UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis

Análisis de la gestión de tratamiento de aguas servidas mediante tanques sépticos y laguna de oxidación con Pontederia Crassipes en el sector Pancarhuaylla, Anta, 2025

Asesor:

Mg. Ing. Laime Calvo, Edixon

Autor:

Salas Pimentel, Tania

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero(a) Civil

Cusco - Cusco - Perú

2026

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FILIAL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Cusco, a los 13 días del mes de julio de 2026, siendo las 10:00 horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N.º 250-2026-UTEA-FI-EPIC-FC(e) de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil.

Presidente :	Mg. **OSCCO ORCCOHUARANCCA, John Charlie**
Dictaminante :	Mgt. **CANAL APAZA, Jaime**
Replicante :	Mgt. **CARDENAS GALIANO, Jorge Armando**

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

☒ Tesis ☐ Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Análisis de la gestión de tratamiento de aguas servidas mediante tanques sépticos y laguna de oxidación con Pontederia Crassipes en el sector Pancarhuaylla, Anta, 2025

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br. SALAS PIMENTEL, Tania

Para optar el Tituló Profesional de:

INGENIERO(A) CIVIL

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO(S) ☒ o DESAPROBADO(S) ☐:

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Nota	Detalle (**)
Br. SALAS PIMENTEL, Tania	16	Aprobado Notable

Siendo las 12:00 horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mgt. **OSCCO ORCCOHUARANCCA, John Charlie** (Firma)

Dictaminante: Mgt. **CANAL APAZA, Jaime** (Firma)

Replicante: Mgt. **CARDENAS GALIANO, Jorge Armando** (Firma)

Nota: Desaprobado: 0-10; **Aprobado:** 11-20

(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

11% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

8%	Fuentes de Internet
4%	Publicaciones
8%	Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.° de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Metadatos

Datos del Autor		
Apellidos y nombres	:	Salas Pimentel, Tania
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	72421939
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0004-2487-9600
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	Mg. Ing. Laime Calvo, Edixon
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	42157485
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0004-7280-0776
Datos de la Investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Civil
Línea de Investigación	:	Gestión de la Infraestructura para el Desarrollo Sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	:	Marzo 2025 – julio 2026
Fuente de financiamiento	:	Autofinanciado
Porcentaje de similitud	:	11%
URL de OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

A mis padres, por su apoyo continuo, su confianza y por enseñarme a seguir avanzando incluso en los tiempos más complicados.

Este logro también es suyo.

Tania Salas Pimentel

Agradecimientos

Ante todo, agradezco a Dios por guiar mi camino.

A mis papás, por su apoyo incondicional, por los ánimos y por estar ahí en cada fase de este proceso.

A mi asesor y docentes, por sus orientaciones e instrucciones durante el desarrollo de esta investigación.

Al Programa Nacional de Saneamiento Rural (PNSR), por la oportunidad que se me dio en mis prácticas profesionales, las cuales contribuyeron a mi educación y a la finalización de este trabajo.

Y a mis gatos, por hacer los días difíciles más livianos y estar conmigo en toda esta travesía.

Tania Salas Pimentel

Resumen

La investigación tuvo como objetivo analizar comparativamente la gestión técnica, económica y operativa del tratamiento de aguas residuales mediante tanques sépticos y laguna de oxidación con Pontederia crassipes en la localidad de Pancarhuaylla, distrito de Anta, Cusco. Se buscó identificar el sistema con mejor estabilidad, menor complejidad operativa, mayor eficiencia y sostenibilidad.

El estudio se desarrolló con un enfoque aplicado y comparativo, empleando ensayos físico-químicos y microbiológicos de los efluentes, análisis de mecánica de suelos y estabilidad de taludes, además de la revisión de presupuestos oficiales para estimar costos de inversión y operación. En el caso de la laguna de oxidación, se consideraron parámetros críticos como la densidad de macrófitas y el tiempo de retención hidráulica.

Los resultados mostraron que los tanques sépticos alcanzaron reducciones limitadas de DBO_5 (25-35%), DQO (30%) y sólidos suspendidos (40%), con alta presencia de coliformes. En contraste, la laguna de oxidación con Pontederia crassipes logró eficiencias superiores, con remociones de DBO_5 entre 70-85%, DQO entre 65-80% y sólidos suspendidos hasta 75%, además de una disminución significativa de coliformes.

En términos económicos, el análisis comparativo evidenció que los tanques sépticos presentaron mayores costos de inversión inicial, operación y mantenimiento anual respecto a las lagunas de oxidación.

Se concluye que la laguna de oxidación con Pontederia crassipes constituye una alternativa más eficiente y sostenible, al optimizar la calidad del efluente, reducir la complejidad operativa y presentar un menor costo de ciclo de vida, adecuada para comunidades rurales altoandinas.

Palabras clave: Tratamiento de aguas residuales, tanques sépticos, laguna de oxidación, Pontederia crassipes, sostenibilidad.

Abstract

The research aimed to comparatively analyze the technical, economic, and operational management of wastewater treatment using septic tanks and oxidation ponds with Pontederia crassipes macrophytes in the locality of Pancarhuaylla, district of Anta, Cusco. The aim was to identify the system with better stability, lower operational complexity, greater efficiency, and sustainability.

The study was conducted with an applied and comparative approach, employing physicochemical and microbiological tests of the effluents, soil mechanics analysis, and slope stability, in addition to reviewing official budgets to estimate investment and operation costs. In the case of the oxidation lagoon, critical parameters such as macrophyte density and hydraulic retention time were considered.

The results showed that the septic tanks achieved limited reductions of BOD_5 (25-35%), COD (30%), and suspended solids (40%), with a high presence of coliforms. In contrast, the oxidation pond with Pontederia crassipes achieved higher efficiencies, with BOD_5 removals between 70-85%, COD between 65-80%, and suspended solids up to 75%, in addition to a significant decrease in coliforms.

In economic terms, the comparative analysis showed that septic tanks had higher initial investment, operation, and annual maintenance costs compared to oxidation ponds.

It is concluded that the oxidation pond with Pontederia crassipes constitutes a more efficient and sustainable alternative, by optimizing the effluent quality, reducing operational complexity, and presenting a lower life cycle cost, suitable for high Andean rural communities.

Keywords: Wastewater treatment, septic tanks, oxidation pond, Pontederia crassipes, sustainability.

Índice

Portada i

Acta de sustentación ii

Reporte de similitud iii

Metadatos iv

Dedicatoria v

Agradecimiento vi

Resumen vii

Abstract viii

Índice ix

Índice de tablas xi

Índice de figuras xiii

Índice de anexos xiv

I. Introducción 15

II. Planteamiento del problema 17

2.1. Descripción y formulación del problema 17

2.2. Objetivos 20

2.2.1. Objetivo General 20

2.2.2. Objetivos Específicos 20

2.3. Justificación e importancia 21

2.4. Hipótesis 24

2.5. Variables 25

III. Marco Teórico 28

3.1. Antecedentes 28

3.2. Bases teóricas 35

3.3. Definición de términos 56

IV. Metodología 60

4.1. Tipo y nivel de investigación 60

4.2. Ámbito temporal y espacial 61

4.3. Población y muestra 63

4.4. Instrumentos 64

4.5. Procedimientos 65

4.6. Análisis de datos 71

4.7. Consideraciones éticas 71

V. Resultados y discusión 72

VI. Conclusiones 100

VII. Recomendaciones 102

VIII. Referencias 104

IX. Anexos 113

Índice de tablas

Tabla 1 Operacionalización de variables 27

Tabla 2 Coordenadas UTM de la Planta de tratamiento de aguas servidas del sector de Pancarhuaylla..... 61

Tabla 3 Coordenadas UTM de la Laguna de oxidación proyectada (Área de oxidación) .. 62

Tabla 4 Análisis físico-químico de aguas residuales - PTAR Pancarhuaylla..... 73

Tabla 5 Análisis microbiológico de aguas residuales - PTAR Pancarhuaylla 73

Tabla 6 Análisis físico-químico de aguas residuales - Área de oxidación natural..... 74

Tabla 7 Análisis microbiológico de aguas residuales - Área de oxidación natural..... 74

Tabla 8 Comparación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del efluente tratado en el sector Pancarhuaylla 75

Tabla 9 Perfil estratigráfico C-1 (Tanque séptico)..... 77

Tabla 10 Contenido de humedad C-1 (Tanque séptico)..... 77

Tabla 11 Límite líquido C-1 (Tanque séptico) 78

Tabla 12 Límite plástico C-1 (Tanque séptico)..... 78

Tabla 13 Peso específico C-1 (Tanque séptico) 79

Tabla 14 Granulometría del material C-1 (Tanque séptico) 79

Tabla 15 Corte directo C-1 (Tanque séptico)..... 80

Tabla 16 Perfil estratigráfico C-2 (Área de oxidación)..... 81

Tabla 17 Contenido de humedad C-2 (Área de oxidación) 81

Tabla 18 Límite líquido C-2 (Área de oxidación)..... 82

Tabla 19 Límite plástico C-2 (Área de oxidación) 82

Tabla 20 Peso específico C-2 (Área de oxidación)..... 83

Tabla 21 Granulometría del material C-2 (Área de oxidación) 83

Tabla 22 Corte directo C-2 (Área de oxidación)..... 84

Tabla 23 Costos de inversión - PTAR Pancarhuaylla 85

Tabla 24 Costo de inversión - Laguna de oxidación con Pontedería crassipes 85

Tabla 25 Tarifario de costos fijos de operación y mantenimiento de la PTAR Pancarhuaylla 86

Tabla 26 Tarifario de costos variables de operación y mantenimiento de la PTAR Pancarhuaylla..... 87

Tabla 27 Tarifario de costos fijos de operación y mantenimiento de la proyección de la Laguna de oxidación..... 88

Tabla 28 Tarifario de costos variables de operación y mantenimiento de la proyección de la Laguna de oxidación..... 88

Tabla 29 Cuadro Comparativo de Tarifas: Real vs. Propuesta 89

Tabla 30 Metrados del sistema propuesto..... 92

Tabla 31 Presupuesto de la propuesta 93

Tabla 32 Resumen del presupuesto..... 94

Tabla 33 Identificación de riesgos y medidas de contingencia de la alternativa propuesta 95

Índice de figuras

Figura 1. Presencia de la macrófita en Pancarhaylla 43

Figura 2. Follaje denso del Jacinto de agua (Pontederia crassipes) 43

Figura 3. Límites máximos permisibles para los efluentes de PTAR 52

Figura 4. Estándares nacionales de calidad ambiental para agua. Categoría 3: Riego de vegetales y bebidas de animales 53

Figura 5. Ubicación de la PTAR del sector de Pancarhuaylla 62

Figura 6. Ubicación de la Laguna de oxidación proyectada 63

Figura 7. Punto de control/toma de muestra efluente PTAR Pancarhuaylla 66

Figura 8. Punto de control/toma de muestra del área de oxidación natural 67

Índice de anexos

Anexo N° 1. Matriz de consistencia 114

Anexo N° 2. Resolución que aprueba ampliación de plazo por paralizaciones 115

Anexo N° 3. Análisis de laboratorio (Agua residual) 119

Anexo N° 4. Estudio de mecánica de suelos 123

Anexo N° 5. Límites Máximos Permisibles - DS N° 003-2010-MINAM 155

Anexo N° 6. Estándares de Calidad Ambiental - DS N° 002-2008-MINAM 157

Anexo N° 7. Planos, metrados y presupuesto 158

Anexo N° 8. Tarifario de O&M 175

Anexo N° 9. Panel fotográfico 177

I. Introducción

El acceso a servicios de saneamiento apropiados es uno de los retos más importantes para la protección de la salud pública y el desarrollo sostenible. De acuerdo con el Programa Conjunto de Monitoreo de la OMS y el UNICEF (2024), aproximadamente el 42 % de la población mundial (3400 millones de personas) no tiene acceso a servicios de saneamiento gestionados de manera segura, lo que aumenta la contaminación del agua y las enfermedades relacionadas con ella. La situación en Perú es más crítica en las áreas rurales, donde la puesta en marcha de sistemas convencionales para el tratamiento de aguas residuales se ve obstaculizada por restricciones geográficas, económicas y técnicas. Por lo tanto, resulta indispensable emplear tecnologías que se adecúen a estas circunstancias.

Varios estudios indican que las tecnologías naturales y los sistemas de tratamiento más simples constituyen una opción factible para las comunidades rurales. Según una revisión sistemática publicada en Environmental Research (2020), solo el 9 % de la población rural del mundo tiene acceso a sistemas de alcantarillado. Se ha encontrado que una de las configuraciones más comunes para el tratamiento consiste en sistemas con tanques sépticos y sistemas naturales de purificación, logrando este último eficiencias medias de remoción del 93 % para la DBO_5, del 89 % para la DQO y del 87 % para los SST.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que se basan en tanques sépticos son una de las opciones convencionales más utilizadas en pequeñas comunidades

rurales. No obstante, varias investigaciones han evidenciado que estos sistemas pueden tener restricciones en la eliminación de contaminantes si se emplean como tratamiento principal. Fernando Garcia y otros (2023), en su estudio informaron eficiencias medias de eliminación del 31,28 % para la DBO_5, del 30,52 % para la DQO y del 39,39 % para los SST, lo que demuestra la importancia de analizar tecnologías adicionales que ayuden a aumentar la calidad del efluente.

Como alternativa, han generado un interés creciente las lagunas de oxidación con macrófitas por su bajo costo de mantenimiento y por ser sostenibles desde el punto de vista medioambiental. La Pontederia crassipes sobresale por su habilidad de fitodepuración; no obstante, hay poca evidencia cuantitativa que contraste su rendimiento con el de una PTAR basada en tanques sépticos bajo las condiciones ambientales de comunidades rurales altoandinas. Se vio que esta especie se desarrollaba de manera natural en el sector de Pancarhuaylla al entrar en contacto con aguas residuales, lo cual provocó un proceso espontáneo de purificación. Este hecho fue la razón por la que se llevó a cabo la presente investigación.

Actualmente, la PTAR definitiva del sector, basada en tanques sépticos, se encuentra en funcionamiento. Asimismo, la presencia natural de la Pontederia crassipes en una zona donde anteriormente se vertían aguas residuales evidenció un proceso espontáneo de depuración, planteando la posibilidad de implementar una laguna de oxidación con esta macrófita. En ese contexto, el presente estudio tiene como objetivo comparar la eficiencia de ambos sistemas para identificar una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales altoandinas. De no realizarse esta investigación, se limitará el conocimiento sobre el uso de tecnologías naturales y su potencial para disminuir la contaminación de los recursos hídricos.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

El tratamiento de aguas residuales constituye un componente fundamental del saneamiento básico debido a su influencia directa en la salud pública y la conservación de los recursos hídricos. En las zonas rurales, los sistemas de tratamiento primario son ampliamente utilizados por su simplicidad constructiva y menores costos de operación; sin embargo, diversas investigaciones nacionales evidencian limitaciones en su eficiencia. Esta situación cobra especial importancia porque el efluente tratado debe cumplir los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en el Decreto Supremo N.° 003-2010-MINAM para su vertimiento, especialmente en parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos suspendidos totales (SST) y los coliformes termotolerantes. Guardia Curasma y Ccente Inga (2023), al evaluar una planta de tratamiento con tratamiento primario, reportaron eficiencias de remoción de 27,19 % para la DBO_5, 22,88 % para la DQO y 16,99 % para los sólidos suspendidos totales (SST). En contraste, Ballón Durand (2021), empleando macrófitas acuáticas, obtuvo eficiencias de remoción de 92,7 % para la DBO_5, 77,3 % para la DQO y 96,3 % para los sólidos totales (SST), evidenciando el potencial de los sistemas naturales como alternativa para optimizar la calidad del efluente.

En el sector de Pancarhuaylla, distrito de Anta, el sistema de saneamiento fue proyectado para atender una población de 542 habitantes distribuidos en 120 viviendas, con una densidad promedio de 4,52 habitantes por vivienda. El diseño considera una dotación de agua potable de 80 L/hab./día, valor establecido para proyectos de saneamiento rural; asimismo, la Resolución Ministerial N.° 192-2018-VIVIENDA establece un coeficiente de retorno del 80 %, por lo que el aporte de aguas residuales corresponde a 64 L/hab./día. Bajo estos criterios, la planta debe tratar aproximadamente 34,69 m^3/día de aguas residuales, volumen que se incrementará progresivamente debido a la tasa de crecimiento poblacional de 2,48 % anual. Del mismo modo, el ingreso promedio mensual de S/ 720,00 evidencia la necesidad de implementar alternativas de tratamiento que sean técnica y económicamente sostenibles para la población.

Durante la ejecución del proyecto, cuyo plazo de ejecución total fue de 885 días calendario, la obra registró cinco ampliaciones de plazo, situación documentada mediante la Resolución de Gerencia de Infraestructura N.° 031-2025-GI/MPA. Durante este periodo se evidenció el funcionamiento del sistema de alcantarillado cuando la PTAR aún no se encontraba operativa, ocasionándose la descarga de aguas residuales parcialmente tratadas (sedimentadas) hacia un riachuelo cercano.

En la zona afectada se identificó la presencia natural de *Pontederia crassipes* en contacto directo con el agua residual, observándose un proceso espontáneo de depuración. Aunque esta especie no fue implementada como parte de un sistema formal de tratamiento, las investigaciones sobre macrófitas acuáticas demuestran su capacidad para reducir la carga contaminante del agua residual, lo que plantea la posibilidad de evaluar una propuesta de laguna de oxidación con esta especie como alternativa para mejorar la eficiencia del tratamiento.

Actualmente, la PTAR del sector se encuentra en funcionamiento; sin embargo, no existe una evaluación técnica que permita determinar si una propuesta de laguna de oxidación con *Pontederia crassipes* podría alcanzar una mayor eficiencia de tratamiento que la PTAR basada en tanques sépticos bajo las condiciones ambientales propias de Pancarhuaylla. Esta falta de evidencia limita la generación de criterios técnicos para la selección de tecnologías sostenibles de saneamiento rural y restringe el aprovechamiento de alternativas naturales para reducir la contaminación de los recursos hídricos.

2.1.1. Problema General

¿Cuál es la eficiencia técnica, operativa y económica del tratamiento de aguas residuales mediante tanques sépticos y una laguna de oxidación con Pontederia crassipes en el sector Pancarhuaylla, Anta, 2025?

2.1.2. Problemas Específicos

P.E.1. ¿Cuál es la eficiencia de remoción de contaminantes de los sistemas de tratamiento mediante tanques sépticos y laguna de oxidación con Pontederia crassipes, considerando los límites máximos permisibles establecidos en el D.S. N.° 003-2010-MINAM, en el sector Pancarhuaylla, Anta, 2025?

P.E.2. ¿Cuál es el nivel de estabilidad estructural y geotécnica de la laguna de oxidación con Pontederia crassipes, considerando las condiciones de suelo y topografía del sector Pancarhuaylla, Anta, 2025?

P.E.3. ¿Cuál de los dos sistemas de tratamiento, tanques sépticos y laguna de oxidación con Pontederia crassipes, requiere menor intervención técnica y mantenimiento para su funcionamiento en el sector Pancarhuaylla, Anta, 2025?

