunto de lineamientos y tratamientos en sus aguas para evitar de esa forma que se altere la calidad de los cuerpos de agua dulce al que se desemboca (Araque Niño et al., 2020).

En el caso del Ecuador, existen muchas comunidades en donde no se cuenta con elementos a nivel de infraestructura adecuados que garanticen un proceso de depuración, siendo los mayores contaminantes los tensoactivos aniónicos, derivados del uso cotidiano de detergentes y productos de limpieza, así como la demanda química de oxígeno (DQO), indicador esencial del nivel de contaminación orgánica, teniendo en cuenta que la presencia de estos compuestos no solo acelera la degradación de los ecosistemas acuáticos, sino también incrementa los riesgos sanitarios con una propagación acelerada de enfermedades de origen hídrico, afectando a la población que depende estas fuentes hídricas para sus actividades pecuarias, es por ello que se propone de manera inmediata temas de fitorremediación que garantizan procesos de mejoramiento de los diferentes contaminantes que se presentan en el área de influencia.

El cantón Santiago de Pillaro, ubicado en la Provincia de Tungurahua, presenta una problemática significativa relacionada a contaminación de sus cuerpos hídricos ocasionada por actividades cotidianas industriales en la producción de derivados de lácteos y actividades agrícolas y pecuarias que solo contribuyen al deterioro de los cuerpos hídricos, pese a contar con diversas plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas con un total aproximado de 27 distribuidas en cada una de sus parroquias para controlar todo el tratamiento de las aguas, se determina que varias de estas no operan de manera eficiente perjudicando así las actividades que se realizan. Bajo este contexto, es oportuno la implementación de un sistema base de fitorremediación basado en el uso de (*Nasturtium officinale*) siendo una especie con mayor potencial fitorremediador, que destaca por su rápido crecimiento y su fácil adaptación a cuerpos de agua con contaminantes, convirtiendo a esta especie acuática en una alternativa ideal en entornos rurales donde las soluciones de tratamiento depende de bajos costos de inversión y mantenimientos mínimos, lo que se plantea como una opción ecológica para todo el sector (Delvalle-Borrero et al., 2022);(Fallain et al., 2025).

3. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se justificó a partir de la problemática evidenciada en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la comunidad de Yacupamba Parroquia San Miguelito, Cantón Santiago de Pillaro, donde se identificaron limitaciones operativas en los procesos de depuración que incidían directamente en la baja eficiencia de remoción de contaminantes fisicoquímicos, particularmente en los tensoactivos anicónico y demanda química de oxígeno. A pesar de la existencia de infraestructura para el tratamiento de aguas residuales, los resultados de monitoreo previos demostraron que los efluentes tratados no siempre cumplían con los límites máximos permisibles establecidos en la normativa ambiental vigente, generando impactos negativos sobre los cuerpos de agua receptores de la subcuenca del río Pillaro (Quevedo Quispe, 2021);(Morales Corozo & Loor Vergara, 2023).

Ante esta problemática, el presente estudio se fundamenta en la necesidad de proponer alternativas sostenibles, de bajo costo y fácil implementación, que puedan complementar o sustituir los métodos convencionales de depuración, se consideró técnicamente pertinente evaluar un sistema implementación de tratamiento basado en procesos naturales, específicamente la fitorremediación mediante la especie berro (*Nasturtium officinale*), debido a su capacidad de adaptación a las condiciones climáticas, su alta tasa de crecimiento y su potencial para la remoción de contaminantes orgánicos. La implantación del sistema experimental en la PTAR Yacupamba permitió analizar, bajo condiciones controladas, el comportamiento del berro frente a variaciones de carga orgánica, caudal y parámetros fisicoquímicos como pH y temperatura, durante un periodo de operación de 52 días.

Desde el ámbito teórico, fortalecerá la falta de estudios y conocimientos dentro de la zona (Khushbu Shende et al., 2024). En lo práctico favorecerá nuevos lineamientos económicos y políticos que podrán ser implementados de manera inmediata reduciendo los costos de mantenimiento (Salamanca-Rivera et al., 2023), centrándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente con el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y el ODS 15 (vida de ecosistemas terrestres).

3.1 Justificación científica

La fitorremediación representa un área de investigación con creciente relevancia científica para el tratamiento de efluentes contaminados. Estudios previos han demostrado que especies acuáticas como *Nasturtium officinale* tienen capacidad de absorber y transformar contaminantes en sistemas experimentales, lo que sugiere un potencial biotecnológico aplicable a aguas residuales domésticas. Por ejemplo, investigaciones han evaluado la eficiencia de (*Nasturtium officinale*) en la remoción de materia orgánica de aguas residuales, proporcionando evidencia cuantitativa de su participación en procesos de tratamiento biológico (Herrera Chavez, 2021).

Además, trabajos de tesis han explorado el uso de (*Nasturtium officinale*) en la fitorremediación de aguas contaminadas por metales, evidenciando bioacumulación y rizofiltración de elementos tóxicos, lo que amplía el conocimiento sobre los mecanismos fisiológicos y ecológicos que sustentan la remoción de contaminantes en medios acuáticos.

Este proyecto se apoya en estos fundamentos para generar datos específicos sobre la remoción de tensoactivos aniónicos y demanda química de oxígeno (DQO), parámetros críticos en aguas residuales que aún carecen de suficiente evidencia científica en condiciones andinas. La generación de estos datos cerrará una brecha de conocimiento en la literatura científica local y permitirá comparar los resultados con estudios internacionales, fortaleciendo la validez de la fitorremediación como herramienta sustentable de tratamiento.

3.2 Justificación técnica

Desde una perspectiva técnica, el diseño de sistemas de fitorremediación exige evidencia metodológica que permita optimizar variables operativas como densidad vegetal, tiempo de retención hidráulica y condiciones ambientales. Estudios en sistemas piloto han evaluado la eficiencia de distintas especies acuáticas, incluidas (*Nasturtium officinale*), para la mejora de parámetros físico-químicos como demanda química de oxígeno y DBO en aguas residuales, demostrando que el uso de macrófitas acuáticas puede integrarse en procesos de tratamiento biológico con resultados medibles (Ayala Tocto et al., 2018a).

La presente investigación aprovecha este conocimiento técnico previo para generar un diseño específico adaptable a las condiciones locales del Cantón Santiago de Pillaro, considerando la topografía, condiciones climáticas y características de los efluentes. Esto es crucial para asegurar que los sistemas no solo funcionen en laboratorio, sino que puedan tener viabilidad operativa en contextos rurales. La elaboración de un diseño detallado también permitirá establecer protocolos de operación, mantenimiento y escalabilidad que podrían servir como referencia en futuras implementaciones comunitarias.

3.3 Justificación social

La contaminación del agua representa un riesgo directo para la salud humana y la calidad de vida en las comunidades rurales. Los sistemas de tratamiento basados en tecnologías naturales como la fitorremediación con (*Nasturtium officinale*) implican bajo costo de operación y requieren menor nivel de infraestructura técnica avanzada, lo que democratiza el acceso a soluciones de saneamiento. Las investigaciones que comparan distintas especies acuáticas para el tratamiento de aguas residuales han demostrado que estas plantas pueden mejorar la calidad del efluente hasta acercarse a límites permisibles, lo cual es socialmente relevante en zonas con acceso limitado a tecnologías convencionales (Ayala Tocto et al., 2018).

Implementar un sistema que utilice berro para el tratamiento de contaminantes permitirá a las comunidades rurales participar en la gestión de sus recursos hídricos. Esto favorece procesos educativos, fortalecimiento de capacidades locales y mejora de condiciones sanitarias, reduciendo la carga de enfermedades relacionadas con agua insalubre. De esta manera, la tesis no solo aporta conocimiento académico, sino que responde a demandas comunitarias reales.

3.4 Justificación ambiental

Desde el punto de vista ambiental, la restauración y protección de cuerpos de agua impactados por descargas domésticas es un imperativo para la conservación de los ecosistemas acuáticos. La fitorremediación ofrece una alternativa sustentable que utiliza procesos naturales para la eliminación o transformación de contaminantes sin necesidad de insumos químicos adicionales, reduciendo así la huella ambiental en comparación con tratamientos físico-químicos convencionales (estudios de revisión en el área de plantas acuáticas) (Mustafa & Hayder, 2021).

El uso de (*Nasturtium officinale*) se ha investigado no solo por su remoción de materia orgánica, sino también por su potencial para bioacumular contaminantes, lo que contribuye a la

recuperación de la calidad del agua y al restablecimiento de procesos ecológicos en los cuerpos receptores. Estos beneficios ambientales son críticos para la sostenibilidad de los ecosistemas fluviales del Cantón Santiago de Píllaro, promoviendo resiliencia ante la presión antropogénica y el uso intensivo de recursos hídricos.

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

Los beneficiarios de este proyecto, son los habitantes de la comunidad Yacupamba, en la Parroquia San Miguelito del Cantón Santiago de Píllaro, donde se encuentran familias que conviven con un problema que les afecta directamente su bienestar este problema es causado por el vertido de aguas residuales domésticas cargadas de contaminación orgánica. Esto deteriora el entorno y pone en riesgo la salud de todos los habitantes actuales y de generaciones jóvenes. Se calcula que aproximadamente más de cinco mil personas pueden verse directamente favorecidas con la implementación del sistema de fitorremediación que ha sido propuesto. Esto ayuda a mejorar la calidad del agua y se reduce la posibilidad de contraer enfermedades de origen hídrico. Ahora, el beneficio no se limita solo a nivel institucional para Yacupamba ya que el GAD Municipal de Píllaro y los operadores de las plantas de tratamiento de aguas residuales de la localidad también saldrán beneficiados y fortalecidos de información científica muy importante de una herramienta técnica y económica que es capaz de optimizar los procesos de depuración de zonas rurales.

Tabla 1

Población total del Cantón de Píllaro y parroquia San Miguelito según el sexo (Censo 2022)

Tabla Comparativa			
Cantón Píllaro		Parroquia San Miguelito	
Sexo	Población	Sexo	Población
Hombres	20,289	Hombres	2,439
Mujeres	22,208	Mujeres	2,707
Total	42,497	Total	5,146

Nota. Datos obtenidos del Censo de Población y Vivienda 2022.
Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2022).

Los beneficiarios directos de este proyecto son los habitantes de la Parroquia San Miguelito de Yacupamba, quienes conviven diariamente con fuentes de agua que presentan distintos niveles de contaminación. La implementación de un sistema de Fitorremediación utilizando la planta berro va a permitir mejorar la calidad del agua de manera natural, ayudando a su vez a reducir los contaminantes que llegan a afectar la salud de las personas, los cultivos y los animales.

Los beneficiarios indirectos son los habitantes del Cantón Santiago de Pillaro, ya que la recuperación de la calidad del agua en la Parroquia San Miguelito contribuye a proteger los cuerpos hídricos que continúan su curso hacia otros Cantones y Parroquias. Este proyecto promueve el uso de soluciones ambientales sostenibles y de bajo costo, que pueden replicarse en otras zonas del Cantón, fortaleciendo la conciencia ambiental y el cuidado del agua como un recurso esencial para el desarrollo y bienestar de toda la población.

5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La contaminación por descargas domésticas se ha convertido en una de las amenazas más serias para la sostenibilidad ambiental en Ecuador. Cuando las aguas residuales no reciben un tratamiento adecuado, alteran la composición natural de los ríos y quebradas, incrementando la materia orgánica, los nutrientes y diversos compuestos sintéticos (López Ocaña et al., 2023). Entre ellos destacan los tensoactivos aniónicos, sustancias derivadas del uso diario de detergentes y productos de limpieza. Estos compuestos modifican la tensión superficial del agua, dificultando la respiración de peces e invertebrados y afectando también el equilibrio del ecosistema acuático (Patel & Mansoor Ahammed, 2024);(Celi Fernández et al., 2025). En el cantón Santiago de Píllaro, este problema se ha hecho evidente con las descargas domesticas e industriales que han favorecido procesos de eutrofización en los ríos locales, reflejados en la

reducción del oxígeno disuelto y en la preocupante pérdida de biodiversidad que alguna vez caracterizó a estos ecosistemas.

Aunque el cantón cuenta con 27 plantas de tratamiento de aguas residuales, muchas de ellas enfrentan serias limitaciones operativas y estructurales que dificultan la eliminación de contaminantes críticos como la demanda química de oxígeno y los tensoactivos aniónicos. Estas deficiencias se deben en gran medida a problemáticas técnicas, falta de mantenimiento preventivo y altos costos de funcionamiento, factores que llegan a disminuir notablemente la eficiencia del sistema de saneamiento municipal. Bajo estas consecuencias, una porción significativa de las aguas residuales termina vertiéndose directamente en los ríos sin recibir el tratamiento adecuado. En esta situación, va más allá de ser un problema técnico, que traduce un impacto acumulativo sobre la calidad del agua, la salud de los ecosistemas y los servicios ambientales de los que dependen las comunidades locales para vivir, producir y sostener su entorno (Viveros Torres et al., 2021).

