



Universidad Nacional

SAN LUIS GONZAGA



Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

Esta licencia permite a otras combinar, retocar, y crear a partir de su obra de forma no comercial, siempre y cuando den crédito y licencia a nuevas creaciones bajo los mismos términos.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>



UNIVERSIDAD NACIONAL SAN LUIS GONZAGA

EVALUACION DE ORIGINALIDAD



ATIT_2026_FIAS-026

CONSTANCIA

El que suscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud al documento cuyo título es:

"Impacto del tratamiento de aguas residuales mediante filtro biológico en la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica 2024"

Presentado por:

DAYALOS ESPINOZA, GIANELLA MAITE

Autor(a) del nivel PREGRADO de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria El resultado obtenido es **PORCENTAJE DE SIMILITUD del 3%** por el cual se otorga el calificativo de:

APROBADO,

Según Reglamento de Evaluación de la Originalidad

Con CÓDIGO DE MATRÍCULA N° **20181716**

Se adjunta al presente el reporte de evaluación con el software de verificación de originalidad.

27 de Febrero del 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUIS GONZAGA"
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
Dr. Victor Alberto Candia Palomino
DIRECTOR



UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUIS GONZAGA”

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria



Tesis

**Impacto del tratamiento de aguas residuales mediante filtro
biológico en la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo,
Castrovirreyna, Huancavelica 2024**

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN INSTITUCIONAL:

Ciencias Naturales, Ingeniería y Tecnologías Sostenibles

PRESENTADO POR:

Bach. DÁVALOS ESPINOZA, GIANELLA MAITE

Ica – Perú

2026

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto de tesis, en primera instancia,
a **Dios**, fuente de mi fortaleza, salud y sabiduría
para culminar esta etapa de mi formación profesional.

Asimismo, lo dedico a **mis padres**, por su apoyo incondicional,
sacrificio y confianza constante, quienes han sido mi mayor inspiración y el
motor para seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a mi universidad y a la **Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria** por la sólida formación académica brindada, la cual ha sido fundamental para mi crecimiento y desarrollo profesional. Asimismo, agradezco a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron con su apoyo y acompañamiento a lo largo de mi etapa universitaria.

De manera especial, manifiesto mi profundo agradecimiento a mi asesora de tesis, **Dra. Isis Cristel Córdova Barrios**, por su guía constante, paciencia, motivación y valiosos aportes metodológicos, los cuales fueron pilares fundamentales durante el desarrollo del presente proyecto.

Finalmente, agradezco a **mi familia y amigos**, cuyo apoyo moral, comprensión y motivación permanente hicieron posible la culminación de este trabajo académico.

INDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
INDICE DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRAC.....	x
I. INTRODUCCION.....	11
1.1 Situación problemática	12
1.2 Antecedentes de la Investigación.....	12
1.2.1 Antecedentes internacionales	13
1.2.2 Antecedentes nacionales	19
1.2.3 Antecedentes locales	20
1.3 Bases Teóricas.....	21
1.3.1 Tratamiento de aguas residuales	21
1.3.2 Etapas del tratamiento de aguas residuales	21
1.3.3 Tecnologías Aplicadas	22
1.3.4 Filtro Biológico.....	23
1.3.5 Laguna de Oxidación	24
1.3.6 Remoción de contaminantes	24
1.4 Formulación del problema general	25
1.4.1 Problema general	26
1.4.2 Problemas específicos	26
1.5 Objetivos	26
1.5.1 Objetivo principal	26
1.5.2 Objetivos Específicos.....	26
1.6 Hipótesis y variables de la investigación	26
1.6.1 Hipótesis principal	26
1.6.2 Hipótesis Específica.....	27
1.7 Variables	27
1.7.1 Variable independiente.....	27
1.7.2 Variable dependiente	27
1.7.3 Variable interviniente.....	27

1.8	Justificación e Importancia de Investigación	29
1.8.1	Justificación	29
1.8.2	Importancia	30
1.9	Definiciones conceptuales	31
1.9.1	Recurso hídrico	31
1.9.2	Los agentes contaminantes	32
1.9.3	Parámetros fisicoquímicos	32
1.9.4	Bacteriología en la calidad del agua	32
1.10	Norma legal	32
1.10.1	Decreto Supremo N°003-2010-MINAM	32
II.	ESTRATEGIA METODOLOGÍA	34
2.1.	Ubicación geográfica	34
2.2.	Metodología de la investigación	36
2.2.1.	Tipo, nivel y diseño de investigación	36
2.2.2.	Población y muestra	37
2.2.3.	Técnicas de recolección de datos	37
2.2.4.	Instrumentos de recolección de datos	38
2.2.5.	Técnicas de procesamiento de datos	39
2.2.6.	Análisis e interpretación de datos	39
III.	RESULTADOS	41
3.1.	El tratamiento de aguas residuales mediante un filtro biológico y la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica.	41
3.1.1.	Hipótesis general	46
3.2.	La tecnología del filtro biológico aplicada al tratamiento de aguas residuales en la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica.	49
3.2.1.	Prueba de Hipótesis	53
3.3.	El efecto del filtro biológico en el tratamiento de aguas residuales en la remoción de contaminantes en la laguna de oxidación de Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024, Huancavelica.	55
3.3.1.	Prueba de Hipótesis	56
IV.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	58
4.1.	Discusión de resultados del tratamiento de aguas residuales mediante un filtro biológico y la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica.	58
4.2.	Discusión de resultados de la tecnología del filtro biológico aplicada al tratamiento de aguas residuales en la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica.	59

4.3. Discusión de resultados del efecto del filtro biológico en el tratamiento de aguas residuales en la remoción de contaminantes en la laguna de oxidación de Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024, Huancavelica	60
V. CONCLUSIONES.....	62
VI. RECOMENDACIONES.....	64
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
VIII. ANEXOS	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Operacionalización de variable	28
Tabla 2.	Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua y establecen Disposiciones Complementarias	33
Tabla 3:	Descripción y ubicación en coordenadas UTM el punto de monitoreo de calidad del agua residual	34
Tabla 4.	Estándares de la calidad ambiental (ECA) para la calidad de agua residual	42
Tabla 5:	Resultados del muestreo de calidad de aguas residuales, de la primera campaña de monitoreo ambiental – 03 de marzo de 2024	43
Tabla 6:	Resultados del muestreo de calidad de aguas residuales, de la segunda campaña de monitoreo ambiental – 05 de mayo de 2024	44
Tabla 7:	Resultados del muestreo de calidad de aguas residuales, de la tercera campaña de monitoreo ambiental – 07 de julio de 2024	44
Tabla 8:	Resultados del muestreo de calidad de aguas residuales, de la cuarta campaña de monitoreo ambiental – 08 de setiembre de 2024	45
Tabla 9.	Estándares de la calidad ambiental (ECA) para categoría 3: riego de vegetales y bebidas de animales a la salida del Filtro Biológico	46
Tabla 10.	Se estimó el estadístico de prueba (Estadística Descriptiva)	47
Tabla 11.	Diseño del Filtro Biológico	51

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Ubicación del área de influencia del estudio, Distrito Ticrapo.....	35
Figura 2.	Ubicación del punto de monitoreo de calidad del agua residual.....	38
Figura 3.	Puntos de monitoreo de la laguna de oxidación en Ticrapo	43
Figura 4.	Puntos de monitoreo de la laguna de oxidación con filtro biológico en Ticrapo	45
Figura 5.	Distribución de t-Student para las cuatro campañas del monitoreo ambiental	48

RESUMEN

El **objetivo**, de la investigación fue “evaluar el tratamiento de aguas residuales mediante un filtro biológico que influye en la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 20244”. **Estrategia metodológica.** Se desarrolló un estudio aplicado con monitoreo ambiental en cuatro campañas, considerando puntos representativos antes y después del filtro biológico y en la laguna de oxidación. Se analizaron parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (DBO₅, DQO, coliformes totales, aceites y grasas, pH y temperatura), comparándolos con los límites normativos nacionales. Asimismo, se efectuó el diseño hidráulico–sanitario del filtro y la contrastación estadística mediante la prueba t de Student. **Resultados:** Los resultados evidenciaron una reducción de la DBO₅ desde aproximadamente 70 mg/L hasta valores entre 11 y 13 mg/L, con una eficiencia de remoción cercana al 57 %, además del cumplimiento sostenido de los Estándares de Calidad Ambiental para la Categoría 3 en los principales parámetros evaluados. El análisis estadístico confirmó diferencias significativas respecto al valor normativo de referencia ($p < 0.05$). **Discusión de los resultados:** La disminución consistente de la carga orgánica y microbiológica se asocia al efecto del filtro biológico como unidad de tratamiento previo, que favorece la biodegradación aerobia y reduce la presión operativa sobre la laguna, en concordancia con antecedentes técnicos reportados para sistemas extensivos en contextos rurales. **Conclusión:** Se concluye que la implementación del filtro biológico mejora de manera significativa la eficacia de la laguna de oxidación de Ticrapo, consolidándose como una alternativa técnica viable y sostenible para optimizar el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales de recursos limitados.

Palabras Claves: *filtro biológico; laguna de oxidación; tratamiento de aguas residuales; remoción de contaminantes; calidad del agua.*

ABSTRAC

The **objective** of this research was to evaluate the effectiveness of a biological filter in wastewater treatment in Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024. **Methodological strategy:** An applied study was conducted with environmental monitoring over four campaigns, considering representative points before and after the biological filter and within the oxidation lagoon. Physicochemical and microbiological parameters (BOD₅, COD, total coliforms, oils and greases, pH, and temperature) were analyzed and compared with national regulatory limits. The hydraulic and sanitary design of the filter was also carried out, and statistical analysis was performed using Student's t-test. **Results:** The results showed a reduction in BOD₅ from approximately 70 mg/L to values between 11 and 13 mg/L, with a removal efficiency of approximately 57%. Furthermore, the study demonstrated sustained compliance with Environmental Quality Standards for Category 3 in the main parameters evaluated. Statistical analysis confirmed significant differences compared to the reference standard value ($p < 0.05$). **Discussion of results:** The consistent decrease in organic and microbiological load is associated with the effect of the biological filter as a pretreatment unit, which promotes aerobic biodegradation and reduces the operational pressure on the lagoon, in accordance with technical background reported for extensive systems in rural contexts. **Conclusion:** It is concluded that the implementation of the biological filter significantly improves the efficiency of the Ticrapo oxidation lagoon, establishing it as a viable and sustainable technical alternative for optimizing wastewater treatment in resource-limited rural areas.

Keywords: *biological filter; oxidation pond; wastewater treatment; contaminant removal; water quality.*

I. INTRODUCCION

En el nuevo milenio, la gestión del agua se ha convertido en uno de los pilares esenciales para garantizar la sostenibilidad ambiental y el bienestar humano. El incremento progresivo de la población, el crecimiento urbano y la intensificación de las actividades domésticas y productivas generan grandes volúmenes de aguas residuales, cuya disposición final sin tratamiento genera deterioro ambiental, eutrofización de cuerpos receptores y riesgos sanitarios para las comunidades. Frente a este escenario, las soluciones convencionales de tratamiento, como las lagunas de oxidación, continúan siendo ampliamente utilizadas debido a su bajo costo operativo y simplicidad estructural; sin embargo, el reto actual es optimizar su eficiencia ante cargas orgánicas crecientes y normativas ambientales más estrictas.

En el contexto de las tecnologías emergentes del siglo XXI, el empleo de filtros biológicos surge como una alternativa sostenible que puede integrarse a sistemas tradicionales para mejorar la remoción de materia orgánica y reducir parámetros críticos como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Estos sistemas actúan como soporte para el crecimiento de biopelículas capaces de degradar contaminantes, favoreciendo procesos naturales de purificación y reduciendo la necesidad de infraestructura costosa o tratamientos químicos. Su incorporación representa un modelo de innovación apropiada, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible vinculados a agua limpia, salud pública y protección de ecosistemas acuáticos.

La localidad de Ticrapo, en Castrovirreyna – Huancavelica, constituye un territorio donde el tratamiento de aguas residuales cobra especial relevancia, debido a que la laguna de oxidación existente constituye el principal medio de depuración antes del vertimiento al entorno. No obstante, su eficiencia puede verse limitada por las condiciones climáticas, la disponibilidad de mantenimiento y la variación estacional en el caudal de descarga. Bajo esta realidad, el presente estudio titulado "Impacto del tratamiento de aguas residuales mediante filtro biológico en la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica 2024", se propone evaluar científicamente la contribución del filtro biológico como complemento tecnológico para fortalecer el proceso depurador.

Esta investigación aporta evidencia aplicada que permite comprender cómo la integración de sistemas biotecnológicos puede potenciar infraestructuras existentes sin necesidad de reemplazar su diseño, constituyéndose en una alternativa viable, replicable y sostenible para comunidades

rurales. Los resultados obtenidos servirán como referencia para futuras políticas ambientales y proyectos de tratamiento descentralizado, contribuyendo a la mejora de la calidad del agua y a la resiliencia socioambiental en el nuevo milenio.

1.1 Situación problemática

En la actualidad, el tratamiento de aguas residuales es esencial para la gestión ambiental. La liberación de estos efluentes sin tratamiento adecuado pone en riesgo el equilibrio de los ecosistemas y la salud pública. Al mismo tiempo, la producción y el consumo intensivo de petróleo a nivel mundial han exacerbado la crisis energética y la contaminación ambiental [1].

Las lagunas de oxidación, conocidas por ser un método comprobado y económico para el tratamiento de aguas residuales, han sido ampliamente utilizadas durante muchos años. No obstante, para abordar los desafíos del siglo XXI, es imprescindible adoptar tecnologías innovadoras que mejoren su eficiencia y promuevan una mayor sostenibilidad.

La situación problemática en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, se centra en la gestión inadecuada de aguas residuales, que afecta tanto la salud pública como el medio ambiente. La falta de infraestructura adecuada para el tratamiento de efluentes industriales y domésticos ha llevado a la descarga de aguas contaminadas en cuerpos de agua cercanos, lo que provoca la proliferación de enfermedades transmitidas por el agua y contamina los recursos hídricos locales. Este problema es especialmente crítico en áreas rurales como Ticrapo, donde las comunidades son vulnerables a los efectos adversos de la contaminación, y donde las opciones de tratamiento de aguas residuales son limitadas.

La integración de tecnologías innovadoras, como los filtros biológicos, podría optimizar el rendimiento de las lagunas de oxidación, mejorando así la calidad del efluente tratado. Sin embargo, la falta de investigación específica en el contexto local dificulta la implementación de soluciones efectivas y sostenibles, lo que subraya la necesidad de evaluar y adaptar estas tecnologías para abordar de manera integral la problemática del tratamiento de aguas residuales en la región.

En consecuencia, la incorporación de tecnologías innovadoras en las lagunas de oxidación en el siglo XXI debe centrarse en aumentar la eficiencia del tratamiento, disminuir el impacto ambiental, fomentar la reutilización del agua y tener en cuenta los aspectos socioeconómicos. La elección de las tecnologías más apropiadas dependerá de las características específicas del agua residual, los objetivos de tratamiento y las condiciones locales.

1.2 Antecedentes de la Investigación

En las últimas décadas, diferentes investigaciones han centrado su atención en mejorar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales ante el incremento de cargas contaminantes y el fortalecimiento de normativas ambientales. A nivel internacional, diversos estudios

han demostrado que los sistemas convencionales, como las lagunas de oxidación, pueden optimizarse mediante la incorporación de tecnologías complementarias, destacando el uso de filtros biológicos, humedales construidos y procesos de bioadsorción para incrementar la remoción de materia orgánica y nutrientes. Estas experiencias han mostrado reducciones significativas en parámetros como DBO, sólidos suspendidos y coliformes, reforzando la importancia del tratamiento biotecnológico en entornos urbanos y rurales.

En el contexto nacional, se han desarrollado trabajos que evalúan alternativas de bajo costo para el tratamiento de efluentes domésticos, resaltando el uso de materiales naturales y residuos agroindustriales como soportes filtrantes. Tales investigaciones evidencian que, cuando se integran sistemas biológicos a las lagunas de estabilización, es posible mejorar la calidad del agua tratada sin requerir instalaciones complejas, lo que resulta adecuado para comunidades altoandinas con limitaciones técnicas y económicas. Este panorama respalda la pertinencia del presente estudio al proponer la incorporación de un filtro biológico para potenciar el rendimiento de la laguna de oxidación en Ticrapo, contribuyendo con conocimiento científico aplicable y replicable en escenarios similares.

1.2.1 Antecedentes internacionales

La gestión adecuada de los efluentes industriales constituye un elemento clave para avanzar hacia los objetivos globales de sostenibilidad y para garantizar la protección de los recursos naturales a largo plazo. El vertimiento de aguas residuales sin un tratamiento apropiado puede generar impactos significativos en los ecosistemas acuáticos, deteriorar la calidad de los cuerpos de agua y representar riesgos para la salud de las poblaciones. En este sentido, el manejo responsable de los efluentes se relaciona directamente con los compromisos internacionales orientados a mejorar la calidad del agua, promover la salud pública y fomentar un desarrollo equilibrado entre crecimiento económico y protección ambiental.