P.E.4. ¿Cuál es el costo de tratamiento y la sostenibilidad financiera de los sistemas de tratamiento mediante tanques sépticos y laguna de oxidación con Pontederia crassipes en el sector Pancarhuaylla, Anta, 2025?

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo General

Analizar comparativamente la eficiencia técnica, operativa y económica del tratamiento de aguas residuales mediante tanques sépticos y una laguna de oxidación con Pontederia crassipes en el sector Pancarhuaylla, Anta, 2025.

2.2.2. Objetivos Específicos

O.E.1. Determinar la eficiencia de remoción de contaminantes de los sistemas de tratamiento mediante tanques sépticos y laguna de oxidación con Pontederia crassipes, considerando los límites máximos permisibles establecidos en el D.S. N.° 003-2010-MINAM, en el sector Pancarhuaylla, Anta, 2025.

O.E.2. Determinar el nivel de estabilidad estructural y geotécnica de la laguna de oxidación con Pontederia crassipes, considerando las condiciones de suelo y topografía del sector Pancarhuaylla, Anta, 2025.

O.E.3. Determinar cuál de los dos sistemas de tratamiento, tanques sépticos y laguna de oxidación con Pontederia crassipes, requiere menor intervención técnica y mantenimiento para su funcionamiento en el sector Pancarhuaylla, Anta, 2025.

O.E.4. Determinar el costo de tratamiento y la sostenibilidad financiera de los sistemas de tratamiento mediante tanques sépticos y laguna de oxidación con Pontederia crassipes en el sector Pancarhuaylla, Anta, 2025.

2.3. Justificación e importancia

2.3.1. Justificación teórica

Esta investigación ayudará a reforzar los conocimientos científicos acerca de cómo se tratan las aguas residuales con sistemas naturales en poblaciones rurales altoandinas. Las macrófitas acuáticas son una opción sostenible para limpiar aguas residuales, gracias a su habilidad de eliminar sólidos suspendidos, materia orgánica y nutrientes (Martelo & Lara Borrero, 2012). De igual manera, Deister Moreira y otros (2020) señalan que los sistemas naturales de tratamiento son una alternativa factible para áreas con restricciones operativas y económicas, ya que muestran eficiencias elevadas de eliminación. No obstante, hay poca información acerca del desempeño de una propuesta de laguna de oxidación con Pontederia crassipes en las condiciones climáticas y geográficas de la zona de Pancarhuaylla. Por lo tanto, esta investigación proporcionará datos técnicos que podrían ser útiles como referencia para investigaciones futuras.

2.3.2. Justificación práctica

La investigación permitirá comparar la eficiencia de una PTAR que se basa en tanques sépticos con una sugerencia de laguna de oxidación que emplea Pontederia crassipes, lo que generará pruebas técnicas para escoger opciones sustentables de saneamiento rural. Los hallazgos ayudarán a mejorar proyectos futuros de tratamiento de aguas residuales y favorecerán el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles (LMP) definidos en el Decreto Supremo N.° 003-2010-MINAM para el vertimiento de efluentes. Además, el estudio podrá funcionar como una referencia para organizaciones públicas y privadas que estén relacionadas con la construcción de infraestructura sanitaria en poblaciones rurales.

2.3.3. Justificación metodológica

La investigación actual se basa en una perspectiva cuantitativa, aplicada y descriptiva-explicativa, que emplea un diseño no experimental, de corte transversal y comparativo. El método cuantitativo se basa en el uso de datos que pueden ser medidos para analizar las condiciones y los resultados de los sistemas de tratamiento. Es de nivel descriptivo-explicativo ya que, en primer lugar, define las condiciones de los sistemas evaluados y, después, estudia las diferencias encontradas entre ellos. También es de tipo aplicado porque trata un asunto específico y dirige sus resultados hacia una sugerencia de mejora (Creswell & Creswell, 2023; Vidal Guerrero, 2022). El diseño no experimental se refiere a que las condiciones de los sistemas no son manipuladas intencionalmente, el corte transversal implica el análisis de la información durante un tiempo específico y el componente comparativo se refiere a la comparación de dos alternativas utilizando indicadores y criterios comunes.

La PhD Salmons (2023) sostiene que de acuerdo con la lógica del diseño comparativo, el cual posibilita el análisis de las diferencias entre alternativas o condiciones sin intervención experimental, la comparación de los tanques sépticos existentes y la laguna de oxidación proyectada con Pontederia crassipes se lleva a cabo utilizando criterios e indicadores comunes. Para los tanques sépticos, se emplean datos observados de operación, calidad del efluente, mantenimiento y costos; por otro lado, en la alternativa proyectada se tienen en cuenta las condiciones geotécnicas, los resultados del área natural con Pontederia crassipes, los parámetros geométricos e hidráulicos y lo que se estima que costará. Por lo tanto, la comparación distingue entre los resultados observados y los proyectados sin suponer que ambas infraestructuras están construidas y funcionando bajo las mismas condiciones.

2.3.4. Justificación técnica

El sistema de tratamiento que está en operación en este momento en la comunidad de Pancarhuaylla solo otorga tratamiento primario y su funcionamiento no asegura que se respeten los Límites Máximos Permitidos (LMP) que el Decreto Supremo N.° 003-2010-MINAM ha fijado para efluentes de aguas residuales. Frente a esta restricción, es preciso considerar una opción adicional que se base en procesos naturales y que incluya una propuesta de laguna de oxidación con Pontederia crassipes, una especie observada en el área de descarga durante las visitas al campo. Asimismo, el análisis proporcionará información técnica acerca del funcionamiento hidráulico y de las condiciones operativas del sistema sugerido. Esto ayudará a mejorar las infraestructuras de saneamiento en áreas rurales altoandinas, siguiendo los parámetros establecidos en la Norma OS.090 del Reglamento Nacional de Edificaciones.

2.3.5. Justificación social

Es esencial manejar correctamente las aguas residuales para proteger la salud de la población, evitar que los cuerpos de agua utilizados por ella se contaminen y disminuir los peligros epidemiológicos. Según la investigación que realizó Irene Altafin para el Banco Interamericano de Desarrollo (2021), la aplicación de soluciones basadas en la naturaleza es una opción sostenible para optimizar los servicios de saneamiento, particularmente en comunidades con recursos escasos. En esta línea, la investigación comparativa entre el sistema actual y una propuesta que incluye macrófitas tiene como objetivo encontrar una opción que ayude a optimizar la calidad del agua tratada y, por ende, el bienestar y la calidad de vida de las personas que viven en la zona de Pancarhuaylla.

2.3.6. Justificación por viabilidad

La investigación es factible porque se tiene acceso directo a la infraestructura actual de tratamiento, lo que hace posible reunir datos y realizar las observaciones de campo requeridas. Además, se cuenta con datos técnicos del proyecto y se ha detectado la existencia natural de Pontederia crassipes en el área de investigación, lo que posibilita examinar su potencial sin modificar las condiciones inherentes al ecosistema. Asimismo, los análisis se efectuarán de acuerdo con parámetros definidos en la normativa nacional actual, lo que asegura que los resultados sean objetivos, cuantificables y comparables. En última instancia, se dispone de los medios técnicos y logísticos necesarios para llevar a cabo las evaluaciones adecuadas y los análisis de calidad del efluente, lo que garantiza la viabilidad del estudio.

2.3.7. Importancia de la investigación

El presente estudio es importante porque ofrece pruebas técnicas que permiten comparar la eficacia del tratamiento de aguas residuales entre una PTAR que usa tanques sépticos y otra que emplea una laguna de oxidación con Pontederia crassipes, lo cual ayuda a valorar opciones sostenibles para el saneamiento en áreas rurales. Los resultados posibilitarán la producción de información imparcial acerca del comportamiento de los dos sistemas, lo que facilitará elegir tecnologías que ayuden a cumplir con los Límites Máximos Permisibles establecidos en el Decreto Supremo N.° 003-2010-MINAM.

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

La laguna de oxidación con Pontederia crassipes presenta mayor eficiencia técnica, operativa y económica que el sistema de tanques sépticos para el tratamiento de aguas residuales en el sector Pancarhuaylla, Anta, 2025.

2.4.2. Hipótesis específicas

H.E.1. La laguna de oxidación con Pontederia crassipes presenta mayor eficiencia de remoción de contaminantes que el sistema de tanques sépticos, considerando los límites máximos permisibles establecidos en el D.S. N.° 003-2010-MINAM, en el sector Pancarhuaylla, Anta, 2025.

H.E.2. La laguna de oxidación con Pontederia crassipes presenta un nivel de estabilidad estructural y geotécnica adecuado, considerando las condiciones de suelo y topografía del sector Pancarhuaylla, Anta, 2025.

H.E.3. La laguna de oxidación con Pontederia crassipes requiere menor intervención técnica y mantenimiento que el sistema de tanques sépticos para su funcionamiento en el sector Pancarhuaylla, Anta, 2025.

H.E.4. La laguna de oxidación con Pontederia crassipes presenta menores costos de tratamiento y mayor sostenibilidad financiera que el sistema de tanques sépticos en el sector Pancarhuaylla, Anta, 2025.

2.5. Variables

2.5.1. Variable 1 (Independiente)

Sistema de tratamiento de aguas residuales

La variable independiente es el método de tratamiento de aguas residuales, entendido como el conjunto de procesos e infraestructuras destinados a la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales generadas por la población de Pancarhuaylla, con el fin de mejorar su calidad antes de su disposición final.

Se consideran dos sistemas de tratamiento: el sistema convencional basado en tanques sépticos, compuesto por unidades de sedimentación primaria y zanjas de percolación

para la disposición del efluente en el suelo; y el sistema alternativo mediante lagunas de oxidación con presencia de macrófitas acuáticas como Pontederia crassipes, las cuales contribuyen a la depuración del agua mediante procesos de sedimentación, absorción de nutrientes y actividad microbiana.

La selección de estos sistemas se fundamenta en su aplicabilidad en zonas rurales y en su implementación real o potencial en el área de estudio, permitiendo un análisis comparativo considerando criterios de diseño, eficiencia del tratamiento, operación y sostenibilidad del sistema.

2.5.2. Variable 2 (Dependiente)

Eficiencia técnica, operativa y económica del sistema de tratamiento

La variable dependiente es la eficiencia técnica, operativa y económica del tratamiento de aguas residuales, definida como la capacidad de cada sistema para reducir la carga contaminante de las aguas residuales. Esta se determinará mediante la calidad del efluente, considerando los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos bajo los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en el D.S. N° 003-2010-MINAM. Además, el análisis de la eficiencia del tratamiento se complementa con la evaluación comparativa de la estabilidad estructural de los sistemas, el nivel de intervención técnica y mantenimiento requerido, así como la viabilidad económica de cada alternativa, en concordancia con los objetivos específicos de la investigación.

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
Variable independiente Sistema de tratamiento de aguas residuales	Conjunto de unidades y procesos destinados a tratar las aguas residuales mediante mecanismos físicos, químicos y biológicos, con el propósito de reducir la carga contaminante y obtener un efluente con características adecuadas para su disposición o aprovechamiento (Humanante Cabrera et al., 2022). En esta investigación comprende los tanques sépticos existentes y la alternativa proyectada de laguna de oxidación con Pontederia crassipes.	Se evaluará mediante la caracterización y comparación de las alternativas de tratamiento, considerando sus características geométricas e hidráulicas. Se determinarán las dimensiones y ubicación de las estructuras mediante Google Earth Pro y se calcularán el volumen útil y el tiempo de retención hidráulica (TRH) a partir del caudal de diseño, conforme a la normativa técnica OS.090.	D1. Tanque séptico	I1: Tiempo de retención hidraúlica (TRH) I2: Volumen util del tanque (m3)
			D2. Laguna de oxidación con Pontederia Crassipes	I3: Tiempo de retención hidraúlica (TRH) - (días) I4: Área superficial (m2) y profundidad de la laguna (m)
Variable dependiente Eficiencia técnica, operativa y económica del sistema de tratamiento	Grado en que una alternativa de tratamiento cumple criterios técnicos, operativos y económicos para alcanzar un tratamiento adecuado de las aguas residuales. El componente técnico comprende la capacidad de remoción de contaminantes y la viabilidad física de la infraestructura; el componente operativo considera los requerimientos de operación y mantenimiento; y el componente económico comprende los costos asociados a su implementación y funcionamiento (Cicekalan et al., 2023; Hazra & Durso, 2022)	Se evaluará mediante tres componentes: 1) técnico, a través de la eficiencia de remoción de contaminantes y del análisis de las condiciones geotécnicas, incluida la capacidad portante y estabilidad; 2) operativo, mediante la identificación y comparación de los requerimientos de operación y mantenimiento de cada alternativa; y 3) económico, mediante la estimación y comparación de los costos de inversión (CAPEX) y de operación y mantenimiento (OPEX).	D3. Calidad del efluente	I5: Porcentaje de remoción de DBO_5 y DQO (%) I6: Concentración de Sólidos Suspendidos Totales (SST) - (mg/L) I7: Aceites y grasas I8: Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)
			D4. Estabilidad estructural	I9: Factor de seguridad (FS) de los taludes de la laguna I10: Esfuerzo admisible del suelo de Fundación (kg/cm2)
			D5. Mantenimiento y operación	I11: Nivel de complejidad operativa del sistema
			D6. Análisis económico	I12: Costo total anual (CAPEX + OPEX simplificado) - (soles/año)

Nota. La Tabla 1 presenta la variable independiente, sistema de tratamiento de aguas residuales, comprende los tanques sépticos existentes y la alternativa proyectada de laguna de oxidación con Pontederia crassipes, evaluados mediante parámetros hidráulicos y geométricos. La variable dependiente, eficiencia técnica, operativa y económica, se evalúa mediante la calidad del efluente, la estabilidad estructural, las condiciones de operación y mantenimiento, y los costos de inversión y operación del sistema.

III. Marco Teórico

3.1. Antecedentes

3.1.1. A nivel Internacional

En la nota técnica del Banco Interamericano de Desarrollo titulado “Innovaciones en el Desarrollo e Implementación de Humedales Construidos para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Latinoamérica y El Caribe”, la investigadora Irene Altafin recopiló experiencias de diversos países. Estas experiencias incluyeron la evaluación de sistemas de tratamiento existentes, tanto en fase de diseño como en proyectos recientemente implementados, y el análisis paralelo de humedales artificiales como solución alternativa. A lo largo del informe se examinaron casos específicos de Brasil, México, Perú y Nicaragua, describiendo el desempeño operativo de los sistemas actualmente en uso y comparándolo con el desempeño proyectado, los costos estimados y las condiciones operativas de las tecnologías alternativas propuestas. Los resultados sugieren que las tecnologías de tratamiento basadas en procesos naturales podrían ser una alternativa técnicamente viable y sostenible frente a los sistemas convencionales, incluso antes de su implementación a gran escala. El informe concluye que dicho análisis comparativo, entre los sistemas existentes y las tecnologías diseñadas, es esencial para evaluar el potencial de alternativas más apropiadas y eficientes para las zonas rurales de escasos recursos. (Altafin, 2021)

Por su parte, Egberto Selerio, en su estudio titulado “ Multicriteria Analysis of Decentralized Wastewater Treatment Technologies for the Philippines”, estimó diversas tecnologías de tratamiento de aguas residuales mediante un análisis multicriterio que examinó eficiencia de remoción, costos de ciclo de vida y facilidad de operación en zonas rurales, Su análisis demostró que los sistemas naturales o de baja energía, entre ellos lagunas, presentan mayor sostenibilidad a largo plazo en comparación con sistemas convencionales. Estos resultados permiten considerar que las tecnologías naturales pueden ser ventajosas en contextos como los evaluados en la sierra peruana durante el último periodo, donde los costos operativos y la disponibilidad técnica son limitados. (Selerio, 2024)

Asimismo, Potosme y Berrios, en su estudio “Evaluación del sistema de lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales del municipio de Masatepe, Departamento de Masaya”, evaluaron la eficiencia del sistema de tratamiento conformado por lagunas anaerobia, facultativa y de maduración. Para ello se emplearon metodologías experimentales mediante la evaluación del afluente y efluente del sistema. Los datos revelaron que, si bien las lagunas lograron remover eficazmente la materia orgánica, se observó un bajo rendimiento debido a la sobrecarga hidráulica y a deficiencias en el mantenimiento del sistema. Finalmente, llegaron a la conclusión que las lagunas pueden funcionar eficientemente, pero esto requiere una operación apropiada y de la conservación de sus componentes biológicos. (Potosme H. & Berrios M., 2021)

Por su parte, Erika Vanegas G., llevó a cabo una investigación titulada “Eficiencia del Jacinto de Agua (Eichhornia Crassipes) en la Fitodepuración de Aguas Residuales Domésticas (ARD) y Aguas Residuales no Domésticas (ARnD)”, en la que examinó la fitodepuración de aguas residuales mediante el empleo de Eichhornia crassipes (actualmente clasificada como Pontederia crassipes). El análisis de la eficiencia de esta planta en la remoción de contaminantes bajo distintos períodos de retención fue parte del estudio, que

sistematizó múltiples experiencias técnicas. Los hallazgos indicaron que la especie tiene una notable capacidad de depuración, con descensos importantes de carga orgánica: hasta el 91,06 % en DBO_5, el 93,9 % en DQO y el 99,9 % en coliformes termotolerantes. La investigación determina que el Jacinto de agua es una opción eficaz y sustentable para el tratamiento de aguas, en particular en las comunidades rurales. (Vanegas Gómez, 2021)

Finalmente, en un estudio publicado recientemente que lleva por título "Evaluation of on-Site Sanitation Systems: Efficiency of Baffled Septic Tanks", realizado por investigadores de la Universidad de Cuenca, la Universidad Católica de Cuenca y la Universidad Tecnológica del Perú, examinó el desempeño de diferentes configuraciones de tanques sépticos para determinar la calidad real de su efluente. Los resultados mostraron niveles limitados de despuración, aproximadamente 31% para DBO_5, 30% para DQO y 39% para sólidos suspendidos totales (SST), Estos valores están significativamente por debajo de los límites requeridos para un vertimiento seguro. Además, el efluente final superó los límites máximos permisibles establecidos en la normativa ambiental ecuatoriana, cuyos requisitos son comparables a los de Perú. Por lo tanto, el estudio concluye que incluso con diseños mejorados, los tanques sépticos no generan un efluente apto para su reutilización ni para el vertimiento en cuerpos naturales de agua. Esto resalta sus limitaciones como alternativa de tratamiento sostenible. (García Avila, y otros, 2023)

3.1.2. A nivel Nacional

Angulo Urpeque y Matínez Varillas realizaron una investigación titulada "Comparativo técnico – económico entre sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas, bajo lagunas de estabilización y tanque imhoff de la asociación Centro Progreso San Juan de Ihuanco, distrito de Cerro Azul, Provincia de Cañete, 2020.", se analizó la viabilidad de dos alternativas de tratamiento para una asociación rural en el distrito de Cerro

Azul. Se realizó un análisis comparativo por parte de las investigadoras entre un sistema convencional que utiliza un tanque Imhoff y una propuesta de un sistema por lagunas de estabilización, analizando criterios técnicos, operativos y económicos. Los resultados indicaron que, aunque ambos sistemas son viables en entornos rurales, el sistema de lagunas ofrece una mayor sostenibilidad a largo plazo por sus menores costos operativos y a su diseño más sencillo. Por último, las autoras concluyen que las lagunas de estabilización constituyen una opción beneficiosa en comparación con los sistemas convencionales, particularmente en comunidades con recursos escasos y poca disponibilidad de conocimientos técnicos. (Angulo Urpeque & Martinez Varillas, 2021)