La presencia persistente de tensoactivos aniónicos en el agua no solo modifica sus propiedades físico-químicas, también coloca en riesgos la vida acuática y la salud humana. Estos compuestos altamente resistentes a la biodegradación, tiende a acumularse en los organismos acuáticos, causando daños fisiológicos y alteraciones en sus procesos reproductivos (Bhat et al., 2024a); (Goodson & Aziz, 2023). Por su parte, la demanda química de oxígeno, es un indicador clave de la carga orgánica presente en el agua, cuando sus valores son elevados revelan la presencia de materia orgánica no degradada que consume el oxígeno disuelto necesario para la vida (Carolina Soto Carrión & Raquelina Vera Damián, 2023). La combinación de ambos contaminantes agrava los procesos de eutrofización, acelerando la degradación de los ecosistemas y limita el aprovechamiento de las fuentes hídricas, tanto para el consumo humano como para las actividades productivas como el riego.

Respecto a la problemática, la fitorremediación se presenta como una alternativa sostenible y cercana a la naturaleza para tratar los afluentes domésticos, aprovechando la capacidad de ciertas plantas para absorber, transformar o incluso degradar contaminantes presentes en el agua. Entre ellas, el (*Nasturtium officinale*) ha demostrado una notable eficiencia en la remoción de materia orgánica y compuestos químicos en diversos estudios internacionales (Sharma et al., 2024). Aun así, su potencial como agente fitorremediador en las condiciones propias de los Andes Ecuatorianos aún no ha sido suficiente explorado. Es por esto, que el proyecto tiene como propósito la evaluación de la eficiencia de un sistema controlado, analizando su comportamiento frente a los parámetros de la demanda química de oxígeno y tensoactivos aniónicos. La meta final es generar conocimiento y soluciones prácticas que puedan aplicarse a nivel local, contribuyendo de este modo el manejo sostenible del agua en comunidades rurales.

El eje central de esta investigación se resume en la siguiente pregunta científica. ¿Qué porcentaje de tensoactivos aniónicos y demanda química de oxígeno puede remover el diseño del sistema de fitorremediación con la especie berro (*Nasturtium officinale*)? La respuesta a esta interrogante permitirá definir criterios técnicos claros para implementar sistemas alternativos de tratamiento en comunidades rurales, donde las limitaciones económicas suelen impedir el uso de tecnologías convencionales. Es que más allá del dato numérico, esta investigación busca abrir una puerta hacia soluciones accesibles, sostenibles y adaptadas a la realidad local. Igualmente, los resultados experimentales generan una base comparativa valiosa para evaluar la eficiencia del berro frente a otras plantas acuáticas utilizadas en procesos de remediación ambiental, fortaleciendo con esto el conocimiento científico y con ello aportando herramientas concretas para la gestión del agua en territorios que más lo lleguen a necesitar.

De esta manera, este trabajo busca aportar en la mitigación de la contaminación hídrica, también fortalece la gestión ambiental en el cantón Píllaro. Los resultados aspiran generar base

de un modelo piloto replicable, que combine simplicidad, bajo costo y alta eficiencia, y con ello responda a la necesidad urgente de contar con soluciones sostenibles para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Estos hallazgos servirán como un insumo técnico valioso para el diseño y el mejoramiento de futuras plantas de tratamientos locales, promoviendo así la innovación desde lo práctico y lo accesible. Por último, esta investigación conlleva a los compromisos de protección ambiental y desarrollo sostenible, con esto aporta como alternativa real para reducir el agua, con ese recurso vital sostiene tanto a las comunidades como a los ecosistemas que lo rodean.

En el Cantón Santiago de Pillaro, la contaminación hídrica derivada de descargas domésticas e industriales representa una problemática ambiental creciente que afecta directamente la calidad de los ríos locales. A pesar de contar con 27 plantas de tratamiento de aguas residuales, las limitaciones técnicas, operativas y económicas han reducido significativamente su eficiencia, permitiendo que parte de las aguas residuales se viertan sin un tratamiento adecuado. Esta situación ha favorecido procesos de eutrofización, evidenciados en la disminución del oxígeno disuelto, el aumento de la demanda química de oxígeno y la presencia persistente de tensoactivos aniónicos provenientes del uso cotidiano de detergentes. Como consecuencia, se ha producido una alteración del equilibrio ecológico y una pérdida progresiva de biodiversidad acuática, afectando no solo los ecosistemas, sino también los servicios ambientales de los que dependen las comunidades rurales.

En este contexto, el problema local trasciende la dimensión ambiental y se convierte en un desafío técnico y social: la necesidad de implementar alternativas de tratamiento que sean eficientes, de bajo costo y adaptadas a las condiciones económicas y geográficas del territorio. Las tecnologías convencionales, aunque efectivas, suelen implicar altos costos de operación y mantenimiento, lo que limita su sostenibilidad en comunidades rurales.

Frente a esta realidad, el aporte científico de la presente investigación radica en evaluar el potencial de la fitorremediación como solución viable para el tratamiento de aguas residuales domésticas en los Andes Ecuatorianos. Específicamente, se propone analizar la eficiencia del berro (*Nasturtium officinale*) en la remoción de tensoactivos aniónicos y en la reducción de la demanda química de oxígeno dentro de un sistema controlado. Aunque estudios internacionales han demostrado la capacidad de esta especie para absorber y transformar contaminantes, su comportamiento bajo las condiciones climáticas y altitudinales propias de la región aún no ha sido suficientemente documentado.

De esta manera, la investigación no solo responde a una problemática ambiental concreta del cantón Píllaro, sino que también genera conocimiento científico aplicado al contexto local. La determinación del porcentaje de remoción de contaminantes permitirá establecer criterios técnicos para el diseño de sistemas de tratamiento alternativos, aportando evidencia experimental que fortalezca la toma de decisiones en materia de saneamiento rural. Así, el estudio integra el diagnóstico del problema ambiental con una propuesta de solución basada en ciencia aplicada, contribuyendo tanto a la mitigación de la contaminación hídrica como al desarrollo de tecnologías sostenibles accesibles para las comunidades.

6. OBJETIVOS

6.1. General:

Evaluar la eficiencia del berro (*Nasturtium officinale*) en la remoción de tensoactivos aniónicos, y demanda química de oxígeno presentes en aguas residuales domésticas mediante un sistema de fitorremediación en condiciones controladas.

6.2. Específicos:

- Diseñar un sistema de fitorremediación con la especie berro (*Nasturtium officinale*) y evaluar su eficiencia mediante la caracterización de las aguas residuales

domésticas en términos de tensoactivos aniónicos y demanda química de oxígeno antes y después del tratamiento.

- Evaluar la remoción de tensoactivos aniónicos y demanda química de oxígeno mediante el uso de (*Nasturtium officinale*).
- Analizar estadísticamente las diferencias significativas entre los tratamientos aplicados mediante un análisis de varianza (ANOVA).

Tabla 2

Actividades y sistema de tareas en relación con los objetivos planteados

Objetivo específico	Metodología	Actividades	Resultados esperados
<ul style="list-style-type: none"> • Caracterizar el agua residual doméstica en términos de la demanda química de oxígeno y tensoactivos aniónicos antes y después del tratamiento con la especie berro. 	<p>La metodología tipo diagnóstica y descriptiva, y experimental. Además de las técnicas de muestreo simple y compuesto, acompañado de análisis de laboratorio.</p> <p>Instrumentos: Formulario de campo, laboratorio certificado (TULSMA).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar un primer muestreo del agua residual presente en cada uno de los tanques (testigo y con berro). • Preparar sub muestras que serán analizadas en el laboratorio (triplicados analíticos). • Enviar muestras al laboratorio previamente seleccionado para la obtención del análisis de la demanda química de oxígeno y tensoactivos. • Registrar de cada uno de los resultados para establecer una línea base. • Realizar muestreos posteriores planificados para los días 7, 14 y 21 días post aclimatación de las plantas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Obtención de la línea base de contaminantes y de las características encontradas. • Registro para el establecimiento de las comparaciones de la variación en demanda química de oxígeno y tensoactivos durante el período del ensayo. • Datos cuantitativos para la realización de los diferentes análisis y la evaluación de eficiencia del sistema.
<ul style="list-style-type: none"> • Diseñar el sistema de fitorremediación con berro (<i>Nasturtium officinale</i>) para el tratamiento de aguas residuales domésticas. 	<p>Con una metodología con nivel descriptivo y explicativo, bajo un diseño experimental, con la preparación de unidades experimentales (tanques).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Calcular el volumen • Determinar el caudal y el TRC • Definir la densidad de plantación (≈ 900 plantas/53 m³). • Aclimatar las plantas (7–10 días). • Instalar el sistema: mallas, soporte, distribución homogénea de berros. • Realizar plan de monitoreo 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de fitorremediación establecido y operativo. • Condiciones de los tanques y vegetales caracterizadas y documentadas. • Base técnica de una réplica para el modelo que funcione como una base comparativa para otras comunidades.
<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar la remoción de tensoactivos y la demanda química de oxígeno mediante el uso de (<i>Nasturtium officinale</i>). 	<p>La metodología explicativa y experimental, bajo un diseño experimental con dos tratamientos (testigo vs. con berro). Además de las mediciones de campo (pH, T°), el respaldo del análisis químico en laboratorio a los que se les realizará los respectivos análisis estadístico.</p> <p>Instrumentos:</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ejecutar el ensayo de aproximadamente 42 días con dos tanques (uno testigo y uno con plantas), con la aclimatación de las plantas. • Tomar muestras semanales las cuales serán enviadas al laboratorio. • Se determinará un registro diario de las variables pH y temperatura. • Los diferentes datos serán analizados e interpretados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se realizará la determinación del porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno y tensoactivos, que serán validados de manera estadística para evaluar la eficiencia del berro. • Todo será respaldado con un informe técnico final del desempeño del sistema.

Termómetro, tiras
de pH y pH-metro,
hoja de registro,
software
estadístico.

Realizado por: Ayala y Lema, 2026.

7. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO – TEÓRICA

7.1. La Contaminación

La contaminación ambiental representa uno de los problemas más críticos y graves en todo el mundo. En consecuencia, es necesario tomar conciencia, así como la búsqueda de alternativas para su pronta solución. Se denomina contaminación atmosférica o contaminación ambiental a la presencia de cualquier agente (físico, químico o biológico) o una combinación de varios agentes en lugares, formas y concentraciones tales que sean nocivos para la salud, para la seguridad y el bienestar de la población, o puedan ser perjudiciales para los seres vivos en general. Se puede afirmar que la contaminación del aire y del agua, el ruido, las emisiones químicas, la contaminación alimentaria, el agotamiento del ozono y las consecuencias del cambio climático seguirán siendo los principales problemas relacionados con la salud humana en el mundo y que sus efectos serán cada vez más notorios (Palacios Anzules & Moreno Castro, 2022).

7.2. Análisis de los contaminantes del agua

El control y análisis de contaminantes en el agua constituye una actividad esencial para la gestión ambiental, ya que permite identificar sustancias responsables del deterioro de la calidad hídrica. Los cuerpos de agua se ven afectados por descargas domésticas, industriales, agrícolas y otras actividades humanas que incorporan contaminantes difíciles de degradar. Entre los compuestos más comunes se encuentran tensoactivos aniónicos, fármacos, pesticidas,

edulcorantes y otros micro contaminantes emergentes. Su estudio requiere métodos analíticos especializados como cromatografía, espectrometría, mediciones UV-visible y técnicas colorimétricas certificadas. Parámetros como la DQO y la cuantificación de tensoactivos aniónicos utilizan metodologías estandarizadas según normas como APHA o TULSMA (Tammone et al., 2025).

7.3. Contaminantes emergentes en aguas residuales

Los contaminantes emergentes se han convertido en un reto dentro de la gestión de aguas residuales. Su persistencia, su toxicidad dificulta para removerlos en plantas de tratamiento convencionales los vuelven especialmente preocupantes. En este grupo entran microplásticos, fármacos, hormonas, cosméticos, compuestos industriales e incluso genes de resistencia antibiótica. Es así como lo señalan (Bhat et al., 2024b), donde gran parte de estos contaminantes llega al ambiente a través de descargas domésticas y urbanas, generando desde alteraciones en la fauna acuática hasta efectos endocrinos y riesgos potenciales para la salud humana. Su resistencia a procesos clásicos (sedimentación o la cloración), obliga a mirar hacia tecnologías alternativas que ofrezcan una eliminación más efectiva (Yuliasni et al., 2023).