Dentro del estado del arte, diversos estudios señalan que enfrentar este desafío requiere la participación coordinada de múltiples actores, incluyendo gobiernos, sector productivo, instituciones académicas y la sociedad civil. La adopción de tecnologías de tratamiento más eficientes, el fortalecimiento de marcos regulatorios ambientales, la implementación de prácticas de producción más limpia y la promoción de programas de educación y sensibilización ambiental son estrategias fundamentales para reducir la carga contaminante de los efluentes industriales. La integración de estos enfoques permite no solo mejorar la calidad del agua tratada, sino también promover sistemas de gestión que contribuyan a la conservación de los ecosistemas y al bienestar de las generaciones presentes y futuras.[2].

Las principales limitaciones ambientales se asocian al riesgo de contaminación de los cuerpos de agua y de los suelos cuando los efluentes son vertidos sin un tratamiento adecuado o sin un control técnico apropiado. Esta situación puede provocar un deterioro progresivo en la calidad de los recursos hídricos, alterando sus características físicas, químicas y biológicas. Como consecuencia, se generan impactos negativos en los ecosistemas circundantes, afectando la biodiversidad y el equilibrio ecológico, además de incrementar los riesgos para la salud de las poblaciones que dependen de estos recursos [3]. El riesgo ambiental se intensifica debido a las características propias de muchas aguas residuales, las cuales pueden presentar valores de pH fuera de los rangos naturales, además de altas concentraciones de materia orgánica, compuestos inhibidores y diversas sustancias contaminantes, particularmente en efluentes generados por actividades agroindustriales. La presencia de estos componentes altera las condiciones físico-químicas de los cuerpos de agua receptores y puede afectar los procesos biológicos que sostienen los ecosistemas acuáticos. En consecuencia, estas condiciones favorecen fenómenos de degradación ambiental, eutrofización y deterioro de la calidad del agua, lo que hace imprescindible la aplicación de sistemas de tratamiento adecuados y eficientes que permitan disminuir la carga contaminante antes de la descarga final de los efluentes al ambiente [4].

Las principales restricciones ambientales se relacionan con el riesgo de contaminación de los cuerpos de agua y de los suelos cuando los efluentes son descargados sin un control adecuado o sin haber pasado por procesos de tratamiento eficientes. Esta situación puede generar alteraciones significativas en la calidad de los recursos hídricos y del suelo, afectando los procesos ecológicos naturales y el equilibrio de los ecosistemas. El problema se origina, en gran medida, en las características propias de muchas aguas residuales, que pueden presentar valores de pH fuera de los rangos naturales, además de altas concentraciones de materia orgánica, compuestos inhibidores, metales pesados y sustancias recalcitrantes que resultan difíciles de degradar mediante procesos naturales [5]. La presencia de estos contaminantes incrementa la probabilidad de impactos ambientales negativos, como la degradación de la calidad del agua, la alteración de los ciclos biogeoquímicos y la acumulación de sustancias tóxicas en el suelo y en los organismos vivos. En consecuencia, se vuelve indispensable implementar sistemas de tratamiento adecuados y tecnologías de depuración eficientes que permitan reducir la carga contaminante de los efluentes antes de su disposición final, contribuyendo así a la protección de los ecosistemas y a la gestión sostenible de los recursos hídricos [5].

La presencia de estos contaminantes incrementa de manera considerable el riesgo de deterioro ambiental, ya que su acumulación en los cuerpos de agua y en los suelos puede alterar los procesos ecológicos naturales y afectar la estabilidad de los ecosistemas. Cuando los efluentes con altas concentraciones de sustancias contaminantes son descargados sin un tratamiento previo adecuado, se favorecen fenómenos como la degradación de la calidad del agua, la afectación de la biodiversidad y la generación de condiciones adversas para la vida acuática [6]. Por esta razón, resulta indispensable implementar procesos de tratamiento eficientes que permitan reducir la concentración de estos contaminantes antes de la disposición final de los efluentes en el medio natural. La aplicación de tecnologías de depuración adecuadas contribuye a disminuir los impactos ambientales, mejorar la calidad del agua y proteger los recursos hídricos, garantizando así un manejo responsable del ambiente y la sostenibilidad de los ecosistemas a largo plazo [6] y las principales restricciones ambientales se asocian al riesgo de contaminación de los cuerpos de agua y de los suelos cuando los efluentes son descargados sin un control adecuado. Este problema se origina en las características propias de muchas aguas residuales, las cuales pueden presentar valores de pH fuera de rangos normales, así como elevadas concentraciones de materia orgánica, compuestos inhibidores, metales pesados y sustancias recalcitrantes de difícil degradación. La presencia de estos contaminantes incrementa el potencial de deterioro ambiental y hace indispensable la aplicación de procesos de tratamiento eficientes que reduzcan su impacto antes de la disposición final de los efluentes. [7].

Resulta imprescindible someter las aguas residuales domésticas a procesos de tratamiento adecuados con el propósito de disminuir la concentración de contaminantes presentes, entre ellos materia orgánica, sólidos suspendidos y microorganismos patógenos. Sin un tratamiento previo, estos efluentes pueden convertirse en una fuente importante de contaminación para los cuerpos de agua y el suelo, generando riesgos sanitarios para las poblaciones y afectando el equilibrio de los ecosistemas acuáticos [8]. La aplicación de sistemas de tratamiento permite reducir significativamente la carga contaminante del agua residual antes de su descarga al ambiente, favoreciendo la protección de la salud pública y la conservación de los recursos hídricos. Asimismo, estos procesos contribuyen a mejorar la calidad del efluente tratado, permitiendo que su disposición final se realice bajo condiciones más seguras y compatibles con los estándares ambientales establecidos para la protección del entorno natural [8].

Resulta imprescindible someter las aguas residuales domésticas a procesos de tratamiento adecuados con el propósito de disminuir la concentración de contaminantes presentes, entre ellos materia orgánica, sólidos suspendidos y microorganismos patógenos. Sin un tratamiento previo, estos efluentes pueden convertirse en una fuente importante de contaminación para los cuerpos de agua y el suelo, generando riesgos sanitarios para las poblaciones y afectando el equilibrio de los ecosistemas acuáticos [9]. La aplicación de sistemas de tratamiento permite reducir significativamente la carga contaminante del agua residual antes de su descarga al ambiente, favoreciendo la protección de la salud pública y la conservación de los recursos hídricos. Asimismo, estos procesos contribuyen a mejorar la calidad del efluente tratado, permitiendo que su disposición final se realice bajo condiciones más seguras y compatibles con los estándares ambientales establecidos para la protección del entorno natural [9].

Los sistemas de tratamiento pasivo, como los humedales construidos, los estanques de estabilización y las lagunas de oxidación, constituyen alternativas ampliamente utilizadas para el tratamiento de aguas residuales domésticas, especialmente en comunidades rurales o en zonas donde los recursos técnicos y energéticos son limitados. Estos sistemas se basan en procesos naturales de depuración, donde intervienen factores físicos, químicos y biológicos que permiten la reducción progresiva de contaminantes presentes en el agua residual [10]. En este tipo de tecnologías, la acción combinada de microorganismos, algas, vegetación acuática y condiciones ambientales como la radiación solar y la sedimentación natural contribuye a la degradación de la materia orgánica, la reducción de nutrientes y la disminución de microorganismos patógenos. Debido a su diseño sencillo, bajo consumo energético y costos operativos relativamente reducidos, los sistemas de tratamiento pasivo representan una opción sostenible para mejorar la calidad del agua residual antes de su descarga al ambiente o su posible reutilización en determinadas actividades [10].

Estos sistemas se distinguen por su estructura simple y requerimientos mínimos de energía y mantenimiento, lo que facilita su implementación y operación en contextos donde los recursos técnicos y económicos son limitados. Gracias a estas características, resultan especialmente adecuados para comunidades descentralizadas, zonas rurales y áreas alejadas de infraestructuras de saneamiento complejas, donde se requieren soluciones de tratamiento eficientes pero de bajo costo operativo [11]. Además, su funcionamiento se basa principalmente en procesos naturales de depuración, lo que reduce la necesidad de equipos mecánicos sofisticados y disminuye los costos asociados al consumo

energético y a la operación del sistema. Por estas razones, los sistemas de tratamiento pasivo han sido ampliamente adoptados como una alternativa sostenible para mejorar la calidad de las aguas residuales antes de su disposición final, contribuyendo al mismo tiempo a la protección del ambiente y al manejo responsable de los recursos hídricos [12].

El empleo de estos sistemas de tratamiento ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, debido a su capacidad para depurar aguas residuales mediante procesos naturales y a su relativa simplicidad operativa. Diversas experiencias reportadas en diferentes contextos han demostrado que estas tecnologías pueden alcanzar niveles adecuados de remoción de contaminantes, especialmente en comunidades donde se requieren soluciones de bajo costo y fácil mantenimiento [12]. Sin embargo, a pesar de sus ventajas, estos sistemas también presentan algunas limitaciones que deben considerarse durante su implementación y operación. Entre ellas se encuentra la necesidad de superficies relativamente extensas para su funcionamiento adecuado, así como la posible generación de olores en determinadas condiciones de operación. Asimismo, los tiempos de retención hidráulica suelen ser más prolongados en comparación con otros métodos de tratamiento más intensivos, lo que puede influir en la velocidad del proceso de depuración. Estas características hacen necesario evaluar cuidadosamente las condiciones del entorno y los objetivos del tratamiento antes de su aplicación. [9].

Además, resulta complejo prever con exactitud el desempeño de un diseño específico antes de su implementación, ya que la eficiencia real del sistema suele evidenciarse únicamente después de su instalación y tras un periodo de operación suficiente que permita su estabilización. Durante esta fase de maduración, los procesos biológicos y las interacciones entre los microorganismos, el sustrato y las condiciones ambientales alcanzan un equilibrio que determina el funcionamiento efectivo del sistema. Por esta razón, el rendimiento de estas tecnologías puede variar en función de factores como la carga orgánica del efluente, las condiciones climáticas y las características del diseño, lo que hace necesario un seguimiento técnico durante las primeras etapas de operación para evaluar y optimizar su desempeño [12].

Los humedales artificiales representan una tecnología natural ampliamente empleada para la depuración de aguas residuales, destacándose por su bajo consumo energético, simplicidad operativa y costos de mantenimiento relativamente reducidos. Estos sistemas se diseñan para reproducir, de manera controlada, los procesos que ocurren en los humedales naturales, donde la

interacción entre el sustrato, la vegetación acuática y las comunidades microbianas permite el desarrollo de mecanismos naturales de depuración del agua. A través de estos procesos, se favorece la retención, transformación y degradación de diversos contaminantes presentes en los efluentes [13]. El funcionamiento de los humedales artificiales se basa en la acción conjunta de procesos físicos, químicos y biológicos, como la sedimentación de partículas, la filtración a través del sustrato, la adsorción de compuestos y la degradación biológica llevada a cabo por microorganismos asociados a las raíces de las plantas. Como resultado, estos sistemas contribuyen a la reducción de materia orgánica, nutrientes como nitrógeno y fósforo, y microorganismos patógenos, mejorando significativamente la calidad del agua tratada. Debido a estas características, los humedales artificiales se consideran una alternativa eficiente, sostenible y apropiada para contextos rurales o comunidades con recursos limitados, donde se requieren soluciones de tratamiento ambientalmente amigables y de fácil implementación [13].

Además, estos sistemas presentan la capacidad de remover una amplia gama de contaminantes presentes en las aguas residuales mediante la interacción simultánea de procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren dentro del sistema de tratamiento. Entre los mecanismos más relevantes se encuentran la sedimentación y la filtración, que facilitan la retención de partículas y sólidos suspendidos; la adsorción y precipitación de determinados compuestos, que permiten inmovilizar o transformar sustancias disueltas; y la degradación biológica, realizada por comunidades microbianas que se desarrollan en el sustrato y en la zona radicular de la vegetación [14]. La acción combinada de estos procesos genera condiciones favorables para la transformación y reducción de diversos contaminantes, incluyendo materia orgánica, nutrientes como nitrógeno y fósforo, y microorganismos patógenos. Como consecuencia, se produce una disminución progresiva de la carga contaminante del efluente, mejorando significativamente la calidad del agua tratada. Este comportamiento convierte a estos sistemas en una alternativa eficiente para el tratamiento de aguas residuales, especialmente en contextos donde se busca implementar tecnologías sostenibles que aprovechen los procesos naturales de depuración [14]. No obstante, durante la implementación de humedales construidos es necesario considerar ciertas limitaciones que pueden influir en su desempeño y viabilidad operativa. Entre los principales aspectos se encuentra la disponibilidad de terreno, ya que estos sistemas requieren superficies relativamente amplias para garantizar tiempos adecuados de retención hidráulica y un tratamiento eficiente del efluente.

Asimismo, su funcionamiento puede verse condicionado por factores climáticos, tales como la temperatura, la radiación solar y las variaciones estacionales, los cuales influyen en la actividad biológica de los microorganismos y en el crecimiento de la vegetación que participa en los procesos de depuración [15]. Desde una perspectiva técnica, diversos estudios dentro del estado del arte señalan que, aunque los humedales construidos constituyen una alternativa sostenible y de bajo consumo energético para el tratamiento de aguas residuales, su eficiencia puede variar dependiendo de las condiciones ambientales, el diseño hidráulico y el tipo de sustrato empleado. Por ello, su planificación requiere una evaluación cuidadosa del contexto geográfico y climático donde se instalarán, con el fin de asegurar un funcionamiento estable y maximizar su capacidad de remoción de contaminantes a largo plazo [15].

En este contexto, el filtro biológico aireado (BAF) se presenta como una alternativa eficiente para el tratamiento de aguas residuales, debido a su diseño compacto y a la integración de un medio filtrante con un sistema de aireación. Este tipo de reactor permite que los microorganismos adheridos al material filtrante degraden la materia orgánica mientras el suministro de aire favorece las condiciones aeróbicas necesarias para los procesos biológicos. Gracias a estas características, el BAF se ha consolidado como una tecnología versátil en sistemas de tratamiento descentralizado, ya que puede ofrecer soluciones operativas eficientes, con menor requerimiento de espacio y costos relativamente accesibles en diferentes etapas del proceso de depuración de aguas residuales [16].

1.2.2 Antecedentes nacionales

La problemática ambiental se intensifica cuando las aguas residuales presentan una coloración oscura marcada, ya que esta condición limita la penetración de la radiación solar en los cuerpos de agua receptores. Esta reducción de la luz afecta los procesos fotosintéticos de los organismos acuáticos y puede generar alteraciones en la dinámica de la cadena trófica si los efluentes son descargados sin un tratamiento previo adecuado. Frente a esta situación, se han aplicado biofiltros elaborados con materiales lignocelulósicos, como aserrín y bagazo de caña de azúcar, los cuales actúan como medios filtrantes capaces de retener partículas y favorecer procesos de depuración, funcionando de manera semejante a un sistema de filtración física combinado con procesos biológicos [17].

En el distrito de Yauli, Huancavelica, Perú, se encuentra una planta de tratamiento de aguas residuales municipales que presentaba una deficiencia en el control del nivel de calidad de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del

efluente. Este debía cumplir con un límite máximo permisible (LMP) de 100 mg/L, pero en realidad llegaba a 185 mg/L. Para abordar este problema, se implementó un proceso de mejora del nivel de calidad mediante el uso de un filtro biológico vegetal [18].

El objetivo de este estudio consiste en desarrollar un sistema sostenible para el tratamiento de aguas residuales domésticas, a partir del diseño de una infraestructura compuesta por un tanque séptico, un filtro biológico y un sistema de zona de raíces, aplicado en un condominio residencial horizontal ubicado en el municipio de Caçador/SC. Esta configuración tecnológica busca integrar diferentes etapas de depuración que permitan mejorar progresivamente la calidad del efluente mediante procesos físicos, biológicos y naturales, contribuyendo a una gestión más eficiente del agua residual generada en áreas residenciales [19]. Dentro del estado del arte, diversos estudios destacan que la fitorremediación aplicada a sistemas de tratamiento descentralizados representa una alternativa viable y ambientalmente favorable. En este enfoque, el tanque séptico cumple la función de remover sólidos y materia sedimentable, el filtro biológico favorece la degradación de compuestos orgánicos mediante la actividad microbiana, y el sistema de zona de raíces, basado en la interacción entre sustrato, plantas y microorganismos, contribuye a la depuración final del efluente. Este tipo de sistemas permite reducir la carga contaminante, mejorar la calidad del agua tratada y minimizar impactos ambientales [19].

Asimismo, los sistemas de tratamiento por zona de raíces desempeñan un papel importante en la purificación de los efluentes, ya que facilitan procesos de filtración, adsorción y degradación biológica dentro del sustrato y la vegetación. Como resultado, el agua tratada puede alcanzar condiciones adecuadas para su conducción hacia los sistemas de drenaje, cuerpos receptores o redes de evacuación urbana, siempre que se cumplan los criterios ambientales establecidos. De esta manera, la integración de estas tecnologías constituye una estrategia sostenible que fortalece la eficiencia del tratamiento de aguas residuales y promueve el uso responsable de los recursos hídricos [19].