También, en una investigación llevada a cabo por Castellanos Morales y Mamani Ccapira, bajo el nombre de “Optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales por las lagunas de oxidación/estabilización del Sector Mukuraya, Provincia de Moho, Región de Puno”, se analizó el desempeño de un sistema de lagunas de oxidación situado en una zona rural altoandina, con características climáticas y geográficas parecidas a las de la sierra peruana. Este estudio reveló que las lagunas son una solución eficaz en estos entornos, ya que demandan poca energía, son sencillas de manejar por las comunidades rurales y su capacidad de estabilizar la carga orgánica incluso cuando la disponibilidad técnica es limitada. Los investigadores concluyen que las lagunas de oxidación son más adecuadas en zonas altoandinas en comparación con sistemas/tecnologías convencionales, debido a compatibilidad con el clima, su estructura simple y su eficiencia cuando se operan con tiempos de retención adecuados. (Catellanos Morales & Mamani Ccapira, 2021)

Asimismo, en la investigación realizada por Calderon R. y Salinas C., titulada “Fitorremediación con Eichhonia crassipes en la remoción de DQO y DBO5 en aguas residuales domiciliarias en la ciudad de Cajamarca, 2021”, se evaluó la eficiencia de remoción de carga contaminante utilizando el Jacinto de agua. La metodología fue de tipo

aplicada y cuasi-experimental, donde se midieron parámetros críticos antes y después del contacto con la macrófita. Los resultados revelaron que una eficiencia de remoción significativa, logrando reducir la DBO5 en un 84.7% y la DQO en un 78.4%, además de una notable disminución en la concentración de coliformes termotolerantes. Las autoras concluyeron que esta tecnología natural es una alternativa viable para optimizar el tratamiento de efluentes en zonas con recursos limitados, destacando su bajo costo y facilidad de implementación frente a sistemas convencionales que no logran alcanzar los estándares normativos vigentes. (Calderon Rodriguez & Salinas Cordova, 2023)

La investigación de Pacori J. y Ginez P., llamada "Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales y propuesta de solución en el lugar Pucará - 2023", analizó cuán eficaz era la eliminación de carga contaminante y qué calidad tenía el efluente final de un sistema que se veía afectado por restricciones operativas. La metodología fue de tipo cuantitativa y no experimental, se tomaron muestras de agua residual en cada una de las etapas unitarias del sistema durante los períodos de estiaje y avenida con el fin de evaluar parámetros microbiológicos y físico-químicos importantes. Los resultados mostraron una grave insuficiencia en la calidad del efluente final, con concentraciones medias de 194.5 mg/l para la DBO_5, 414.1 mg/l para la DQO y 3 762 500 NMP/100ml para los coliformes termotolerantes; cifras que sobrepasan de forma preocupante los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por la legislación nacional vigente. Los autores llegaron a la conclusión de que la mala elección de la tecnología para el área, los efectos de las bajas temperaturas y la ausencia de programas estrictos de operación y mantenimiento son causas directas del deterioro en la calidad del agua tratada. Esto muestra que es necesario pasar a sistemas biológicos adaptados que no requieran una gestión operativa compleja en situaciones con restricciones técnicas. (Pacori Pacori & Ginez Choque, 2023)

3.1.3. A nivel Regional y Local

Quispe Cusihuallpa y Saldivar quispicusi, en su investigación titulada “Eficiencia de plantas de tratamiento de aguas residuales de los sectores de Pucyura y Huancacalle, Distrito de Vilcabamba - Cusco, en el año 2024”, se evaluó el desempeño de distintas infraestructuras de tratamiento de aguas residuales domésticas, entre ellas tanque Imhoff. Los resultados del estudio evidencian que varios sistemas convencionales de tratamiento presentan limitaciones en su eficiencia, principalmente asociadas a deficiencias en el diseño, operación y mantenimiento, lo que repercute directamente en la calidad del efluente final. Asimismo, se señala que en contextos rurales y altoandinos, la falta de tecnologías complementarias reduce la capacidad de los sistemas para cumplir con los estándares ambientales vigentes. Los investigadores concluyeron que, es necesario evaluar e implementar alternativas de tratamiento más eficientes y sostenibles, adecuadas a las condiciones geográficas y operativas de la región de Cusco, que permitan mejorar la calidad del efluente tratado y reducir el impacto ambiental generado por el vertimiento de aguas residuales domésticas. (Quispe Cusihuallpa & Saldivar Quispicusi, 2025)

En su tesis titulada “Diseño de planta de tratamiento de aguas residuales mediante humedales en el distrito de Layo-Cusco”, Yauri Gomez y Cahuana Concha, evaluaron el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales basado en humedales artificiales en la provincia de Canas, región de Cusco. La investigación siguió una metodología aplicada que consideró el análisis de parámetros físico-químicos y microbiológicos del agua residual y la comparación con los límites máximos permisibles establecidos por la normativa peruana. Los resultados proyectados mostraron que la PTAR propuesta con humedales podría alcanzar eficiencias cercanas al 93% en remoción de contaminantes, cumpliendo con los estándares ambientales, lo que sugiere que los sistemas naturales son una alternativa viable para zonas rurales altoandinas. (Yauri Gomez & Cahuana Concha, 2024)

Asimismo, en la investigación realizada por Joachin A. y Paredes J., titulada "Eficiencia de remoción de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial en el sector de Angostura - distrito de Saylla - Cusco", se evaluó el diagnóstico operativo, el mantenimiento y la calidad del efluente de un sistema mixto conformado por un tanque séptico y celdas de fitodepuración a escala piloto. Donde se realizó una inspección sanitaria directa de la infraestructura existente y se ejecutaron análisis físicos, químicos y bacteriológicos en laboratorio de los efluentes antes y después del contacto con la biomasa vegetal. Los resultados revelaron que el estado de conservación del tanque séptico convencional obtuvo una calificación técnica de MALO, operando con una eficiencia deficiente de apenas el 32%; sin embargo, tras implementar el sistema de tratamiento natural complementario, el desarrollo favorable de la vegetación fitorremediadora optimizó la cinética de depuración, logrando una eficiencia de remoción significativa del 96.8% en los parámetros de aceites, grasas, DBO, DQO y coliformes termotolerantes, además de reducir un 65% los nitratos y fosfatos. Las autoras concluyeron que la infraestructura sanitaria pasiva tradicional colapsa operativamente por falta de mantenimiento en el contexto rural de Cusco, siendo técnicamente indispensable el acople de sistemas naturales de fitodepuración para garantizar un efluente de alta calidad que cumpla con los límites máximos permisibles vigentes y permita el reúso seguro del recurso. (Joachin Huaman & Paredes Rios, 2021)

Por último, en la investigación realizada por Auccatinco R., titulada "Evaluación de la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales en el distrito de Cusipata, provincia Quispicanchi - Cusco, 2021", se analizó el rendimiento operativo, la administración del mantenimiento y la calidad del efluente final de una infraestructura sanitaria a nivel municipal. La metodología utilizada fue cuantitativa y aplicada, basada en el seguimiento técnico de parámetros microbiológicos, químicos y físicos en el efluente y

afluente del sistema. Se compararon los resultados obtenidos en laboratorio con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por las regulaciones actuales. Los resultados revelaron un estado de colapso operativo crítico y una baja eficiencia de depuración, debido a que tanto el tanque séptico como la laguna de estabilización se encuentran totalmente colmatados por lodos acumulados. El autor determinó que la mala calidad del agua que se vierte al cuerpo receptor es resultado directo de la falta de extracción regular de sedimentos y de un programa constante para operar y mantener por parte de las entidades locales. Esto prueba que las tecnologías tradicionales necesitan, como requisito indispensable, una gestión técnica apropiada e intervenciones complementarias para prevenir el impacto ambiental y el colapso hidráulico en áreas rurales. (Auccatinco Hirpahuanca, 2021)

3.2. Bases teóricas

3.2.1. Tratamiento de aguas residuales domésticas

El tratamiento de las aguas residuales domésticas comprende un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos destinados a reducir la carga contaminante presente en el agua generada por las actividades domésticas. Su finalidad es mejorar la calidad del efluente antes de su disposición final, contribuyendo a la protección de la salud pública y del ambiente. Los sistemas de tratamiento permiten reducir diferentes grupos de contaminantes mediante procesos que pueden combinar mecanismos físicos, químicos y biológicos (Humanante Cabrera, Moreno Alcivar, Grijalva-Endara, Saldoya Tinedo, & Suárez Tomalá, 2022).

En el contexto del saneamiento rural, la selección de las tecnologías de tratamiento debe considerar las características del caudal, el terreno, las condiciones ambientales, los recursos disponibles y los requerimientos de operación y mantenimiento. En este ámbito

pueden emplearse sistemas descentralizados y tecnologías de bajo requerimiento energético, entre ellas los tanques sépticos y los sistemas naturales de tratamiento.

3.2.1.1. Clasificación de los procesos de tratamiento

Los procesos de tratamiento de aguas residuales pueden clasificarse de acuerdo con las características de los contaminantes que se pretende remover y con los mecanismos empleados en cada etapa. Esta clasificación permite establecer una secuencia de tratamiento acorde con las características del agua residual y con las condiciones de disposición del efluente, de acuerdo con los criterios establecidos en la Norma OS.090 del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE).

a. **Pretratamiento**: El pretratamiento, de acuerdo con la Norma OS.090, es la fase inicial del proceso de purificación de aguas residuales. Su propósito es eliminar los sólidos gruesos, las arenas y los materiales que flotan para salvaguardar las unidades posteriores de la planta.
b. **Tratamiento primario**: El objetivo del tratamiento primario es eliminar los sólidos gruesos y sedimentables a través de procedimientos físicos, sobre todo la sedimentación. En esta fase, aunque se disminuye parcialmente la carga orgánica del agua residual, no se consigue una depuración que sea suficiente para que los límites de vertimiento ambiental sean cumplidos.

   Según la norma OS.090, que se encuentra en el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) y regula las plantas de tratamiento de aguas residuales, los tanques sépticos operan a través de dos procesos: la digestión anaerobia de materia orgánica y la sedimentación de sólidos. Como resultados, generan un efluente que necesita tratamiento adicional antes de ser desechado.

c. **Tratamiento secundario**: La finalidad del tratamiento secundario es eliminar la materia orgánica disuelta y coloidal que no fue eliminada durante el tratamiento primario. Los procesos biológicos, tanto anaerobios como aerobios, que posibilitan la descomposición de la materia orgánica mediante la intervención de microorganismos, son predominantes en esta fase.

   En este nivel se hallan sistemas como las lagunas de oxidación, también llamadas lagunas de estabilización, y otros procesos biológicos que requieren poca energía.

d. **Tratamiento terciario**: Eliminar contaminantes concretos que se quedan después del tratamiento secundario, como los nutrientes (fósforo y nitrógeno), los compuestos orgánicos persistentes y los patógenos, es el propósito del tratamiento terciario o avanzado.

   Este grado de tratamiento se utiliza cuando la calidad del efluente tiene que ser alta, ya sea para la reutilización o para su vertido en cuerpos de agua delicados.

   Según lo estipulado en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, la calidad del efluente tiene que ajustarse a los límites máximos permisibles antes de ser vertido, lo cual a menudo requiere que se añadan procesos extra a los tratamientos primarios y secundarios.

3.2.2. Sistemas de tratamiento de aguas residuales

El objetivo de los sistemas de tratamiento de aguas residuales es reducir la cantidad de contaminantes en las aguas residuales domésticas antes de su disposición final. García Avila y colaboradores (2023), indican que para que una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) rural tenga viabilidad y sostenibilidad en el largo plazo, es necesario

elegir tecnologías que no necesiten una inversión significativa de capital (CAPEX), que tengan un bajo consumo de energía convencional y cuya operación no dependa de personal con alta capacitación. Estos sistemas deben ser simples desde la perspectiva técnica, tener un bajo consumo de energía y estar alineados con las condiciones locales en el entorno rural.

Desde la perspectiva tecnológica, es posible diferenciar entre sistemas convencionales y sistemas naturales. Los tanques sépticos y las lagunas de oxidación son los más empleados en áreas rurales, gracias a lo fácil que resulta construirlos y hacerlos funcionar. La norma OS.090 del RNE define los criterios y hacerlos funcionar define los criterios técnicos para la elaboración y operación, teniendo en cuenta el caudal, las particularidades del terreno y las exigencias de calidad del efluente.

3.2.3. Tanques sépticos

Los tanques sépticos son unidades de tratamiento primario utilizadas para el tratamiento descentralizado de aguas residuales domésticas. Su funcionamiento se basa principalmente en la sedimentación de sólidos y en la digestión anaerobia de la materia orgánica. Como resultado, se obtiene un efluente con una reducción parcial de la carga contaminante, por lo que su disposición o tratamiento posterior debe considerar las características del efluente y las condiciones del sistema.

El desempeño de estas unidades está relacionado con factores como el tiempo de retención hidráulica, el volumen útil disponible y la frecuencia de extracción de lodos. La acumulación excesiva de sólidos puede reducir el volumen efectivo del tanque y afectar su funcionamiento, por lo que las actividades de operación y mantenimiento son necesarias para conservar las condiciones adecuadas de tratamiento.

3.2.4. Zanjas de percolación

Las zanjas de percolación son una unidad adicional en los sistemas de tratamiento con tanques sépticos y su propósito es la eliminación final del efluente a través de su infiltración en el terreno. La eficiencia de la infiltración depende directamente de las propiedades geotécnicas del terreno, en particular su textura y permeabilidad.

3.2.5. Lagunas de oxidación

Los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales, como las lagunas de oxidación o estabilización, funcionan a través de procesos bioquímicos, físicos y biológicos. Su operación se fundamenta en la interacción entre microorganismos y elementos medioambientales, como la radiación solar y el tiempo de retención hidráulica. En este proceso, las algas proporcionan oxígeno al sistema mientras que las bacterias descomponen la materia orgánica.

Estos sistemas son una opción apropiada para las zonas rurales y para comunidades con limitaciones económicas y técnicas debido a su diseño sencillo, coste de construcción bajo, escasa demanda energética y facilidad de operación. La Norma OS.090 del RNE (2016), establece que “las lagunas de oxidación son sistemas adecuados para procesar aguas residuales domésticas, siempre y cuando se diseñen tomando en cuenta ciertos parámetros técnicos, como la duración de retención hidráulica, el caudal de diseño y las condiciones climáticas del medioambiente”.

Aunque las lagunas convencionales de oxidación se basan en la relación entre algas y bacterias, en los sistemas naturales mejorados estos procesos pueden incrementarse o complementarse con el empleo de macrófitas acuáticas. Al añadir vegetación acuática, se pueden optimizar los procesos de depuración. Esto favorece la retención de sólidos, la

absorción de nutrientes y el crecimiento de comunidades microbianas en las raíces, lo que mejora la calidad del efluente tratado.

3.2.6. Fitodepuración en sistemas de tratamiento de aguas residuales

La fitodepuración es un proceso natural que utiliza vegetación acuática para mejorar la calidad de las aguas residuales mediante procesos bioquímicos, biológicos y físicos. Las plantas, al tener contacto con los microorganismos que están relacionados con sus raíces, ayudan a suprimir patógenos, materia orgánica, nutrientes y sólidos suspendidos. En el entorno rural de Cusco, las evaluaciones experimentales indican que esta tecnología es muy adecuada para zonas altoandinas debido a su bajo consumo energético, alcanzando rendimientos de eliminación significativos en los criterios de calidad del efluente final (hasta un 96.8%). La fitodepuración se convierte en un elemento esencial para reducir la colmatación y mejorar la eficiencia del tratamiento en las lagunas de oxidación, superando así a los sistemas tradicionales (Joachin Huaman & Paredes Rios, 2021).

3.2.6.1. Mecanismos de remoción en lagunas de oxidación

De acuerdo con Vanegas Gómez (2021), la eliminación de contaminantes en lagunas de oxidación por medio de fitodepuración se lleva a cabo mediante la sedimentación de sólidos, la degradación biológica del material orgánico, la absorción de nutrientes y la retención física de partículas en el sistema radicular. Se genera un amplio espacio para la creación de biofilms microbianos en las raíces de las macrófitas, los cuales son esenciales para disminuir contaminantes y para oxidar compuestos orgánicos. Del mismo modo, la prolongación del Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) ayuda a eliminar los agentes patógenos, ya que se exponen durante más tiempo a condiciones ambientales adversas en el sistema y hay una competencia biológica.

3.2.6.2. Clasificación de lagunas de oxidación

Según su función y régimen biológico, las lagunas de oxidación se dividen en tres categorías: de maduración, facultativas y anaerobias. Las unidades anaerobias tienen la responsabilidad de eliminar grandes cargas orgánicas a través de la digestión sin oxígeno; las facultativas integran procesos aerobios en la superficie y anaerobios en el fondo; y las de maduración mejoran la calidad del efluente final, reduciendo significativamente los agentes patógenos. Según Joachin H. y Paredes R. (2021), estos estanques tienen la habilidad de funcionar de forma convencional o alternativa, incorporando macrófitas acuáticas en su superficie. Esta infraestructura verde potencia los procesos de sedimentación y mejora el rendimiento general del tratamiento biológico.

3.2.6.3. El papel de las macrófitas en la oxigenación del sustrato

Las macrófitas acuáticas son fundamentales en los sistemas de fitodepuración porque transportan oxígeno desde la atmósfera hasta el área de las raíces. Esto crea microambientes aeróbicos que fomentan a las bacterias responsables de descomponer la materia orgánica. En zonas rurales altoandinas con lagunas de oxidación, donde las bajas temperaturas restringen la efectividad de los procesos microbiológicos tradicionales, emplear estas tecnologías naturales mejora el proceso de depuración y mantiene en equilibrio la calidad del efluente final (Vanegas Gómez, 2021).

3.2.7. Pontederia crassipes como macrófita en el tratamiento de aguas residuales

Debido a su gran tolerancia a ambientes contaminados, su rápido crecimiento y su aptitud para absorber nutrientes, la Pontederia crassipes es una macrófita acuática flotante que se emplea de manera extensa en los sistemas de tratamiento natural de aguas residuales. En contextos rurales donde se necesita tecnología de bajo costo y de fácil operación, su

empleo en humedales construidos y lagunas de oxidación ha probado ser efectivo para mejorar la calidad del efluente.

Varios estudios han evidenciado que esta especie participa de manera importante en la disminución de microorganismos, nutrientes y materia orgánica, desempeñando un papel fundamental en los sistemas de fitodepuración.

3.2.7.1. Características morfológicas y fisiológicas

La Pontederia crassipes, también llamada jacinto de agua, es una macrófita flotante de tipo follaje que se encuentra con gran frecuencia en los cuerpos de agua dulce. Esta especie se distingue porque tiene hojas de color verde brillante, que son redondeadas u ovaladas y están organizadas en forma de "ramillete" o roseta. Estas hojas se mantienen por pecíolos inflados, lo que le confiere una flotabilidad natural. Según Water hyacinth (2020), sus raíces son fibrosas, largas y colgantes; juntas forman una densa masa radicular que se extiende en la columna de agua.