Bajo este contexto, la fitorremediación aparece como una herramienta prometedora, ya que muchas plantas acuáticas son capaces de absorber o degradar estos compuestos mediante procesos enzimáticos y gracias a la colaboración natural con microorganismos asociados a sus raíces. Ahora bien, la verdad es que la complejidad química de estas sustancias exige tiempos de tratamientos más largos, densidades mayores de biomasa vegetal y un monitoreo cuidadoso (Ramírez Jiménez, 2021). Los contaminantes emergentes, no solo colocan en riesgo la integridad ecológica, también la seguridad hídrica en zonas donde los cuerpos de agua son la única fuente disponible para riego o consumo indirecto. Estudiarlos a fondo se vuelve interesante para diseñar estrategias de saneamiento rural que lleguen a proteger ecosistemas

vulnerables, como los ríos del Cantón Santiago de Píllaro. La integración de la vegetación acuática en los sistemas de depuración puede ayudar a reducir notablemente la presencia de estos compuestos, aseas fortalecería la sostenibilidad hídrica para las comunidades locales.

7.4. Fitorremediación

La fitorremediación es una tecnología ambiental que emplea plantas superiores, junto con los microorganismos que coexisten en sus raíces, para retener, transformar o degradar contaminantes presentes en el entorno. Su funcionamiento depende de procesos fisiológicos como la absorción, el transporte interno, la metabolización y el almacenamiento en tejidos (Intriago et al., 2024).

(Goren et al., 2021) argumenta que la misma puede ser aplicada como fitoextracción (para contaminantes y biomasa), fitodegradación (conversión de agentes peligrosos) rizofiltración (filtro), y fitostabilización (inmoviliza los contaminantes).

7.5. Tratamiento de aguas grises mediante fitorremediación

El uso de plantas es una actividad que se viene desarrollando con gran dinámica. Humedales construidos y sistemas de flujo continuo con especies como berro, jacinto y totora han demostrado capacidad para disminuir parámetros como DQO, DBO, nutrientes y tensoactivos aniónicos (Sánchez Araujo et al., 2021). Estas soluciones no requieren infraestructura compleja ni gastos elevados, lo que las convierte en alternativas apropiadas para comunidades rurales. La eficiencia depende de la especie seleccionada, la dinámica del flujo, el tiempo de retención y la frecuencia de cosecha de biomasa. Además de mejorar la calidad del agua, estos sistemas contribuyen a cerrar el ciclo hídrico local, permitiendo el aprovechamiento del recurso tratado para riego o infiltración. En consecuencia, la

fitorremediación se posiciona como una herramienta clave en modelos de saneamiento descentralizado y resiliente (Chakole & Gajbhiye, 2026); (Khan et al., 2022).

7.6. Fitorremediación en aguas residuales: técnicas y perspectivas

La fitorremediación basada al tratamiento de aguas residuales se ha transformado, en una técnica capaz de llamar la atención dentro de las soluciones establecidas en la naturaleza. Teniendo la habilidad para eliminar contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos. El trabajo de (Sharma et al., 2024), está concentrado en la remoción de metales, ofreciendo un marco conceptual muy útil, permitiendo extender sus principios al tratamiento de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). La DQO indica la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar los compuestos orgánicos presentes en el agua, y su disminución en sistemas de fitorremediación que puede lograrse mediante procesos de absorción, degradación microbiana y estabilización biológica (Thakur et al., 2023).

Es por ello que los humedales construidos y los sistemas de flujo superficial emplean especies vegetales que además de embellecer el entorno, impulsa la actividad microbiana, aumentan la oxigenación y favorecen la sedimentación de partículas. Por ejemplo, la estructura radicular del berro, crea pequeños refugios donde se forman biofilms responsables de descomponer la materia orgánica, casi como diminutas fabricas naturales trabajando en silencio. Con una visión hacia el futuro, esto apunta a sistemas híbridos capaces de combinar procesos físicos, químicos y biológicos para optimizar la eliminación de contaminantes persistentes (Fasanando Lescano et al., 2021); (Monroy-Licht et al., 2024).

7.7. Enfoques de fitorremediación para contaminantes orgánicos

Los contaminantes orgánicos, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), los compuestos orgánicos persistentes (COP), los tensioactivos y los derivados de detergentes, siguen siendo una de las amenazas serias para los ecosistemas acuáticos, sobre todo porque

combina toxicidad con una resistencia a degradarse. Así como señalan (Burud et al., 2021) y (Uturunco et al., 2024), la fitorremediación ofrece una vía prometedora para enfrentar este problema mediante procesos químicos que abarcan la absorción, la degradación enzimática y el almacenamiento de estos compuestos dentro de los tejidos vegetales. Las plantas acuáticas, además de su apariencia, liberan exudados radiculares que transforman el pequeño mundo que rodea sus raíces. Ese tipo de microambiente alterado despierta la actividad de microorganismos capaces de desarmar compuestos complejos, así como las plantas les dieran un empujón inicial para ponerse a trabajar (Kafle et al., 2022).

La fitodegradación ocurre cuando las enzimas vegetales actúan directamente sobre los contaminantes, rompiendo enlaces químicos y convirtiéndolos en metabólicos mucho más inofensivos. En otro aspecto, la fitoestimulación refuerza la degradación microbiana asociada a las raíces, mientras que el fitosequestro permite retener parte de estos compuestos en los tejidos radiculares, evitando que sigan dispersando. También, algunos contaminantes pueden transformarse en compuestos volátiles mediante fitovolatilización, reduciendo así su presencia en el agua (Najwa et al., 2025).

Estos mecanismos hacen que la fitorremediación sea especialmente útil en el tratamiento de aguas residuales domésticas, donde abundan detergentes, jóvenes y restos orgánicos. Sin embargo, su eficiencia no es automática, ya que dependen del tiempo de retención, de la concentración inicial de contaminantes, de la densidad de las plantas y de las condiciones físicas del sistema (Neeti et al., 2024). Es por ello que la aplicación de estos enfoques en entornos rurales, abre una ventana interesante hacia un saneamiento descentralizado, accesible y mucho más respetuoso con el entorno. Y lo más importante, representa una oportunidad real para mejorar la calidad de vida de comunidades que suelen quedar fuera de las soluciones convencionales.

7.8. Factores fisicoquímicos que afectan la eficiencia de la fitorremediación

La eficiencia de la fitorremediación depende de una buena medida de las condiciones fisicoquímicas del agua. Donde estas variables determinan hasta qué punto una planta puede absorber contaminantes, metabolizarlos y sobrevivir a ello. Entre los factores más importantes se encuentran el pH, la temperatura, la conductividad eléctrica (CE), el oxígeno disuelto (OD) y la concentración de sólidos totales disueltos (TDS). El pH, regula la solubilidad de los contaminantes y la disponibilidad de los nutrientes esenciales. Cuando los niveles se salen de rango, las raíces pueden tener dificultades para absorberlos y la actividad enzimática se desajusta. La temperatura también marca el ritmo, influyen en la velocidad metabólica tanto de las plantas como de los microorganismos que viven en la rizosfera. En temperaturas moderadas, fluyen las mismas, en cambio el frío, como es el caso el que suele sentirse en las zonas altas de los Andes ecuatorianos, puede frenar la biodegradación de manera notable (Haironizam et al., 2024).

La conductividad eléctrica funciona como una señal del contenido de sales en el agua. Un nivel demasiado alto puede afectar la osmorregulación, generando estrés hídrico y reduciendo el crecimiento de las plantas acuáticas. El oxígeno disuelto, por su parte es indispensable, la degradación aeróbica realizada por los microorganismos de la rizosfera es una pieza clave para disminuir la DQO y los TDS, aunque a veces pasan desapercibidos, incluyen partículas que pueden adherirse a las raíces y entorpecer la absorción. Un monitoreo constante de estas variables permite ajustar el diseño y la operación del sistema, algo crucial en entornos rurales donde las condiciones fisicoquímicas pueden variar de un día para otro. Analizando estos parámetros, como recomendación técnica, se considera un paso para asegurar la estabilidad y la eficacia del tratamiento con *Nasturtium officinale* (Cristóbal-Muñoz et al., 2025).

7.9. Detección de DQO mediante técnicas espectrales

La Demanda química de oxígeno (DQO), es uno de esos parámetros clave que nos dicen, a simple vista que tan cargada de materia orgánica esta una muestra de agua residual. Los métodos tradicionales, como la clásica digestión con dicromato funcionan dependiendo de insumos tóxicos y suelen requerir tiempos largos de análisis. Y es justamente esa combinación la que ha impulsado la búsqueda de alternativas más rápidas, que sean amigables con el ambiente. Según (Che et al., 2024), las técnicas espectrales están ganando terreno como opciones innovadoras que aprovechan la fotometría UV y la espectroscopia láser para obtener mediciones en tiempo real. Casi sin intervención humana. Es así, como estas tecnologías detectan como los compuestos orgánicos absorben la radiación y establecen correlaciones directas entre la absorbancia y la concentración de DQO (Polińska et al., 2021).

En consecuencia, los sensores espectrales pueden registrar variaciones instantáneas, algo especialmente valioso para ajustar el funcionamiento de sistemas de tratamiento como humedales construidos o tanques con plantas fitorremediadoras. No obstante, queda camino por recorrer para implementar estas herramientas en zonas rurales, representan una oportunidad para mejorar la gestión del agua mediante equipos portátiles y de bajo consumo energético. En relación de este proyecto, la combinación de métodos tradicionales con técnicas espectrales permite obtener una caracterización más fina del comportamiento de los contaminantes bajo la acción del barro, un detalle que marca la diferencia al evaluar la eficiencia real del sistema. La incorporación de estos equipos en laboratorios municipales, no solo agiliza la toma de decisiones en saneamiento, sino que también medir en tiempo real, como responden los tratamientos naturales. estas metodologías espectrales, no son solo una novedad tecnológica que apuntan a una tendencia clara hacia un monitoreo más rápido, preciso y sostenible de la calidad del agua.

7.10. Rol de los microorganismos en la rizosfera

Los microorganismos que habitan la rizosfera, tienen un papel decisivo en la eficiencia de los sistemas de fitorremediación. Impulsando la degradación de contaminantes, que también ayudan a que la plantas accedan a más nutrientes. La rizosfera, ese pequeño mundo que rodea directamente las raíces, funciona como un micro ecosistema vibrante donde bacterias, hongos y actinomicetos interactúan constantemente con los exudados liberados por la planta. Estos exudados, cargados de azúcares, aminoácidos y compuestos fenólicos, actúan como una invitación abierta con respecto a la estimulación del crecimiento microbiano y generan un entorno bioactivo capaz de transformar contaminantes orgánicos mediante rutas metabólicas complejas (Kristanti et al., 2023).

La degradación bacteriana de sustancias como detergentes, hidrocarburos o restos de fármacos está ampliamente documentada en sistemas acuáticos, sorprende ver lo lejos que pueden llegar estas comunidades microbianas. Especies como *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Rhodococcus* participan activamente en la descomposición de tensoactivos aniónicos, reduciendo tanto su concentración como toxicidad. Ciertos microorganismos incrementan la solubilidad de los metales pesados mediante la producción de sideróforos, lo que facilita su absorción por la planta. En ecosistemas acuáticos con alta carga orgánica, la respiración bacteriana juega un papel clave en la disminución de la demanda química de oxígeno, transformando compuestos complejos de CO₂, agua y, metabolismos simples. La relación simbiótica entre plantas y microbios explica los sistemas como los humedales construidos suelen funcionar mejor que la vegetación por si sola. Para el caso del berro, sus raíces finas y muy ramificadas ofrecen un espacio ideal para la colonización microbiana, lo que lleva a una especie especialmente eficiente para tratar aguas residuales. Comprendiendo a fondo este proceso, es fundamental para diseñar sistemas de fitorremediación comunitarios realmente eficaces (Márquez-Reyes et al., 2020).

7.11. Sistemas comparativos de depuración natural

El análisis comparativo entre los distintos sistemas de depuración natural permite entender mejor que tan eficiente resulta la fitorremediación con (*Nasturtium officinale*) frente a otras alternativas tecnológicas de bajo costo. Entre los sistemas más utilizados destacan los humedales construidos, los biofiltros, los lagunajes facultativos y los sistemas de raíces flotantes. Los humedales construidos, emplean plantas emergentes, por ejemplo, la Typha o Phragmites, funcionan gracias al flujo lento del agua través de un sustrato que actúa como un filtro tanto físico como biológico. Los biofiltros, en cambio dependen de capas de grava, arena o materia orgánica para retener contaminantes, mientras que los lagunajes facultativos combinan la acción de algas, bacterias y la energía solar para oxidar compuestos orgánicos (Sharma et al., 2024).

Para finalizar, los sistemas de raíces flotantes utilizan estructuras artificiales donde las plantas crecen sin sustrato, dejando sus raíces suspendidas en el agua y creando un entorno muy dinámico. En este último tipo de sistemas, el berro ha demostrado un rendimiento especialmente alto gracias a su movilidad radicular, su rapidez de absorción y su tolerancia a variaciones bruscas en la carga orgánica. La comparación general muestra que la fitorremediación con berro ofrece ventajas claras, siendo simple de instalar, requiere poco mantenimiento y sus costos operativos son mínimos. En cuanto a su cuidado es accesible para comunidades rurales, y la cosecha periódica de su biomasa permite recuperar parte de los nutrientes acumulados. Conocer estas alternativas, no solo es un ejercicio técnico, siendo esto clave para argumentar por qué el berro se presenta como una especie óptima para el tratamiento de aguas residuales domésticas en el cantón Santiago de Pillaro (Tobing, 2025).