1.2.3 Antecedentes locales

“El objetivo es proponer la alternativa de tratamiento terciario de aguas residuales mediante el uso de humedales de flujo subsuperficial (HH-FSS)”. “Este método aprovecha las plantas, los microorganismos y el sustrato para eliminar contaminantes del agua, ofreciendo una solución ecológica y eficiente para mejorar la calidad del efluente tratado”[20]. En contraste, la presente investigación busca implantar la tecnología del filtro biológico como tratamiento

terciario. Los filtros biológicos emplean medios filtrantes, como arenas o gravas, que albergan biofilms de microorganismos que descomponen los contaminantes orgánicos restantes. “Esta tecnología es conocida por su alta eficiencia en la reducción de la demanda biológica de oxígeno (DBO) y sólidos suspendidos, proporcionando un enfoque complementario y eficaz para la depuración de aguas residuales”[21].

1.3 Bases Teóricas

1.3.1 Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales comprende un conjunto de procesos de naturaleza física, química y biológica orientados a reducir o eliminar las sustancias contaminantes presentes en el agua utilizada por actividades domésticas, industriales o agrícolas.

Estos procedimientos tienen como finalidad disminuir la carga de materia orgánica, sólidos suspendidos, nutrientes y microorganismos patógenos, permitiendo mejorar la calidad del efluente antes de su descarga al ambiente o de su posible reutilización en determinadas actividades. De esta manera, el tratamiento adecuado de las aguas residuales contribuye a la protección de los ecosistemas y al uso sostenible de los recursos hídricos [21]. Este proceso resulta esencial para proteger la salud pública y conservar el equilibrio de los ecosistemas naturales, ya que permite reducir la presencia de sustancias contaminantes y microorganismos patógenos antes de la descarga del efluente al ambiente. De esta manera, se minimizan los riesgos de contaminación de los recursos hídricos, se previenen posibles enfermedades asociadas al agua y se contribuye a la sostenibilidad ambiental [21].

1.3.2 Etapas del tratamiento de aguas residuales

El proceso de tratamiento se divide típicamente en varias etapas. En el pretratamiento, se eliminan los materiales grandes y sólidos a través de métodos como el cribado y el desarenado. Esto prepara el agua para las siguientes etapas al reducir la carga de contaminantes

Pretratamiento: En esta etapa inicial del tratamiento de aguas residuales se realiza la remoción de materiales de gran tamaño y partículas sólidas mediante operaciones como el cribado y el desarenado. Estos procedimientos permiten retener residuos gruesos, arenas y otros elementos que podrían afectar el funcionamiento de las unidades posteriores. De esta manera, el pretratamiento acondiciona el agua residual para las etapas siguientes del proceso, reduciendo la carga inicial de contaminantes y protegiendo la eficiencia de los sistemas de tratamiento subsiguientes [22].

Tratamiento Primario: Esta etapa se orienta principalmente a la separación de sólidos suspendidos, grasas y aceites presentes en el agua residual mediante procesos de sedimentación. Durante este proceso, el efluente permanece en tanques o sedimentadores donde las partículas más densas se depositan gradualmente en el fondo formando lodos, mientras que los materiales flotantes son retirados de la superficie. Como resultado, se reduce la carga de sólidos y materia orgánica antes de que el agua continúe hacia las etapas posteriores del tratamiento [23].

Tratamiento Secundario: Esta fase del proceso de depuración está orientada a la reducción de la materia orgánica disuelta y de los sólidos en suspensión mediante mecanismos biológicos. En esta etapa intervienen comunidades de microorganismos que metabolizan los compuestos orgánicos presentes en el agua residual, transformándolos en sustancias más estables. Estos procesos pueden desarrollarse en condiciones aeróbicas, donde existe disponibilidad de oxígeno, o anaeróbicas, cuando el tratamiento se realiza en ausencia de este. Como resultado de estas transformaciones biológicas, se logra disminuir significativamente la carga orgánica del efluente, obteniéndose un agua con mejores condiciones para su disposición final o para etapas adicionales de tratamiento [24].

Tratamiento Terciario: Esta etapa corresponde al proceso de depuración avanzada orientado a mejorar aún más la calidad del efluente tratado. En ella se busca reducir la presencia de nutrientes, microorganismos patógenos y otros contaminantes específicos que pueden permanecer después de las fases anteriores. Para ello se emplean técnicas complementarias como filtración, desinfección y procesos de adsorción o tratamiento químico, los cuales permiten disminuir las concentraciones residuales de sustancias indeseables. Como resultado, se obtiene un agua con mejores condiciones sanitarias y ambientales, lo que facilita su descarga segura al medio natural o su posible reutilización en determinadas actividades [25].

1.3.3 Tecnologías Aplicadas

Las tecnologías aplicadas se entienden como el uso práctico de conocimientos científicos, métodos técnicos y herramientas especializadas orientados a solucionar problemas concretos o a mejorar la eficiencia de determinados procesos. Estas tecnologías implican la adaptación y utilización de innovaciones técnicas en contextos reales, permitiendo optimizar el funcionamiento de sistemas productivos, ambientales o industriales. En el ámbito del tratamiento de aguas residuales, las tecnologías aplicadas incluyen la incorporación de

dispositivos, materiales o procedimientos que contribuyen a incrementar la capacidad de remoción de contaminantes y a mejorar la calidad del efluente, favoreciendo así una gestión más eficiente y sostenible de los recursos hídricos[22], [21] En el campo del tratamiento de aguas residuales, estas tecnologías comprenden un conjunto de sistemas, procesos y métodos técnicos orientados a mejorar la eficiencia de los procesos de depuración. Su aplicación permite incrementar la remoción de contaminantes, optimizar el funcionamiento de las unidades de tratamiento y elevar la calidad del efluente final. Asimismo, contribuyen a una gestión más eficiente de los recursos hídricos, favoreciendo prácticas que reducen el impacto ambiental y promueven el uso sostenible del agua [22], [21]. Entre estas alternativas se encuentran los filtros biológicos, los humedales construidos y los sistemas de desinfección avanzada, tecnologías que han sido aplicadas en distintos contextos para mejorar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales. Estas soluciones permiten incrementar la capacidad de remoción de contaminantes y elevar la calidad del efluente tratado. Asimismo, su implementación considera no solo los aspectos técnicos del proceso de depuración, sino también criterios económicos, sociales y ambientales, lo que favorece su aplicación en comunidades que requieren sistemas sostenibles y de fácil operación.

1.3.4 Filtro Biológico

Un filtro biológico es una unidad de tratamiento de aguas residuales que utiliza un medio poroso, como grava, arena u otros materiales filtrantes, sobre cuya superficie se desarrolla una biopelícula o biofilm compuesta por microorganismos. Estos microorganismos se adhieren al material del filtro y degradan la materia orgánica y otros compuestos presentes en el agua residual a medida que el líquido atraviesa el sistema. Mediante este proceso biológico se favorece la transformación y reducción de contaminantes, mejorando la calidad del efluente tratado y contribuyendo a la eficiencia global del sistema de depuración.” [22], [21]. Estos microorganismos degradan los compuestos orgánicos presentes en el agua residual a medida que el líquido atraviesa el medio filtrante, utilizando dichos compuestos como fuente de energía y nutrientes para su desarrollo. Durante este proceso biológico se produce la transformación de la materia orgánica y la reducción progresiva de contaminantes presentes en el efluente. En este sentido, los filtros biológicos constituyen una alternativa eficiente para disminuir la carga de materia orgánica, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y los sólidos suspendidos presentes en las aguas residuales. Su funcionamiento se basa en procesos naturales de degradación microbiana, lo que

permite mejorar la calidad del agua tratada mediante un sistema relativamente simple, de operación estable y con requerimientos económicos y energéticos reducidos, convirtiéndose en una opción sostenible para el tratamiento de efluentes [22], [21].

1.3.5 Laguna de Oxidación

Una laguna de oxidación es un sistema de tratamiento biológico de aguas residuales que aprovecha procesos naturales para reducir la carga contaminante del efluente. En este tipo de infraestructura intervienen la radiación solar, las algas y diversos microorganismos que interactúan para degradar la materia orgánica presente en el agua residual. La energía solar favorece el crecimiento de algas, las cuales producen oxígeno mediante la fotosíntesis, permitiendo que las bacterias aeróbicas utilicen este oxígeno para descomponer los contaminantes. Este sistema se caracteriza por su operación sencilla, bajos costos de mantenimiento y adecuada eficiencia en la reducción de materia orgánica, lo que lo convierte en una alternativa apropiada para comunidades rurales o zonas con recursos limitados, contribuyendo a mejorar la calidad del efluente antes de su disposición final o posible reutilización [22], [21]. Estas lagunas, generalmente de amplia extensión y baja profundidad, favorecen el desarrollo de procesos biológicos naturales dentro del sistema de tratamiento. En ellas interactúan organismos como algas y bacterias, cuya actividad metabólica —incluyendo la fotosíntesis y la respiración microbiana— permite transformar y degradar los compuestos orgánicos presentes en el agua residual. Como resultado de estas interacciones, se promueve la reducción de la materia orgánica y de determinados nutrientes, contribuyendo progresivamente a mejorar la calidad del agua antes de su disposición final o posible reutilización [22], [21]. Este método es considerado efectivo y de bajo costo, especialmente en áreas rurales o con recursos limitados.

1.3.6 Remoción de contaminantes

La remoción de contaminantes se entiende como el conjunto de procesos mediante los cuales se eliminan, transforman o reducen las sustancias potencialmente nocivas presentes en distintos medios ambientales, como el agua, el suelo o el aire. Este proceso tiene como finalidad disminuir la concentración de compuestos que pueden afectar la salud humana, los ecosistemas y la calidad de los recursos naturales. Para lograrlo, se emplean diversas técnicas que pueden ser de naturaleza física, química o biológica, las cuales actúan de manera individual o combinada dependiendo del tipo de contaminante y de las características del medio donde se encuentran [22].

En el caso del tratamiento de aguas residuales, la remoción de contaminantes implica la reducción de materia orgánica, nutrientes, sólidos suspendidos, microorganismos patógenos y otros compuestos que deterioran la calidad del agua. Los procesos físicos, como la sedimentación o filtración, permiten separar partículas presentes en el líquido; los procesos químicos facilitan la precipitación o neutralización de determinadas sustancias; mientras que los procesos biológicos utilizan la actividad metabólica de microorganismos para degradar compuestos orgánicos. La aplicación adecuada de estos mecanismos contribuye a mejorar la calidad del efluente tratado, permitiendo su disposición final con menor impacto ambiental o incluso su posible reutilización en determinadas actividades productivas [21]. “Este proceso resulta fundamental dentro del tratamiento de aguas residuales, ya que tiene como propósito disminuir la presencia de sustancias contaminantes y mejorar la calidad del efluente final, de modo que su descarga al ambiente no represente riesgos para los ecosistemas ni para la salud pública. La remoción eficiente de contaminantes permite que el agua tratada alcance niveles compatibles con los estándares ambientales establecidos y contribuya a una gestión responsable de los recursos hídricos. Para lograr este objetivo se emplea una variedad de tecnologías y métodos de tratamiento que pueden aplicarse de forma individual o combinada. Entre los más utilizados se encuentran la sedimentación y la filtración, que facilitan la separación de partículas sólidas; los procesos biológicos, que aprovechan la actividad metabólica de microorganismos para degradar la materia orgánica; y los procesos de oxidación avanzada, orientados a transformar compuestos más complejos o resistentes. La selección de estas tecnologías depende de la naturaleza de los contaminantes presentes, las condiciones del sistema de tratamiento y los objetivos de calidad que se buscan alcanzar en el efluente final [22], [21].

1.4 Formulación del problema general

a formulación del problema se origina en la necesidad de incrementar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales en la laguna de oxidación del distrito de Ticrapo. Aunque este sistema constituye una alternativa económica y de operación sencilla para el manejo de efluentes domésticos, en determinadas condiciones presenta limitaciones para reducir adecuadamente la concentración de contaminantes antes de su descarga al ambiente. Asimismo, el crecimiento progresivo de la población y las actuales exigencias de protección ambiental demandan sistemas de tratamiento más eficientes que garanticen la calidad del efluente y minimicen los riesgos para los ecosistemas y la salud de la población. En este contexto, surge la necesidad de evaluar alternativas tecnológicas que permitan optimizar el desempeño del sistema existente. Por ello, la presente investigación plantea

analizar la incorporación de un filtro biológico como una estrategia complementaria para mejorar el proceso de depuración en la laguna de oxidación. Esta propuesta busca determinar en qué medida dicha tecnología contribuye a incrementar la remoción de la carga orgánica y otros contaminantes, fortaleciendo así la eficiencia del tratamiento y promoviendo una gestión más sostenible de las aguas residuales en la localidad de Ticrapo. Por lo tanto, la pregunta de investigación que guía este estudio es:

1.4.1 Problema general

¿De qué manera el tratamiento de aguas residuales mediante filtro biológico influye en la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024?

1.4.2 Problemas específicos

PE1: ¿En qué medida la tecnología del filtro biológico aplicada en el tratamiento de aguas residuales contribuye a la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024?

PE2: ¿De qué manera el efecto del filtro biológico en el tratamiento de aguas residuales influye en la remoción de contaminantes en la laguna de oxidación de Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024.?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo principal

Evaluar el tratamiento de aguas residuales mediante un filtro biológico que influye en la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024.

1.5.2 Objetivos Específicos

OE1: Desarrollar la tecnología del filtro biológico aplicada al tratamiento de aguas residuales que contribuya a su articulación con la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024.

OE2: Determinar el efecto del filtro biológico en el tratamiento de aguas residuales que influye en la remoción de contaminantes en la laguna de oxidación de Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024.

1.6 Hipótesis y variables de la investigación

1.6.1 Hipótesis principal

El tratamiento de aguas residuales mediante un filtro biológico influye en la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024.

1.6.2 Hipótesis Específica

HE1: La tecnología del filtro biológico aplicada al tratamiento de aguas residuales contribuye a la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024.

HE2: El efecto del filtro biológico en el tratamiento de aguas residuales influye en la remoción de contaminantes en la laguna de oxidación de Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024, Huancavelica.

1.7 Variables

1.7.1 Variable independiente

Tratamiento de aguas residuales. - Esto se refiere a los diferentes métodos y procesos aplicados para tratar las aguas residuales en la localidad de Ticrapo.

1.7.2 Variable dependiente

Laguna de oxidación. - Esto se mide a través de diversos indicadores como la reducción de contaminantes, niveles de oxígeno disuelto, y otros parámetros de calidad del agua tratada.

1.7.3 Variable interviniente

Condiciones Ambientales y Climáticas. - Factores como la temperatura, la precipitación, y otras condiciones ambientales que podrían afectar la eficacia del tratamiento en la laguna de oxidación

Tabla 1. Operacionalización de variable

Variable Independiente	Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Unidades de medida	Estrategia metodológicas
VI: “Tratamiento de aguas residuales”	“El tratamiento de aguas residuales no solo busca cumplir con las normativas ambientales y de salud, sino también contribuir a la sostenibilidad mediante la recuperación y reutilización del agua, lo que es cada vez más crítico en contextos de escasez de recursos hídricos”[26]. Esta definición conceptual abarca tanto los procesos físicos, químicos y biológicos involucrados como los objetivos principales del tratamiento de aguas residuales	DI,1: Tecnología aplicada	I_{I,1,1}: filtro biológico	m	Observación Método de ensayo Estadístico de t-student
Variable Dependiente	Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Unidades de medida	
VD: “Laguna de oxidación”	De acuerdo con estudios en salud ambiental, la percepción de los usuarios sobre el agua potable incluye aspectos como el olor, el sabor, y la apariencia del agua, así como su nivel de confianza en la infraestructura de tratamiento y distribución [27].	DD,1: Remoción de contaminantes	I_{D,1,1}: DBO ₅ I_{D,1,2}: DQO I_{D,1,3}: SST I_{D,14}: Coliformes totales	µg/m ³ µg/m ³ µg/m ³ NMP/100ml	

1.8 Justificación e Importancia de Investigación

1.8.1 Justificación

El manejo adecuado de las aguas residuales constituye un desafío prioritario en muchas zonas rurales, donde la disponibilidad de infraestructura sanitaria, recursos técnicos y capacidades de operación suele ser limitada. En estos contextos, las lagunas de oxidación representan una alternativa viable para el tratamiento de efluentes domésticos debido a su diseño sencillo, bajo costo de operación y aprovechamiento de procesos naturales de depuración. Sin embargo, su desempeño puede verse influenciado por factores como las condiciones climáticas, la carga orgánica del afluente, el mantenimiento del sistema y la variabilidad del caudal. Por esta razón, resulta fundamental evaluar su funcionamiento en escenarios específicos, como el distrito de Ticrapo, con el fin de identificar oportunidades de optimización y la posible incorporación de tecnologías complementarias que permitan mejorar su eficiencia y adaptarla a las condiciones locales.