Desde la perspectiva fisiológica, la Pontederia crassipes muestra una notable habilidad de adaptarse a entornos con alta carga orgánica y nutrientes disueltos, así como una tasa de crecimiento vegetativo elevada. Su sistema de raíces proporciona una superficie extensa para que los microorganismos se adhieran, lo cual ayuda a procesos biológicos tales como la degradación de materia orgánica y la retención de sólidos suspendidos. Esta cualidad transforma a la planta en un elemento esencial en sistemas de purificación natural de aguas residuales, sobre todo en lagunas de oxidación y sistemas de fitodepuración.

También es esencial para mantener la eficiencia del sistema y prevenir la liberación secundaria de contaminantes almacenados en la biomasa vegetal el hecho de que su propagación sea fácil y rápida, lo que posibilita que se maneje a través de cosechas periódicas.

Figura 1

Presencia de la macrófita en Pancarhuaylla



Nota. Fotografía tomada por el autor

Figura 2

Follaje denso del Jacinto de agua (Pontederia crassipes)



Nota. Revista Lifeder, https://www.lifeder.com/lirio-acuatico/

3.2.7.2. Cinética de remoción de nutrientes (Nitrógeno y Fósforo)

Varios estudios han evidenciado que la Pontederia crassipes tiene un alto potencial para eliminar nutrientes que se encuentran en aguas residuales, sobre todo fósforo y nitrógeno, a causa de sus mecanismos fisiológicos de absorción y asimilación. De acuerdo con la investigación divulgada en la revista Ciencia Latina, esta macrófita acuática tiene una eficacia importante a la hora de disminuir compuestos que contienen fósforo y nitrógeno cuando se usa en sistemas de tratamiento natural, pues los emplea como fuente para su crecimiento y desarrollo vegetal. El informe enfatiza que la cinética de eliminación está vinculada directamente con la concentración inicial de nutrientes en el agua residual, el tiempo de retención hidráulica y la densidad de biomasa vegetal (Quispe Benavides, Guadalupe Baylón , Diaz Avalos, & Diaz Panduro, 2021).

Desde la perspectiva cinética, el fósforo se absorbe como fosfatos disueltos y luego se incorpora a los tejidos de la planta; en cambio, el nitrógeno se absorbe sobre todo en forma de nitratos y amonio. Este procedimiento disminuye la cantidad de nutrientes en el efluente, lo que ayuda a reducir la posibilidad de eutrofización en los cuerpos que reciben dicho efluente.

De manera complementaria, Rasool y otros (2023), examinaron el rendimiento de la Pontederia crassipes en un sistema piloto para el tratamiento de aguas residuales domésticas, notando disminuciones importantes tanto del fósforo total como del nitrógeno total durante todo el periodo experimental. Los autores afirman que, a medida que se extiende el tiempo de contacto entre el agua residual y las raíces de la planta, la eficacia del proceso mejora. Esto respalda la importancia esencial de la cinética de remoción en los sistemas de fitodepuración.

3.2.7.3. Influencia del clima altoandino en el metabolismo de la Pontederia crassipes

El rendimiento metabólico de la Pontederia crassipes se ve afectado por elementos del entorno, como la radiación solar, la temperatura, el nivel del mar y la presencia de nutrientes en el agua residual. Estos elementos determinan la conducta fisiológica de la macrófita en los sistemas de tratamiento natural en áreas altoandinas, que se distinguen por temperaturas moderadas y alta radiación solar.

Investigaciones desarrolladas en regiones altoandinas del Perú evidencian que los sistemas de lagunas de oxidación pueden operar de manera eficiente bajo estas condiciones climáticas, siempre que se garantice un tiempo de retención hidráulica adecuado, una correcta adaptación de la biomasa vegetal y un mantenimiento periódico del sistema (Catellanos Morales & Mamani Ccapira, 2021). En este escenario, la eficacia del tratamiento está relacionada fundamentalmente con el diseño hidráulico, la carga orgánica que se aplica y la administración operativa del sistema.

Desde la perspectiva de la ingeniería sanitaria, estas circunstancias enfatizan lo esencial que es un diseño técnico apropiado para áreas altoandinas, en el que la Pontederia crassipes tiene el potencial de ayudar a mejorar continuamente la calidad del efluente. Por lo tanto, en áreas rurales como la zona de Pancarhuaylla, el uso de esta macrófita en sistemas de lagunas de oxidación es técnicamente factible, siempre que se consideren las particularidades climáticas propias de la región.

3.2.8. Eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales

La capacidad de un sistema para disminuir la concentración de contaminantes en el efluente, con el objetivo de que este esté dentro de los límites máximos permitidos por la normativa ambiental vigente, es lo que se conoce como eficiencia. El Decreto Supremo N.°

003-2010-MINAM, en Perú, determina las normas y los valores de referencia para valorar el rendimiento de las plantas que tratan aguas residuales domésticas y municipales.

Se mide la eficiencia del tratamiento a través de indicadores microbiológicos y fisicoquímicos que hacen posible calcular la eliminación de microorganismos patógenos, sólidos y carga orgánica. Los más relevantes son los siguientes: los sólidos suspendidos totales, los aceites y grasas, la DBO_5 y la DQO, así como los coliformes termotolerantes.

3.2.8.1. Porcentaje de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y demanda química de oxígeno (DQO)

La DBO_5 es un indicador que determina el oxígeno que los microorganismos necesitan para descomponer la materia orgánica biodegradable presente en las aguas residuales; por su parte, la DQO mide la cantidad total de materia orgánica, tanto biodegradable como no, que puede ser oxidada químicamente.

Uno de los factores más importantes para medir la eficacia de los sistemas de tratamiento es el porcentaje de eliminación de DBO_5 y DQO. De acuerdo con Metcalf & Eddy (2014), “los tanques sépticos, como sistemas de tratamiento primario, tienen eficiencias reducidas al eliminar la DBO_5 y la DQO, lo cual normalmente no es suficiente para satisfacer los estándares ambientales de vertimiento por sí mismos”.

Las lagunas de oxidación, en cambio, posibilitan aumentar la eliminación de carga orgánica a través del trabajo conjunto de microorganismos, sedimentación y procesos naturales de estabilización; esto puede resultar en porcentajes más altos de remoción de DBO_5 y DQO si se diseñan y funcionan correctamente.

3.2.8.2. Eficiencia en la reducción de sólidos suspendidos totales (SST)

Las partículas sólidas que están en el agua residual y no se hallan disueltas, los SST, son capaces de deteriorar la calidad del efluente, generar sedimentación indeseada y trasladar contaminantes relacionados.

En los tanques sépticos, la disminución de SST se lleva a cabo mayormente por sedimentación gravitacional; no obstante, varios estudios técnicos indican que el nivel de eliminación es restringido y está condicionado por el mantenimiento del sistema y el tiempo de retención hidráulica. Tal como establece la legislación ambiental de Perú, la supervisión de los SST es esencial para reducir los efectos adversos sobre los cuerpos receptores.

La productividad de la eliminación de SST se eleva en las lagunas de oxidación porque los procesos de sedimentación, retención física y estabilización biológica se combinan. La existencia de macrófitas acuáticas puede ayudar además a que las partículas sólidas se retengan, lo que mejora la calidad del efluente tratado.

3.2.8.3. Remoción de aceites y grasas

Los aceites y las grasas son sustancias que se encuentran en las aguas residuales de los hogares y pueden perjudicar el funcionamiento de los sistemas de tratamiento, así como la calidad del efluente, si no se eliminan correctamente. Su presencia puede causar obstrucciones, interferir con los procesos biológicos y tener repercusiones en el medio ambiente de los cuerpos que reciben.

En los tanques sépticos, el proceso de eliminación de grasas y aceites ocurre sobre todo por flotación, lo que genera una capa en la superficie que tiene que ser eliminada a través del mantenimiento regular. Sin embargo, la eficacia de este procedimiento está directamente relacionada con la frecuencia con que se limpia y las condiciones operativas del sistema.

En las lagunas de oxidación, la eliminación de grasas y aceites es favorecida por los procesos naturales de descomposición biológica y por la retención física vinculada a la biomasa que se encuentra en el sistema. Estos procedimientos ayudan a disminuir el riesgo de contaminación ambiental y a optimizar la calidad del efluente.

3.2.8.4. Remoción de coliformes termotolerantes

Los coliformes termotolerantes son marcadores microbiológicos que se emplean para analizar la contaminación fecal y el peligro sanitario vinculado al desecho de aguas residuales. El Decreto Supremo N.° 003-2010-MINAM fija restricciones concretas para este parámetro, debido a su importancia en la defensa de la salud pública y del entorno natural.

Los sistemas de tratamiento primario, como los tanques sépticos, no están hechos para erradicar una cantidad importante de microorganismos patógenos; por ello, la disminución de coliformes termotolerantes tiende a ser baja y cambiante. Por lo tanto, se necesitan procesos adicionales para reducir la carga microbiológica del efluente producido.

Las lagunas de oxidación posibilitan una disminución más significativa de los coliformes termotolerantes, gracias a elementos como el tiempo de retención hidráulica, la radiación del sol y los mecanismos naturales de inactivación biológica. Estos mecanismos otorgan a los sistemas naturales de tratamiento beneficios en cuanto al control microbiológico, particularmente en áreas rurales.

3.2.9. Calidad del efluente tratado

Se entiende por calidad del efluente tratado la medida en que el agua residual satisface, después de ser tratada, los criterios físicos, químicos y microbiológicos que la legislación ambiental en vigor ha fijado para su disposición final. Esta evaluación en Perú está regida, sobre todo, por los LMP fijados en el Decreto Supremo N.° 003-2010-MINAM para las plantas de tratamiento de aguas residuales de uso doméstico y municipal.

La calidad del efluente se establece, desde una perspectiva técnica, a través de la evaluación de parámetros representativos como los SST, DQO, DBO_5, las grasas y aceites y los coliformes termotolerantes. Estos indicadores hacen posible la evaluación del desempeño ambiental y la cuantificación del nivel de depuración que el sistema ha logrado. Los tanques sépticos, que son sistemas de tratamiento primario, tienden a tener limitaciones en la calidad del efluente porque están concebidos sobre todo para eliminar sólidos sedimentables y no para llegar a niveles de depuración superiores. Por esta razón, es esencial realizar una comparación evaluativa con alternativas como las lagunas de oxidación para establecer mejoras en la calidad del efluente tratado, sobre todo en áreas rurales.

3.2.10. Estabilidad estructural en infraestructuras sanitarias

La estabilidad estructural de las infraestructuras sanitarias alude a la habilidad de las estructuras que integran los sistemas de tratamiento de aguas residuales para soportar las acciones físicas, geotécnicas e hidráulicas a las que se exponen durante su vida útil, sin sufrir averías que pongan en peligro su seguridad o funcionamiento.

Para los tanques sépticos, la estabilidad estructural se basa esencialmente en la capacidad portante correcta del suelo de fundación, la estanqueidad del sistema y la resistencia del concreto. Estos elementos deben estar de acuerdo con lo que estipula la Norma OS.090 (2016). Una insuficiencia en cualquiera de estas áreas puede provocar filtraciones, derrumbamientos parciales o daños en el entorno. En el caso de las lagunas de oxidación, la estabilidad estructural se relaciona sobre todo con la estabilidad de los taludes, el control de la erosión y la compatibilidad geotécnica del terreno natural. Para asegurar la operación continua y segura del sistema, es crucial examinar el factor de seguridad de los taludes y la conducta del terreno de fundación, en particular en áreas altoandinas donde las condiciones climáticas y topográficas pueden tener un impacto considerable.

3.2.11. Operación y mantenimiento de sistemas de tratamiento

Para garantizar que los sistemas de tratamiento de aguas residuales se mantengan en funcionamiento, eficaces y seguros durante un periodo prolongado, es necesario llevar a cabo una serie de actividades técnicas que constituyen la operación y el mantenimiento. La calidad del efluente, la eficacia del tratamiento y el tiempo de vida útil de la infraestructura se ven afectados directamente por estos elementos.

Los tanques sépticos necesitan mantenimiento periódico, sobre todo la limpieza de las grasas que se van acumulando y la extracción de lodos. Si estas tareas no se realizan a tiempo, su capacidad para tratar puede disminuir considerablemente y pueden producirse fallos en el funcionamiento (RNE, 2016). Además, el buen desempeño del sistema depende de que la población lo use correctamente. Por otro lado, las lagunas de oxidación tienen un funcionamiento más sencillo, fundamentado en procesos naturales. No obstante, necesitan que se monitoree con regularidad el nivel del agua, la condición de los taludes y el tratamiento de la biomasa vegetal cuando sea necesario. La simplicidad operativa de estos sistemas es una ventaja en entornos rurales, donde la disponibilidad de personal técnico especializado y recursos económicos suele ser escasa (SIDE, 2020).

3.2.12. Análisis económico de sistemas de saneamiento

El análisis económico de los sistemas de saneamiento posibilita la evaluación de la viabilidad financiera de las opciones para el tratamiento de aguas residuales, teniendo en cuenta no solo los costos iniciales de inversión, sino también los gastos relacionados con su operación y mantenimiento durante su vida útil. Este estudio es crucial en áreas rurales de las tierras altas andinas, porque la disponibilidad de recursos técnicos y económicos es escasa. Por tanto, se da prioridad a soluciones que sean económicas, sencillas de operar y que requieran poca energía.

3.2.12.1. Costo de inversión para plantas de tratamiento en zonas rurales (CAPEX)

El CAPEX, o gasto de capital, hace alusión a la inversión inicial y única que se requiere para que una planta de tratamiento de aguas residuales pueda concretarse físicamente. En las zonas rurales, esto abarca el pago por la parcela en la que se localizarán los estanques o lagunas, el diseño pormenorizado efectuado por ingenieros, la edificación de infraestructura civil como canales de entrada y sedimentadores, así como la adquisición de equipos como bombas y rejillas para basura. Se considera una inversión debido a que genera un activo que beneficiará a la comunidad durante décadas.

3.2.12.2. Costo de operación y mantenimiento anual (OPEX)

El OPEX, o Gasto Operativo, por su parte, es el gasto anual y continuo que se requiere para que esa planta ya construida purifique el agua cada día. En una planta de tratamiento de aguas residuales rural, el OPEX abarca la adquisición de insumos químicos para la desinfección final y los sueldos de los operadores locales. Además, incluye el mantenimiento regular, como la limpieza de los lodos que se acumulan y el análisis periódico en laboratorio para comprobar que el agua tratada no contamina los ríos locales y se ajusta a las normativas medioambientales.

3.2.13. Normativa aplicable al tratamiento de aguas residuales

3.2.13.1. Norma técnica peruana NTP OS.090 Planta de tratamiento de aguas residuales

La Norma Técnica OS.090 del Reglamento Nacional de Edificaciones establece las pautas de ingeniería para la edificación y diseño de plantas de tratamiento, garantizando que las infraestructuras sean viables desde un punto de vista técnico.

3.2.13.2. Resolución Ministerial N° 273-2013-VIVIENDA

La Resolución Ministerial N° 273-2013-VIVIENDA, por su parte, aprueba el protocolo oficial para llevar a cabo el seguimiento de la calidad del agua que se vierte desde estas plantas, determinando cuándo y cómo deben recogerse las muestras.

3.2.13.3. Límites máximos permisibles (LMP) para efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) domésticas o municipales D.S. N° 003-2010-MINAM

El Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM es aquel que regula mayormente el cumplimiento ambiental. Este decreto establece los LMP para los residuos líquidos de las plantas municipales.

Figura 3

Límites máximos permisibles para los efluentes de PTAR

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUA
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10,000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	unidad	6.5-8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mL/L	150
Temperatura	°C	<35

Nota. Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM

3.2.13.4. Estándares de calidad de agua (ECA) D.S N°002- 2008- MINAM Categoría III (Riego de vegetales y bebida de animales)

Además, el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM determina los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para la Categoría III. Estos estándares especifican los requisitos

que debe cumplir el agua en ríos o lagunas receptoras si se va a emplear para regar plantas o dar de beber a animales.

Figura 4

Estándares nacionales de calidad ambiental para agua. Categoría 3: Riego de vegetales y bebidas de animales

PARÁMETROS PARA RIEGO DE VEGETALES			
PARÁMETRO		**Vegetales Tallo Bajo**	**Vegetales Tallo Alto**
	Unidad	**Valor**	**Valor**
Biológicos			
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	1000	2000 (3)
Coliformes Totales	NMP/100 mL	5000	5000 (3)
Eterococos	NMP/100 mL	20	100
Escherichia coli	NMP/100 mL	100	100
Huevos de Helmintos	huevos/litro	<1	<1 (1)
Salmonella sp.	Ausente		Ausente
Vibrion cholerae	Ausente		Ausente

PARÁMETROS PARA BEBIDAS DE ANIMALES		
PARÁMETROS	**UNIDAD**	**VALOR**
Fisicoquímicos		
Conductividad eléctrica	(uS/cm)	<=5000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	<=15
Demanda Química de oxígeno	mg/L	40
Floruro	mg/L	2
Nitratos-(NO3-N)	mg/L	50
Nitratos (NO2-N)	mg/L	1
Oxígeno Disuelto	mg/L	> 5
pH	Unidades de PH	6,5-8,4
Sulfatos	mg/L	500
Sulfuros	mg/L	0,05
Inorgánicos		
Aluminio	mg/L	5
Arsénico	mg/L	0,1
Berilio	mg/L	0,1
Boro	mg/L	5
Cadmio	mg/L	0,01
Cianuro WAD	mg/L	0,1
Cobalto	mg/L	1
Cobre	mg/L	0,5
Cromo (6+)	mg/L	1
Hierro	mg/L	1
Litio	mg/L	2,5
Magnesio	mg/L	150
Manganeso	mg/L	0,2
Mercurio	mg/L	0,001
Niquel	mg/L	0,2

Plata	mg/L	0,05
Plomo	mg/L	0,05
Selenio	mg/L	0,05
Zinc	mg/L	24
Orgánicos		
Aceites y Grasas	mg/L	1
Fenoles	mg/L	0,001
S.A.A.M. (detergentes)	mg/L	1

Nota. Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM

3.2.14. Limitaciones y desafíos para las lagunas de oxidación en zonas altoandinas

Las zonas altoandinas tienen características climáticas y geográficas específicas que plantean retos importantes para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Estas restricciones se distribuyen en tres ejes fundamentales: Efecto de la altitud y la baja presión de oxígeno en los procesos biológicos, variaciones térmicas extremas (heladas) y su impacto en la biomasa vegetal y accesibilidad y logística para el mantenimiento en comunidades rurales (Bosstech, 2025). Por lo que es necesario considerar alternativas adaptadas a las condiciones propias de estas zonas.

3.2.14.1. Efecto de la altitud y la baja presión de oxígeno en los procesos biológicos

Aunque la altitud disminuye la cantidad de oxígeno en el aire, el empleo de Pontederia crassipes desempeña un papel compensatorio esencial, pues esta planta posee la habilidad de trasladar oxígeno desde sus hojas a la rizosfera (estrecha zona del suelo que rodea las raíces de las plantas). Este suplemento de oxígeno por medio de las raíces promueve la actividad de bacterias aerobias, incluso cuando la presión es baja, lo que facilita una degradación eficaz de la materia orgánica. Así, la biomasa vegetal acelera el proceso biológico que, en una laguna sin plantas y a gran altitud, sería mucho más lento (Valencia Espinosa, Durán Rodríguez, & Ramirez Herrejón, 2025).