7.12. *Nasturtium officinale* (Berro)

El (*Nasturtium officinale*), conocido como berro, es una planta acuática perteneciente a la familia Brassicaceae y ampliamente distribuida en cursos de agua dulce. Su presencia en estos ecosistemas se debe a su rápida expansión, escasos requerimientos nutrientes y notable

capacidad de adaptarse a diversos rangos fisicoquímicos. El sistema radicular del berro es fino, muy ramificado y con un elevado contacto con el agua, lo que favorece la captación eficiente de sustancias orgánicas, inorgánicas y nutrientes. Investigaciones como las recopiladas destacan su resistencia frente a cambios ambientales y su habilidad para bioacumular metales y otros compuestos, características esenciales para su uso en sistemas naturales de depuración (Celi Fernández et al., 2025).

Su metabolismo intensivo y la alta concentración de clorofila facilitan la transformación de contaminantes complejos, mientras que su rápido crecimiento permite renovar la biomasa con frecuencia y mantener procesos continuos de remoción. Además, contribuye a mejorar la oxigenación y claridad del agua, generando un entorno favorable para microorganismos benéficos que viven en la rizósfera y potencian la biorremediación.

7.13. Acumulación de níquel y su efecto sobre la biomasa, el contenido de proteínas y las enzimas antioxidantes en raíces y hojas del berro

La acumulación y translocación de níquel, y se examinó la influencia del níquel sobre biomasa, contenido de proteínas y antioxidantes enzimáticos tanto para raíces como para hojas. Se determinó que (*Nasturtium officinale*) podía acumular cantidades apreciables de Ni tanto en raíces como en hojas. El níquel se acumulaba especialmente en las raíces de las plantas. La biomasa aumentó a bajas concentraciones de níquel, pero no se encontró cierto cambio medible a altas concentraciones. Bajo condiciones de estrés, las enzimas antioxidantes estaban reguladas al alza en comparación con el control. Se observó un aumento del contenido de proteínas y de las actividades enzimáticas en condiciones de exposición moderada, seguido de un descenso tanto en raíces como en hojas. Las actividades enzimáticas máximas se observaron en diferentes condiciones de exposición. Nuestros resultados mostraron que (*Nasturtium officinale*) tenía la capacidad de superar el estrés inducido por el níquel, especialmente en condiciones moderadas de exposición al níquel. Por lo tanto, (*Nasturtium officinale*) puede

utilizarse como fitorremediador en ecosistemas acuáticos moderadamente contaminados (López Yupanqui et al., 2022).

8. HIPÓTESIS Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

8.1. Hipótesis

La especie berro (*Nasturtium officinale*) reduce de manera significativamente las concentraciones de los diferentes contaminantes físico-químicos que están presentes en las aguas residuales tratadas de la planta de Yacupamba.

8.2. Pregunta de Investigación

¿Qué porcentaje de tenso activo aniónicos y demanda química de oxígeno puede remover el diseño del sistema de fitorremediación con la especie berro (*Nasturtium officinale*)?

9. ÁREA DE ESTUDIO

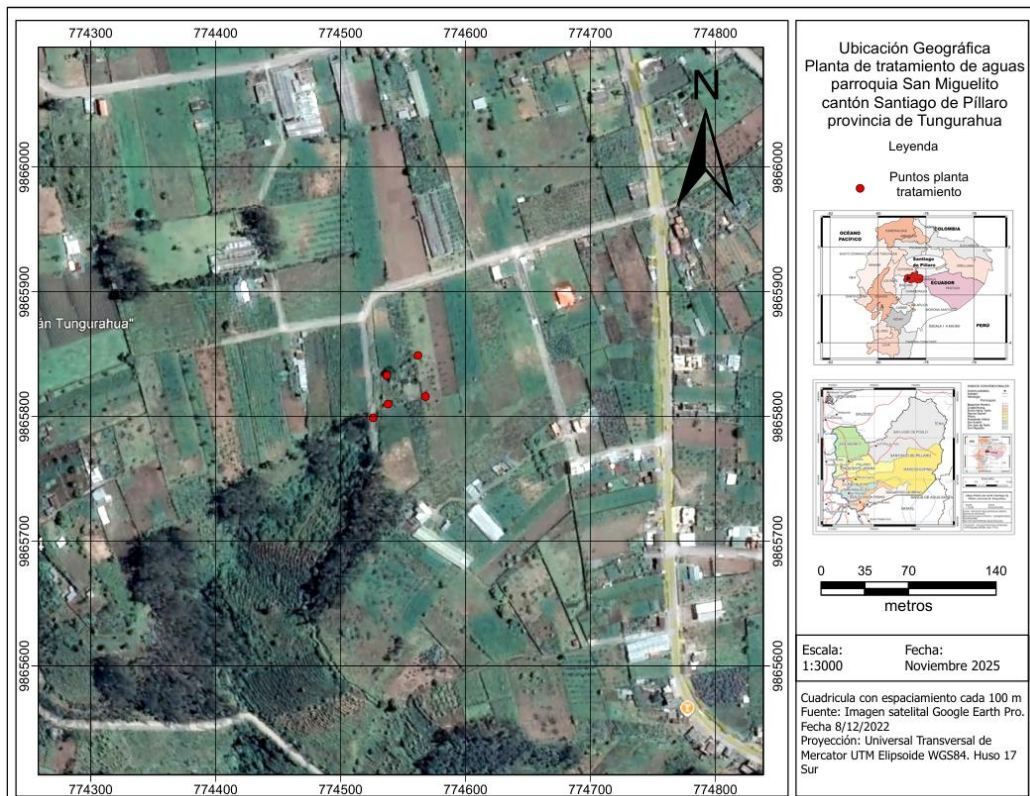
La planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del cantón Santiago de Píllaro, está ubicada dentro de la parroquia San Miguelito, que pertenece a la comunidad de Yacupamba, zona centro-oriental de la provincia de Tungurahua, Ecuador, formando parte de la cuenca del río Píllaro, que corresponde al sistema hidrográfico del río Ambato, entre las coordenadas (E-774300-774800 y N-9865600-9866000, Figura 1). Comprendiendo un aproximado de 2 ha, con una zona de captación de afluentes, con tanques de tratamiento y su correspondiente zona de descarga y canalización que favorecen la instalación de un sistema de fitorremediación.

Con una altitud promedio de 2600 a 2750 msnm, con clima templado alto andino que es característico de la Sierra Central del Ecuador, con una temperatura promedio de 13°C, humedad relativa de 80% y una precipitación de 850 mm. Los suelos se caracterizan por estar entre los órdenes de Andisoles e Inceptisoles con pH entre 5.5 y 6.5. La vegetación propia del

páramo, con gramíneas (*Calamagrostis intermedia*), matorrales (*Baccharis latifolia*), hidrófilas (*Nasturtium officinale*). La hidrología perteneciente a la subcuenca del río Píllaro, cuyo caudal puede variar entre los 5 y 12 L/s, siendo sus parámetros típicos, la turbidez, presencia de algunos nutrientes N y P, incremento de la demanda biológica de oxígeno y demanda química de oxígeno, además de un conjunto de trazas de metales.

Ilustración 1

Ubicación relativa del área de estudio



Nota. Elaborado por Ayala y Lema (2026) a partir de ARCGIS

10. METODOLOGÍA

De acuerdo al primero objetivo de diseñar un sistema de fitorremediación utilizando la especie (*Nasturtium officinale*) y evaluar su eficiencia en la remoción de tensoactivos aniónicos y demanda química de oxígeno, se inició en el trabajo de planificación de las actividades de campo, laboratorio, asegurando que cada una se cumpliera con criterios técnicos y normativos vigentes.

10.1. Técnica

la técnica aplicada consistió en colocar una malla resistente alrededor del filtro y fijar con alambre galvanizado y puntos de anclaje, asegurando que permaneciera estable frente al caudal de ingreso. Su función principal es evitar el desplazamiento o agrupamiento del berro, ya que al tratarse de una especie semiacuática con flotabilidad parcial, puede concentrarse en un solo sector del tanque si no existe un sistema de contención.

10.2. Técnicas de campo

En primera instancia, realizamos el reconocimiento del lugar de la extracción de la planta, la cual se ve ubicado en Huapante Grande en el Cantón Santiago de Pillaro. La recolección de las plantas se basó en las dimensiones del tanque designado para el berro con un diámetro de 5.36 m, y con un volumen de 53 m^3 que corresponde al del filtro de la planta de tratamiento de agua residuales de Yacupamba. Con esos datos pudimos basarnos en el número total de plantas (900 plantas de berro) para tener una buena remoción de los contaminantes ya mencionados.

Posteriormente se ejecutó la instalación del sistema experimental, colocando las 900 plantas recolectadas, distribuyéndolas homogéneamente para evitar acumulaciones que pudieran alterar la eficiencia hidráulica. Supervisando constantemente el caudal de ingreso para evitar el arrastre de las plantas y garantizar un tiempo de retención adecuado.

Se consideró 4 puntos clave de muestreo, mismos que se definieron como: (A1, A2, A3 y A4), cuyas muestras fueron posteriormente analizadas en un laboratorio acreditado con el único fin de obtener datos verídicos.

A1.- Fosa Séptica

A2.- Filtro con berro

A3.- Salida del efluente del filtro con berro

A4.- Filtro testigo (punto blanco)

10.3. Identificación de puntos de muestreo

Ilustración

2

Tanques de la planta de tratamiento



Nota: Tanques circulares de la planta de tratamiento de aguas residuales comunitaria con implementación de fitorremediación mediante la siembra de berro (*Nasturtium officinale*) en el tanque anaerobio. Elaboración por Ayala y Lema, 2026.

10.4. Técnicas de laboratorio

Durante los 52 días de experimentación, realizamos monitoreos diarios in situ, midiendo pH y temperatura con una sonda multiparamétrica previamente calibrada. Paralelamente, se llevó un registro detallado de características organolépticas como color, olor, presencia de espuma y turbidez, así como el estado fisiológico de las plantas evaluando crecimiento radicular, coloración, foliar y signos de estrés.

Se toma en cuenta el procedimiento de muestreo por (Abad, 2023) En cada punto se recolectó un volumen de 1 litro, obteniéndose un total de 3 litros en dicho filtro. En el filtro

testigo sin especie vegetativa se tomó una sola muestra de 1 litro que sirvió para futuras comparaciones de datos. Las muestras fueron analizadas en Laboratorios acreditados por la (SAE) mediante triplicados analíticos, con el propósito de asegurar la precisión y confiabilidad de los resultados.

En el laboratorio, se realizó la determinación de la demanda química de oxígeno mediante el método de reflujo cerrado con digestión y posterior lectura colorimétrica en espectrofotómetro. Para la cuantificación de tensoactivos aniónicos, se aplicó el método MBAS (sustancias activas al azul de metileno), que permitió medir su concentración a través de análisis espectrofotómetro.

Cada muestra fue analizada por triplicado con el fin de garantizar precisión y reproducibilidad. Los resultados obtenidos fueron registrados sistemáticamente en tablas **comparativas antes y después del tratamiento**.

10.5. Instrumentos utilizados

En campo utilizamos una sonda multiparamétrica, termómetro portátil, frascos ámbar de vidrio, botellas plásticas estériles, etiquetas indelebles, cámara fotográfica y equipo de protección personal (guantes, gafas y botas)

En laboratorio se emplearon reactor de digestión para la demanda química de oxígeno, espectrofotómetro calibrado, material volumétrico certificado y balanza analítica de precisión.

10.6. Evaluación de remoción

Para dar cumplimiento al segundo objetivo, la investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental comparativo y longitudinal, tomando como base el diseño previamente establecido. La evaluación de la remoción se realizó mediante la implementación de dicho sistema de fitorremediación para de esta manera evaluar la eficiencia.

Se establecieron cuatro puntos estratégicos: Punto 1 (A1 fosa séptica); Punto 2 (filtro con berro); Punto 3 (A3 salida del efluente con berro) y Punto 4 (A4 filtro testigo). Esta distribución

permitió evaluar la concentración inicial de los contaminantes y compararla con la concentración posterior al tratamiento biológico, así como verificar el comportamiento del sistema sin intervención vegetal.

El sistema experimental tuvo una duración de 52 días, los cuales se distribuyeron en: día 1 adaptación de la planta en bioenraizante, día 22 tiempo de adaptación, día 32 primer muestreo por el laboratorio (ALS), día 42 segundo muestreo por el laboratorio (LABCESTTA), día 52 tercer muestreo (ALS). Previo a la evaluación, se ejecutó un proceso de aclimatación de la especie vegetal durante 21 días, asegurando su adaptación a las condiciones hidráulicas y fisicoquímicas del agua residual. Se seleccionaron plantas en buen estado fitosanitario y se fortaleció su sistema radicular (25-30 cm) mediante la aplicación previa de bioenraizantes comerciales. Posteriormente, se implementó el sistema colocando aproximadamente 900 plantas dentro del filtro experimental.