Asimismo, la creciente preocupación por la salud pública y la calidad ambiental refuerza la importancia de realizar estudios orientados a mejorar los sistemas de tratamiento de aguas residuales. La disposición inadecuada de efluentes sin un tratamiento eficiente puede provocar la contaminación de cuerpos de agua, afectar la calidad del suelo y favorecer la propagación de enfermedades de origen hídrico que impactan directamente en la población. En este sentido, analizar cómo el tratamiento previo de las aguas residuales, mediante la incorporación de tecnologías como filtros biológicos u otros sistemas complementarios, puede influir en la eficiencia de la laguna de oxidación permite generar conocimiento aplicado para fortalecer los procesos de depuración y reducir los riesgos sanitarios asociados a la descarga de efluentes. Por otro lado, esta investigación se inscribe dentro de un marco más amplio orientado a la sostenibilidad ambiental y al desarrollo territorial. La implementación de soluciones innovadoras y sostenibles en el tratamiento de aguas residuales contribuye a optimizar el uso de los recursos hídricos y a promover prácticas de gestión ambiental responsables. La mejora en la calidad del agua tratada abre la posibilidad de reutilización en actividades agrícolas, riego de áreas verdes o usos complementarios, lo cual resulta especialmente relevante en regiones donde el recurso hídrico es limitado. De esta manera, el fortalecimiento de los sistemas de tratamiento no solo reduce los impactos ambientales, sino que también favorece una gestión más eficiente y racional del agua.

Finalmente, el desarrollo de esta investigación adquiere una relevancia significativa al abordar simultáneamente aspectos relacionados con la eficiencia tecnológica, la protección ambiental, la salud pública y el desarrollo local. Evaluar el impacto del tratamiento de aguas residuales mediante tecnologías complementarias en la eficacia de la laguna de oxidación permitirá generar información científica útil para la toma de decisiones en materia de saneamiento rural. Asimismo, los resultados podrán servir como referencia para otras localidades con características similares, contribuyendo al diseño de estrategias sostenibles de tratamiento de aguas residuales y al fortalecimiento de la gestión ambiental en contextos rurales.

1.8.2 Importancia

La presente investigación adquiere una relevancia significativa por diversas razones vinculadas a la salud pública, la protección ambiental y el desarrollo sostenible de las comunidades. En primer lugar, el tratamiento adecuado de las aguas residuales constituye un elemento fundamental para prevenir riesgos sanitarios asociados a la contaminación del agua. Cuando los efluentes domésticos no reciben un tratamiento eficiente, pueden convertirse en un medio de propagación de microorganismos patógenos y otros contaminantes que afectan directamente la salud de la población. En este sentido, mejorar la calidad del agua tratada mediante la optimización de los sistemas de depuración contribuye a disminuir los riesgos de enfermedades de origen hídrico y a garantizar condiciones más seguras para las comunidades, especialmente en contextos rurales donde los sistemas de saneamiento suelen ser limitados.

Asimismo, la investigación presenta una importante dimensión ambiental, ya que promueve el uso de tecnologías de tratamiento basadas en procesos naturales que permiten reducir la carga contaminante de los efluentes antes de su descarga al medio natural.

La laguna de oxidación, al aprovechar la interacción entre la radiación solar, las algas y los microorganismos, constituye una alternativa eficiente para la depuración de aguas residuales en localidades con recursos limitados. La evaluación y optimización de este sistema, mediante la incorporación de tecnologías complementarias como filtros biológicos u otros mecanismos de mejora, permiten fortalecer su capacidad de remoción de contaminantes y favorecer una gestión más sostenible de los recursos hídricos. De esta manera, se contribuye a la conservación de los ecosistemas acuáticos y a la reducción de los impactos ambientales derivados del vertimiento de efluentes sin tratamiento adecuado.

Por otro lado, los resultados de esta investigación pueden generar beneficios directos para el desarrollo local. La mejora en la eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales contribuye a elevar la calidad ambiental del entorno y a mejorar las condiciones de vida de la población. Además, la implementación y el mantenimiento de tecnologías de tratamiento pueden abrir oportunidades para la capacitación técnica y la generación de empleo en actividades relacionadas con la gestión del agua y el saneamiento ambiental. Este proceso también fomenta una mayor conciencia comunitaria sobre la importancia de la gestión responsable del agua, fortaleciendo prácticas orientadas a la protección del ambiente y al uso racional de los recursos naturales.

Finalmente, esta investigación puede aportar información relevante para el fortalecimiento de políticas públicas y estrategias de gestión ambiental relacionadas con el tratamiento de aguas residuales en contextos rurales. Los resultados obtenidos pueden servir como base para la formulación de lineamientos técnicos y normativos que promuevan sistemas de tratamiento más eficientes, sostenibles y adaptados a las condiciones locales.

En este sentido, el estudio no solo aborda un problema técnico asociado al tratamiento de efluentes, sino que también contribuye a generar conocimiento aplicable para la toma de decisiones en materia de saneamiento, protección ambiental y desarrollo territorial sostenible.

1.9 Definiciones conceptuales

1.9.1 Recurso hídrico

En el contexto de la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), este enfoque se entiende como un proceso orientado a promover la planificación y administración coordinada de los recursos relacionados con el agua, la tierra y otros elementos asociados. Su finalidad es optimizar el uso de estos recursos de manera equilibrada, considerando simultáneamente las dimensiones ambientales, sociales y económicas, con el propósito de garantizar su disponibilidad y sostenibilidad para las generaciones presentes y futuras [28].

Asimismo, este enfoque busca impulsar el desarrollo económico y social de manera equilibrada, al mismo tiempo que procura reducir las presiones ambientales asociadas tanto a la disponibilidad como a la calidad del agua.

De esta manera, se promueve una gestión responsable del recurso hídrico que permita satisfacer las necesidades humanas y productivas sin comprometer la estabilidad de los ecosistemas ni la sostenibilidad ambiental a largo plazo [28].

1.9.2 Los agentes contaminantes

La Ley General del Ambiente N.º 28611 establece que los contaminantes son aquellas sustancias o agentes presentes en el ambiente en concentraciones que pueden generar efectos adversos sobre los seres vivos, incluyendo a los seres humanos, la flora y la fauna. Asimismo, se consideran contaminantes cuando superan los límites establecidos en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), los cuales fijan los niveles máximos permitidos para proteger la salud pública y mantener el equilibrio de los ecosistemas. De esta manera, la normativa busca regular la presencia de estas sustancias y prevenir impactos negativos sobre el ambiente [29].

1.9.3 Parámetros fisicoquímicos

Para evaluar la calidad del agua que ha sido sometida a procesos como purificación o saneamiento, es recomendable realizar una serie de mediciones fisicoquímicas utilizando métodos estandarizados. Esto se realiza con el propósito de verificar si la precisión de estas mediciones cumple con los estándares establecidos por la normativa vigente [30].

1.9.4 Bacteriología en la calidad del agua

Las bacterias pueden incorporarse al ambiente a partir de múltiples fuentes de contaminación, entre las que se incluyen las excretas humanas, las descargas domésticas y los sistemas de alcantarillado urbano, así como los efluentes provenientes de actividades industriales. Asimismo, otras vías potenciales de introducción de microorganismos al medio acuático son el agua de lastre de embarcaciones, escorrentías superficiales y vertimientos no controlados, los cuales pueden transportar bacterias y otros microorganismos hacia los cuerpos de agua. Estas fuentes contribuyen a la alteración de la calidad microbiológica del agua, incrementando los riesgos sanitarios y ambientales cuando no se cuenta con sistemas adecuados de tratamiento y control [9].

1.10 Norma legal

1.10.1 Decreto Supremo N°003-2010-MINAM

La normativa legal utilizada como referencia para la evaluación de los parámetros de calidad del agua corresponde al Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM, el cual establece los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el agua en el Perú. Estos estándares fijan los límites permisibles para diversos parámetros físicos, químicos y biológicos, con el propósito de garantizar que los cuerpos de agua mantengan condiciones adecuadas para la protección de la salud humana y la conservación de los ecosistemas acuáticos. En el marco de esta normativa, los valores obtenidos en el análisis de las aguas residuales tratadas son comparados

con los límites establecidos, permitiendo determinar si el efluente cumple con los criterios ambientales exigidos por la legislación vigente.

De acuerdo con lo señalado en esta norma, el agua que actúa como cuerpo receptor cumple un papel fundamental dentro del equilibrio de los ecosistemas acuáticos y, por lo tanto, su calidad debe mantenerse dentro de rangos que no representen un riesgo significativo para la salud pública ni para el ambiente. En consecuencia, los sistemas de tratamiento de aguas residuales deben asegurar que los efluentes descargados al medio natural presenten concentraciones de contaminantes dentro de los valores permitidos, contribuyendo así a la protección de los recursos hídricos, la biodiversidad y el bienestar de las poblaciones que dependen de estos ecosistemas [31].

Tabla 2. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua y establecen Disposiciones Complementarias

Parámetros	Unidad de medida	LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de agua
Aceites y grasas	µg/L	20
Demanda bioquímica de oxígeno	µg/L	100
Demanda química de oxígeno	µg/L	200
pH	unidad	6.5 – 8.5
Sólidos totales en suspensión	µg/L	150
Temperatura	°C	< 35
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	10 000

II. ESTRATEGIA METODOLOGÍA

2.1. Ubicación geográfica

La presente investigación se desarrolló en la localidad de Ticrapo, perteneciente al distrito del mismo nombre, ubicado en la provincia de Castrovirreyna, en la región Huancavelica, Perú. Ticrapo se encuentra situada en la zona sur de la región, caracterizada por un relieve andino, clima frío y una altitud promedio que supera los 3 000 m. s. n. m., condiciones que influyen directamente en los procesos físicos y biológicos del tratamiento de aguas residuales.

El sistema de laguna de oxidación evaluado forma parte de la infraestructura sanitaria local destinada al tratamiento de aguas residuales domésticas. Esta instalación se emplaza en la periferia del centro poblado, en un área con disponibilidad de terreno y pendiente moderada, lo que facilita el flujo gravitacional del efluente. La elección de este lugar como área de estudio responde a la necesidad de mejorar la eficiencia del sistema de tratamiento existente, debido a las condiciones climáticas y operativas propias de la zona altoandina que pueden limitar su rendimiento.

La ubicación geográfica de Ticrapo, sus características ambientales y su limitado acceso a tecnologías avanzadas de depuración hacen que este estudio resulte relevante para proponer soluciones aplicables y sostenibles en contextos rurales similares dentro de la región andina.

Tabla 3: Descripción y ubicación en coordenadas UTM el punto de monitoreo de calidad del agua residual

Monitoreo	Coordenadas UTM		Altitud	Descripción
	(WGS)			
	ESTE	NORTE		
AC-01	0452612	8519644	2096	Ingreso de las aguas a la laguna
AC-02	0452632	8519601	2090	Salidas de las aguas de la laguna

Coordenadas UTM en el WGS-84, zona 18L.

Mapa del área de estudio (descripción técnica)

El mapa del área de estudio representa de manera espacial la localización exacta de la laguna de oxidación del distrito de Ticrapo, permitiendo identificar su relación geográfica con el núcleo urbano y los elementos físicos del entorno. En este mapa se muestra la disposición territorial del sistema de tratamiento, destacando la ubicación del ingreso del afluente doméstico, la traza del colector principal y la posición de la estructura complementaria destinada a la instalación del filtro biológico. Asimismo, el mapa delimita las coordenadas geográficas de referencia, la altitud promedio y las características topográficas inmediatas, factores que influyen en el comportamiento hidráulico del sistema.

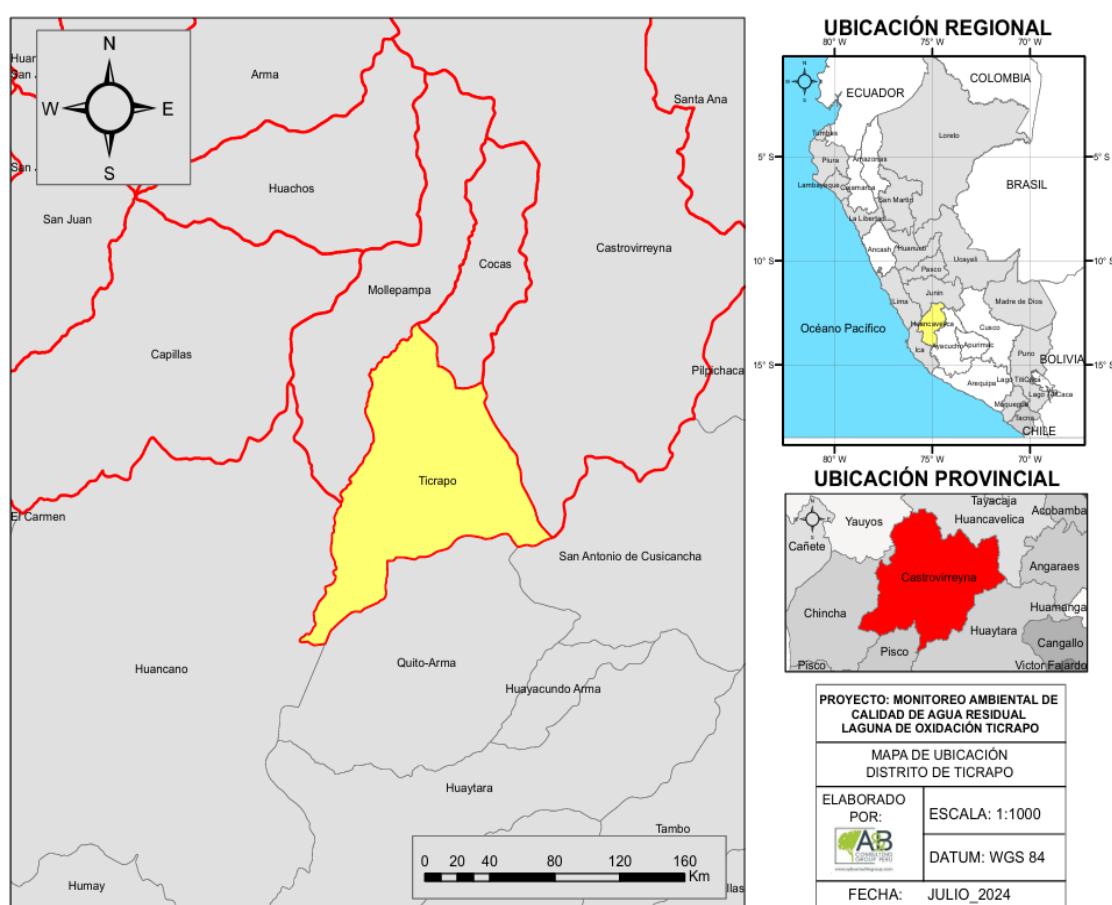


Figura 1. Ubicación del área de influencia del estudio, Distrito Ticrapo

El mapa del área de estudio presenta de manera geoespacial la localización precisa de la laguna de oxidación del distrito de Ticrapo, permitiendo visualizar su relación territorial con el núcleo urbano y con los principales elementos físicos del entorno. En dicha representación cartográfica se identifica la disposición del sistema de tratamiento, destacándose el punto de ingreso del afluente doméstico, el recorrido del colector principal y la ubicación de la estructura complementaria prevista para la instalación del filtro biológico. Asimismo, el mapa incorpora información de referencia como las coordenadas

geográficas, la altitud promedio del área y las características topográficas circundantes, aspectos que influyen en la dinámica hidráulica y en la eficiencia del proceso de depuración. Esta representación espacial facilita una comprensión integral del contexto territorial donde se desarrolla el estudio y constituye un soporte técnico para el análisis del funcionamiento del sistema y la evaluación de mejoras orientadas a optimizar la calidad del efluente tratado.

2.2. Metodología de la investigación

2.2.1. Tipo, nivel y diseño de investigación

Tipo de investigación

“El estudio corresponde a un tipo de investigación aplicada, porque busca generar una solución práctica y directa al problema de la baja eficiencia en el tratamiento de aguas residuales en la laguna de oxidación de Ticrapo mediante la incorporación de un filtro biológico. Además, se enmarca en un enfoque cuantitativo, ya que se analizan parámetros medibles de la calidad del agua para evaluar la eficacia del sistema. Asimismo, posee un carácter explicativo, debido a que pretende determinar cómo y en qué medida el filtro biológico influye en la remoción de contaminantes, aportando evidencia científica que permita mejorar el funcionamiento del sistema de depuración existente”[32].

Nivel de investigación

“El nivel de investigación es explicativo, ya que busca identificar y comprender la relación causal entre dos variables: el tratamiento de aguas residuales mediante filtro biológico y la eficacia de la laguna de oxidación. Este nivel permite determinar en qué medida la incorporación del filtro biológico influye en la remoción de contaminantes, aportando evidencia científica que explica el comportamiento del sistema de tratamiento. Además, se apoya en mediciones cuantitativas que permiten comparar resultados antes y después de la intervención, fortaleciendo la validez de las conclusiones”[33].