3.2.14.2. Variaciones térmicas extremas (heladas) y su impacto en la biomasa vegetal

A pesar de que las temperaturas bajas representan un desafío, la Pontederia crassipes es capaz de recuperarse con eficacia si se implementan métodos apropiados de manejo, como la regulación de la densidad poblacional del vegetal y el control periódico de la biomasa. La masa vegetal flotante genera un microclima en la superficie del agua y funciona como un aislante térmico que resguarda a las colonias bacterianas del fondo frente a los cambios bruscos de temperatura. Asimismo, la habilidad de esta especie para reproducirse rápidamente posibilita que, después de cortos periodos de heladas, la biomasa se recupere con rapidez, manteniendo una cobertura vegetal adecuada para el funcionamiento del sistema. De esta manera, el proceso de fitorremediación puede continuar y la extracción de nutrientes no se interrumpe significativamente a lo largo del año (Brito, Lillebo , & Teixeira, 2026).

3.2.14.3. Accesibilidad y logística para el mantenimiento en comunidades rurales

Como es una tecnología sustentada en la naturaleza, la creación de lagunas con Pontederia crassipes en áreas rurales es muy viable, ya que no necesita maquinaria complicada ni piezas de repuesto de difícil adquisición. Su mantenimiento es fácil y puede llevarse a cabo por la misma comunidad usando herramientas elementales para el retiro manual de la biomasa sobrante, que se puede usar localmente como compost o fertilizante orgánico después de ser tratada. Esta autonomía operativa hace que no sea necesaria la intervención especializada, lo cual transforma el manejo de las aguas residuales en un proceso sostenible, acorde con las habilidades organizativas comunitarias de los territorios altoandinos (Huamani Leon, Huayta Astopillo, & Ortega Veliz, 2021).

3.3. Definición de términos

3.3.1. Aguas residuales domésticas

Son las aguas que surgen del empleo doméstico en casas, producidas por acciones como el aseo personal, la preparación de comida, etc., que tienen elementos contaminantes, microorganismos, sólidos en suspensión y materia orgánica (Osorio Rivera, Carrillo Barahona, Negrete Costales, Loor Lalvay, & Riera Guachichullca, 2021).

3.3.2. Sistema de tratamiento de aguas residuales

Conjunto de procedimientos biológicos, químicos y físicos que tienen como objetivo disminuir la contaminación en las aguas residuales para salvaguardar el medio ambiente y la salud pública antes de su eliminación definitiva, mediante la reducción de la carga contaminante, garantizando un efluente con mejores condiciones para su disposición final (Ferrovial, 2025).

3.3.3. Planta de tratamiento de aguas residuales

Infraestructura diseñada para aplicar uno o varios procesos de tratamiento a las aguas residuales, con el propósito de reducir la presencia de contaminantes y disminuir su impacto ambiental. Asimismo, permite mejorar la calidad del efluente tratado y cumplir con los límites establecidos por la normativa vigente antes de su disposición final (Matsena & Nkhalambayausi Chirwa, 2022).

3.3.4. Tanque séptico

Unidad de tratamiento primario de aguas residuales domésticas que funciona mediante sedimentación y digestión anaerobia, permitiendo la separación de sólidos y la reducción parcial de la materia orgánica (RNE, 2016).

3.3.5. Laguna de oxidación o estabilización

Sistema de tratamiento natural que utiliza procesos biológicos y físicos para la depuración de aguas residuales, mediante la acción conjunta de microorganismos, radiación solar y tiempo de retención hidráulica (RNE, 2016).

3.3.6. Fitodepuración

Método de depuración de aguas residuales que utiliza vegetación acuática para eliminar contaminantes mediante procesos como la absorción de nutrientes, la retención de sólidos y la actividad microbiana vinculada a sus raíces (NEOMA, 2026).

3.3.7. Macrófitas

Las macrófitas son plantas acuáticas que se pueden ver a simple vista y residen de manera temporal o permanente en ecosistemas de agua dulce o salada, desempeñando un papel esencial en la filtración del agua, además de habitar en zonas altoandinas como ríos, lagos, lagunas y bofedales sobre los 3000 metros sobre el nivel del mar.

3.3.8. Pontederia crassipes

Macrófita acuática flotante de rápido crecimiento, utilizada en sistemas de tratamiento natural por su capacidad para remover materia orgánica, nutrientes y otros contaminantes del agua residual.

3.3.9. Tiempo de retención hidráulica (TRH)

Periodo promedio durante el cual el agua residual permanece dentro de un sistema de tratamiento, influyendo directamente en la eficiencia de remoción de contaminantes. Este tiempo permite que se desarrollen los procesos necesarios para reducir la carga contaminante del agua residual.

3.3.10. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5)

Cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para descomponer la materia orgánica biodegradable presente en el agua durante un periodo de cinco días.

3.3.11. Demanda química de oxígeno (DQO)

Cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente la materia orgánica e inorgánica presente en el agua residual.

3.3.12. Sólidos suspendidos totales (SST)

Material particulado presente en el agua que no se disuelve y puede ser retenido mediante procesos físicos de sedimentación o filtración.

3.3.13. Coliformes termotolerantes

Grupo de bacterias indicadoras de contaminación fecal utilizadas para evaluar el riesgo sanitario del efluente tratado.

3.3.14. Eficiencia de sistema de tratamiento

Capacidad de un sistema para reducir la concentración de contaminantes presentes en el agua residual, expresada generalmente como porcentaje de remoción.

3.3.15. Costo de inversión (CAPEX)

Gastos asociados a la construcción, implementación e instalación de un sistema de tratamiento de aguas residuales.

3.3.16. Costo de operación y mantenimiento (OPEX)

Costos recurrentes necesarios para el funcionamiento, conservación y mantenimiento de un sistema de tratamiento a lo largo del tiempo.

3.3.17. Límites máximos permisibles (LMP)

Valores máximos de concentración de contaminantes establecidos por la normativa ambiental para el vertimiento de aguas residuales tratadas.

3.3.18. Estándares de calidad ambiental (ECA)

Indicadores que determinan los niveles máximos de elementos o sustancias permitidos en el aire, agua o tierra (cuerpo receptor). Su cumplimiento busca la protección de la salud pública y la estabilidad del ecosistema sin crear peligros considerables.

3.3.19. Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE)

Reglamento técnico requerido para la construcción en Perú, que determina condiciones de diseño y seguridad en edificios.

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, debido a que emplea datos medibles y expresados numéricamente para evaluar las condiciones y resultados de los sistemas de tratamiento de aguas residuales (Creswell & Creswell, 2023). Es de tipo aplicada, porque aborda una problemática concreta de saneamiento rural y orienta los resultados obtenidos hacia el sustento de una propuesta de mejora para el tratamiento de aguas residuales en el sector Pancarhuaylla.

El nivel de investigación es descriptivo-explicativo, debido a que, en una primera etapa, se caracterizan las condiciones técnicas, operativas, geotécnicas y económicas de los sistemas de tratamiento evaluados; posteriormente, se analizan y explican las diferencias identificadas entre los tanques sépticos existentes y la alternativa proyectada de laguna de oxidación con Pontederia crassipes, considerando los criterios e indicadores establecidos para el estudio (Vidal Guerrero, 2022).

El diseño de la investigación es no experimental, de corte transversal y comparativo, ya que las variables no se manipularon; más bien, se observó su contexto natural. Para evaluar el desempeño real de la PTAR, se llevó a cabo la recolección de datos válidos en un único período, tomando en cuenta únicamente las condiciones del sistema después de finalizar la ejecución de la PTAR. Aunque se llevó a cabo un primer muestreo en la fase de

ejecución, no fue tomado en cuenta para el análisis final porque no reflejó condiciones operativas estables. El análisis comparativo se llevó a cabo entre el sistema de tanques sépticos que ya existe y un área de oxidación con Pontederia crassipes, la cual fue sugerida como unidad de tratamiento. Se evaluaron ambos sistemas a través de inspecciones en campo y muestreo en los puntos de efluente y afluente.

4.2. Ámbito temporal y espacial

4.2.1. Temporal

La investigación se realizó entre los meses de abril a diciembre del 2025

4.2.2. Espacial

En términos geográficos, la planta de tratamiento analizada y el sistema sugerido se encuentran en la zona de Pancarhuaylla, dentro de los límites territoriales de Anta, que pertenece a la provincia y al departamento del Cusco.

La planta de tratamiento con tanques sépticos del centro poblado de Pancarhuaylla tiene las siguientes coordenadas:

Tabla 2

Coordenadas UTM de la Planta de tratamiento de aguas servidas del sector de Pancarhuaylla

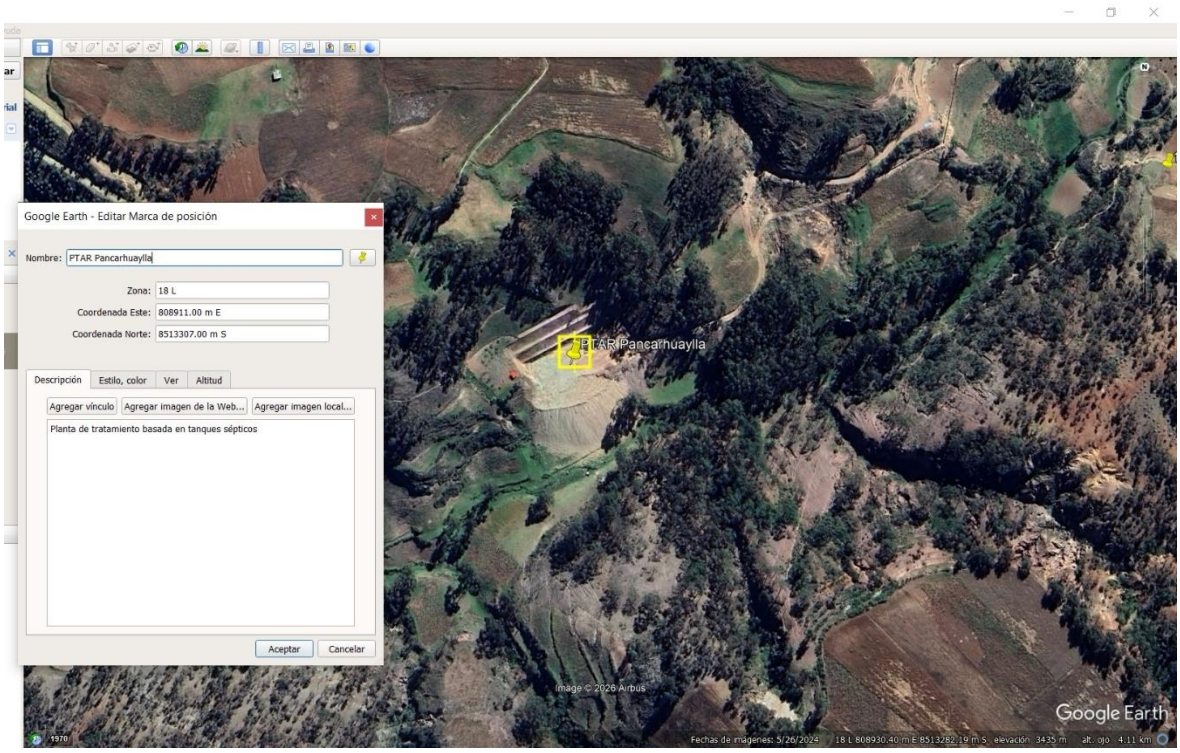
UTM	18 L
Coordenada Este	808911.00 m E
Coordenada Norte	8513307.00 m S
Altitud	3445 m.s.n.m.

Nota. La Tabla 2 presenta las coordenadas UTM y la altitud de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas del sector Pancarhuaylla, información que permite la localización precisa del área de estudio dentro del sistema de referencia geodésico UTM. Estos datos constituyen un

insumo fundamental para el análisis topográfico, hidráulico y geotécnico, así como para la delimitación del área de influencia del proyecto y la interpretación de las condiciones altimétricas del sistema de tratamiento evaluado.

Figura 5

Ubicación de la PTAR del sector de Pancarhuaylla



Nota. Imagen capturada de Google Earth por el autor

Tabla 3

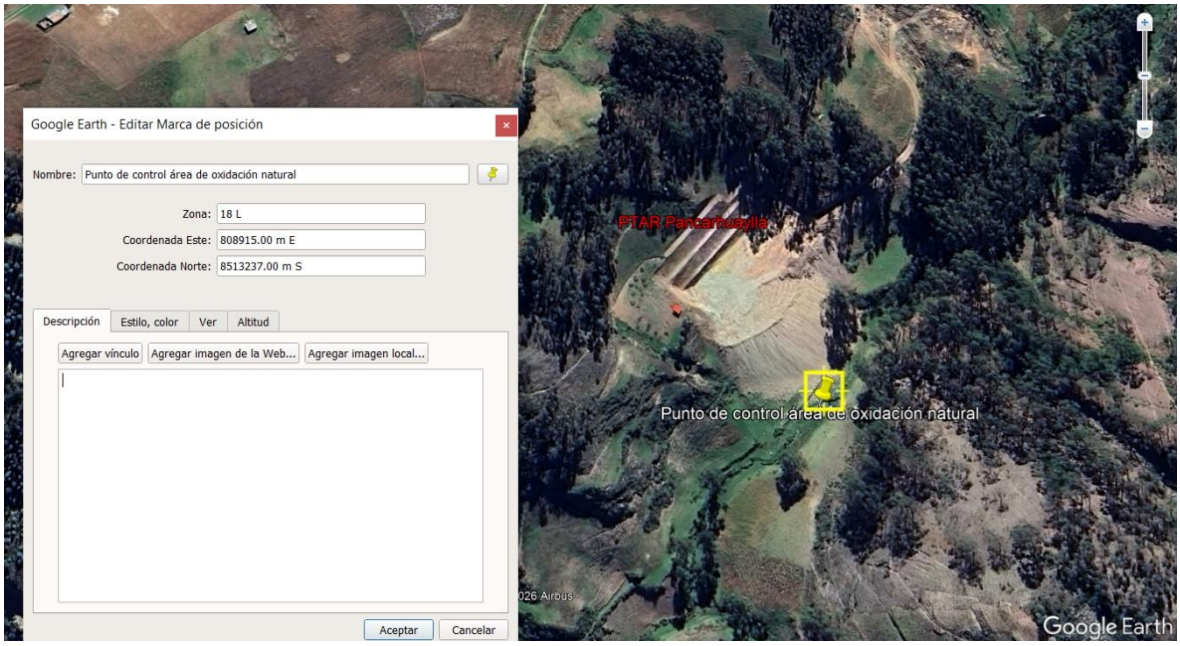
Coordenadas UTM de la Laguna de oxidación proyectada (Área de oxidación)

UTM	18 L
Coordenada Este	808915.00 m E
Coordenada Norte	8513237.00 m S
Altitud	3434 m.s.n.m.

Nota: La Tabla 3 presenta las coordenadas UTM y la altitud del área proyectada para la laguna de oxidación, correspondiente a la zona de tratamiento natural identificada en el sector Pancarhuaylla. Esta información permite ubicar espacialmente el área de oxidación propuesta y constituye un insumo básico para el análisis topográfico, hidráulico y de diseño del sistema de tratamiento, considerando las condiciones altimétricas y la relación con la infraestructura existente.

Figura 6

Ubicación de la Laguna de oxidación proyectada



Nota. Imagen capturada de Google Earth por el autor

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

Está constituida por el total de aguas residuales domésticas generadas y conducidas por el sistema de alcantarillado del sector Pancarhuaylla hacia el sistema de tratamiento existente, correspondiente al caudal de diseño de 34.69 m^3/día.

4.3.2. Muestra

La muestra es no probabilística por conveniencia, debido a que los puntos de muestreo fueron seleccionados considerando su accesibilidad y su correspondencia con las unidades de tratamiento objeto de estudio.

Está constituida por las muestras de aguas residuales obtenidas en dos puntos de control: 1) la salida del tanque séptico existente, por ser el punto accesible que representa el sistema de tratamiento actual; y 2) el punto de control ubicado en el área natural de

fitodepuración con presencia de Pontederia crassipes, seleccionado por corresponder al sistema natural considerado como referencia para la evaluación de la alternativa proyectada.

4.4. Instrumentos

4.4.1. Protocolos de muestreo basados en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM

Para definir los métodos de recolección de muestras de aguas residuales domésticas, se aplican los criterios técnicos establecidos en dicho decreto. El instrumento garantiza que el muestreo respete las normas legales para medir parámetros como DBO_5, DQO, SST, aceites y grasas y coliformes termotolerantes. De esta manera se asegura que los resultados sean comparables con los límites máximos permisibles en vigor.

4.4.2. Estudio de Mecánica de suelos con fines de cimentación y estabilidad

Para determinar las propiedades físicas del suelo, se utilizan instrumentos estandarizados como la cuchara de Casagrande, el horno eléctrico, la balanza electrónica y el vidrio esmerilado para los límites de consistencia. Se emplean tamices ASTM, un agitador mecánico, el equipo DPL y el dispositivo de corte directo para realizar la evaluación mecánica; luego, con GEO5 se procesan los datos obtenidos para determinar la capacidad portante y el factor de seguridad de los taludes.

4.4.3. Formato de protocolo de monitoreo y cadena de custodia

Este dispositivo documenta las condiciones in situ al momento de tomar muestras de aguas residuales, además de la hora y el sitio donde se realiza la recolección, garantizando su integridad y trazabilidad hasta el laboratorio.

4.4.4. Software de diseño asistido y modelamiento técnico

Para el diseño de la infraestructura sanitaria y la elaboración de los planos detallados, se emplean instrumentos digitales de ingeniería (Autocad). Este instrumento posibilita la

determinación de los niveles de excavación, las dimensiones geométricas y los aspectos estructurales específicos de las lagunas de oxidación proyectadas y de los tanques sépticos. Su implementación garantiza que la representación gráfica de las obras civiles sea exacta y que se ajuste a los requisitos técnicos indispensables para la construcción y evaluación del sistema de tratamiento.

4.4.5. Planilla de metrados y presupuestos (CAPEX - OPEX)

Este instrumento técnico es empleado para calcular en detalle las unidades de obra y para establecer los costos directos e indirectos de cada sistema de tratamiento. Esta planilla permite consolidar los metrados de las estructuras civiles para estimar el CAPEX (inversión inicial) y también los costos operativos y de mantenimiento, conocido como OPEX. Su empleo posibilita llevar a cabo un análisis comparativo de la relación costo-efectividad entre el sistema de tanques sépticos y la laguna de oxidación, lo cual justifica la viabilidad económica del proyecto con base en normas de ingeniería de costos. (Mark, 2024)

4.5. Procedimientos

Esta investigación se lleva a cabo utilizando el método científico aplicado, con un diseño no experimental - descriptivo comparativo y una perspectiva cuantitativa para comprobar la eficacia del sistema sugerido. Esta metodología posibilita convertir las observaciones de campo en datos técnicos exactos, garantizando que el análisis de la gestión del tratamiento de aguas residuales en el área de Pancarhuaylla sea normativamente robusto y técnicamente replicable.