10.7. Variables de estudio

Basado en estudios investigativos como (Abad, 2023) determina la eficiencia de la fitorremediación en tiempos determinados con la especie ya mencionada del parámetro en calidad del agua de la demanda química de oxígeno y el contaminante químico presente en aguas residuales denominado tensoactivo aniónicos mismo que se determina de esta manera por su color, turbidez y generación de espuma, de la misma manera se tomó en cuenta varios parámetros de control principalmente pH, temperatura y su caudal.

- **Variable independiente:** proceso de fitorremediación mediante (*Nasturtium officinale*).

- **Variables dependientes:**

- Demanda química de oxígeno
- Tensoactivos aniónicos
- Tiempo

Parámetros de control y monitoreo diario:

- pH (medido con tiras indicadoras y sonda multiparamétrica)
- Temperatura del agua (°C)

Parámetros cualitativos:

- Características organolépticas: color, olor, presencia de espuma, turbidez, algas
- Estado fisiológico de las plantas: coloración foliar, crecimiento, desarrollo radicular, presencia de plagas o enfermedades

VARIABLES OPERATIVAS:

- Caudal (Q), tiempo de retención hidráulica (TRH), densidad vegetal.

10.8. Diseño experimental

En los sistemas de tratamiento de aguas residuales, la eficiencia de la purificación de agua tratadas no cumple con la normativa ambiental vigente por varios contaminantes presentes como tensoactivos aniónicos y demanda química de oxígeno, lo que motiva a realizar el presente diseño experimental.

Se plantea la hipótesis de la implementación de la especie acuática vegetativa berro (*Nasturtium officinale*) que mediante investigación bibliográfica muestra un gran porcentaje de remoción para disminuir en gran cantidad dichos contaminantes presentes en las aguas residuales con el fin de cumplir con los límites permisibles para desembocar en cuerpos de agua dulce

10.9. Análisis de datos

Los datos obtenidos fueron organizados sistemáticamente en tablas y sometidos a un análisis de estadística descriptiva. Asimismo, los resultados fueron contrastados con los límites máximos permisibles establecidos en el Acuerdo Ministerial 097 A Libro VI (TULSMA), Tabla 9, con el fin de evaluar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente que nos menciona

los límites permisibles para desembocar las aguas tratadas en las plantas de tratamiento de aguas residuales a un cuerpo receptor de agua dulce.

10.10. Toma de muestras por tanque

Se toma en cuenta el procedimiento de muestreo por (Abad, 2023), en cada evento de monitoreo y muestreo se definieron puntos clave para el filtro con la especie vegetativa: entrada, zona central y salida. En cada punto se recolectó un volumen de 1 litro, obteniéndose un total de 3 litros en dicho filtro. En el filtro testigo sin especie vegetativa se tomó una sola muestra de 1 litro que sirvió para futuras comparaciones de datos. Las muestras fueron analizadas en Laboratorios acreditados por la (SAE) mediante triplicados analíticos, con el propósito de asegurar la precisión y confiabilidad de los resultados.

10.11. Seguridad y bioseguridad

A lo largo de todo el proceso experimental se aplicaron medidas de seguridad y bioseguridad, entre ellas el uso obligatorio de guantes, gafas y botas. Se evitó el contacto directo con muestras de agua no tratadas y se garantizó una adecuada disposición de los residuos generados. Todos los materiales empleados y los procedimientos realizados fueron debidamente registrados.

10.12. Materiales y equipos

Para el desarrollo del estudio se utilizaron botellas de vidrio ámbar de 1 L, botellas de plástico con capacidad de 1 L, frascos de muestras de orina debidamente esterilizados para no alterar la composición de los parámetros del agua residual doméstica y etiquetadas, etiquetas y marcadores indelebles, sonda multiparamétrica para la medición de pH y temperatura, termómetro portátil, equipos de protección personal (guantes, gafas y botas), libretas de registro de campo, cámara fotográfica y acceso a un laboratorio certificado para el análisis de demanda química de oxígeno y tensoactivos aniónicos.

10.13. ANOVA

Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor bajo un diseño completamente al azar con el propósito de evaluar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los cuatro puntos de muestreo establecidos en el sistema experimental (P1 fosa séptica) (P2 filtro con berro) (P3 salida del efluente del filtro con berro) (P4 filtro testigo (punto blanco)). Cada punto fue analizado con tres repeticiones independientes, lo que permitió estimar la variabilidad intra-grupo y garantizar la confiabilidad del análisis estadístico. El ANOVA permitió contrastar la hipótesis nula (H_0), que establece la igualdad de medias entre los tratamientos, frente a la hipótesis alternativa (H_1), que indica la presencia de al menos una diferencia significativa entre los puntos evaluados. Para la toma de decisiones se adoptó un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, considerando como criterio de rechazo de H_0 un valor de p inferior a dicho umbral. En los casos donde se detectaron diferencias significativas, se procedió a la aplicación de pruebas post hoc para identificar específicamente entre qué tratamientos se presentaron dichas diferencias, permitiendo así determinar el efecto del sistema de fitorremediación sobre los parámetros analizados.

10.14 Fórmulas fundamentales del ANOVA

Ecuación 1

Media general

La fórmula que se muestra corresponde a la media general (\bar{X}) utilizada en el análisis de varianza (ANOVA). Esta expresión permite calcular el promedio de todas las observaciones incluidas en el estudio, sin distinguir entre grupos.

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}$$

(1)

Esta media representa el promedio global de los valores medidos (por ejemplo, demanda química de oxígeno y tensoactivos aniónicos) considerando todos los puntos de muestreo y sus repeticiones.

Donde:

- X_{ij} : observación j del grupo i
- k : número de grupos
- n_i : tamaño del grupo i
- N : total de observaciones

Ecuación 2

Suma de cuadrados total (SCT)

La Suma de cuadrados total (SCT) mide la variabilidad total de todos los datos respecto a la media general.

Indica cuánto se dispersan todas las observaciones alrededor del promedio global.

representa la variabilidad total de los valores de demanda química de oxígeno y tensoactivos aniónicos considerando todos los puntos y repeticiones.

$$SCT = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X})^2$$

(2)

Ecuación 3

Suma de cuadrados entre grupos (SCB)

La suma de cuadrados entre grupos (SCB) mide la variabilidad explicada por el factor de estudio.

El factor es el punto de muestreo (antes y después del tratamiento).

Esta ecuación cuantifica cuánto se alejan las medias de cada grupo respecto a la media general. Si el sistema de fitorremediación es efectivo, la diferencia entre el punto inicial y los posteriores aumentará, incrementando la SCB.

$$SCB = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2$$

(3)

Ecuación 4

Suma de cuadrados dentro de los grupos (SCD)

La suma de cuadrados dentro de los grupos (SCD) mide la variabilidad interna de cada grupo.

Indica cuánto se dispersan las repeticiones respecto a su propia media de grupo.

Representa el error experimental.

Si las repeticiones son consistentes y el sistema es estable, la SCD será baja.

$$SCD = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2$$

(4)

Donde:

- Cada grupo = condición experimental
- Antes del berro
- Con berro (medición 1)
- Con berro (medición 2)

La SCD indica si los valores en P1, P2, P3 y P4 son similares entre sí dentro de cada condición.

Ecuación 5

Relación fundamental

Esta descomposición es la base para calcular el estadístico F.

Permite determinar si las diferencias en demanda química de oxígeno o tensoactivo anicónicos se deben realmente a la acción del berro o solo a fluctuaciones naturales del agua.

$$SCT = SCB + SCD$$

(5)

Donde:

- **SCB** representa el efecto del sistema de fitorremediación con (*Nasturtium officinale*).
- **SCD** representa la variabilidad entre las repeticiones dentro de cada punto.
- **SCT** representa la variabilidad total de los datos medidos (demanda química de oxígeno y tensoactivos aniónico).

Ecuación 6

Entre grupo:

Corresponde a los grados de libertad asociados a la variabilidad entre grupos.

Representa el número de comparaciones independientes entre los promedios de los grupos.

$$gl_B = 4 - 1$$

(6)

Donde:

- gl_B : Grados de libertad entre grupos. (se tiene 4 puntos de muestreo)
- k : Número de grupos o tratamientos (4).

Ecuación 7

Dentro de grupos:

Corresponde a los grados de libertad del error o variabilidad dentro de los grupos.

Representa cuántos valores pueden variar libremente dentro de los grupos después de considerar las medias de cada uno.

$$gl_D = N - k$$

(7)

- gl_D : Grados de libertad dentro de grupos.
- N : Número total de observaciones.
- k : Número de grupos.

Reemplazando

- 4 grupos
- 3 repeticiones por grupo
- Total, de observaciones:

$$N = 4 \times 3 = 12$$

Entonces:

$$gl_D = 12 - 4 = 8$$

(8)

Estos grados de libertad representan la variabilidad experimental.

Ecuación 8

Total:

Representa la variabilidad total de todos los datos con respecto a la media general.

$$gl_T = N - 1$$

(9)

Donde:

- gl_T = Grados de libertad totales
- N = Número total de observaciones (suma de todos los datos de todos los grupos)
- **1** = Restricción asociada al cálculo de la media general

Ecuación 9*Entre grupos:*

Mide la variabilidad debida al efecto del tratamiento o factor que se está evaluando.

$$CMB = \frac{SCB}{gl_B}$$

(10)

Donde:

- CMB = Cuadrado medio entre grupos
- SCB = Suma de cuadrados entre grupos
- gl_B = Grados de libertad entre grupos

Recordando que:

$$gl_B = k - 1$$

(11)

donde:

k = Número de grupos o tratamientos

Ecuación 10*Dentro de grupos:*

Representa la variabilidad interna o el error experimental.

$$CMD = \frac{SCD}{gl_D}$$

(12)

Donde:

- CMD = Cuadrado medio dentro de grupos
- SCD = Suma de cuadrados dentro de grupos

- g_{ID} = Grados de libertad dentro de grupos

Recordando que:

$$g_{ID} = N - k \quad (13)$$

donde:

- N = Número total de observaciones
- k = Número de grupos

Ecuación 11

Estadístico F

El estadístico F es el valor calculado en el análisis de varianza (ANOVA) que permite determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los grupos evaluados.

$$F = \frac{CMB}{CMD} \quad (14)$$

Donde:

- F = Estadístico de prueba F
- CMB = Cuadrado medio entre grupos
- CMD = Cuadrado medio dentro de grupos

Tabla 3

Límites permisibles (Desemboque a cuerpos de agua dulce LIBRO VI TULSMA)

Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
----------------	--------	--------------------------

Aceites y Grasas	Sust. solubles	enmg/l	30,0
	hexano		
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	2,0
Boro total	B	mg/l	2,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN ⁻	mg/l	0,1
Cinc	Zn	mg/l	5,0
Cloro activo	Cl	mg/l	0,5
Cloroformo	Ext. carbón	carbónmg/l	0,1
	cloroformo ECC		
Cloruros	Cl ⁻	mg/l	1000
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cobalto	Co	mg/l	0,5
Coliformes fecales	NMP	NMP/100 ml	2000
Color real	Color real	unidades de color	Inapreciable en dilución 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,2
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO ₅	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	200
Estaño	Sn	mg/l	5,0
Fluoruros	F	mg/l	5,0
Fósforo total	P	mg/l	10,0
Hierro total	Fe	mg/l	10,0

Hidrocarburos	TPH	mg/l	20,0
Totales de Petróleo			
Manganeso total	Mn	mg/l	2,0
Materia flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0,005
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitrógeno amoniacal	N	mg/l	30,0
Nitrógeno Kjeldahl	totalN	mg/l	50,0
Compuestos organoclorados	Organoclorados totales	mg/l	0,05
Compuestos organofosforados	Organofosforados totales	mg/l	0,1
Plata	Ag	mg/l	0,1
Plomo	Pb	mg/l	0,2
Potencial hidrógeno	depH		6 - 9
Selenio	Se	mg/l	0,1
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	130
Sólidos totales	ST	mg/l	1600
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	mg/l	1000
Sulfuros	S ⁻²	mg/l	0,5
Temperatura	°C		Condición natural ± 3
Tensoactivos	Sustancias Activas al azul de metileno	mg/l	0,5
Tetracloruro de carbono	de Tetracloruro de carbono	demg/l	1,0

Nota: Datos obtenidos del Registro Oficial N° 097A LIBRO VL TULSMA

11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

11.1 Introducción al análisis de resultados

El presente capítulo expone de manera ordenada y técnica los resultados obtenidos durante la evaluación del sistema de fitorremediación mediante berro (*Nasturtium officinale*) para la remoción de contaminantes en aguas residuales. El análisis se realizó a partir de datos experimentales correspondientes a los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos evaluados antes y después de la aplicación del tratamiento. Para determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las condiciones de estudio, se empleó el análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, indicando la remoción parcial.