Diseño de investigación

“El diseño de investigación empleado es cuasi-experimental, debido a que se evalúa el efecto de la implementación del filtro biológico sobre la eficacia de la laguna de oxidación mediante la comparación de parámetros de calidad del agua antes y después de la intervención, sin realizar una manipulación total de todas las condiciones del entorno. Este diseño permite observar cambios en la remoción de contaminantes en un sistema real de tratamiento de aguas residuales, donde no es posible controlar completamente todas las variables externas, pero sí medir con precisión el impacto de la tecnología aplicada, fortaleciendo la validez de los resultados obtenidos” [34].

2.2.2. Población y muestra

Población

La población de estudio estuvo conformada por el total de aguas residuales generadas por la población del distrito de Ticrapo y conducidas hacia la laguna de oxidación para su respectivo tratamiento. Este conjunto de efluentes domésticos representa el universo del recurso hídrico sometido al proceso de depuración dentro del sistema sanitario local. En consecuencia, dicha población constituye la base de análisis para evaluar el comportamiento del tratamiento aplicado y determinar la contribución del filtro biológico en la mejora de los parámetros de calidad del efluente tratado.

Muestra

La muestra del estudio estuvo constituida por porciones representativas de agua residual recolectadas en puntos estratégicos del sistema de tratamiento: una antes de ingresar al filtro biológico (afluente) y otra después de su proceso de filtración (efluente tratado). Estas muestras permitieron reflejar las condiciones reales del agua en ambas etapas del proceso, facilitando la comparación de los parámetros de calidad y la determinación del grado de remoción de contaminantes. De esta manera, fue posible evaluar de forma objetiva la eficiencia del filtro biológico en la depuración del agua residual [23].

2.2.3. Técnicas de recolección de datos

“La recolección de datos se realizó mediante muestreo directo del agua residual en puntos previamente definidos del sistema de tratamiento, complementado con observación técnica de las condiciones operativas de la laguna de oxidación y del filtro biológico. Las muestras fueron obtenidas siguiendo protocolos estandarizados de toma de agua para asegurar la representatividad y confiabilidad de los datos.

Asimismo, se empleó registro instrumental, utilizando equipos calibrados para medir parámetros de calidad como DBO5, sólidos suspendidos y otros indicadores necesarios para evaluar la eficiencia del tratamiento. Estas técnicas permitieron obtener información precisa y comparable antes y después de la intervención con el filtro biológico [34]”.

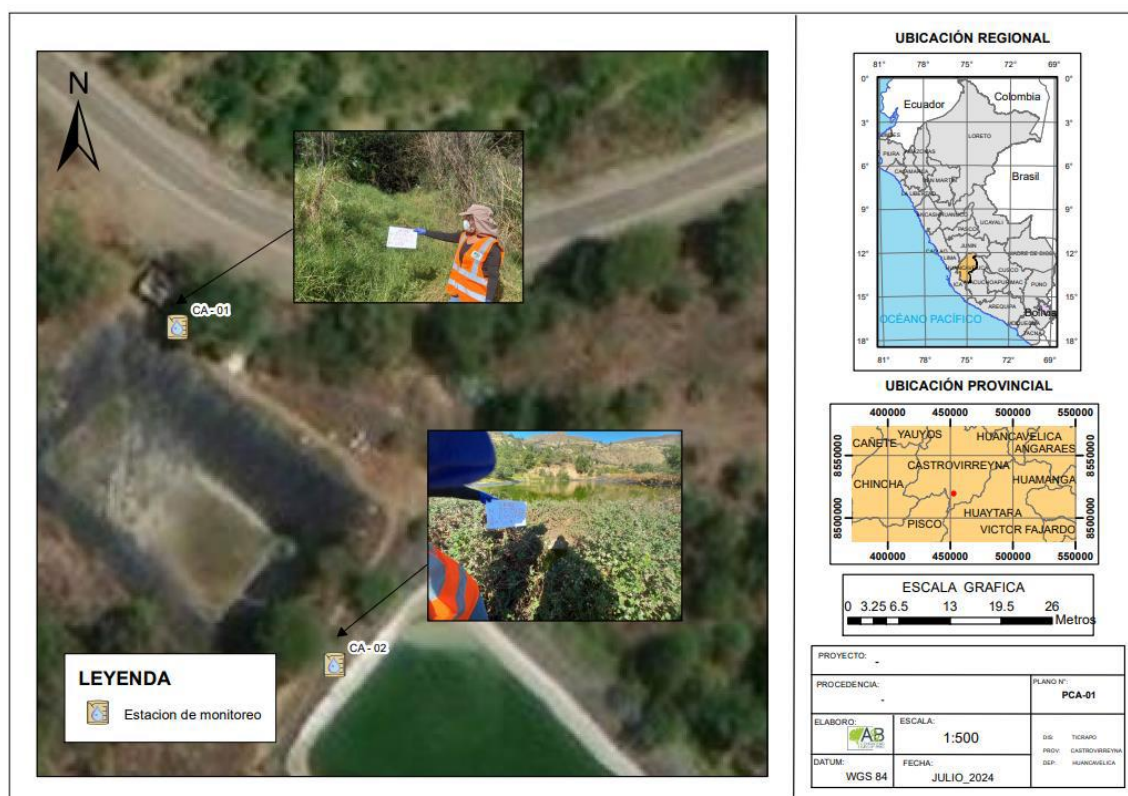


Figura 2. Ubicación del punto de monitoreo de calidad del agua residual

2.2.4. Instrumentos de recolección de datos

Para la obtención de la información requerida en el estudio se emplearon instrumentos y materiales adecuados a las características del muestreo y análisis de aguas residuales. En primer lugar, se utilizaron recipientes estériles y debidamente rotulados para la recolección de muestras en puntos estratégicos del sistema de tratamiento, específicamente antes y después de la aplicación del filtro biológico, con el fin de evitar alteraciones en sus propiedades físico-químicas y microbiológicas. Asimismo, se emplearon equipos portátiles de medición, entre ellos medidores de DBOs, turbidímetro y un equipo multiparamétrico para la determinación de variables como pH, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto, lo que permitió obtener mediciones precisas y confiables directamente en campo. Complementariamente, se utilizaron fichas y hojas de registro estructuradas donde se consignaron de manera sistemática los valores obtenidos durante cada jornada de muestreo, incluyendo fecha, hora, condiciones ambientales y observaciones relevantes, garantizando la organización, control y trazabilidad de la información recopilada. El uso conjunto de estos instrumentos y registros técnicos permitió asegurar la calidad de los datos obtenidos y facilitó la evaluación objetiva de la eficiencia del filtro biológico incorporado al sistema de laguna de oxidación en el distrito de Ticrapo [36].

2.2.5. Técnicas de procesamiento de datos

El procesamiento de los datos se desarrolló mediante procedimientos estadísticos orientados a organizar, sistematizar y analizar la información obtenida durante el muestreo en los distintos puntos del sistema de tratamiento. En una primera etapa, los valores registrados para cada parámetro físico-químico fueron codificados, tabulados y ordenados en matrices de datos, lo que permitió estructurar la información y facilitar su posterior análisis e interpretación. Posteriormente, se aplicaron técnicas de estadística descriptiva, tales como el cálculo de promedios, valores mínimos y máximos, desviación estándar y porcentajes de variación de los parámetros de calidad del agua, con el propósito de identificar tendencias y comparar el comportamiento del afluente y del efluente tratado. De manera complementaria, se elaboraron tablas y representaciones gráficas que permitieron visualizar las diferencias en los niveles de concentración de los contaminantes evaluados. Finalmente, se empleó la prueba estadística *t* de Student para muestras relacionadas, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, con el fin de determinar si las diferencias observadas entre los valores obtenidos antes y después de la implementación del filtro biológico resultaban estadísticamente significativas. Este conjunto de técnicas permitió realizar una evaluación objetiva y rigurosa de la influencia del filtro biológico en la mejora de la eficiencia del proceso de depuración en la laguna de oxidación del distrito de Ticrao [36].

2.2.6. Análisis e interpretación de datos

El análisis e interpretación de los datos se realizaron mediante la comparación sistemática de los valores obtenidos en los parámetros de calidad del agua antes y después de la incorporación del filtro biológico en el sistema de tratamiento. A partir de la información previamente procesada y organizada en tablas y gráficos, se identificaron las variaciones en la concentración de los principales contaminantes, evaluando el grado de remoción alcanzado en cada etapa del proceso. Asimismo, se examinó la coherencia de estos cambios con el comportamiento esperado de los sistemas de biofiltración, considerando los mecanismos biológicos y fisicoquímicos asociados a la degradación de la materia orgánica y la reducción de sólidos en suspensión. La interpretación de los resultados se sustentó en criterios técnicos, en el análisis estadístico aplicado y en la contrastación con antecedentes científicos relacionados con el tratamiento de aguas residuales mediante filtros biológicos y lagunas de oxidación. Del mismo modo, los hallazgos fueron analizados en función de las condiciones ambientales y operativas del sistema, tales como temperatura, radiación solar, tiempo de retención hidráulica y características del efluente doméstico, factores

que influyen directamente en la eficiencia del proceso de depuración. Este enfoque permitió establecer conclusiones sólidas sobre la contribución del filtro biológico en la mejora de la calidad del efluente tratado y en el fortalecimiento del desempeño del sistema de laguna de oxidación en el distrito de Ticrapo [37].

III. RESULTADOS

3.1. El tratamiento de aguas residuales mediante un filtro biológico y la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica.

El tratamiento de aguas residuales mediante filtros biológicos se ha consolidado como una alternativa eficiente para reforzar sistemas convencionales como las lagunas de oxidación, especialmente en localidades rurales donde los recursos técnicos y económicos son limitados. Este tipo de filtro funciona aprovechando la actividad de microorganismos adheridos a un medio poroso, los cuales degradan la materia orgánica y otros compuestos presentes en el agua residual. La incorporación de esta tecnología en la laguna de oxidación de Ticrapo permite complementar los procesos naturales de estabilización que ya ocurren en el sistema, incrementando la capacidad de remoción de contaminantes y mejorando la calidad del efluente final.

La eficacia del filtro biológico radica en su capacidad para mantener una alta superficie de contacto para el crecimiento microbiano y un flujo adecuado que favorece la aireación y la degradación biológica. Al integrarse con la laguna de oxidación, se fortalece la etapa de tratamiento secundario, reduciendo parámetros críticos como la demanda bioquímica de oxígeno y los sólidos suspendidos. Esto adquiere relevancia en Ticrapo, donde las condiciones climáticas, la variabilidad del caudal y la limitada infraestructura sanitaria exigen soluciones adaptadas al entorno. De este modo, la implementación del filtro biológico no solo optimiza el rendimiento del sistema existente, sino que también representa una estrategia sostenible y replicable para mejorar la gestión de aguas residuales en zonas altoandinas.

1. Enfoque normativo adecuado

- **Antes del filtro biológico:** Se evalúa el agua residual cruda o parcialmente tratada conforme a los **LMP establecidos en el D.S. N.º 003-2010-MINAM**, con la finalidad de caracterizar la carga contaminante inicial y determinar la eficiencia del sistema de tratamiento.
- **Después del filtro biológico y la laguna:** Se evalúa la calidad del efluente tratado conforme a los **ECA para agua del D.S. N.º 004-2017-MINAM, Categoría 3**, considerando su potencial uso para riego de vegetales y bebida de animales, así como su impacto ambiental.

2. Esta diferenciación es técnicamente sólida, normativa y científicamente aceptada.

Tabla 4. Estándares de la calidad ambiental (ECA) para la calidad de agua residual

PARÁMETROS	UNIDAD	CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL	
		D.S. N°003-2010-MINAM	D.S. N°004-2017-MINAM
		LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA EFLUENTES DE PTAR	CATEGORIA 3: RIEGO DE VEGETALES Y BEBIDAS DE ANIMALES
Aceites y grasas	mg/L	20	5
Coliformes Totales	NMP/100 ml	10 000	1 000
DBO5	mg/L	100	15
DQO	mg/L	200	40
pH	Unidad	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5
SST	mg/L	150	----
Temperatura	°C	< 35	Δ 3

Ubicación de la Investigación:			
Puntos muestreos:	CA-01		CA-02
Hora de muestreo:	14:30:00	p.m.	14:45:00 p.m.
Fecha muestreo:	03/03/2024	día	03/03/2024 día
Geolocalización:	8519644	Norte	8519601 Norte
	452612	Este	452632 Este
Altitud:	2096	msnm	2090 msnm

La ubicación de la investigación y la selección de los puntos de muestreo CA-01 y CA-02 se establecieron considerando criterios técnicos de representatividad espacial, control del proceso de tratamiento y seguimiento del comportamiento del efluente dentro del sistema de depuración de aguas residuales. Ambos puntos se encuentran situados dentro del área de influencia directa de la laguna de oxidación del distrito de Ticrapo y fueron georreferenciados mediante coordenadas UTM, registrando altitudes similares comprendidas entre 2090 y 2096 msnm, lo cual garantiza una adecuada precisión espacial y permite asegurar la comparabilidad de los datos obtenidos. El punto CA-01 corresponde al sector de ingreso o condición inicial del agua residual dentro del sistema, mientras que CA-02 se ubica en la zona posterior al proceso de tratamiento, permitiendo evaluar el

comportamiento del efluente y estimar la eficiencia del sistema en la reducción de contaminantes. El muestreo se realizó el 03 de marzo de 2024 en horarios próximos (14:30 y 14:45 horas), con el propósito de minimizar la variabilidad temporal asociada a fluctuaciones en el caudal, cambios climáticos o variaciones en las condiciones operativas del sistema. Esta estrategia metodológica permitió obtener datos representativos y comparables, asegurando que los resultados reflejen de manera confiable el desempeño del proceso de tratamiento y faciliten la evaluación objetiva de la eficacia de la laguna de oxidación en la mejora de la calidad del agua residual tratada.

Puntos de monitoreo en la laguna de oxidación: Ticrapo



Figura 3. Puntos de monitoreo de la laguna de oxidación en Ticrapo

Tabla 5: Resultados del muestreo de calidad de aguas residuales, de la primera campaña de monitoreo ambiental – 03 de marzo de 2024

PARÁMETROS	UNIDAD	CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL	RESULTADOS	
		D.S. N°003-2010-MINAM	CA- 01	CA-02
		LMP - PTAR	03/03/2024	03/0//2024
Aceites y grasas	mg/L	20	18	16
Coliformes Totales	NMP/100 ml	10 000	< 5450	< 3200
DBO5	mg/L	100	48	33
DQO	mg/L	200	87	65
pH	Unidad	6.5 – 8.5	8.3	7.9
SST	mg/L	150	98	77
Temperatura	°C	< 35	21	23

Tabla 6: Resultados del muestreo de calidad de aguas residuales, de la segunda campaña de monitoreo ambiental – 05 de mayo de 2024

PARÁMETROS	UNIDAD	CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL	RESULTADOS	
		D.S. N°003-2010-MINAM	CA- 01	CA-02
		LMP - PTAR	05/05/2024	05/05//2024
Aceites y grasas	mg/L	20	20	15
Coliformes Totales	NMP/100 ml	10 000	< 5100	< 2800
DBO5	mg/L	100	52	30
DQO	mg/L	200	91	56
pH	Unidad	6.5 – 8.5	8.2	7.9
SST	mg/L	150	95	73
Temperatura	°C	< 35	19	21

Tabla 7: Resultados del muestreo de calidad de aguas residuales, de la tercera campaña de monitoreo ambiental – 07 de julio de 2024

PARÁMETROS	UNIDAD	CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL	RESULTADOS	
		D.S. N°003-2010-MINAM	CA- 01	CA-02
		LMP - PTAR	07/07/2024	07/07//2024
Aceites y grasas	mg/L	20	19	17
Coliformes Totales	NMP/100 ml	10 000	< 5390	< 3300
DBO5	mg/L	100	46	28
DQO	mg/L	200	85	60
pH	Unidad	6.5 – 8.5	8.1	7.8
SST	mg/L	150	95	73
Temperatura	°C	< 35	20	22

Tabla 8: Resultados del muestreo de calidad de aguas residuales, de la cuarta campaña de monitoreo ambiental – 08 de setiembre de 2024

PARÁMETROS	UNIDAD	CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL	RESULTADOS	
		D.S. N°003-2010-MINAM	CA- 01	CA-02
		LMP - PTAR	08/09/2024	08/09//2024
Aceites y grasas	mg/L	20	19	16
Coliformes Totales	NMP/100 ml	10 000	< 5410	< 3150
DBO5	mg/L	100	49	31
DQO	mg/L	200	85	62
pH	Unidad	6.5 – 8.5	8.1	7.7
SST	mg/L	150	93	72
Temperatura	°C	< 35	19	22

Puntos de monitoreo en la laguna de oxidación con filtro biológico: Ticrapo



Figura 4. Puntos de monitoreo de la laguna de oxidación con filtro biológico en Ticrapo

Los puntos de monitoreo de la laguna de oxidación con filtro biológico en el distrito de Ticrapo fueron definidos siguiendo criterios técnicos de representatividad hidráulica, sanitaria y operativa, con el propósito de evaluar de manera precisa la calidad del agua en las etapas más relevantes del proceso de tratamiento. La selección estratégica de estos puntos permite registrar las condiciones del afluente y del efluente dentro del sistema, facilitando el seguimiento del comportamiento del filtro biológico y su contribución en la reducción de contaminantes. Asimismo, su adecuada localización garantiza la comparabilidad de los datos obtenidos durante el monitoreo, minimiza posibles sesgos en la toma de muestras y asegura una evaluación confiable de la eficiencia del sistema de depuración en la mejora de la calidad del agua residual tratada.