Para comparar el rendimiento del tanque séptico con la laguna de oxidación y Pontederia crassipes, el estudio emplea un método comparativo en términos de estabilidad geotécnica, eficiencia hídrica y sostenibilidad financiera. Los resultados de laboratorio se procesan utilizando técnicas de modelado y análisis de ingeniería, con el fin de asegurar que

el diseño satisfaga adecuadamente los retos geográficos del área altoandina y para sustentar la viabilidad de la infraestructura planeada.

4.5.1. Procedimientos para la evaluación de la calidad del agua

Se revisaron, en primer lugar, las regulaciones vigentes relacionadas con el saneamiento rural, especialmente la Norma OS.090 del RNE y el D.S. N° 003-2010-MINAM, con el objetivo de definir los criterios ambientales y técnicos para determinar cuán eficiente es el sistema de tratamiento. Después, se llevaron a cabo visitas técnicas en la zona de Pancarhuaylla, ubicada en el distrito de Anta, con la finalidad de determinar los elementos del sistema de tratamiento existente y las condiciones del área donde hay macrófitas de manera natural. A lo largo de estas visitas, se comprobaron las condiciones hidráulicas, estructurales y operativas del sistema de tanques sépticos y del área de oxidación natural. Esto posibilitó determinar los puntos cruciales para realizar la evaluación y el muestreo.

Figura 7

Punto de control/toma de muestra efluente PTAR Pancarhuaylla



Nota. Imagen capturada de Google Earth por el autor

Figura 8

Punto de control/toma de muestra del área de oxidación natural



Nota. Imagen capturada de Google Earth por el autor

4.5.1.1. Toma de muestras de aguas residuales

La toma de muestras de aguas residuales se realizó mediante campañas de muestreo simple, considerando dos puntos de control: el efluente a la salida del sistema de tanques sépticos y el punto ubicado en el área de tratamiento natural con presencia de Pontederia crassipes. Las muestras fueron recolectadas en recipientes herméticos, siguiendo los protocolos establecidos en el D.S. N.° 003-2010-MINAM, garantizando la representatividad de los parámetros físico-químicos y microbiológicos evaluados.

Las muestras fueron trasladadas a un laboratorio especializado para su análisis, permitiendo obtener resultados comparables con los Límites Máximos Permisibles vigentes. El procedimiento fue documentado mediante registro fotográfico, el cual evidencia los puntos de muestreo y los recipientes utilizados durante la recolección de las muestras, información que se presenta en los anexos correspondientes.

Además, se empleó un formato de cadena de custodia para asegurar la trazabilidad y la integridad de las muestras desde su recolección hasta que llegan al laboratorio de análisis. Este formato se encuentra en los anexos del presente estudio.

4.5.1.2. Análisis de laboratorio de la calidad del efluente

Se pudo analizar indicadores como DBO_5, DQO, sólidos suspendidos totales, aceites y grasas, y coliformes termotolerantes gracias a los estudios microbiológicos y fisicoquímicos. Los datos obtenidos se emplearon para calcular el porcentaje de eliminación de contaminantes y comparar cuán eficaz es el sistema de tanques sépticos en comparación con la opción alternativa de tratamiento por medio de una laguna de oxidación con Pontederia crassipes, según los límites que establece la normativa ambiental vigente.

4.5.2. Procedimientos para el análisis geotécnico y estructural

El análisis estructural y geotécnico se llevó a cabo para determinar la estabilidad del terreno y la compatibilidad de las infraestructuras sanitarias existentes con el tratamiento natural propuesto, tomando en cuenta las condiciones geográficas y geotécnicas específicas de la zona de Pancarhuaylla.

Se empleó el estudio de mecánica de suelos que pertenece al expediente técnico de la PTAR existente como punto de partida, y se lo tuvo en cuenta como una fuente secundaria importante para entender las propiedades generales del terreno, entre ellas su clasificación, capacidad portante y comportamiento mecánico. Sin hacer cambios ni reestructuraciones, este estudio se utilizó como referencia técnica.

Para completar la información disponible y garantizar que las condiciones reales del terreno estén bien representadas, se llevaron a cabo más pruebas geotécnicas en el área de la PTAR existente y en el área natural donde se construirá la laguna de oxidación. Estos ensayos posibilitaron la comprobación de la uniformidad del terreno, el reconocimiento de cambios

potenciales en sus características físicas y la evaluación de su aptitud para sistemas de tratamiento con distintos requerimientos estructurales.

Los ensayos efectuados contemplaron la clasificación del suelo y la evaluación de parámetros mecánicos fundamentales, cuyos resultados fueron analizados con ayuda de programas informáticos especializados en ingeniería geotécnica. Esto posibilitó calcular los factores de seguridad y la capacidad portante correspondientes a cada zona examinada. Esta información fue utilizada para comparar el nivel de exigencia estructural requerido por los tanques sépticos, que demandan estructuras rígidas y confinadas, frente a las lagunas de oxidación, que presentan mayor adaptabilidad a las condiciones naturales del terreno.

Finalmente, los resultados del análisis geotécnico y estructural fueron empleados como criterio técnico complementario dentro de la evaluación comparativa de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, priorizando la estabilidad, seguridad y sostenibilidad de la infraestructura sanitaria en zonas rurales altoandinas. El detalle del estudio de mecánica de suelos, los ensayos realizados y los resultados obtenidos se presentan en los anexos de la presente investigación.

4.5.3. Procedimientos para el diseño de ingeniería y análisis económico

El análisis ingenieril y la evaluación económica de los sistemas para el tratamiento de aguas residuales se llevaron a cabo con un enfoque comparativo, tomando en cuenta el sistema actual de tanques sépticos y la opción alternativa de tratamiento a través de lagunas de oxidación con fitodepuración, sin que esto signifique crear un diseño ingenieril final.

En primer lugar, para el sistema existente, se recopiló y revisó la información técnica contenida en el expediente técnico de la PTAR del sector Pancarhuaylla, incluyendo planos, metrados, análisis de costos unitarios y presupuesto general. Esta información permitió

identificar los componentes principales del sistema, su nivel de complejidad constructiva y los costos asociados a su implementación y operación.

Para la opción de laguna de oxidación con Pontederia crassipes, el análisis se llevó a cabo utilizando criterios técnicos de referencia definidos en la normativa nacional actual, sobre todo la Norma OS.090 del Reglamento Nacional de Edificaciones, y también utilizando literatura técnica especializada en sistemas naturales de tratamiento. Se realizó una estimación técnica de los elementos requeridos para su funcionamiento, en lugar de un diseño constructivo detallado; esto se hizo únicamente para posibilitar la comparación técnica y económica entre las dos opciones.

Utilizando análisis de precios de referencia de proyectos de saneamiento rural y análisis de costos unitarios disponibles, el estudio económico fue realizado a través del desarrollo de planillas comparativas con presupuestos y metrados. Los costos de operación y mantenimiento por año (OPEX) y los costos de inversión inicial (CAPEX) se calcularon para cada sistema basándose en esta información, teniendo en cuenta elementos como la frecuencia con la que se debe mantener, el personal requerido, las necesidades energéticas y la reposición de partes.

Por último, los resultados económicos se combinaron con los criterios técnicos y operativos analizados en el estudio, lo que permitió cotejar la relación entre coste y eficiencia entre la laguna de oxidación y el sistema de tanques sépticos. Esta comparación es un elemento clave para establecer la viabilidad técnica y económica de sistemas naturales de tratamiento en áreas rurales altoandinas, como lo es el sector Pancarhuaylla. Los anexos de la tesis contienen cuadros con presupuestos, metrados y un análisis económico exhaustivo.

4.6. Análisis de datos

La estadística descriptiva se utilizó para examinar los datos, lo que posibilitó la organización, síntesis e interpretación de las conclusiones logradas a partir de los análisis económicos, estructurales, microbiológicos y físico-químicos. Esta herramienta, a través de tablas y cuadros comparativos, posibilitó la comparación entre los valores medidos en el efluente del sistema de tanques sépticos y del sistema de laguna de oxidación con Pontederia crassipes.

Se compararon los hallazgos de calidad del efluente con los Límites Máximos Permisibles que se encuentran en el D.S. Nº 003-2010-MINAM, lo que favoreció la evaluación del nivel de cumplimiento normativo de cada sistema de tratamiento. Además, se llevó a cabo un análisis comparativo de la información asociada con el mantenimiento y funcionamiento, la estabilidad estructural y los costos de inversión y operación para detectar las diferencias económicas y técnicas entre los dos sistemas.

4.7. Consideraciones éticas

La presente investigación se llevó a cabo siguiendo los principios éticos que rigen a las investigaciones técnicas y ambientales, empleando la información recopilada únicamente con propósitos académicos. Se aseguró la veracidad, objetividad e interpretación adecuada de los datos adquiridos en los análisis de laboratorio, estudios técnicos y documentos revisados, además del respeto por la autoría de las fuentes consultadas al citarlas correctamente según las normas académicas actuales.

V. Resultados y discusión

5.1. Resultados

5.1.1. Resultados de los ensayos para agua residual

5.1.1.1. Ensayos de calidad del efluente tratado - PTAR Pancarhuaylla

De acuerdo con las normas en vigor, se adquirieron los datos de la calidad del efluente de la PTAR de Pancarhuaylla mediante el análisis físico-químico y microbiológico de muestras simples de aguas residuales domésticas, que fueron recolectadas en el lugar donde los tanques sépticos descargan. Microlab, un laboratorio acreditado, fue el encargado de realizar los análisis, lo cual ayuda a asegurar la fiabilidad y trazabilidad de los resultados que se lograron. Se analizaron los coliformes termotolerantes, el pH, los aceites y grasas, la SST, la DQO y la DBO_5. Estos se consideran indicadores de las propiedades microbiológicas y físico-químicas del efluente.

Los resultados adquiridos se compararon después con los LMP fijados por el Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM para los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales o domésticas que se vierten a cuerpos acuáticos. Esta comparación posibilitó la identificación de las condiciones de calidad del efluente tratado en la PTAR de Pancarhuaylla y la determinación del cumplimiento de cada parámetro con relación a los valores fijados por la normativa vigente. Además, los resultados sirvieron como fundamento

objetivo para evaluar las condiciones actuales del sistema de tratamiento y para analizarlo más adelante en el estudio.

Tabla 4

Análisis físico-químico de aguas residuales - PTAR Pancarhuaylla

EXAMEN FISICOQUIMICO	UNIDAD	RESULTADOS	LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS DS. 003 MINAM
Aceites y grasas	mg/L	9	20
Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO5	mg/L	35.4	100
Demanda Química de Oxígeno DQO	mg/L	91.2	200
pH		8.1	6.5-8.5
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	120	150

Nota. Los resultados de la evaluación físico-química del efluente que se trató en la PTAR de Pancarhuaylla, contrastados con los LMP del D.S. N.° 003-2010-MINAM, se muestran en la Tabla 4. A pesar de que cumplen con la normativa, indicadores como la DBO_5 y los SST están cerca de los límites, lo cual demuestra una eficacia limitada en el tratamiento.

Tabla 5

Análisis microbiológico de aguas residuales - PTAR Pancarhuaylla

ANÁLISIS	RESULTADOS	
EXAMEN BACTEREOLÓGICO	RESULTADO	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES
Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	22 x 10^4 NMP/100 mL	Hasta 10 000 NMP/100 mL

Nota. Una concentración de coliformes termotolerantes de 22 x 10^4 NMP/100 mL se observó en el análisis microbiológico, lo cual es superior al LMP de 10 000 NMP/100 mL y señala una eliminación microbiana inadecuada del sistema de tratamiento.

5.1.1.2. Ensayos de calidad del efluente tratado - Área de oxidación natural

Se lograron los resultados de la calidad del efluente en el área de oxidación natural a través de análisis microbiológicos y fisicoquímicos realizados a muestras simples de aguas residuales que contenían macrófitas Pontederia crassipes.

El laboratorio Microlab llevó a cabo un análisis de DQO, SST, DBO_5, coliformes termotolerantes, pH y aceites y grasas para evaluar la eficacia del sistema mediante la comparación de los resultados obtenidos con los LMP del D.S. N.º 003-2010-MINAM.

Tabla 6

Análisis físico-químico de aguas residuales - Área de oxidación natural

EXAMEN FISICOQUIMICO	UNIDAD	RESULTADOS	LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS DS. 003 MINAM
Aceites y grasas	mg/L	5	20
Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO5	mg/L	5.6	100
Demanda Química de Oxígeno DQO	mg/L	13.8	200
pH		8.1	6.5-8.5
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	70	150

Nota. El análisis físico-químico demuestra que todos los parámetros analizados (aceites y grasas, DBO_5, DQO, pH y SST) están dentro de los límites máximos permitidos por el D.S. N.º 003-2010-MINAM, lo que muestra un nivel apropiado de tratamiento del efluente en el sector de oxidación natural.

Tabla 7

Análisis microbiológico de aguas residuales - Área de oxidación natural

ANÁLISIS	RESULTADOS	
EXAMEN BACTEREOLÓGICO	RESULTADO	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES
Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	2 x 10^2 NMP/100 mL	Hasta 10 000 NMP/100 mL

Nota. La Tabla 7 presenta los resultados del análisis microbiológico del agua residual en el área de oxidación natural, comparados con los Límites Máximos Permisibles establecidos en la normativa ambiental vigente. Se observa una reducción significativa de la concentración de coliformes termotolerantes respecto al sistema de tratamiento existente, manteniéndose el efluente dentro de los límites permisibles.

Se muestran a continuación los resultados logrados en los dos sistemas de tratamiento, con el fin de cotejar su rendimiento respecto al acatamiento de los Límites Máximos Permisibles (LMP) fijados en el D.S. N.° 003-2010-MINAM para verter desechos

en cuerpos de agua. Además, en línea con el D.S. N.º 002-2008-MINAM, Categoría III (riego de plantas y consumo de animales), se incluye la evaluación del cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el agua.

A pesar de que el objetivo principal de la investigación es comprobar si se está cumpliendo con las regulaciones relacionadas con el vertido de aguas residuales tratadas, el cotejo con los ECA posibilita extender el análisis a las oportunidades para reutilizar el efluente; sin embargo, es relevante aclarar que los ECA no son la esencia del estudio, sino una perspectiva adicional que ofrece un criterio extra de evaluación. En este marco, se evalúa la idoneidad del efluente para ser utilizado en tareas como el riego agrícola, favoreciendo una administración más sostenible del agua y el uso de aguas tratadas en áreas rurales, sin apartarse del objetivo primordial de cumplir con los LMP.

Tabla 8

Comparación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del efluente tratado en el sector Pancarhuaylla

Análisis	Unidad	PTAR Pancarhuaylla	Área de oxidación natural	LMP - D.S. 003-2010-MINAM	* ECA - D.S. 002-2008-MINAM
EXAMEN FISICOQUIMICO					
Aceites y grasas	mg/L	9	5	20	1
Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO5	mg/L	35.4	5.6	100	< = 15
Demanda Química de Oxígeno DQO	mg/L	91.2	13.8	200	40
pH	Unidades de pH	8.1	8.1	6.5-8.5	6.5-8.4
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	120	70	150	-
EXAMEN BACTEREOLÓGICO					
Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	NMP/100 mL	22 x 10^4 NMP/100 mL	2 x 10^2 NMP/100 mL	Hasta 10 000 NMP/100 mL	** 2 000(3)

* En la evaluación con los ECA, solo se toman en cuenta los parámetros examinados en los ensayos de calidad del agua. Además, se ha utilizado la Categoría III, que corresponde al riego de vegetales de tallo alto y que tiene que ver con aguas residuales tratadas.

** (3): El límite permitido es de 2000 NMP/100 mL, siempre y cuando se empleen técnicas de riego que no humedezcan la parte comestible del vegetal (por ejem., el riego por surcos o goteo).

Nota. Los hallazgos indican que los dos sistemas satisfacen los LMP del D.S. N.º 003-2010-MINAM en lo que respecta a los parámetros físico-químicos; no obstante, la zona de oxidación natural muestra cifras más favorables, con concentraciones más bajas de DBO_5, DQO, aceites y grasas y SST. En el aspecto microbiológicos, la PTAR de Pancarhuaylla excede considerablemente el límite permitido de coliformes termotolerantes. En cambio, el sistema natural satisface tanto los LMP como los ECA, lo que demuestra un potencial superior para su reúso en riego agrícola bajo condiciones controladas y una eficacia más alta del tratamiento.

5.1.2. Resultados de los ensayos de estabilidad estructural y geotécnica

5.1.2.1. Ensayos de estabilidad estructural y geotécnica para la zona de la PTAR Pancarhuaylla

Se muestran los hallazgos de los ensayos geotécnicos realizados en la calicata C-1 de la PTAR Pancarhuaylla, que abarcan el contenido de humedad, la resistencia al corte, el perfil estratigráfico, la granulometría, los límites de Atterberg y el peso específico.

Estos datos posibilitan el análisis de la idoneidad y la viabilidad de los procesos de infiltración, así como la evaluación del comportamiento del suelo, lo que constituye un fundamento para examinar opciones de tratamiento.

a. Perfil estratigráfico

Tabla 9

Perfil estratigráfico C-1 (Tanque séptico)

DESCRIPCIÓN	PROF. MUESTRA	SÍMBOLO	CLASIFICACIÓN	
			SUCS	AASTHO
Calicata N° 01 (TANQUE SÉPTICO)	0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80 0.90 1.00 1.10 1.20 1.30 1.40 1.50		SUELO DE PLASTICIDAD MEDIA ARENOSA (CL)	A-2-6

Nota. La Tabla 9 muestra el perfil estratigráfico de la calicata C-1, que se encuentra en el área del tanque séptico. La tabla describe las características del suelo según la profundidad analizada. La categorización del material de acuerdo con los sistemas AASHTO y SUCS está incluida.

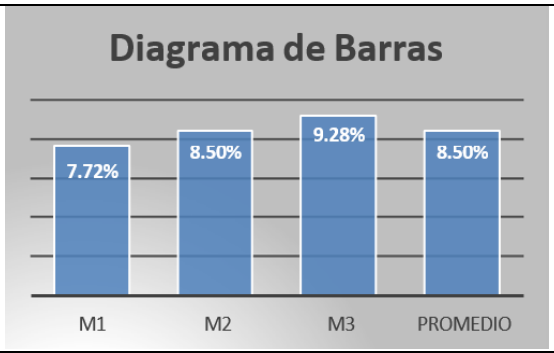
b. Contenido de humedad

Tabla 10

Contenido de humedad C-1 (Tanque séptico)

CONTENIDO DE HUMEDAD	
MUESTRA	**%W**
M1	7.72%
M2	8.50%
M3	9.28%
Media Aritmética	**8.50%**
Desviación estándar	0.0063563
Límite superior	11.700%
Límite inferior	11.660%

C1



Nota. Los resultados de la humedad natural del suelo en la calicata C-1, que comprenden tanto los valores individuales como el promedio aritmético, se muestran en la Tabla 10. Estos datos fueron empleados para caracterizar geotécnicamente la zona del tanque séptico.