11.2 Análisis descriptivo de los datos

Previo a la aplicación de las pruebas inferenciales, se efectuó un análisis descriptivo de los datos obtenidos. Este análisis permitió caracterizar el comportamiento general de los parámetros evaluados mediante el cálculo de estadísticos como la media, desviación estándar, valores mínimos y máximos.

En investigaciones de (Herrera Chavez, 2021), los resultados evidencian una tendencia general a la disminución de las concentraciones de los contaminantes analizados en las unidades con presencia de (*Nasturtium officinale*), en comparación con las unidades de control. Esta reducción preliminar sugiere un efecto positivo del proceso de fitorremediación, el cual es analizado estadísticamente en los apartados siguientes.

11.3 Análisis estadístico de tensoactivos aniónicos

El objetivo del presente análisis es determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones de tensoactivos aniónicos entre los distintos momentos del

tratamiento evaluado (antes, después 1 y después 2), utilizando un análisis de varianza (ANOVA) de un factor.

Este método permite comparar simultáneamente las medias de tres grupos independientes y establecer si las diferencias observadas son atribuibles al efecto del tratamiento o a la variabilidad aleatoria.

Tabla 4

Tensoactivos aniónicos antes y después del tratamiento

Tensoactivos aniónicos			
Puntos	Antes	Después	Después
P1	12,30	0,64	0,61
P2	10,8	1,11	1,00
P3	9,50	0,11	0,21
P4	1,20	0,65	0,71

Nota. Datos experimentales de concentración de tensoactivos aniónicos medidos antes y después del tratamiento aplicado.

11.3.1 Planteamiento de hipótesis

Se formularon las siguientes hipótesis:

- **Hipótesis nula (H_0):**

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

(No existen diferencias significativas entre las medias de concentración).

- **Hipótesis alternativa (H_1):**

Al menos una de las medias es diferente.

Nivel de significancia adoptado:

$$\alpha = 0,05$$

11.3.2 Estadísticos descriptivos

Cada grupo estuvo conformado por 4 observaciones ($n = 4$).

Tabla 5

Estadísticos descriptivos de los grupos evaluados ($n = 4$)

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Antes	4	42,6	10,65	1,497
Después	4	2,51	0,6275	0,167
Después	4	2,53	0,6325	0,107

Nota. Elaborado por Ayala y Lema, a partir de los datos obtenidos en el análisis estadístico mediante ANOVA.

11.3.3 Interpretación descriptiva

Comparación de medias

- La concentración promedio inicial (Antes) fue 10,65.
- Luego del tratamiento, los valores disminuyen drásticamente a:
- 0,6275 (Después 1)
- 0,6325 (Después 2)

Esto representa una reducción superior al 94 % respecto a la condición inicial.

Análisis de variabilidad

- La mayor varianza corresponde al grupo antes (1,497).
- Los valores posteriores presentan menor dispersión (0,167 y 0,107), lo que indica estabilidad del sistema tras el tratamiento.
- Después 2 muestra la menor variabilidad, sugiriendo mayor homogeneidad en las concentraciones finales.

11.3.4 Tabla ANOVA

Tabla 6*Análisis de varianza (ANOVA) para tensoactivos aniónicos*

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	126,774	2	133,887	226,8	< 0,0001	4,26
Dentro de los grupos	5,311	9	0,59			
Total	273,086	11				

Nota. ANOVA de un factor aplicado a las concentraciones de tensoactivos aniónicos. gl = grados de libertad; p = probabilidad asociada al estadístico F.

11.3.5 Descomposición de la variabilidad

El modelo ANOVA divide la variabilidad total en:

a) Variabilidad entre grupos

La suma de cuadrados entre grupos (126,774) representa la variabilidad explicada por el efecto del tratamiento.

b) Variabilidad dentro de los grupos

La suma de cuadrados dentro de los grupos (5,311) corresponde al error experimental o variabilidad residual.

Se observa que la mayor parte de la variabilidad proviene de las diferencias entre tratamientos.

11.3.6 Estadístico F

$$F = \frac{6,3387}{0,59} = 226,8$$

Este valor es extremadamente alto, lo que indica que la variabilidad entre grupos es aproximadamente 227 veces mayor que la variabilidad interna.

Si no existieran diferencias reales, F sería cercano a 1.

11.3.7 Contraste de hipótesis

Comparación con F crítico

- F calculado = 226,8
- F crítico = 4,26

Dado que:

$$226,8 \gg 4,26$$

Se rechaza la hipótesis nula.

Interpretación del p-valor

$$p < 0,0001$$

Esto significa que la probabilidad de que las diferencias observadas se deban al azar es menor al 0,01 %.

Por lo tanto:

$$p < 0,05$$

Se rechaza H_0 con un nivel de confianza superior al 99,99 %.

11.3.8 Magnitud del efecto (η^2)

$$n^2 = \frac{126,774}{273,086} \approx 0,464$$

Esto indica que aproximadamente 46,4 % de la variabilidad total es explicada por el tratamiento aplicado.

Sin embargo, considerando el valor extremadamente alto del estadístico F y la diferencia marcada entre medias, el efecto práctico del tratamiento es considerable.

11.3.9 Interpretación técnica del proceso

Desde el punto de vista de ingeniería ambiental:

- Se evidencia una reducción drástica y estadísticamente significativa en la concentración de tensoactivos aniónicos.
- La baja varianza en los grupos después indica estabilidad operacional.
- No se observan diferencias relevantes entre después 1 y después 2, lo que sugiere que la mayor remoción ocurre en la primera etapa del tratamiento.

El tratamiento evaluado demuestra ser altamente eficiente en la remoción de tensoactivos aniónicos.

11.4 Fundamento del análisis estadístico de la demanda química de oxígeno

Con el objetivo de determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en los valores de demanda química de oxígeno entre los distintos momentos de evaluación del tratamiento (antes, después 1 y después 2), se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor.

El ANOVA es una técnica inferencial paramétrica que permite comparar simultáneamente tres o más medias poblacionales y evaluar si las diferencias observadas entre ellas pueden atribuirse al efecto del tratamiento o simplemente a la variabilidad aleatoria inherente al muestreo.

Tabla 7*Demanda química de oxígeno antes y después del tratamiento*

DQO			
Puntos	Antes	Después	Después
P1	55,53	198,79	67,43
P2	118,29	1166,8	54,22
P3	120	267,93	90,93
P4	50,3	64,22	55,22

Nota. Datos experimentales de concentración de la demanda química de oxígeno medidos antes y después del tratamiento aplicado.

11.4.1 Planteamiento de hipótesis

Se formularon las siguientes hipótesis estadísticas:

- **Hipótesis nula (H_0):**

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

(No existen diferencias significativas entre las medias de demanda química de oxígeno de los tres grupos).

- **Hipótesis alternativa (H_1):**

Al menos una de las medias es diferente.

El nivel de significancia adoptado fue:

$$\alpha = 0,05 \text{ (95\% de confianza)}$$

11.4.2 Estadísticos descriptivos

Cada grupo estuvo conformado por 4 observaciones ($n = 4$), correspondientes a los puntos de muestreo p1, p2, p3 y p4.

Tabla 8*Análisis de varianza (ANOVA) para Demanda química de oxígeno*

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Antes	4	344,12	86,03	1 137,46
Después	4	1697,74	424,44	7 783,38

Después 4	267,8	66,95	298,17
-----------	-------	-------	--------

Nota. ANOVA de un factor aplicado a las concentraciones de la demanda química de oxígeno. gl = grados de libertad; p = probabilidad asociada al estadístico F.

1. **Comparación de medias**

- El valor promedio más alto corresponde a después 1 (424,44).
- El promedio más bajo corresponde a después 2 (66,95).
- Se observa una reducción considerable de demanda química de oxígeno

entre después 1 y después 2.

2. **Análisis de dispersión**

- Después 1 presenta la mayor varianza (7783,38), indicando alta heterogeneidad.
- Después 2 presenta la menor varianza (298,17), lo que sugiere mayor estabilidad del sistema en esta etapa.
- Antes presenta una variabilidad intermedia.

Desde el punto de vista operacional, la disminución tanto del promedio como de la varianza en después 2 sugiere un comportamiento más controlado del proceso.

11.4.3 Descomposición de la variabilidad

El ANOVA divide la variabilidad total en dos componentes:

$$SC_{Total} = SC_{Entre\ grupos} + SC_{Dentro\ de\ grupos}$$

Tabla 9

Descomposición de la variabilidad mediante ANOVA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1 033 232,15	2	516 616,08	6,36	0,019	4,26
Dentro de los grupos	730 870,52	9	81 208,39			
Total	1 764 102,67	11				

Nota. Elaborado por Ayala y Lema, a partir del análisis de varianza (ANOVA) aplicado a los datos experimentales.

11.4.4 Interpretación detallada de cada componente

a) Suma de Cuadrados Entre Grupos (SC_e)

Representa la variabilidad explicada por el efecto del tratamiento. Un valor elevado (1 033 232,15) indica que gran parte de la variabilidad total se debe a diferencias entre los momentos evaluados.

b) Suma de Cuadrados Dentro de los Grupos (SC_d)

Representa la variabilidad residual o error experimental (730 870,52). Corresponde a fluctuaciones propias del muestreo, error analítico y variabilidad natural.

c) Grados de libertad

- Entre grupos: $k - 1 = 3 - 1 = 2$
- Dentro de grupos: $N - k = 12 - 3 = 9$
- Total: 11

Esto confirma que se trabajó con 12 observaciones totales.

d) Cuadrados medios

$$CM = \frac{SC}{gl}$$

- CM entre grupos = 516 616,08
- CM dentro de grupos = 81 208,39

La razón entre ambos determina el estadístico F.

11.4.5 Estadístico F

$$F = \frac{CM_{entre}}{CM_{dentro}} = 6,36$$

Este valor indica que la variabilidad entre los grupos es aproximadamente 6,36 veces mayor que la variabilidad interna.

Si las medias fueran iguales, se esperaría un valor cercano a 1.

Un valor considerablemente mayor que 1 sugiere efecto del tratamiento.

11.4.6 Contraste de hipótesis

Método 1: Comparación con F crítico

- F calculado = 6,36
- F crítico ($\alpha = 0,05$; $gl_1=2$; $gl_2=9$) = 4,26

Como:

$$6,36 > 4,26$$

Se rechaza la hipótesis nula.

Método 2: p-valor

$$p = 0,019$$

Interpretación:

Existe un 1,9 % de probabilidad de obtener diferencias tan grandes como las observadas si realmente no existiera efecto del tratamiento.

Dado que:

$$0,019 < 0,05$$

Se rechaza H_0 .

11.4.7 Magnitud del efecto

Puede estimarse la proporción de variabilidad explicada por el tratamiento mediante:

$$n^2 = \frac{1033232,15}{1764102,67} \approx 0,586$$

Esto indica que aproximadamente 58,6 % de la variabilidad total de la demanda química de oxígeno es explicada por el tratamiento aplicado, lo cual representa un efecto estadístico considerable.

11.4.8 Interpretación técnica aplicada al proceso

Desde el punto de vista del tratamiento:

- El incremento observado en después 1 podría asociarse a procesos intermedios de oxidación o liberación de materia orgánica.
- La disminución significativa en después 2 evidencia una mejora en la eficiencia del proceso.
- La menor varianza en después 2 sugiere estabilidad operacional.

El análisis estadístico confirma que los cambios en demanda química de oxígeno no se deben al azar, sino al efecto del tratamiento evaluado.

El análisis de los resultados obtenidos después del tratamiento demuestra que todas las concentraciones de tensoactivos aniónicos registradas en los cuatro puntos de monitoreo se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) para descargas de efluentes. En comparación con los valores iniciales, se evidencia una reducción significativa de las concentraciones, pasando de niveles elevados antes del tratamiento a valores considerablemente bajos posteriores al proceso, lo que refleja una alta eficiencia en la remoción del contaminante. Los resultados posteriores, que oscilan entre 0,11 mg/L y 1,11 mg/L, cumplen con la normativa ambiental vigente, garantizando que el efluente tratado no representa un riesgo para los cuerpos receptores ni para el equilibrio ecológico del entorno. Este cumplimiento normativo no solo valida la efectividad técnica del sistema de tratamiento implementado, sino que también demuestra la adecuada gestión ambiental de la operación, asegurando que las descargas se realicen conforme a la legislación ecuatoriana y contribuyendo a la protección de los recursos hídricos y la salud pública.