Tabla 9. Estándares de la calidad ambiental (ECA) para categoría 3: riego de vegetales y bebidas de animales a la salida del Filtro Biológico

PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADOS				D.S. N°004-2017-MINAM CATEGORIA 3: RIEGO DE VEGETALES Y BEBIDAS DE ANIMALES
		CA-03	CA-03	CA-03	CA-03	
		03/03/0224	05/05/0224	07/07/0224	08/08/0224	
Aceites y grasas	mg/L	3	3	3	3	5
Coliformes Totales	NMP/100 ml	990	980	950	965	1 000
DBO5	mg/L	12	11	13	12	15
DQO	mg/L	35	30	33	31	40
pH	Unidad	7.7	7.8	7.8	7.7	6.5 – 8.5
SST	mg/L	----	-----	-----	----	----
Temperatura	°C	20	20	21	21	Δ 3

3.1.1. Hipótesis general

Ho: El tratamiento de aguas residuales mediante un filtro biológico NO influye en la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024.

Ha: El tratamiento de aguas residuales mediante un filtro biológico influye en la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024.

1. Se planteó la hipótesis el monitoreo en el Centro Poblado Porta Cruz (Cloro)

$H_0: \mu \geq 15$ mg/L (El tratamiento de aguas residuales mediante un filtro biológico NO influye en la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024)

$H_a: \mu < 15$ mg/L (El tratamiento de aguas residuales mediante un filtro biológico influye en la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024)

Se consideró el nivel de significancia

$$\alpha = 0.05$$

Tabla 10. Se estimó el estadístico de prueba (estadística descriptiva)

Numero aleatorios	Columna 1	
12	Media	12.0000
11	Error típico	0.4082
13	Mediana	12
12	Desviación estándar	08165
	Varianza de la muestra	0.6667
	Coefficiente de asimetría	0
	Rango	2
	Mínimo	11
	Máximo	13
	Suma	48
	Cuenta	4
	Nivel de confianza (95.0%)	1.29923

Se estableció la regla de decisión

$\mu =$	15
$\alpha =$	0.05
n =	4
gl =	3

Se resuelve el t-Student experimental

$$t_{\text{Experimental}} = -7.3485$$

La distribución del $t_{\text{Teórico}} = -2.3530$ (ANEXO I: Distribución t de Student, gl = 3 y $\alpha = 0.05$) obteniéndose un **p valor de (0.00260), que es menor al p valor (0.05) de significancia.**

Entonces,

“Si $t_{\text{Experimental}} (-7.3485) < t_{\text{Teórico}} (-2.3530)$ entonces SE RECHAZA H_0 ”

H_a : (El tratamiento de aguas residuales mediante un filtro biológico influye en la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024 ($\mu_{\text{turbidez}} < 15 \text{ mg/L}$)).

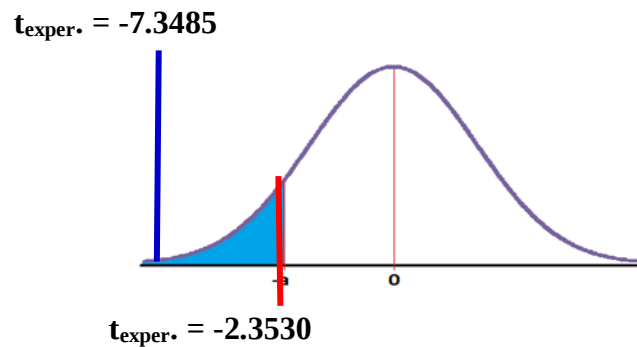


Figura 5. Distribución de t-Student para las cuatro campañas del monitoreo ambiental

Se afirma, que:

El análisis estadístico efectuado mediante la **prueba t de Student para una muestra** tuvo como propósito evaluar si el tratamiento de aguas residuales mediante la incorporación de un **filtro biológico** influye significativamente en la eficacia del sistema de **laguna de oxidación del distrito de Ticrapo**. Para ello se tomó como parámetro de referencia la **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_s)** del efluente tratado, considerando como valor límite de comparación **15 mg/L**, de acuerdo con los **Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua – Categoría 3**, establecidos en la normativa ambiental vigente. Este enfoque permitió contrastar estadísticamente la media observada de los datos obtenidos en campo con el valor normativo que define condiciones aceptables de calidad del agua.

Los resultados obtenidos durante el **monitoreo realizado en cuatro campañas de muestreo correspondientes a marzo, mayo, julio y agosto de 2024** evidenciaron concentraciones de **DBO_s comprendidas entre 11 y 13 mg/L**, con una **media muestral de aproximadamente 12 mg/L**, valor que se encuentra claramente por debajo del límite de referencia establecido por la normativa ambiental. Estos resultados iniciales sugieren un comportamiento favorable del sistema de tratamiento, ya que reflejan una reducción sostenida de la carga orgánica en el efluente final. Para verificar estadísticamente esta tendencia, se aplicó la prueba t de Student, obteniéndose un **valor t experimental de -7.3485**, el cual resulta menor que el **t teórico de -2.3530** para un **nivel de significancia $\alpha = 0.05$ y 3 grados de libertad**. De manera complementaria, el **p-valor calculado (0.00260)** fue considerablemente inferior al nivel de significancia establecido, lo que evidencia que la diferencia entre la media observada y el valor normativo no se debe al azar.

De acuerdo con la **regla de decisión estadística**, al cumplirse que **t experimental < t teórico** y que **p < α** , se procede al **rechazo de la hipótesis nula (H₀)**, la cual planteaba que el tratamiento mediante filtro biológico no ejerce influencia sobre la eficacia de la laguna de oxidación. En consecuencia, se **acepta la hipótesis alterna (H_a)**, la cual sostiene que el

tratamiento de aguas residuales mediante la incorporación de un filtro biológico **influye significativamente en el desempeño del sistema lagunar**, al permitir que las concentraciones de DBO₅ del efluente se mantengan de forma constante por debajo del umbral establecido en la normativa ambiental.

Desde una perspectiva **sanitaria, ambiental y operativa**, estos resultados evidencian que el filtro biológico desempeña un papel fundamental en la reducción de la **carga orgánica que ingresa a la laguna de oxidación**, lo que contribuye a disminuir la presión oxidativa del sistema y a mejorar las condiciones para el desarrollo de los procesos naturales de degradación biológica. Esta reducción previa de contaminantes favorece un funcionamiento más estable del sistema de tratamiento, permitiendo que la laguna opere bajo condiciones más eficientes y sostenibles.

Asimismo, la **consistencia de los valores registrados en las cuatro campañas de monitoreo** refuerza la confiabilidad del análisis estadístico realizado. La estabilidad de las concentraciones observadas indica que la mejora en la calidad del efluente no corresponde a un comportamiento ocasional o aleatorio, sino que responde al efecto sistemático del tratamiento biológico implementado. En este sentido, los resultados obtenidos demuestran que la incorporación del **filtro biológico como unidad complementaria de tratamiento** representa una alternativa tecnológica eficaz para optimizar el rendimiento de las lagunas de oxidación en contextos rurales, contribuyendo a mejorar la calidad del agua tratada y a fortalecer la gestión sostenible de las aguas residuales.

3.2. La tecnología del filtro biológico aplicada al tratamiento de aguas residuales en la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica.

La tecnología del filtro biológico aplicada al tratamiento de aguas residuales constituye un elemento complementario de gran importancia para optimizar el funcionamiento de la laguna de oxidación, ya que favorece procesos de biodegradación aerobia mediante el desarrollo de biopelículas microbianas adheridas al medio filtrante. Estas biopelículas están conformadas por comunidades de bacterias y microorganismos que degradan la materia orgánica presente en el agua residual, contribuyendo a la reducción de la carga contaminante antes de su permanencia en la laguna o durante su interacción con el sistema de tratamiento. A través de este mecanismo, el filtro biológico permite disminuir de manera progresiva la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), los sólidos suspendidos y la presencia de microorganismos patógenos, mejorando las condiciones hidráulicas y operativas del proceso natural de oxidación.

En el contexto del distrito de Ticrapo, provincia de Castrovirreyna, región Huancavelica, la aplicación de esta tecnología resulta particularmente pertinente debido a su simplicidad operativa, bajo requerimiento energético y capacidad de adaptación a condiciones ambientales propias de zonas altoandinas, donde las variaciones de temperatura, la

disponibilidad limitada de infraestructura y los recursos económicos condicionan el desempeño de los sistemas convencionales de tratamiento. En este sentido, el filtro biológico actúa como una etapa de mejora del sistema existente, fortaleciendo la eficiencia global de la laguna de oxidación al incrementar la remoción de contaminantes y favorecer la estabilidad del proceso de depuración.

Asimismo, el método de la Norma de Saneamiento del National Research Council (NRC) de los Estados Unidos reconoce la viabilidad del uso de materiales naturales, como piedras o gravas, como medios filtrantes en sistemas de tratamiento de aguas residuales. Estos materiales presentan superficies irregulares y porosas que proporcionan un soporte adecuado para la fijación y crecimiento de microorganismos, facilitando la formación de biopelículas activas que promueven tanto la filtración física como los procesos biológicos de degradación. Como resultado, se mejora la remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos sin necesidad de implementar tecnologías complejas o de alto costo.

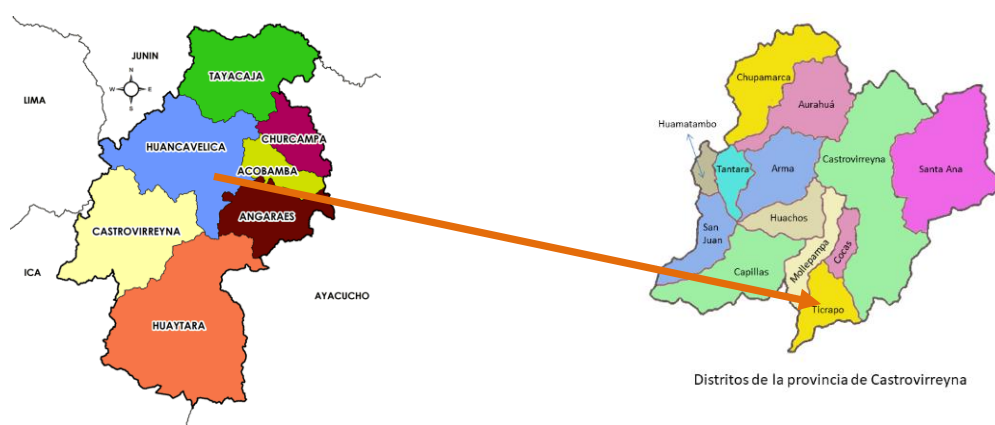
Este enfoque adquiere especial relevancia en entornos rurales o con limitados recursos tecnológicos, como ocurre en Ticrapo, donde el aprovechamiento de materiales disponibles localmente permite desarrollar soluciones sostenibles y económicamente viables para el tratamiento de aguas residuales. En consecuencia, la incorporación del filtro biológico basado en medios naturales no solo contribuye a optimizar la eficiencia del sistema de laguna de oxidación, sino que también representa una alternativa apropiada para fortalecer la gestión sanitaria y ambiental del recurso hídrico en comunidades de zonas altoandinas..

Datos para el diseño del Filtro Biológico

El diseño del filtro biológico se fundamenta en la selección de medios filtrantes apropiados, tales como piedras, grava o arena, los cuales proporcionan una superficie específica suficiente para el desarrollo y adherencia de biopelículas microbianas responsables de los procesos de degradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales. Estos materiales, debido a su porosidad y estabilidad estructural, permiten el flujo del agua a través del sistema y favorecen la interacción entre los microorganismos y los contaminantes a remover. Entre los parámetros fundamentales de diseño se consideran el tiempo de retención hidráulico (TRH), la carga hidráulica aplicada y la velocidad de filtración, variables que deben determinarse de acuerdo con la capacidad del sistema de tratamiento, el volumen de aguas residuales generadas y las características físico-químicas del afluente. Asimismo, es necesario evaluar factores ambientales y operativos como la temperatura, el pH y la carga orgánica del agua, los cuales influyen directamente en la actividad metabólica de los microorganismos responsables de la biodegradación.

Tabla 11. Diseño del Filtro Biológico

DISEÑO DE FILTRO BIOLÓGICO (TRATAMIENTO SECUNDARIO)				
Filtro Biológico				
Descripción		Valores	Unidad	Característica
Población en Tícrapo	=	1567	Hab.	INEI-2020
Tasa de Crecimiento	=	1.25%	%	INEI-Anual
Periodo de Poblacional	=	20	años	Proyección
Población Proyectada	=	392	Hab.	Calculo poblacional
Población Final	=	1959	Hab.	Poblacion-2040
Número de Unidades	=	1	Hab.	Unidad
Población de Diseño	=	1959	Hab.	Calculo poblacional



La adecuada consideración de estos parámetros permite optimizar el funcionamiento del filtro biológico, garantizando una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes y contribuyendo a mejorar el desempeño global de sistemas naturales de tratamiento, como la laguna de oxidación, particularmente en contextos rurales donde se priorizan soluciones tecnológicas de bajo costo y alta sostenibilidad.

Datos para el Diseño del Filtro Biológico				
Descripción	Símbolo	Unidad	Fuente	Valores
Población de Diseño	P	Habitantes	Calculo Poblacional	1959
Dotación de agua residual	D	L/Habitantes/día	RM-192-MCVS-RURAL	80
Contribución de Aguas Residuales	C	%	RNE OS.100	80%
Temperatura de la zona	Ts	°C	Monitoreo realizado en la zona	23

Contribución Perca pita de DBO ₅	Y	gr/hab/día	RNE OS 090	50
DBO ₅ en el Afluente	Sa	mg/L	D.S. 0.03-2010 MINAM	100
Eficiencia de Remoción de DBO ₅ del Tratamiento Primario (EP)	Ep	%	RNE OS.090	30%

Cálculo de caudal				
Descripción	Símbolo	Unidad	Calculo	Valores
Cálculo de Diseño	Q	m ³ /día	$Q = (P * \text{Dotación}) / 1000$	157

Parámetros del Filtro Biológico Rectangular				
Descripción	Símbolo	Unidad	Calculo	Valores
Producción Perca pita de Aguas Residuales	q	L/hab/día	$q = C * D$	64
DBO ₅ requerida en el EFLUENTE	Sr	mg/L	Sr (Análisis de Laboratorio)	30
DBO ₅ Remanente	So	mg/L	$So = (1 - Ep) * Sr$	70.00

Dimensionamiento del Filtro Biológico				
Descripción	Símbolo	Unidad	Calculo	Valores
Porcentaje	---	%		100%
Eficiencia del Filtro	Ef	%	$Ef = (So - Sr) / So$	57.14%
Carga de DBO ₅	W	Kg _{DBO5} /día	$W = (So * Q) / 1000$	10.97
Carga de recirculación	Q _R	m ³ /día		0
Razón de recirculación	R	m ³ /día	$R = Q_R / Q$	0
Factor de recirculación	F		$F = (1 + R) / (1 + R/10)^2$	1
Volumen del Filtro	V	m ³	$V = (W / F) * (0.4425 * Ef / (1 - Ef))^2$	15.10
Volumen Corregido	Vc	m ³	$Vc = V / (1.035)^{(20 - T_s)}$	16.74
Profundidad del Medio Filtrante	H	m	RNE OS. 0.90	1
Área del medio filtro	Af	m ²	$A = Vc / H$	16.74
Tasa Aplicación Superficial	TAS	m ³ /(m ² * día)	$TAS = Q / A$	9.36

Carga Orgánica	Co	KgDBO5/m ³ día	Co = W/Vc	0.66
----------------	----	---------------------------	-----------	------

Filtro Circular

Descripción	Símbolo	Unidad	Calculo	Valores
Diámetro del Filtro	d	m	$d = (4*A/3.2426)^{1/2}$	2.32

Filtro Biológico Rectangular

Descripción	Símbolo	Unidad	Calculo	Valores
Número de filtros	N	m		1
Ancho del filtro	B	m	$B = (Af/2)^{1/2}$	2.89
Largo del filtro	L	m	$L = 2*B/N$	5.79

RESUMEN DEL DISEÑO DE FILTRO BIOLÓGICO (TRATAMIENTO SECUNDARIO)					
Descripción	Símbolo	Valores	Unidad	Condición	Dato-Diseño
Diámetro del filtro (Q)	D =	2.32	m	SI SE CONSIDERA	2.00
Altura del Filtro (H)	H =	----	m	SI SE CONSIDERA	----
Largo (L)	L =	2.89	m	SI SE CONSIDERA	3.00
Ancho (A)	A =	5.79	m	SI SE CONSIDERA	5.50

3.2.1. Prueba de Hipótesis

H₀: La tecnología del filtro biológico aplicada al tratamiento de aguas residuales NO contribuye a la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024.