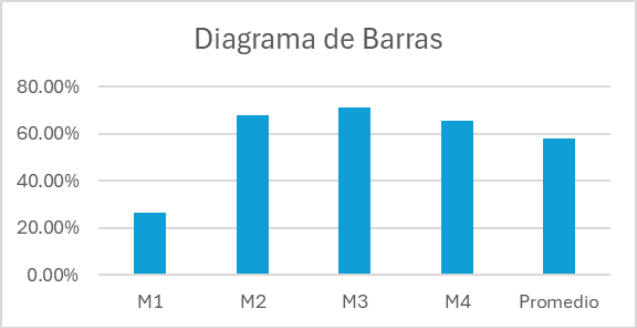
c. Límite líquido

Tabla 11

Límite líquido C-1 (Tanque séptico)

LÍMITE LÍQUIDO	C1

MUESTRA	%W
M1	26.58%
M2	67.70%
M3	71.32%
M4	65.24%
Media Aritmética	**57.71%**
Desviación estándar	18.102414
Límite superior	83.580%
Límite inferior	30.703%



Nota. Los resultados del ensayo de límite líquido de la calicata C-1 presentan un valor medio de ***57.71 %****, indicando una plasticidad alta, característica de suelos finos cohesivos. La variabilidad entre muestras evidencia cierta heterogeneidad, aspecto que debe considerarse al evaluar el comportamiento del suelo en la zona del tanque séptico.*

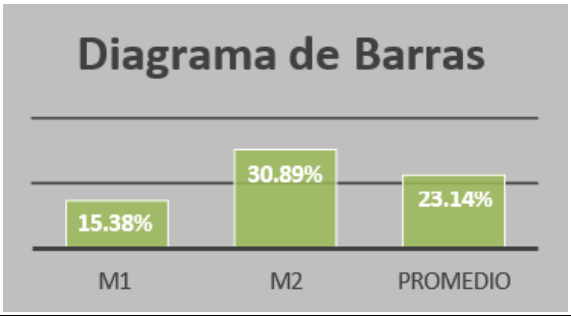
d. Límite plástico

Tabla 12

Límite plástico C-1 (Tanque séptico)

LÍMITE PLÁSTICO	C1

MUESTRA	%W
M1	15.38%
M2	30.89%
Media Aritmética	**23.14%**
Desviación estándar	7.7527185
Límite superior	63.090%
Límite inferior	10.710%



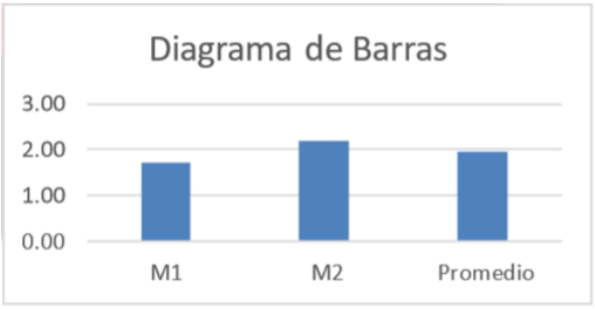
Nota. La muestra C1 tiene un límite de plasticidad promedio de 23.14%, con resultados individuales del 15.38% y el 30.89%. El hecho de que la desviación estándar sea del 7.75% señala una variabilidad entre las muestras, si bien los valores se mantienen dentro de un rango amplio delimitado por límites de 10.71 % y 63.09 %, lo que define un suelo con plasticidad moderada.

e. Peso específico

Tabla 13

Peso específico C-1 (Tanque séptico)

PESO ESPECÍFICO	C1
MUESTRA	**P.E**
M1	1.71
M2	2.19
Media Aritmética	**1.95**
Desviación estándar	0.2385338
Límite superior	1.8957
Límite inferior	1.7243



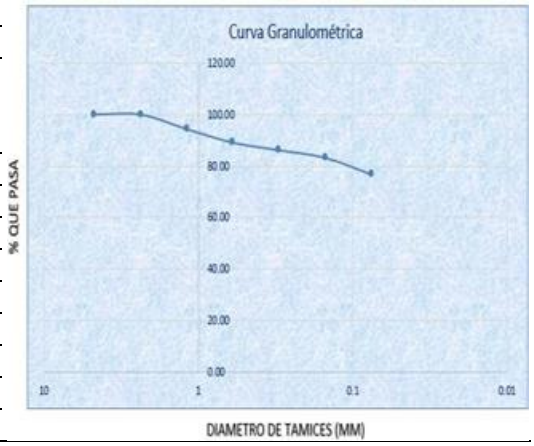
Nota. El ensayo de peso específico del suelo de la calicata C-1 arrojó un promedio de 1.95, lo que indica que el suelo es fino y tiene material arenoso. Una variación moderada entre las muestras señala una cierta homogeneidad del material.

f. Granulometría del material

Tabla 14

Granulometría del material C-1 (Tanque séptico)

GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL			C1
Peso de la muestra seca (gr)			631.12
Peso de la muestra lavada (gr)			88.19
Diferencia (gr)			542.93
N°	**Tamaño Malla ASTM**	**Diámetro (mm)**	**Peso Retenido (gr)**
1	N° 4	4.75	0.00
2	N° 8	2.36	0.00
3	N° 16	1.18	31.00
4	N° 30	0.6	28.01
5	N° 50	0.3	16.12
6	N° 100	0.15	16.25
7	N° 200	0.075	35.45
	Fondo		**415.44**
	Total		**542.27**

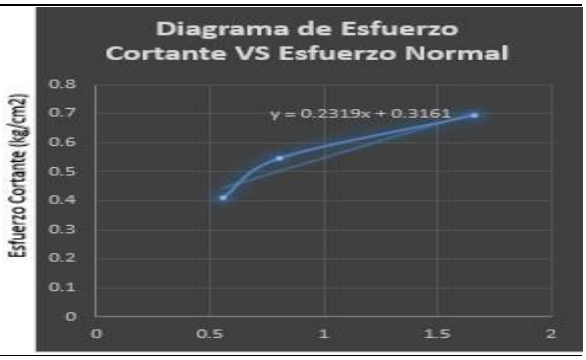


Nota. La muestra C1, según el análisis granulométrico, tiene una mayoría de partículas finas con un alto nivel de retención en la malla N.º 200 y en el fondo; esto sugiere que el terreno tiene baja permeabilidad. Esta situación limita la infiltración del efluente en las zanjas, lo cual reduce la efectividad del sistema de tanque séptico y propicia que el terreno se sature.

g. Corte directo

Tabla 15

Corte directo C-1 (Tanque séptico)

CORTE DIRECTO		C1
DESCRIPCIÓN	**RESULTADO**	
Ángulo de fricción interna (Φ)	22.5703	
Cohesión (C)	0.1109	

Nota. La muestra C1, en su corte directo, tiene un ángulo de fricción interna de 22.57° y una cohesión de 0.11. Esto señala que se trata de un suelo con moderada resistencia y baja cohesión, así como con escasa capacidad para infiltrarse o drenar.

5.1.2.2. Ensayos de estabilidad estructural y geotécnica para la zona del Área de oxidación natural

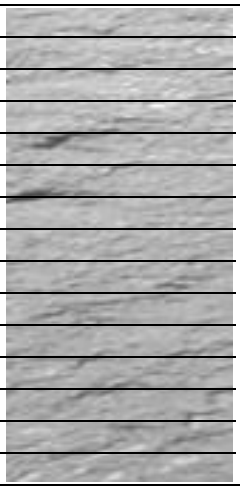
Se muestran los hallazgos de los análisis geotécnicos que se llevaron a cabo en la calicata C-2, que se sitúa en el área de oxidación natural donde se sugiere establecer la laguna. Estos resultados comprenden el perfil estratigráfico, la granulometría, la humedad, los límites de Atterberg, la resistencia al corte y el peso específico del terreno.

Estos datos permiten valorar la estabilidad geotécnica del terreno y su aptitud para el sistema propuesto, considerando las características del suelo, su interacción con la infraestructura y las condiciones de estabilidad de la laguna. Asimismo, constituyen un sustento técnico para determinar la factibilidad del área de oxidación natural y establecer las condiciones necesarias para su adecuada implementación.

a. Perfil estratigráfico

Tabla 16

Perfil estratigráfico C-2 (Área de oxidación)

DESCRIPCIÓN	PROF. MUESTRA	SÍMBOLO	CLASIFICACIÓN	
			SUCS	AASTHO
Calicata N° 02 (ÁREA DE OXIDACIÓN)	0.10		SUELO CON TURBA Y OTROS TIPOS DE ALTO CONTENIDO DE HUMEDAD (PT)	A-7-5
	0.20			
	0.30			
	0.40			
	0.50			
	0.60			
	0.70			
	0.80			
	0.90			
	1.00			
	1.10			
	1.20			
	1.30			
	1.40			
	1.50			

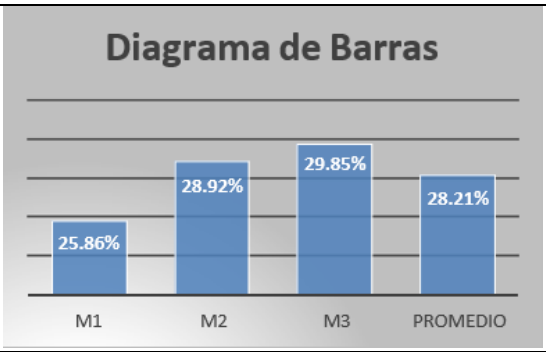
Nota. La tabla 16 muestra la calicata C-2, que está formada por suelos orgánicos (turba) con escasa capacidad portante y una compresibilidad alta. Sin embargo, la implementación de la laguna de oxidación es factible a través de mejoras técnicas, enfocándose en impermeabilizar el fondo y los taludes con arcilla compactada.

b. Contenido de humedad

Tabla 17

Contenido de humedad C-2 (Área de oxidación)

CONTENIDO DE HUMEDAD	C2
MUESTRA	%W
M1	25.86%
M2	28.92%
M3	29.85%
Media Aritmética	**28.21%**
Desviación estándar	0.0170546
Límite superior	11.995%
Límite inferior	11.985%



Nota. El contenido de humedad de la muestra C2 es del 28.21%, con números parecidos en las mediciones, lo que señala un terreno húmedo y relativamente homogéneo. Esta circunstancia es beneficiosa para la estabilidad del suelo en el área de oxidación natural.

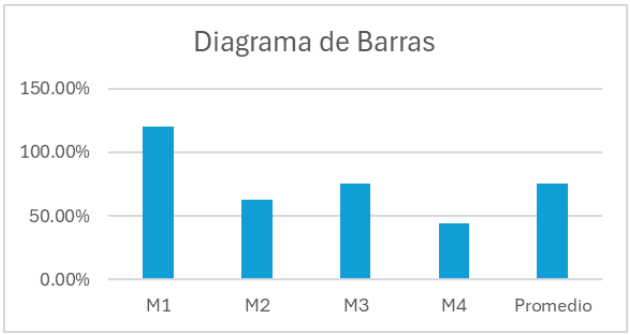
c. Límite líquido

Tabla 18

Límite líquido C-2 (Área de oxidación)

LÍMITE LÍQUIDO	C2

MUESTRA	%W
M1	120.45%
M2	62.75%
M3	75.47%
M4	44.00%
Media Aritmética	**75.67%**
Desviación estándar	28.176838
Límite superior	144.950%
Límite inferior	-14.413%



Nota. Los resultados del ensayo de límite líquido del suelo de la calicata C-2, con un valor medio de 75.67%, revelan una plasticidad y una humedad elevadas, rasgos propios de los suelos orgánicos. La diversidad entre las muestras demuestra que el material es heterogéneo, lo cual afecta su comportamiento mecánico y tiene que tenerse en cuenta al diseñar el sistema propuesto.

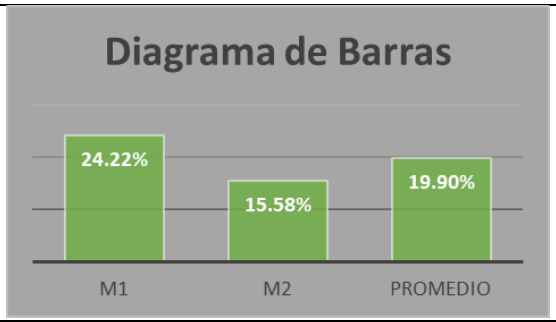
d. Límite plástico

Tabla 19

Límite plástico C-2 (Área de oxidación)

LÍMITE PLÁSTICO	C2

MUESTRA	%W
M1	24.22%
M2	15.58%
Media Aritmética	**19.90%**
Desviación estándar	4.3228565
Límite superior	46.590%
Límite inferior	26.890%



Nota. La muestra C2 tiene un límite plástico promedio del 19.90%, con fluctuaciones de entre el 15.58% y el 24.22%. Una desviación estándar baja señala una plasticidad del suelo que es relativamente homogénea, lo cual indica que es un material con un comportamiento estable ante variaciones de humedad, lo cual es significativo para su evaluación geotécnica en la zona de oxidación natural.

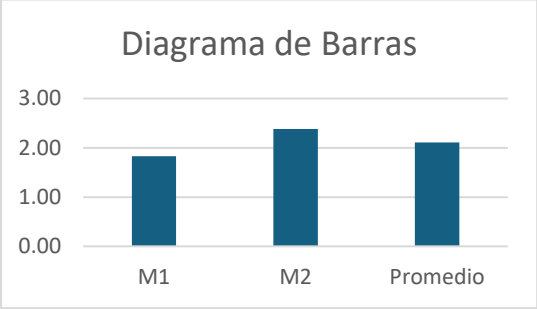
e. Peso específico

Tabla 20

Peso específico C-2 (Área de oxidación)

PESO ESPECÍFICO	C2

MUESTRA	P.E
M1	1.83
M2	2.38
Media Aritmética	**2.11**
Desviación estándar	0.2749481
Límite superior	2.0416
Límite inferior	1.8184



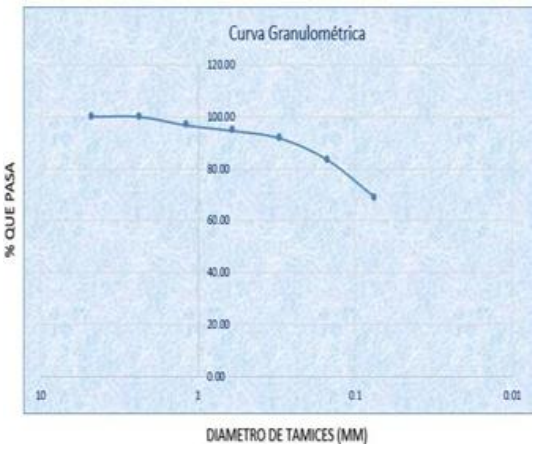
Nota. La Tabla 20 ofrece los valores del peso específico del suelo de la calicata C-2, un parámetro usado en análisis geotécnicos para determinar esfuerzos, la estabilidad de los taludes y la capacidad de carga del terreno en el sector de oxidación.

f. Granulometría del material

Tabla 21

Granulometría del material C-2 (Área de oxidación)

GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL			C2
Peso de la muestra seca (gr)			599.80
Peso de la muestra lavada (gr)			58.50
Diferencia (gr)			541.30
N°	**Tamaño Malla ASTM**	**Diámetro (mm)**	**Peso Retenido (gr)**
1	N° 4	4.75	0.00
2	N° 8	2.36	0.00
3	N° 16	1.18	18.20
4	N° 30	0.6	11.50
5	N° 50	0.3	15.78
6	N° 100	0.15	45.20
7	N° 200	0.075	78.67
	Fondo		**371.89**
	Total		**541.24**



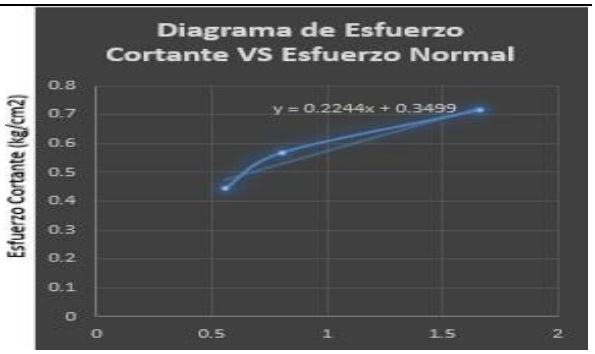
Nota. En la Tabla 21 hay una dominancia de partículas pequeñas, lo que proporciona al suelo baja permeabilidad, lo cual es propicio para establecer la laguna de oxidación si se tienen en cuenta las medidas de estabilización y control de taludes.

g. Corte directo

Tabla 22

Corte directo C-2 (Área de oxidación)

CORTE DIRECTO	C2
DESCRIPCIÓN	**RESULTADO**
Ángulo de fricción interna (Φ)	23.2274
Cohesión (C)	0.1697



Nota. La Tabla 22 presenta los parámetros de resistencia al corte del suelo de la calicata C-2, que fueron empleados para el análisis de estabilidad y el diseño geotécnico de la laguna de oxidación sugerida.

5.1.3. Resultados del análisis de costos de inversión (CAPEX)

La viabilidad financiera de las opciones de tratamiento de aguas residuales presentadas en esta investigación se puede medir a través de análisis de los costos de inversión (CAPEX). Este estudio tiene en cuenta todos los gastos relacionados con la implementación de los sistemas.

Los resultados conseguidos para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Pancarhuaylla y para el sistema de tratamiento por laguna de oxidación con macrófitas se muestran a continuación.

5.1.3.1. Costos de inversión para la PTAR Pancarhuaylla

El costo de inversión de la PTAR Pancarhuaylla fue determinado en base al presupuesto del expediente técnico del proyecto, el cual contempla la construcción de unidades convencionales de tratamiento, incluyendo estructuras de concreto armado, instalaciones hidráulicas y componentes complementarios.

Tabla 23

Costos de inversión - PTAR Pancarhuaylla

DESCRIPCIÓN	COSTO (S/.)
Costo directo de obra	**S/. 4,072,384.39**
Gastos generales	S/. 289,101.06
Gastos de supervisión	S/. 178,423.66
Gastos de monitoreo	S/. 53,814.11
Gastos de liquidación	S/. 33,156.65
Expediente técnico	S/. 62,188.00
Costo total de inversión	S/. **4,698,067.87**

Nota. La Tabla 23 especifica el CAPEX de la PTAR Pancarhuaylla, que asciende a una inversión total de S/. 4,698,067.87. El costo directo de obra es el que tiene más peso, seguido por los gastos generales, la supervisión y la gestión técnica. Este análisis permite determinar la viabilidad financiera del sistema convencional y hacer comparaciones con otras opciones.

5.1.3.2. Costos de inversión para la proyección de la Laguna de oxidación

En el presente estudio, se estimó el costo de inversión del sistema de tratamiento con laguna de oxidación que utiliza macrófitas. Para ello, se realizó un análisis de metrados y presupuesto tomando en cuenta las condiciones típicas de un sistema natural que es sencillo de implementar y económico.