11.5 Análisis estadístico del PH y la temperatura

Sobre el seguimiento del pH y la temperatura entre el 14 de noviembre y el 5 de diciembre de 2025, los datos muestran que el sistema está bastante estable (Tabla 10). El pH se movió en un rango de 6,74 a 7,06, o sea, casi siempre cerca de la neutralidad, lo que ayuda a que las bacterias y procesos biológicos degraden la materia orgánica sin problemas, este estudio evidencia que la investigación realizada demuestra énfasis como lo menciona (Almasi et al., 2017; Fonseca et al., 2020)

Esta estabilidad indica que el sistema está controlado y no hubo descargas raras que alteraran todo. Por otro lado, la temperatura varió entre 8 °C y 17 °C por cuestiones del clima del sitio; aunque esto permite que haya actividad microbiana, la cinética se vuelve moderada. Básicamente, el comportamiento de estos puntos confirma que el tratamiento es estable y sirve para procesos biológicos de baja a media tasa como lo menciona (Araujo, 2022) en sus investigaciones con dicha especie.

Tabla 10
Monitoreo diario de pH y temperatura

Fecha	Ensayo físico químico	Unidad	Resultado Entrada
14/11/2025	Potencial de Hidrógeno	u Ph	7.05
	Temperatura:	°C	17
15/11/2025	Potencial de Hidrógeno	u Ph	6.89
	Temperatura:	°C	8
16/11/2025	Potencial de Hidrógeno	u Ph	6.75
	Temperatura:	°C	14
17/11/2025	Potencial de Hidrógeno	u Ph	6.74
	Temperatura:	°C	12
18/11/2025	Potencial de Hidrógeno	u Ph	6.76
	Temperatura:	°C	10
19/11/2025	Potencial de Hidrógeno	u Ph	6.76
	Temperatura:	°C	15
20/11/2025	Potencial de Hidrógeno	u Ph	6.78
	Temperatura:	°C	17
21/11/2025	Potencial de Hidrógeno	u Ph	6.8
	Temperatura:	°C	15
22/11/2025	Potencial de Hidrógeno	u Ph	6.8
	Temperatura:	°C	14
23/11/2025	Potencial de Hidrógeno	u Ph	6.81
	Temperatura:	°C	12

	Potencial de Hidrógeno	u Ph	6.81
24/11/2025	Temperatura:	°C	10
	Potencial de Hidrógeno	u Ph	6.83
25/11/2025	Temperatura:	°C	12
	Potencial de Hidrógeno	u Ph	6.83
26/11/2025	Temperatura:	°C	13
	Potencial de Hidrógeno	u Ph	6.84
27/11/2025	Temperatura:	°C	14
	Potencial de Hidrógeno	u Ph	6.86
28/11/2025	Temperatura:	°C	12
	Potencial de Hidrógeno	u Ph	6.87
29/11/2025	Temperatura:	°C	8
	Potencial de Hidrógeno	u Ph	6.88
30/11/2025	Temperatura:	°C	9
	Potencial de Hidrógeno	u Ph	6.99
1/12/2025	Temperatura:	°C	10
	Potencial de Hidrógeno	u Ph	7
2/12/2025	Temperatura:	°C	12
	Potencial de Hidrógeno	u Ph	7.03
3/12/2025	Temperatura:	°C	8
	Potencial de Hidrógeno	u Ph	7.05
4/12/2025	Temperatura:	°C	10
	Potencial de Hidrógeno	u Ph	7.06
5/12/2025	Temperatura:	°C	8

Realizado por: Ayala y Lema, 2026.

En la Tabla 11 se definen los lugares donde se sacan las muestras, que corresponden al ingreso y a la descarga de la planta, usando coordenadas UTM. Tener estos puntos bien georreferenciados sirve para que los resultados se puedan rastrear y comparar bien la calidad del agua antes de entrar y después de salir del sistema. La elección de estos sitios es técnicamente correcta porque permite ver la eficiencia real, asegurando que los análisis de laboratorio reflejen lo que pasa de verdad en la planta de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 11
Puntos de control

Punto	X[m]	Y[m]	Z[m]
Ingreso	774559	9865842	17 M
Descarga	774537	9965836	17 M

Realizado por: Ayala y Lema, 2026.

Dentro de los resultados obtenidos in situ (Tabla 12), hay una reducción que es consistente en la carga orgánica desde la entrada hasta la salida. El pH registrado en ambos

puntos es casi igual y se mantiene neutro (de 7,5 a 7,4), por lo que el tratamiento biológico no cambia mucho la acidez y eso favorece a los microorganismos. También, la temperatura bajó apenas un grado (de 17 a 16), lo que dice que el proceso es estable y no genera calor de más, funcionando bien para una digestión biológica controlada. Con estos datos se entiende que la planta de tratamiento de aguas residuales opera en condiciones aceptables para oxidar y estabilizar la materia orgánica.

Tabla 12
Parámetros in situ

Ensayo físico químico	Resultado	
	Entrada	Salida
demanda bioquímica de oxígeno	85,32	55,53
demanda química de oxígeno	249,66	118,29
sólidos suspendidos totales	104	9
Ph	7.5	7.4
Temperatura	17	16

Realizado por: Ayala y Lema, 2026.

La Tabla 13 muestra qué tan bien la planta de tratamiento de aguas residuales remueve los contaminantes, con resultados muy distintos según qué se mire. La remoción de sólidos suspendidos totales es del 91,35%, un valor que está muy por encima de lo que piden las normas, lo que confirma que las unidades físicas funcionan de forma efectiva. En cambio, la eficiencia de la demanda biológica de oxígeno (34,92%) y de la demanda química de oxígeno (52,62%) es más baja de lo que se esperaría para sistemas como el FAFA o el UASB según la RAS 2000 y la OPS. Esto indica que, aunque se eliminan bien los sólidos, la parte orgánica no se degrada tanto, quizás por falta de mantenimiento o tiempos de retención que no son los mejores. Por eso, hace falta mejorar la parte operativa para que la remoción orgánica suba.

Tabla 13
Eficiencia de remoción de contaminantes de la planta.

Parámetro	Eficiencia (%)
demanda bioquímica de oxígeno	34,92%
demanda química de oxígeno	52,62%
sólidos suspendidos totales	91,35%

Realizado por: Ayala y Lema, 2026.

Las capacidades de volumen de las unidades de tratamiento están en la Tabla 14 y sirven para ver si el diseño hidráulico es el adecuado. El desarenador tiene 2,40 m³ para atrapar lo grueso, mientras que el reactor UASB y el filtro biológico tienen 50,00 m³ cada uno, siendo estas las partes principales para la limpieza biológica. Estas dimensiones tienen sentido para un sistema que hace tratamiento primario y secundario, dando el espacio necesario para que las cosas se asienten y los microbios trabajen.

Tabla 14
Medidas de PTAR

Unidad	Capacidad
Desarenador	2.40 [m ³]
Reactor UASB	50.00 [m ³]
Filtro biológico	50.00 [m ³]

Realizado por: Ayala y Lema, 2026.

El tiempo de retención real que se calculó para cada parte coincide con lo que se necesita en teoría para que todo funcione (Tabla 15). El desarenador tiene 1,5 horas, que alcanza para quitar sólidos gruesos, y el reactor UASB junto al filtro biológico llegan a 1 día y 7 horas, lo que ayuda a estabilizar la carga orgánica. Aunque los tiempos cumplen con el diseño, se recomienda darle mantenimiento seguido al sistema, ya que la eficiencia de la demanda química de oxígeno sugiere que hay cosas operativas que limitan el desempeño de la planta.

Tabla 15
Tiempo de retención real

Unidad	Tiempo de retención
Desarenador	1.5 horas
Reactor UASB	1 días y 7 horas
Filtro biológico	1 días y 7 horas

Realizado por: Ayala y Lema, 2026.

Sacar los lodos de la fosa es algo vital para que el sistema no falle. En esta planta de tratamiento de aguas residuales, hay que hacer esta limpieza cuando el lodo llegue a los 25 cm de altura, lo que suele pasar cada dos meses. Se deben dejar 10 cm de lodo para que sirvan de

"semilla" biológica para el siguiente ciclo. Hacer esto permite que la actividad de los microorganismos siga, evita que se amontonen sólidos y que la planta pierda capacidad, manteniendo así el proceso de depuración estable.

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

12.1 Conclusiones

La implementación del sistema piloto de fitorremediación con la especie acuática vegetativa Berro demostró ser una alternativa eficiente en la remoción de los principales contaminantes como tensoactivos aniónicos y demanda química de oxígeno por sus altos índices de remoción, absorción y retención ya que los resultados comparados con el tanque testigo demuestra un gran potencial de fitorremediación para mejorar la calidad del efluente frente a los límites permisibles a su descarga en cuerpos de agua dulce.

A partir de los resultados obtenidos, se determina que el diseño del sistema piloto de fitorremediación con la especie (*Nasturtium officinale*) es una de varias alternativas sostenibles, de bajos costos y fácil implementación para el tratamiento de aguas residuales, siendo eficaz en zonas rurales y periurbanas dentro del Cantón Santiago de Píllaro. Su aplicación ayuda a reducir los contaminantes y beneficiando la gestión local de los recursos hídricos mismos que son esenciales para varias actividades agrícolas dentro del Cantón y favoreciendo el cumplimiento a la normativa ambiental vigente y alineándose a los principios de desarrollo sostenible.

Se concluye que el sistema de fitorremediación alcanzó niveles de estabilidad significativos en cuanto a la reducción de contaminantes en la estación evaluada con la implementación de la especie vegetativa, evidenciando menor concentración de compuestos derivados de detergentes, contribuyendo al equilibrio de la calidad del efluente y a la reducción del impacto ambiental sobre los cuerpos de agua receptores.

12.2 Recomendaciones

Se recomienda a las autoridades locales del Cantón Santiago de Píllaro y a las autoridades encargadas de la Gestión Ambiental consideren la fitorremediación con la especie vegetativa berro (*Nasturtium officinale*) como alternativas de baja inversión y altas demandas

de remoción para promover planes de gestión hídrica y saneamiento en monitoreo de aguas residuales antes de enviar a cuerpos hídricos receptores de agua dulce.

Es oportuno replicar y optimizar sistemas de fitorremediación con especie Berro (*Nasturtium officinale*) en las distintas plantas de tratamiento de aguas residuales Domesticas, especialmente en zonas rurales donde la demanda de contaminación hídrica es elevada debido a la falta de control y correcta operación de la PTAR, mismas en las que no cumplen los límites vigentes permisibles.

Se sugiere ampliar futuras investigaciones más concretas donde sus análisis estadísticos permitan profundizar los diferentes comportamientos de la especie frente a la remoción, absorción y retención de los contaminantes a lo largo de toda la especie vegetativa, de esta manera teniendo mejores datos y mejores resultados de fitorremediación.

13. BIBLIOGRAFÍA

- Abad, R. A. A. (2023). Factibilidad técnica de la aplicación de fitorremediación en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas en la parroquia Otón-Cayambe.
- Almasi, A., Navazeshkha, F., & Mousavi, S. A. (2017). Biosorption of lead from aqueous solution onto *Nasturtium officinale*: Performance and modeling. *Desalination and Water Treatment*, 65, 443-450. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.20308>
- Araque Niño, I. D., Britto Aponte, M. C., Cuellar Rodríguez, L. A., & Perico Granados, N. R. (2020). Fitorremediación en aguas residuales sin tratamiento previo. Caso: Tierra Negra, Boyacá. *Revista de Tecnología*, 17(1), 37-48. <https://doi.org/10.18270/rt.v17i1.2950>
- Araujo, V. G. S. (2022). EVALUACIÓN DEL HUMEDAL.
- Ayala Tocto, R. Y., Calderón Ordoñez, E., Rascón, J., & Collazos Silva, R. (2018a). Fitorremediación de aguas residuales domésticas utilizando las especies *Eichhornia*

crassipes, *Nymphoides humboldtiana* y *Nasturtium officinale*. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 2(3), 48-53.

<https://doi.org/10.25127/aps.20183.403>

Ayala Tocto, R. Y., Calderón Ordoñez, E., Rascón, J., & Collazos Silva, R. (2018b).

Fitorremediación de aguas residuales domésticas utilizando las especies *Eichhornia crassipes*, *Nymphoides humboldtiana* y *Nasturtium officinale*. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 2(3), 48-53.

<https://doi.org/10.25127/aps.20183.403>

Bhat, S. A., Kumar, V., Li, F., & Verma, P. (Eds.). (2024a). *Detection and Treatment of Emerging Contaminants in Wastewater*. IWA Publishing.

<https://doi.org/10.2166/9781789063752>

Bhat, S. A., Kumar, V., Li, F., & Verma, P. (Eds.). (2024b). *Detection and Treatment of Emerging Contaminants in Wastewater*. IWA Publishing.

<https://doi.org/10.2166/9781789063752>

Burud, I., D. Tata, M., Selvaraja, K., & Y. El Hariri, S. (2021). Marbelization of the gallbladder, a variant of acute gangrenous cholecystitis. *Ghana Medical Journal*, 55(3), 226-228. <https://doi.org/10.4314/gmj.v55i3.8>

Carolina Soto Carrión & Raquelina Vera Damián. (2023). POTENCIAL DE FITORREMEDIACIÓN DEL MATECLLO (*Hydrocotyle ranunculoides* L.f.) EN AGUAS CONTAMINADAS CON METALES PESADOS DE LA QUEBRADA PACCHANTAY. *Hatun Yachay Wasi*, 3(1), 86-97.