Ha: La tecnología del filtro biológico aplicada al tratamiento de aguas residuales contribuye a la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024.

Se afirma, que:

La hipótesis alterna plantea que la aplicación de la tecnología del **filtro biológico en el tratamiento de aguas residuales** contribuye de manera significativa a mejorar el desempeño de la **laguna de oxidación en el distrito de Ticrapo**, debido a que introduce una etapa previa de depuración que permite reducir la carga orgánica antes de su ingreso al sistema lagunar. Este proceso complementario favorece condiciones más adecuadas para el funcionamiento del tratamiento natural, ya que disminuye la presión contaminante sobre

la laguna y optimiza los procesos biológicos de degradación que se desarrollan en ella. En este sentido, el filtro biológico actúa como una unidad de pretratamiento que fortalece la eficiencia global del sistema de depuración.

Los resultados obtenidos a partir del **monitoreo sistemático del efluente** y del análisis de los parámetros de diseño hidráulico-sanitario del filtro biológico evidencian que la incorporación de esta tecnología genera una mejora significativa en la eficacia del sistema de tratamiento. Los valores registrados a la salida del filtro biológico muestran concentraciones de **DBO₅ entre 11 y 13 mg/L, DQO entre 30 y 35 mg/L, aceites y grasas cercanos a 3 mg/L y coliformes totales inferiores a 1 000 NMP/100 mL**, valores que se encuentran dentro de los límites establecidos por los **Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua – Categoría 3**, según lo establecido en el **Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM**. La consistencia de estos resultados a lo largo de las campañas de monitoreo confirma que el sistema presenta una **remoción efectiva de contaminantes orgánicos y microbiológicos** antes de la etapa de tratamiento en la laguna de oxidación.

Desde el punto de vista del desempeño del sistema, la disminución de la **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)** desde un valor inicial estimado de **70 mg/L** hasta **30 mg/L** representa una **eficiencia de remoción aproximada del 57.14 %**, lo cual evidencia una reducción considerable de la carga orgánica que ingresa a la laguna. Este comportamiento no puede atribuirse exclusivamente a los procesos naturales del sistema extensivo, sino que se encuentra asociado al funcionamiento del filtro biológico y a las condiciones de diseño que permiten mantener un proceso estable de depuración. Entre estos parámetros destacan una **carga orgánica volumétrica cercana a 0.66 kg DBO₅/m³·día**, una **tasa de aplicación hidráulica de 9.36 m³/m²·día** y un **volumen efectivo del reactor de aproximadamente 16.74 m³**, condiciones que favorecen la formación de biopelículas aerobias y la degradación sostenida de la materia orgánica.

En este contexto, la **hipótesis nula**, que plantea que el filtro biológico no influye en la eficacia del sistema de tratamiento, queda descartada debido a la evidencia técnica obtenida durante el desarrollo del estudio. Los resultados muestran mejoras claras y repetibles en la calidad del efluente tratado, así como una mayor estabilidad en la operación de la laguna de oxidación. Por el contrario, los datos obtenidos permiten **aceptar la hipótesis alterna**, ya que demuestran que la incorporación del filtro biológico optimiza el proceso de tratamiento, reduce la carga contaminante que llega a la laguna y fortalece la capacidad del sistema para cumplir su función sanitaria y ambiental.

En términos generales, la evidencia obtenida confirma que la **integración de tecnologías biológicas complementarias** representa una estrategia eficaz para mejorar el rendimiento de los sistemas de tratamiento extensivos en zonas rurales. La aplicación del filtro biológico no solo contribuye a incrementar la eficiencia del proceso de depuración, sino que también

favorece la sostenibilidad del sistema al reducir la presión contaminante sobre la laguna de oxidación y facilitar el cumplimiento de los estándares ambientales establecidos. Estos resultados demuestran que la incorporación de soluciones tecnológicas apropiadas puede fortalecer la gestión de aguas residuales en comunidades con recursos limitados, contribuyendo a la protección de la salud pública y a la conservación de los ecosistemas..

3.3. El efecto del filtro biológico en el tratamiento de aguas residuales en la remoción de contaminantes en la laguna de oxidación de Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024, Huancavelica.

El efecto del filtro biológico en el tratamiento de aguas residuales se manifiesta de manera directa en la remoción efectiva de contaminantes que ingresan a la laguna de oxidación de Ticrapo, al actuar como una etapa secundaria de depuración que reduce la carga orgánica y microbiológica antes de la estabilización final del efluente. La incorporación de un medio filtrante mineral favorece el desarrollo de biopelículas aerobias, las cuales intensifican los procesos de oxidación biológica de la materia orgánica biodegradable y la retención de sólidos suspendidos, disminuyendo la concentración de contaminantes que alcanzan el sistema lagunar.

Los resultados obtenidos evidencian que la DBO₅ se reduce desde valores cercanos a 70 mg/L hasta aproximadamente 30 mg/L, lo que representa una remoción del 57.14 % atribuible al efecto del filtro biológico. Esta reducción sustancial de la carga orgánica se traduce en una menor demanda de oxígeno dentro de la laguna, permitiendo condiciones bioquímicas más estables y favoreciendo la actividad biológica natural propia de los sistemas extensivos. Asimismo, los valores registrados a la salida del filtro biológico para DQO (30–35 mg/L), aceites y grasas (3 mg/L), coliformes totales (<1 000 NMP/100 mL), pH (7.7–7.8) y temperatura (20–21 °C) cumplen de forma consistente con los Estándares de Calidad Ambiental para la Categoría 3 establecidos en el D.S. N.º 004-2017-MINAM, lo que confirma una remoción efectiva y sostenida de contaminantes.

Desde el punto de vista hidráulico y operativo, el desempeño del filtro biológico se sustenta en parámetros de diseño adecuados, como una carga orgánica volumétrica de 0.66 kg DBO₅/m³·día, una tasa de aplicación superficial de 9.36 m³/m²·día y un volumen efectivo de 16.74 m³, los cuales garantizan condiciones favorables para la biodegradación aerobia sin generar sobrecargas al sistema. Estos resultados demuestran que la mejora observada en la calidad del efluente no es atribuible únicamente a los procesos naturales de la laguna, sino que responde al efecto específico del filtro biológico como unidad de remoción previa.

3.3.1. Prueba de Hipótesis

H₀: El efecto del filtro biológico en el tratamiento de aguas residuales NO influye en la remoción de contaminantes en la laguna de oxidación de Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024, Huancavelica.

H_a: El efecto del filtro biológico en el tratamiento de aguas residuales influye en la remoción de contaminantes en la laguna de oxidación de Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024, Huancavelica.

Se afirma, que:

Se afirma que, con base en la **evidencia empírica y técnica obtenida durante el desarrollo de la investigación**, se procede al **rechazo de la hipótesis nula (H₀)**, la cual planteaba que la incorporación del filtro biológico no ejercía influencia significativa en la remoción de contaminantes dentro del sistema de tratamiento. Los resultados derivados del monitoreo y del análisis de los parámetros de calidad del agua evidencian **reducciones cuantificables, consistentes y repetibles** en variables fundamentales como la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno, la presencia de aceites y grasas y los indicadores microbiológicos. Estas mejoras observadas en el efluente tratado demuestran que la incorporación del filtro biológico genera un efecto positivo en el proceso de depuración.

En consecuencia, se **acepta la hipótesis alterna (H_a)**, la cual establece que la aplicación del filtro biológico influye significativamente en la **remoción de contaminantes en la laguna de oxidación de Ticrapo**. La evidencia obtenida muestra que esta tecnología permite reducir la carga orgánica y microbiológica que ingresa al sistema lagunar, favoreciendo condiciones más adecuadas para el desarrollo de los procesos naturales de estabilización y degradación biológica. Como resultado, se mejora la eficiencia global del tratamiento de aguas residuales, incrementando la capacidad del sistema para cumplir con los criterios ambientales establecidos.

Desde una perspectiva técnica, la reducción de la carga contaminante previa a la etapa lagunar disminuye la presión sobre el sistema de oxidación, permitiendo un funcionamiento más estable y eficiente de los procesos biológicos que se desarrollan en la laguna. Este comportamiento demuestra que la integración del filtro biológico como unidad complementaria de tratamiento contribuye a optimizar el rendimiento del sistema, especialmente en **contextos rurales donde los recursos económicos, tecnológicos y operativos son limitados**.

En síntesis, los resultados del estudio confirman que la incorporación del filtro biológico constituye una **estrategia tecnológica eficaz para fortalecer la eficiencia del tratamiento de aguas residuales**, mejorar la calidad del efluente final y favorecer una gestión ambiental más sostenible. Esta evidencia respalda la pertinencia de implementar

soluciones tecnológicas apropiadas en sistemas de tratamiento extensivos, contribuyendo tanto a la protección de la salud pública como a la conservación de los recursos hídricos en comunidades rurales.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Discusión de resultados del tratamiento de aguas residuales mediante un filtro biológico y la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica.

Los resultados de las cuatro campañas (marzo–septiembre 2024) muestran que la incorporación del **filtro biológico** fortalece la eficacia del sistema lagunar al entregar un efluente con **carga orgánica y microbiológica reducida y estable**. En el tramo previo a la unidad con filtro, los puntos CA-01 y CA-02 evidencian un patrón consistente de disminución de contaminantes a lo largo del proceso: por ejemplo, la **DBO_s** se reduce desde rangos de **46–52 mg/L (CA-01)** a **28–33 mg/L (CA-02)**, mientras que la **DQO** baja de **85–91 mg/L** a **56–65 mg/L**, y los **SST** descienden de **93–98 mg/L** a **72–77 mg/L** (Tablas 5–8). Este comportamiento es coherente con el rol del tratamiento biológico: al aumentar el contacto sustrato-biomasa y la difusión de oxígeno hacia biopelículas adheridas a un medio, los filtros percoladores favorecen la oxidación de la fracción biodegradable y la retención de sólidos, reduciendo la carga que presiona a las unidades posteriores [48].

La evidencia más concluyente sobre la contribución del filtro se observa en CA-03 (salida del filtro), donde los parámetros se mantienen **por debajo de los valores guía** para el uso previsto (Categoría 3). En particular, la **DBO_s** registrada (11–13 mg/L) es menor al umbral de **15 mg/L**, la **DQO** (30–35 mg/L) es menor al valor de referencia (**40 mg/L**), los **aceites y grasas** (3 mg/L) se ubican por debajo de **5 mg/L**, y los **coliformes totales** (950–990 NMP/100 mL) permanecen dentro del límite de **1 000 NMP/100 mL**; adicionalmente, el **pH** (7.7–7.8) se mantiene en el intervalo aceptable (6.5–8.5) y la temperatura cumple el criterio de variación [49]. Estos resultados no solo reflejan “cumplimiento”, sino **estabilidad**, ya que los valores varían poco entre campañas, lo cual es un atributo clave de sistemas rurales donde las fluctuaciones de caudal y carga suelen comprometer el desempeño.

Desde la perspectiva sanitaria, mantener recuentos bacterianos alrededor del orden de **10³ por 100 mL** se alinea con enfoques internacionales de referencia para riego (según condiciones de exposición y tipo de riego), lo que refuerza la pertinencia de interpretar el CA-03 como un efluente con menor riesgo relativo para usos agrícolas/pecuarios bajo control, en comparación con aguas con cargas microbianas mayores [50]. Complementariamente, en sistemas extensivos como lagunas, es reconocido que el

desempeño puede verse afectado por algas y sólidos finos, por lo que una reducción previa de carga orgánica y particulada ayuda a mejorar la operación global y a evitar sobrecargas que deterioren el régimen de oxigenación y la calidad final [51].

En términos estadísticos, la prueba t para una muestra aplicada al umbral normativo ($\mu_0=15$ mg/L en DBO₅) confirma que la media observada (12 mg/L) es significativamente menor ($t = -7.3485$; $p = 0.00260$; $\alpha=0.05$), lo que sustenta el **rechazo de H₀ ($\mu \geq 15$)** y la **aceptación de H_a ($\mu < 15$)**. Esta evidencia cuantitativa, sumada a la consistencia multivariable del CA-03 (DBO₅, DQO, aceites y grasas, coliformes y pH), permite afirmar que el filtro biológico **sí influye** en la eficacia del sistema al mejorar la calidad del efluente que llega a la etapa lagunar y al consolidar un desempeño compatible con los estándares ambientales aplicables al uso final [52].

4.2. **Discusión de resultados de la tecnología del filtro biológico aplicada al tratamiento de aguas residuales en la eficacia de la laguna de oxidación en Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica.**

Los resultados obtenidos confirman que la aplicación de la tecnología del filtro biológico incrementa de forma significativa la eficacia de la laguna de oxidación de Ticrapo, al reducir sostenidamente la carga orgánica y microbiológica del efluente. Las concentraciones registradas a la salida del filtro (DBO₅ entre 11 y 13 mg/L, DQO entre 30 y 35 mg/L y coliformes totales $< 1\,000$ NMP/100 mL) cumplen de manera consistente con los Estándares de Calidad Ambiental para agua, Categoría 3, lo que evidencia una remoción efectiva previa a la etapa lagunar. Este comportamiento concuerda con lo reportado para filtros biológicos aerobios, donde la formación de biopelículas sobre medios porosos incrementa la oxidación de la materia orgánica y estabiliza el proceso de tratamiento, reduciendo la presión oxidativa sobre sistemas extensivos como las lagunas de oxidación [51], [52]. Asimismo, los parámetros de diseño adoptados para el sistema de tratamiento en Ticrapo muestran coherencia con los criterios técnicos recomendados para filtros biológicos o filtros percoladores de baja carga orgánica. En particular, la carga orgánica volumétrica de 0.66 kg DBO₅/m³·día y la tasa de aplicación superficial de 9.36 m³/m²·día se ubican dentro de los rangos operativos considerados adecuados para este tipo de unidades de tratamiento, lo cual favorece condiciones estables para el desarrollo de biopelículas microbianas encargadas de la degradación de la materia orgánica. Estas condiciones hidráulicas y orgánicas permiten mantener un equilibrio entre la carga contaminante aplicada y la capacidad de depuración del sistema, facilitando una adecuada aireación del medio filtrante y promoviendo la actividad metabólica de los microorganismos responsables del proceso de biodegradación. Como consecuencia, se optimiza la reducción de la carga orgánica antes de que el efluente ingrese a la laguna de

oxidación, disminuyendo la presión contaminante sobre el sistema lagunar y favoreciendo su funcionamiento eficiente.[53]. En conjunto, la evidencia empírica y el respaldo teórico permiten afirmar que el filtro biológico actúa como una unidad complementaria eficaz, mejorando el desempeño global del sistema lagunar y validando su aplicación como alternativa técnica sostenible en zonas altoandinas.

4.3. Discusión de resultados del efecto del filtro biológico en el tratamiento de aguas residuales en la remoción de contaminantes en la laguna de oxidación de Ticrapo, Castrovirreyna, Huancavelica, 2024, Huancavelica

Los resultados obtenidos confirman que el filtro biológico ejerce un efecto determinante en la remoción de contaminantes que ingresan a la laguna de oxidación, al reducir de forma significativa la carga orgánica y microbiológica del agua residual antes de su estabilización final. La disminución de la DBO_5 desde aproximadamente 70 mg/L hasta 30 mg/L, equivalente a una eficiencia de remoción del 57.14 %, evidencia que los procesos de biodegradación aerobia desarrollados en el medio filtrante mineral contribuyen activamente a la depuración del efluente. Este comportamiento es consistente con lo reportado para sistemas de biofilm, donde la oxidación biológica y la retención de sólidos permiten disminuir la demanda de oxígeno y mejorar las condiciones de operación de las lagunas de estabilización [50], [51].

Asimismo, el cumplimiento sostenido de los Estándares de Calidad Ambiental – Categoría 3 en parámetros como DQO, aceites y grasas, coliformes totales y pH confirma que la remoción de contaminantes no responde únicamente a los procesos naturales del sistema extensivo, sino al efecto específico del filtro biológico como unidad previa de tratamiento [52]. Desde una perspectiva operativa y de diseño sanitario, los valores de carga orgánica volumétrica ($0.66 \text{ kg } DBO_5/\text{m}^3\cdot\text{día}$) y tasa de aplicación superficial ($9.36 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$) registrados en el sistema de tratamiento de Ticrapo se encuentran dentro de los rangos técnicos recomendados para filtros percoladores de baja carga orgánica. Estos parámetros permiten mantener un equilibrio adecuado entre la carga contaminante aplicada y la capacidad de degradación biológica del medio filtrante, favoreciendo condiciones estables para el desarrollo de biopelículas microbianas responsables de la degradación de la materia orgánica [51]. La adecuada relación entre carga orgánica y aplicación hidráulica facilita además una distribución uniforme del efluente sobre el material filtrante, promoviendo una aireación natural eficiente y condiciones aeróbicas favorables para la actividad metabólica de los microorganismos. Como resultado, se fortalece la capacidad del sistema para transformar y reducir los compuestos orgánicos presentes en el agua residual antes de su ingreso a la laguna de oxidación [51].

En consecuencia, el cumplimiento de estos parámetros de operación explica la estabilidad del proceso de tratamiento y la eficacia observada en la remoción de contaminantes, contribuyendo a disminuir la carga orgánica que llega al sistema lagunar. Este comportamiento no solo mejora el rendimiento global del tratamiento, sino que también favorece un funcionamiento más confiable y sostenible del sistema, especialmente en contextos rurales donde se requieren soluciones tecnológicas eficientes y de fácil operación para el manejo adecuado de las aguas residuales [52]. En este contexto, la evidencia empírica y el respaldo técnico permiten aceptar la hipótesis alterna y afirmar que el filtro biológico influye significativamente en la mejora del desempeño sanitario de la laguna de oxidación de Ticrapo.

V. CONCLUSIONES

1. Se concluye, que la incorporación del filtro biológico influye de manera significativa y positiva en la eficacia de la laguna de oxidación de Ticrapo, al reducir de forma sostenida la carga orgánica y microbiológica del efluente. Los valores obtenidos en las cuatro campañas de monitoreo evidencian concentraciones de DBO₅ entre 11 y 13 mg/L, DQO entre 30 y 35 mg/L, aceites y grasas de 3 mg/L y coliformes totales inferiores a 1 000 NMP/100 mL, cumpliendo consistentemente con los ECA para agua – Categoría 3. El contraste estadístico mediante la prueba t de Student confirmó que la media de DBO₅ es significativamente menor al umbral normativo ($p < 0.05$), permitiendo rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alterna. En conjunto, estos resultados evidencian que el filtro biológico reduce la presión oxidativa sobre la laguna, mejora la estabilidad del proceso y optimiza el desempeño del sistema de tratamiento, consolidándose como una alternativa técnica eficiente y sostenible para el manejo de aguas residuales en contextos rurales altoandinos.
2. Se concluye que los resultados evidenciaron que la incorporación del filtro biológico fortalece el desempeño del sistema de lagunas al lograr un efluente con menores concentraciones de materia orgánica y microorganismos, cumpliendo de forma constante con los estándares ambientales vigentes. La reducción alcanzada en parámetros clave y la estabilidad observada entre campañas confirman que el tratamiento previo permite condiciones operativas más favorables en la laguna, optimizando su capacidad depuradora. En consecuencia, el uso de esta tecnología se consolida como una alternativa técnica viable y sostenible para mejorar el manejo de aguas residuales en entornos rurales altoandinos.
3. Se concluye que la evidencia obtenida durante el desarrollo de la investigación confirma que el filtro biológico cumple un papel determinante en la reducción de la carga contaminante que ingresa a la laguna de oxidación. La incorporación de esta unidad de tratamiento previo permite disminuir significativamente la concentración de materia orgánica y otros contaminantes, generando un efluente con mejores condiciones sanitarias y operativas antes de su ingreso al sistema lagunar. Este comportamiento favorece un funcionamiento más estable del proceso de depuración natural y contribuye a mejorar la eficiencia global del tratamiento de aguas residuales. Asimismo, los niveles de remoción alcanzados en los principales parámetros de calidad del agua, junto con la consistencia observada durante el periodo de evaluación, evidencian que el filtro biológico aporta un efecto real, medible y sostenido en el desempeño del sistema de tratamiento. En este sentido, los resultados

obtenidos demuestran que esta tecnología constituye una alternativa técnica viable y apropiada para su implementación en contextos rurales, donde las limitaciones económicas, operativas y de infraestructura requieren soluciones eficientes, de bajo costo y de fácil mantenimiento para el tratamiento adecuado de las aguas residuales.

.

VI. RECOMENDACIONES

- 1.** Se recomienda, mantener y replicar la implementación del filtro biológico como etapa previa o complementaria a las lagunas de oxidación en sistemas rurales, asegurando un monitoreo periódico de parámetros clave (DBO₅, DQO, coliformes y caudal) y un mantenimiento básico del medio filtrante para preservar la eficiencia de remoción; asimismo, resulta pertinente evaluar su aplicación en comunidades similares a Ticrapo como alternativa sostenible y de bajo costo para mejorar la gestión sanitaria de las aguas residuales.
- 2.** Se recomienda, consolidar el uso del filtro biológico como etapa complementaria del sistema de tratamiento, incorporando rutinas básicas de operación y seguimiento periódico de la calidad del efluente, a fin de asegurar su desempeño continuo. Asimismo, se sugiere evaluar su replicabilidad en localidades rurales con características similares, priorizando el empleo de materiales locales y criterios de diseño ajustados a las condiciones ambientales y demográficas de cada zona.
- 3.** Se recomienda, optimizar la operación del filtro biológico mediante un control periódico de sus parámetros hidráulicos y del estado del medio filtrante, así como evaluar su incorporación en otros sistemas de lagunas de oxidación con características similares, a fin de potenciar la remoción de contaminantes y fortalecer la sostenibilidad del tratamiento en zonas rurales.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Yu *et al.*, “Advances in Treatment Technologies for Silver- Containing Wastewater,” *Chem. Eng. J.*, p. 153689, 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.153689.
- [2] D. V. Savant, R. Abdul-Rahman, and D. R. Ranade, “Anaerobic degradation of adsorbable organic halides (AOX) from pulp and paper industry wastewater,” *Bioresour. Technol.*, vol. 97, no. 9, pp. 1092–1104, 2006, doi: 10.1016/j.biortech.2004.12.013.
- [3] A. Folino, D. A. Zema, and P. S. Calabrò, “Environmental and economic sustainability of swine wastewater treatments using ammonia stripping and anaerobic digestion: A short review,” *Sustain.*, vol. 12, no. 12, 2020, doi: 10.3390/su12124971.
- [4] D. A. Zema, P. S. Calabro, A. Folino, V. Tamburino, G. Zappia, and S. M. Zimbone, “Wastewater management in citrus processing industries: An overview of advantages and limits,” *Water (Switzerland)*, vol. 11, no. 12, pp. 1–23, 2019, doi: 10.3390/w11122481.
- [5] P. S. Calabrò, D. Pangallo, and D. A. Zema, “Wastewater Treatment in Lagoons: A systematic review and a meta-analysis,” *J. Environ. Manage.*, vol. 359, no. April, p. 13, 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120974.
- [6] P. Sharma, A. K. Pandey, S. H. Kim, S. P. Singh, P. Chaturvedi, and S. Varjani, “Critical review on microbial community during in-situ bioremediation of heavy metals from industrial wastewater,” *Environ. Technol. Innov.*, vol. 24, p. 16, 2021, doi: 10.1016/j.eti.2021.101826.
- [7] A. Bawiec, K. Paweska, and A. Jarzab, “Changes in the microbial composition of municipal wastewater treated in biological processes,” *J. Ecol. Eng.*, vol. 17, no. 3, pp. 41–46, 2016, doi: 10.12911/22998993/63316.
- [8] M. F. Imron *et al.*, “Phytotechnology for domestic wastewater treatment: Performance of Pistia stratiotes in eradicating pollutants and future prospects,” *J. Water Process Eng.*, vol. 51, no. December 2022, p. 103429, 2023, doi: 10.1016/j.jwpe.2022.103429.
- [9] H. Boleydei, M. J. Lemay, M. J. Gagné, J. Brassard, and C. Vaneeckhaute, “Are lagoons efficient for summer wastewater treatment in northern decentralized communities to ensure environmental and human health?,” *J. Water Process Eng.*, vol. 60, no. March, 2024, doi: 10.1016/j.jwpe.2024.105123.
- [10] J. Vymazal, “Constructed wetlands for wastewater treatment,” *Water (Switzerland)*, vol. 2, no. 3, pp. 530–549, 2010, doi: 10.3390/w2030530.
- [11] M. Bajpai, S. S. Katoch, and N. K. Chaturvedi, “Comparative study on decentralized

- treatment technologies for sewage and graywater reuse – A review,” *Water Sci. Technol.*, vol. 80, no. 11, pp. 2091–2106, 2019, doi: 10.2166/wst.2020.039.
- [12] A. G. Werker, J. M. Dougherty, J. L. McHenry, and W. A. Van Loon, “Treatment variability for wetland wastewater treatment design in cold climates,” *Ecol. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 1–11, 2002, doi: 10.1016/S0925-8574(02)00016-2.
- [13] R. Zhang *et al.*, “Pilot scale demonstration of an underground biological aerated filter for rural wastewater treatment in a protected area,” *J. Water Process Eng.*, vol. 64, no. June, p. 105603, 2024, doi: 10.1016/j.jwpe.2024.105603.
- [14] A. I. Machado, M. Beretta, R. Fragoso, and E. Duarte, “Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil,” *J. Environ. Manage.*, vol. 187, pp. 560–570, 2017, doi: 10.1016/j.jenvman.2016.11.015.
- [15] B. Ji *et al.*, “Can subsurface flow constructed wetlands be applied in cold climate regions? A review of the current knowledge,” *Ecol. Eng.*, vol. 157, no. July, p. 14, 2020, doi: 10.1016/j.ecoleng.2020.105992.
- [16] R. Moore, J. Quarmby, and T. Stephenson, “The effects of media size on the performance of biological aerated filters,” *Water Res.*, vol. 35, no. 10, pp. 2514–2522, 2001, doi: 10.1016/S0043-1354(00)00534-0.
- [17] E. Morales Rojas, S. M. Oliva Cruz, J. Rascón Barrios, M. E. Milla Pino, D. A. Villegas Rivas, and S. G. Chavez Quintana, “Sistemas de tratamiento de aguas mieles de café en la Provincia de Rodríguez de Mendoza, Perú,” *Rev. Colomb. Investig. Agroindustriales*, vol. 7, no. 1, pp. 84–90, 2020, doi: 10.23850/24220582.2918.
- [18] E. Y. Chavarría Márquez, L. L. Huamaní Astocaza, C. M. Basurto Contreras, and O. S. Carvo Baltazar, “Nivel de calidad de la demanda bioquímica de oxígeno del proceso de filtros biológicos,” *Rev. Alfa*, vol. 7, no. 19, pp. 153–159, 2023, doi: 10.33996/revistaalfa.v7i19.205.
- [19] S. Maria, S. Catarina, S. Catarina, S. Catarina, and C. Real, “Dimensionamiento De Un Sistema Sostenible Para El Tratamiento De Aguas Residuales Domésticas En Un Condominio Residencial De La Ciudad De Caçador/Sc,” *Dimens. Un Sist. Sosten. Para El Trat. Aguas Residuales Domésticas En Un Condominio Resid. La Ciudad Caçador/Sc*, vol. 21, no. 2, pp. 166–178, 2017.
- [20] M. Gutiérrez Velásquez, P. Córdova Mendoza, A. J. García Espinoza, E. P. Peña Casas, T. O. Barrios Mendoza, and E. L. Peña Casas, “Alternativa de tratamiento terciario de aguas residuales mediante humedal de flujo subsuperficial para reúso agrícola,” *Rev. Alfa*, vol. 6, no. 18, pp. 503–515, 2022, doi: 10.33996/revistaalfa.v6i18.186.
- [21] M. Von Sperling, *Volumen 2: Basic Principles og Wastewater Treatment*. New Delhi, India: British Library Cataloguing in Publication Data, 2007.
- [22] Matcalf y Eddy, *Wastewater Engineering Treatment and Rause*, Fourth Edi. Republic of

- China: McGraw-Hill Companies, Inc, 2003.
- [23] F. Spellman, *Water and Wastewater Treatment Plant Operations*, Third Edit. London: Taylor & Francis Group, 2014.
 - [24] R. L. Droste, *Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment*. Canada: CALL-WILEY, 1997.
 - [25] N. F. Gray, *Biology of Wastewater Treatment*. London: Printed in Singapore by World Scientific Printers (S), 2004. doi: 10.13140/RG.2.1.4598.8003.
 - [26] D. Mara, *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*. USA, 2004.
 - [27] World Health Organization, *Guidelines for drinking-water quality*, Fourth edi. Ginebra, Suiza: Fourth Edition Incorporating the First and Second Addenda, 2022.
 - [28] D. Gavrilescu, C. Teodosiu, and M. David, “Environmental assessment of wastewater discharges at river basin level by means of waste absorption footprint,” *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 21, pp. 33–46, 2020, doi: 10.1016/j.spc.2019.10.006.
 - [29] L. G. del A. N°28611, “Ley general del Medio Ambiente N° 28611,” 2005, *Lima - Perú*.
 - [30] B. M. D. Martinez, “Eficiencia en la remocion de la demanada bioquimica de oxigeno, demanda quimica de oxigeno y solidos suspendidos totales en la planata de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de celendin,” Universidad Nacional de Cajamarca, 2016.
 - [31] Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, “Aprueban Limites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales,” 2010, *Diario el Peruano, Lima - Perú*. [Online]. Available: http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds_003-2010-minam.pdf
 - [32] R. Hernández-Sampieri and C. P. Mendoza Torres, *Metodologia de la Investigacion. Las rutas cuantitativa y mixta*. Mexico: McGraw-Hill Education, 2018.
 - [33] S. Valderrama, *Pasos Para Elaborar Proyectos de Investigación Científica. Cuantitativa, cualitativa y mixta*, Segunda Ed. Lima - Perú: EDITORIAL SAN MARCOS E I R LTDA, 2020.
 - [34] J. Supo, *Cómo escribir una tesis: Redacción del informe final de tesis*, Primera Ed. Lima - Perú: BIOESTADISTICO EIRL, 2015.
 - [35] M. Tamayo y Tamayo, *El proceso de la Investigación Científica. Incluye evaluación y administración de proyectos de investigación*, Cuarta Edi. Mexico: Limusa, 2012.
 - [36] M. Tamayo y Tamayo, *El Proceso de la Investigación Científica. Incluye evaluación y Administración de Proyectos de Investigación*, Cuarta Edi. Mexico - Mexico, 2003.
 - [37] S. Fernández Bao, *Diseño de Experimentos: Diseño Factorial. Memorias y Anexos*. España: Universitat Politecnica de Catalunya, 2020.
 - [38] OMS, *Guías Para la Calidad del Agua de Consumo Humano*, 4ta Edicio. Ginebra, Suiza: World Health Organization, 2018.
 - [39] UNESCO, “El agua en un mundo en constante cambio. El 3er Informe sobre el Desarrollo

de los Recursos Hídricos en el Mundo,” 2016.

- [40] M. Hincapié *et al.*, “Automated household-based water disinfection system for rural communities: Field trials and community appropriation,” *Water Res.*, vol. 284, no. March, 2025, doi: 10.1016/j.watres.2025.123888.
- [41] D. S. N° 004-2017-MINAM, “Aprueban Estandares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y Establecen disposiciones Complementarias,” 2017, *Diario El Peruano*, Lima-Peru.
- [42] A. V. Kulinkina *et al.*, “Physicochemical parameters affecting the perception of borehole water quality in Ghana,” *Int. J. Hyg. Environ. Health*, vol. 220, no. 6, pp. 990–997, 2017, doi: 10.1016/j.ijheh.2017.05.008.
- [43] M. Hincapié *et al.*, “Automated household-based water disinfection system for rural communities: Field trials and community appropriation,” *Water Res.*, vol. 284, no. March, 2025, doi: 10.1016/j.watres.2025.123888.
- [44] S. Rangecroft *et al.*, “Unravelling and understanding local perceptions of water quality in the Santa basin, Peru,” *J. Hydrol.*, vol. 625, no. PA, p. 129949, 2023, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.129949.
- [45] World Health Organization, *WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region*. Dinamarca: Oficina Regional de la OMS para Europa Ciudad de las Naciones Unidas, 2018.
- [46] K. L. Butterfield and K. P. Daniels, “Community gardens support stress coping and health – A comparison of rural and urban perceptions of benefits,” *Wellbeing, Sp. Soc.*, vol. 9, no. March, p. 100297, 2025, doi: 10.1016/j.wss.2025.100297.
- [47] S. Bai *et al.*, “Similarities and differences in gastrointestinal microbiomes between wild and human-cared spotted dolphins (*Stenella attenuata*) in natural waters,” *Water Biol. Secur.*, vol. 3, no. 4, p. 100288, 2024, doi: 10.1016/j.watbs.2024.100288.

VIII. ANEXOS

ANEXO I: VALORES CRITICOS DE LA DISTRIBUCION DE T-STUDENT

α r	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0005
1	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,656	636,578
2	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,600
3	0,765	0,979	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,924
4	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
6	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408
8	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,768
24	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,689
28	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,660
30	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
60	0,679	0,848	1,045	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
120	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,373
∞	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,290