<https://doi.org/10.57107/hyw.v3i1.60>

Celi Fernández, R. S., Morales Avendaño, E. D., & Andrade Ruiz, C. E. (2025). Aplicación de la fitorremediación con Macrófitas. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 30(2), 103-113. <https://doi.org/10.32480/rscp.2025.30.2.103113>

- Chakole, P., & Gajbhiye, A. (2026). Impact of Different RPM on BOD, COD and Turbidity Reduction Using Natural and Synthetic Media in Dairy Wastewater Treatment. *Nature Environment and Pollution Technology*, 25(1), B4311.
<https://doi.org/10.46488/NEPT.2026.v25i01.B4311>
- Che, X., Tian, Z., Fu, D., Bi, Z., Wang, L., & Zhu, D. (2024). Research on COD parameter in water based on the combination of UV absorption photometry and laser spectroscopy. *Environmental Technology & Innovation*, 35, 103730.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103730>
- Cristóbal-Muñoz, I., Cristóbal-Muñoz, Y., Prado-Hernández, J. V., Cristóbal-Acevedo, D., Quintana-Molina, E., & Rodríguez-Rosas, S. (2025). Evaluation of the Phytoremediation Capacity of a Natural Wetland Adjacent to Fluvial and Vehicular Infrastructure for Domestic Wastewater Treatment: A Case Study in Central Mexico. *Water*, 17(11), 1560. <https://doi.org/10.3390/w17111560>
- Delvalle-Borrero, D. M., Medina, J. R., & Fuentes, K. (2022). Humedales artificiales flotantes y su valor paisajista en ríos urbanos—Ciudad de Panamá. *Prisma Tecnológico*, 13(1), 3-9. <https://doi.org/10.33412/pri.v13.1.2871>
- Fallain, A., Delgado, M., & Banchón, C. (2025). Islas flotantes como fitorremediación de aguas residuales domésticas de la laguna de oxidación de Manabí—Bolívar. *Research, Society and Development*, 14(4), e5114448645. <https://doi.org/10.33448/rsd-v14i4.48645>
- Fasanando Lescano, I. K., Mostacero León, J., Gil Rivero, A. E., De La Cruz Castillo, A. J., López Medina, S. E., & Charcape Ravelo, J. M. (2021). PLANT SPECIES WITH PHYTOREMEDIATION POTENTIAL OF THE WETLANDS OF THE LOWER MOCHE RIVER BASIN, LA LIBERTAD-PERU. *REBIOL*, 41(2), 195-203.
<https://doi.org/10.17268/rebiol.2021.41.02.05>

- Fonseca, K. M., Ruiz Depablos, J. L., Espitia-Sarmiento, E. F., & Llugsha Moreta, N. M. (2020). Artificial Floating Island with Vetiver for Treatment of Arsenic-Contaminated Water: A Real Scale Study in High-Andean Reservoir. *Water*, 12(11), 3086. <https://doi.org/10.3390/w12113086>
- Goodson, E., & Aziz, T. (2023). Assessing the Native Plant Species for Phytoremediation of Freshwater Bodies in Southern Ontario, Canada. *Science Letters*, 11(2), 50-58. <https://doi.org/10.47262/SL/11.2.132023500>
- Goren, A. Y., Yucel, A., Sofuoglu, S. C., & Sofuoglu, A. (2021). Phytoremediation of olive mill wastewater with *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash and *Cyperus alternifolius* L. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 102071. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102071>
- Hairolnizam, N. F. A., Sulaiman, S., Razak, A. S. A., Mokhtar, N. M., Mokhtar, N., Aziz, A. A., & Chin, K. B. (2024). Synergic Usage of *Pistia stratiotes* sp., *Eichhornia crassipes* sp., *Typha angustifolia* sp., and *Lepironia articulata* sp. Plants for Sewage Treatment via Phytoremediation Technology. *The Open Civil Engineering Journal*, 18(1), e18741495285941. <https://doi.org/10.2174/0118741495285941240313062247>
- Herrera Chavez, L. L. (2021a). Eficiencia de *Nasturtium officinale* W T. Aiton y *Zantedeschia aethiopica* L. en la remoción de materia orgánica de aguas residuales domésticas. *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 4(1), 30-35. <https://doi.org/10.25127/ucni.v4i1.693>
- Herrera Chavez, L. L. (2021b). Eficiencia de *Nasturtium officinale* W T. Aiton y *Zantedeschia aethiopica* L. en la remoción de materia orgánica de aguas residuales domésticas. *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 4(1), 30-35. <https://doi.org/10.25127/ucni.v4i1.693>

- Intriago, L. M. R., Intriago, H. R. R., Palomeque, P. G., Solano, J. L. C., & Delgado, I. R. (2024). Efecto fitorremediador de *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* en parámetros físicos y químicos en aguas residuales domésticas. *South Florida Journal of Development*, 5(2), 688-696. <https://doi.org/10.46932/sfjdv5n2-021>
- Kafle, A., Timilsina, A., Gautam, A., Adhikari, K., Bhattarai, A., & Aryal, N. (2022). Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environmental Advances*, 8, 100203. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203>
- Khan, A. U., Khan, A. N., Waris, A., Ilyas, M., & Zamel, D. (2022). Phytoremediation of pollutants from wastewater: A concise review. *Open Life Sciences*, 17(1), 488-496. <https://doi.org/10.1515/biol-2022-0056>
- Khushbu Shende, Mohini Jumde, Perna Raipure, Sanskar Bhoga, Sahil Sheikh, & Prof. Sandeep Ajmere. (2024). Phytoremediation of Grey Water. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 474-482. <https://doi.org/10.48175/IJAR SCT-18273>
- Kristanti, R. A., Tirtalistyani, R., Tang, Y. Y., Thao, N. T. T., Kasongo, J., & Wijayanti, Y. (2023). Phytoremediation Mechanism for Emerging Pollutants: A Review. *Tropical Aquatic and Soil Pollution*, 3(1), 88-108. <https://doi.org/10.53623/tasp.v3i1.222>
- López Ocaña, G., Estrada Pérez, N., Aguilar Pérez, G., Alonso Mendoza, E. C., & Torres Balcázar, C. A. (2023). Degradación de contaminantes en humedales artificiales en serie con especies macrófitas del trópico húmedo. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 12(24), 19-48. <https://doi.org/10.23913/ciba.v12i24.122>
- López Yupanqui, G. M., Mendoza Mallqui, S. D., Chávez De La Torre, M. Y., Campos Flores, M., Curo Soto, W., & Galindo Rojas, J. S. (2022). Valoración de los beneficios

nutricionales del Berro (*Nasturtium Officinale*) para la anemia en Pampas Tayacaja-Huancavelica. *GnosisWisdom*, 2(2), 06-12.

<https://doi.org/10.54556/gnosiswisdom.v2i2.32>

Márquez-Reyes, J. M., Valdés-González, A., García-Gómez, C., Rodríguez-Fuentes, H., Delgado, J. G., & Luna-Olvera, H. (2020). Evaluation of the synergistic effects of chromium and lead during the process of phytoremediation with watercress (*Nasturtium officinale*) in an artificial wetland.

Monroy-Licht, A., Carranza-Lopez, L., De La Parra-Guerra, A. C., & Acevedo-Barrios, R. (2024). Unlocking the potential of *Eichhornia crassipes* for wastewater treatment: Phytoremediation of aquatic pollutants, a strategy for advancing Sustainable Development Goal-06 clean water. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(31), 43561-43582. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33698-9>

Morales Corozo, J. P., & Loor Vergara, K. (2023). Diseño de biofiltro para eliminación de contaminantes de aguas residuales de la comunidad Ballagán, Ecuador: Design of a filter for the elimination of pollutants from wastewater in the Ballagan community, Ecuador. *REVISTA CIENTÍFICA ECOCIENCIA*, 10(2), 92-106. <https://doi.org/10.21855/ecociencia.102.801>

Mustafa, H. M., & Hayder, G. (2021). Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 355-365. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.009>

Najwa, N., Abdullah, S., & Mohd Noor, N. A. (2025). Phytoremediation as a sustainable approach for heavy metal removal from wastewater: Insights from *Salvinia molesta*, *Pistia stratiotes*, and *Lemnoideae* studies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1548(1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1548/1/012029>

- Neeti, K., Singh, R., & Kumar, A. (2024). Plant-Based Approaches for Wastewater Management: A Comprehensive Review of Phytoremediation Techniques. *IECTO* 2024, 41. <https://doi.org/10.3390/proceedings2024102041>
- Palacios Anzules, Í. D. C., & Moreno Castro, D. W. (2022). Contaminación ambiental. *RECIMUNDO*, 6(2), 93-103. [https://doi.org/10.26820/recimundo/6.\(2\).abr.2022.93-103](https://doi.org/10.26820/recimundo/6.(2).abr.2022.93-103)
- Patel, M., & Mansoor Ahammed, M. (2024). Characteristics and removal of organic micropollutants in reverse osmosis concentrate from urban wastewater treatment plants: A review. *Waste Management Bulletin*, 2(4), 249-260. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.11.012>
- Polińska, W., Kotowska, U., Kiejza, D., & Karpińska, J. (2021). Insights into the Use of Phytoremediation Processes for the Removal of Organic Micropollutants from Water and Wastewater; A Review. *Water*, 13(15), 2065. <https://doi.org/10.3390/w13152065>
- Quevedo Quispe, A. W. (2021). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE HUMEDAL ARTIFICIAL PARA LA RECUPERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN LA POBLACIÓN DE ALCALÁ. *Revista de Ciencia, Tecnología e Innovación*, 19(24), 133-148. <https://doi.org/10.56469/rcti.v19i24.476>
- Ramírez Jiménez, D. F. (2021). Sistema de medición y control de temperatura para un prototipo de planta de tratamiento de aguas residuales. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 9(1), 100-113. <https://doi.org/10.17081/invinno.9.1.4305>
- Salamanca-Rivera, A. P., Silva, D. A., Cardozo-Muñoz, J., Rojas-Sánchez, F., Meléndez-Mazabel, J. C., & Borda-Chingate, L. S. (2023). Fitorremediación con Brassicaceae y Apiaceae en suelos contaminados con metales pesados. *Revista de Biología Tropical*, 71(1), e51493. <https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop..v71i1.51493>

- Sánchez Araujo, V. G., Palomino Pastrana, P. A., & Malpartida Yapias, R. J. (2021). Eficiencia de humedales artificiales de totora y berros sobre efluentes de granja porcícola, Perú. *Revista Alfa*, 5(14), 192-203.
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i14.110>
- Sharma, M., Rawat, S., & Rautela, A. (2024). Phytoremediation in sustainable wastewater management: An eco-friendly review of current techniques and future prospects. *AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73(9), 1946-1975.
<https://doi.org/10.2166/aqua.2024.427>
- Tammone, C., Tangredi, D. N., Cicatelli, A., Giuliano, F., Spiniello, I., Guarino, F., & Castiglione, S. (2025). Efficient phytoremediation of first-flush storm water using an innovative constructed wetland: A pilot-scale study towards sustainable water reuse. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 159(1), 66-78. <https://doi.org/10.1080/11263504.2024.2446782>
- Thakur, T., Barya, M., Dutta, J., Mukherjee, P., Thakur, A., Swamy, S., & Anderson, J. (2023). Integrated Phytobial Remediation of Dissolved Pollutants from Domestic Wastewater through Constructed Wetlands: An Interactive Macrophyte-Microbe-Based Green and Low-Cost Decontamination Technology with Prospective Resource Recovery. *Water*, 15(22), 3877. <https://doi.org/10.3390/w15223877>
- Tobing, J. H. L. (2025). The Effect of Water Spinach (*Ipomoea aquatica*), Watercress (*Nasturtium officinale*), and Genjer (*Lemna minor*) on Domestic Wastewater Quality.
- Uturunco, G. M., Diaz, R. R. I., Rodriguez, E. D. P., Tisnado, M. Q., Ccopa, D. L., Zea, C. Y. H., Chambi, G. H., & Tapia, J. L. P. (2024). Innovations in Phytoremediation: Application of Artificial Wetlands for the Contaminated Water Treatment and Heavy Metals Removal. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(11), e08758.
<https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n11-021>

- Viveros Torres, I., Aguirre Guzmán, J. A., & Muñoz Delgado, J. (2021, octubre 27). Diseño de Dispositivo Automático Potabilizador de Agua por Floculación Orgánica. Proceedings INNODOCT/21. International Conference on Innovation, Documentation and Education. INNODOCT 2021. <https://doi.org/10.4995/INN2021.2021.13380>
- Yuliasni, R., Kurniawan, S., Marlana, B., Hidayat, M. R., Kadier, A., Ma, P. C., & Imron, M. (2023). Recent Progress of Phytoremediation-Based Technologies for Industrial Wastewater Treatment. *Journal of Ecological Engineering*, 24(2), 208-220. <https://doi.org/10.12911/22998993/156621>