Tabla 24

Costo de inversión - Laguna de oxidación con Pontedería crassipes

Concepto/Componente	Porcentaje/Condición	Monto (S/.)
COSTO DIRECTO	**Base**	**S/ 84,897.26**
GASTOS GENERALES FIJOS	**3.00%**	**S/ 2,546.92**
Elaboración de Expediente Técnico / EIA	Especialista	S/ 1,273.46
Gastos de licitación, contratos y notariales	Trámites	S/ 424.49
Garantías y Seguros (Cartas fianza, SCTR, CAR)	Pólizas	S/ 848.97
GASTOS GENERALES VARIABLES	**7.00%**	**S/ 5,942.81**
Personal Profesional (Residente, Prevencionista, Topógrafo)	Meses de obra	S/ 3,395.89
Personal Administrativo y Auxiliar (Almacenero, Guardián)	Meses de obra	S/ 1,273.46
Oficinas, Almacén, Equipos y Servicios (Agua, Luz, Internet)	Operación	S/ 424.49
Movilidad, Viáticos y Traslado de Equipos Pesados	Logística	S/ 848.97
UTILIDAD	**5.00%**	**S/ 4,244.86**
GASTOS POR SUPERVISIÓN DE OBRA	**6.00%**	**S/ 5,093.84**
EVALUACIÓN DE EXPEDIENTE TÉCNICO	**Monto fijo**	**S/ 2,500.00**
SUBTOTAL GENERAL	**-**	**S/ 105,225.68**
IGV	**18.00%**	**S/ 18,940.62**
PRESUPUESTO TOTAL DEL PROYECTO	**-**	**S/ 124,166.31**

Nota. La Tabla 24 Muestra el costo de inversión de la laguna de oxidación con Pontederia crassipes, que incluye el costo directo y los gastos generales, así como la utilidad y los impuestos asociados.

5.1.4. Resultados del análisis de los costos de operación y mantenimiento (OPEX)

5.1.4.1. Costos de O&M de la PTAR Pancarhuaylla

Se calculó el costo de operación y mantenimiento del sistema de tanque séptico alineando el expediente técnico con la situación real en Pancarhuaylla. Dado que no hay suficientes trabajadores especializados, la JASS tomará el control con ayuda técnica de vez en cuando. El presupuesto abarca tareas fundamentales como el control del efluente y la remoción cíclica de lodos, garantizando la operación óptima del sistema a largo plazo.

Tabla 25

Tarifario de costos fijos de operación y mantenimiento de la PTAR Pancarhuaylla

ÍTEM	DESCRIPCIÓN TIPO DE GASTO	UNIDAD	CANTIDAD	N° DE VECES	PRECIO UNITARIO	COSTO ANUAL
1	**OPERACIÓN**					**$ 2,010.00**
1.1	**Personal**					
1.1.1	Operador (JASS - tiempo parcial)	Mes	1	12	150.00	1,800.00
1.2	**Consumo de agua**					
1.2.1	Consumo de agua (Limpieza ocasional)	Glb	1	1	30.00	30.00
1.3	**Otros gastos**					
1.3.1	Herramientas menores	Glb	1	1	100.00	100.00
1.3.2	Papelería y materiales de escritorio	Glb	1	4	20.00	80.00
2	**MANTENIMIENTO**					**$ 1,350.00**
2.1	**Personal**					
2.1.1	Obrero (Limpieza exterior/interior)	Jornal	2	4	70.00	560.00
2.2	**Insumos**					
2.2.1	Materiales (tub., accesorios, etc)	Glb	1	1	400.00	400.00
2.2.2	Herramientas de intervención	Glb	1	1	190.00	190.00
2.2.3	EPP	Glb	1	1	200.00	200.00
	TOTAL COSTO FIJO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ANUAL					**$ 3,360.00**

Nota. El costo total de operación y mantenimiento al año es de $3,360.00; el gasto más alto se destina a la operación ($2,010.00), en particular por el pago del operador de la JASS, y a mantenimiento ($1,350.00) debido a mano de obra, materiales y equipo de protección

personal (EPP). Estos valores representan el gasto que se necesita para que el sistema funcione.

Tabla 26

Tarifario de costos variables de operación y mantenimiento de la PTAR Pancarhuaylla

ÍTEM	DESCRIPCIÓN TIPO DE GASTO	UNIDAD	CANTIDAD	N° DE VECES	PRECIO UNITARIO	COSTO ANUAL
1	**MANTENIMIENTO**					**$ 2,600.00**
1.1	Monitoreo de aguas residuales	Servicio	1	2	900.00	1,800.00
1.2	Extracción y disposición de lodos	Servicio	1	1	800.00	800.00
	TOTAL DE COSTO VARIABLE DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ANUAL					**$ 2,600.00**

Nota. La vigilancia de aguas residuales (que vale $1,800.00) y el extraer y disponer de lodos (que cuesta $800.00) son actividades que se requieren para controlar y hacer funcionar el sistema; su costo variable anual es de $2,600.00.

5.1.4.2. Costos de O&M de la proyección de la Laguna de oxidación

Para calcular los costos de operación y mantenimiento, se consideraron las características extensivas de la laguna de oxidación y su adaptación a las condiciones del ámbito rural de Pancarhuaylla. Este sistema permite una gestión operativa más sencilla por parte de la organización comunal, reduciendo la dependencia de insumos externos, equipos especializados y personal técnico permanente, lo que facilita su manejo en el contexto local.

Las actividades de operación y mantenimiento comprenden principalmente la vigilancia del sistema, el control y manejo de macrófitas, la limpieza de la infraestructura y el monitoreo periódico de la calidad del agua. Debido a su baja complejidad tecnológica, estas actividades pueden desarrollarse con recursos locales y capacitación básica, favoreciendo la participación de la comunidad en el mantenimiento de la infraestructura sanitaria. Asimismo, la menor necesidad de recursos especializados permite optimizar los gastos recurrentes y contribuye a la sostenibilidad económica y operativa del sistema propuesto.

Tabla 27

Tarifario de costos fijos de operación y mantenimiento de la proyección de la Laguna de oxidación

ÍTEM	DESCRIPCIÓN TIPO DE GASTO	UNIDAD	CANTIDAD	N° DE VECES	PRECIO UNITARIO	COSTO ANUAL
1	**OPERACIÓN**					**$ 1,200.00**
1.1	**Personal**					
1.1.1	Operador (JASS - tiempo parcial)	Mes	1	12	100.00	1,200.00
2	**MANTENIMIENTO**					**$ 1,420.00**
2.1	**Limpieza**					
2.1.1	Limpieza de maleza y mantenimiento de taludes	Jornal	2	4	70.00	560.00
2.2	**Insumos**					
2.2.1	Insumos (Mantenimiento de arcilla/tierra)	Glb	1	1	400.00	400.00
2.2.2	Herramientas (Rastrillos, redes)	Glb	1	1	260.00	260.00
2.2.3	EPP	Glb	1	1	200.00	200.00
	TOTAL COSTO FIJO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ANUAL					**$ 2,620.00**

Nota. La Tabla 27 especifica los costos fijos de la laguna de oxidación, que incluyen el abono del personal (operador a tiempo parcial), la limpieza de taludes, materiales y EPP. Se determina un costo anual de S/. 2,620.00 lo que garantiza la viabilidad económica y sostenibilidad del sistema a largo plazo.

Tabla 28

Tarifario de costos variables de operación y mantenimiento de la proyección de la Laguna de oxidación

ÍTEM	DESCRIPCIÓN TIPO DE GASTO	UNIDAD	CANTIDAD	N° DE VECES	PRECIO UNITARIO	COSTO ANUAL
1	**MANTENIMIENTO**					**$ 2,200.00**
1.1	Análisis de Laboratorio (Monitoreo LMP)	Servicio	1	2	900.00	1,800.00
1.2	Reposición de macrófitas (si aplica)	glb	1	2	200.00	200.00
	TOTAL DE COSTO VARIABLE DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ANUAL					**$ 2,200.00**

Nota. Los precios variables de la laguna de oxidación, concentrados en la reposición de macrófitas y el monitoreo de LMP, se describen en la Tabla 28. El cuadro establece un coste total anual de S/ 2,200.00. Además, especifica unidades, frecuencias y cantidades para satisfacer los requerimientos operativos del sistema.

Tabla 29

Cuadro Comparativo de Tarifas: Real vs. Propuesta

Concepto de Costo	Tanque séptico (existente)	Laguna de oxidación (proyección)	Diferencia Técnica
O&M Anual Total	S/ 6,500.00	S/ 4,820.00	La laguna presenta menores costos debido a su operación extensiva y menor requerimiento de mantenimiento especializado.
Costo por m3	S/ 0.41	S/ 0.30	El costo unitario es menor en la laguna por menor consumo de energía e insumos.
Cuota Familiar Sugerida	S/ 4.51	S/ 3.35	La laguna permite una tarifa más accesible, adecuada para la capacidad de pago rural.

Nota. La Tabla 29 muestra que la laguna de oxidación es más rentable financieramente que el tanque séptico actual, ya que su costo anual de funcionamiento y mantenimiento (S/ 4,820.00) es inferior al del tanque séptico (S/ 6,500.00). El costo unitario por metro cúbico también se ve afectado por esta disminución, ya que baja de S/ 0.41 a S/ 0.30; esto se debe a la naturaleza extensiva del sistema, que demanda un menor uso de energía, insumos y mantenimiento especializado. Por lo tanto, la cuota familiar recomendada baja de S/ 4.51 a S/ 3.35 al mes, lo que hace que el servicio sea más accesible en términos económicos y favorece su viabilidad en las zonas rurales.

5.2. Propuesta de mejora

Esta propuesta de mejora se elabora con base en los hallazgos de la evaluación comparativa de los sistemas para tratar las aguas residuales que fueron estudiados en la investigación. Su objetivo es presentar una opción técnica dirigida a optimizar el rendimiento del tratamiento de aguas residuales en la zona de estudio, siguiendo principios de eficacia, sustentabilidad y factibilidad en entornos rurales.

En este sentido, se sugiere una opción de tratamiento natural fundamentada en una unidad de oxidación que incluye Pontederia crassipes. Esta ha sido diseñada a nivel de propuesta técnico-referencial con base en los resultados logrados, que incluyen planos esquemáticos, metrados y un presupuesto referencial; no obstante, no es un diseño final de ingeniería.

La propuesta tiene en cuenta criterios fundamentales de operación del sistema, como el tiempo de retención hidráulica, la disponibilidad del área y las condiciones para operar y mantenerlo. Esto se hace con el propósito de demostrar su viabilidad técnica frente al sistema convencional sometido a evaluación.

5.2.1. Descripción de la propuesta

La propuesta actual consiste en implementar una laguna de oxidación recién construida como un método natural para tratar las aguas residuales, con el objetivo de optimizar la calidad del efluente producido por los habitantes de Pancarhuaylla.

Se tuvo en cuenta una población proyectada de 542 habitantes, repartidos en 120 casas y con un suministro de agua potable de 80 L/hab/día, para calcular el caudal de diseño. Además, se utilizó el coeficiente de retorno de 0.80 definido en la Resolución Ministerial N° 192-2018-VIVIENDA. Este coeficiente indica qué parte del agua consumida vuelve como agua residual.

El caudal de aguas residuales se determinó mediante la siguiente expresión:

$$Q = P \times D \times C_r$$

$$Q = 542 \times 80 \times 0.80 = 34688\ L/día = 34.69\ m3/día$$

Las dimensiones de la laguna de oxidación se definieron con base en el volumen necesario para asegurar que el proceso de tratamiento fuera efectivo, utilizando este caudal de diseño. El sistema tiene una forma rectangular, con 25 metros de longitud, 20 metros de ancho y 1.5 metros de profundidad, lo que resulta en un volumen útil de:

$$V = L \times A \times H = 25 \times 20 \times 1.5 = 750\ m3$$

Se estableció el tiempo de retención hidráulica (TRH) a través del cociente entre el caudal de diseño y el volumen útil:

$$TRH = \frac{V}{Q} = \frac{750}{34.69} = 21.6\ días$$

El dimensionamiento propuesto para la laguna de oxidación/estabilización/facultativa contempla un área de 500 m² (20 m × 25 m) y una profundidad útil de 1.5 m, con un volumen de 750 m³. Considerando una población de 542 habitantes y un caudal de 34.69 m³/día, se obtiene un TRH de 21.6 días, valor que cumple con los criterios establecidos en la OS.090 del RNE y la RM 192-2018-VIVIENDA para ámbitos rurales.

La infraestructura contempla una berma perimetral de 0.60 m, taludes de 2:1 y revestimiento con arcilla compactada, considerando los resultados del EMS para reducir la permeabilidad y prevenir infiltraciones. Asimismo, se propone el uso de Pontederia crassipes en aproximadamente el 70 % de la superficie (350 m²), favoreciendo la remoción de materia orgánica y nutrientes mediante procesos biológicos.

El sistema incluye tuberías de conducción y cajas de entrada y salida para garantizar el flujo del efluente. La propuesta es de carácter técnico-referencial, orientada a la evaluación comparativa del sistema, y no constituye un expediente técnico definitivo.

5.2.2. Metrados y costos referenciales

Los costos y metrados de la propuesta actual se han creado de forma referencial, basándose en las medidas definidas en el diseño técnico de la laguna de oxidación y sus elementos complementarios. Estos valores se han establecido tomando en cuenta cálculos de geometría, criterios relacionados con la ingeniería sanitaria y los precios medios del mercado local para materiales, mano de obra y equipos.

En esa línea, los metrados toman en cuenta las partidas más importantes del proyecto, incluyendo el movimiento de tierras, la impermeabilización del suelo, las obras

provisionales, la incorporación de macrófitas, las estructuras de acceso y salida, la instalación de tuberías y las medidas para gestionar el medioambiente y la seguridad. Igualmente, los gastos vinculados comprenden la inversión inicial (CAPEX) y los gastos de operación y mantenimiento (OPEX), que posibilitan calcular la viabilidad económica del sistema sugerido.

Tabla 30

Metrados del sistema propuesto

PARTIDAS	DESCRIPCIÓN	UND	CANTIDAD	DIMENSIONES			PARCIAL	TOTAL
				L	A	H		
.01.00	**Obras provisionales y trabajos preliminares**							
.01.01	Trabajos preliminares							
.01.01.01	Limpieza del terreno	m2	1	31.40	26.40		828.96	828.96
.01.01.02	Trazo, niveles y replanteo	m2	1	31.40	26.40		828.96	828.96
.01.02	**Seguridad y salud**							
.01.02.01	Equipo de protección individual	glb	1				1.00	1.00
.01.02.02	Equipo de protección colectiva	glb	1				1.00	1.00
.01.02.03	Señalización temporal de seguridad	glb	1				1.00	1.00
.01.02.04	Capacitación en seguridad y salud	glb	1				1.00	1.00
.02.00	**Movimiento de tierras**							
.02.01	Nivelación de terreno							
.02.01.01	Perfilado y conformación de taludes	m2	1	90.00	3.55		319.50	319.50
.02.01.02	Compactación de fondo (Nivelado apisonado)	m2	1	18.60	13.60		252.96	252.96
.02.02	Excavaciones							
.02.02.01	Excavaciones simples	m3	1	31.40	26.40	1.60	1326.34	1326.34
.02.03	**Rellenos**							
.02.03.01	Rellenos con material de préstamo (Capa de arcilla)	m3	1	18.60	13.60	0.25	63.24	63.24
.02.03.02	Conformación de berma superior	m2	1	90.00	0.60		54.00	54.00
.02.04	**Obras de concreto simple**							
.02.04.01	Concreto simple f'c=175 kg/cm2 - caja de entrada	m3	1	0.80	0.80	0.80	0.51	0.51
.02.04.02	Concreto simple f'c=175 kg/cm2 - caja de salida	m3	1	0.80	1.00	1.00	0.80	0.80
.03.00	**Instalaciones sanitarias**							
.03.01.01	Suministro e instalación tubería PVC 160 mm ingreso	und	1	10.00			10.00	10.00
.03.01.02	Suministro e instalación tubería PVC Ø160 mm salida	und	1	10.00			10.00	10.00
.04.00	**Varios. Limpieza, Jardinería**							
.04.01.01	Implantación de macrófitas flotantes	m	1	40.00			40.00	40.00
.05.00	**Impacto Ambiental**							
.05.01.01	Limpieza permanente de la obra	und	1	25.00	20.00		500.00	500.00
.05.01.02	Disposición y eliminación de residuos sólidos	und	1	25.00	20.00		500.00	500.00
.06.00	**Gestión de riesgos**							
.06.01	Gestión de riesgos en la comunidad							
.06.01.01	Plan de gestión de riesgos para la comunidad	glb	1				1.00	1.00
.06.02	Gestión de riesgos en la obra							
.06.02.01	Plan de gestión de riesgos de residuos en obra	glb	1				1.00	1.00

Nota. La presente tabla de metrados ha sido elaborada de manera referencial a partir del diseño propuesto de la laguna de oxidación y sus componentes, considerando dimensiones geométricas, criterios de ingeniería sanitaria y precios promedio del mercado local. Los

valores obtenidos no corresponden a un expediente técnico definitivo, sino que sirven como base para el análisis comparativo técnico y económico del sistema de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 31

Presupuesto de la propuesta

PARTIDAS	DESCRIPCIÓN	UND	METRADOS	P.U.	PARCIAL	SUBTOTAL
.01.00	**Obras provisionales y trabajos preliminares**					7460.64
.01.01	Trabajos preliminares					
.01.01.01	Limpieza del terreno	m2	828.96	4.80	3979.008	
.01.01.02	Trazo, niveles y replanteo	m2	828.96	4.20	3481.632	
.01.02	**Seguridad y salud**					9620.00
.01.02.01	Equipo de protección individual	glb	1.00	1370.00	1370.00	
.01.02.02	Equipo de protección colectiva	glb	1.00	4200.00	4200.00	
.01.02.03	Señalización temporal de seguridad	glb	1.00	2850.00	2850.00	
.01.02.04	Capacitación en seguridad y salud	glb	1.00	1200.00	1200.00	
.02.00	**Movimiento de tierras**					48696.62
.02.01	Nivelación de terreno					
.02.01.01	Perfilado y conformación de taludes	m2	319.50	55.00	17572.50	
.02.01.02	Compactación de fondo (Nivelado apisonado)	m2	500.00	14.50	7250	
.02.02	Excavaciones					
.02.02.01	Excavaciones simples	m3	1326.34	18.00	23874.12	
.02.03	**Rellenos**					3935.00
.02.03.01	Rellenos con material propio (Capa de arcilla impermeabilizante en interior de laguna)	m3	125.00	25.00	3125.00	
.02.03.02	Conformación de berma superior	m2	54.00	15.00	810.00	
.02.04	**Obras de concreto simple**					765.00
.02.04.01	Concreto simple f'c=175 kg/cm2 - caja de entrada	m3	0.80	450.00	360.00	
.02.04.02	Concreto simple f'c=175 kg/cm2 - caja de salida	m3	0.90	450.00	405.00	
.03.00	**Instalaciones sanitarias**					900.00
.03.01.01	Suministro e instalación tubería PVC 160 mm ingreso	und	10.00	45.00	450.00	
.03.01.02	Suministro e instalación tubería PVC Ø160 mm salida	und	10.00	45.00	450.00	
.04.00	**Varios. Limpieza, Jardinería**					4000.00
.04.01.01	Implantación de macrófitas flotantes	m	500.00	8.00	4000.00	
.05.00	**Impacto Ambiental**					8020.00
.05.01.01	Limpieza permanente de la obra	und	500.00	0.64	320.00	
.05.01.02	Disposición y eliminación de residuos sólidos	und	500.00	15.40	7700.00	
.06.00	**Gestión de riesgos**					1500.00
.06.01	Gestión de riesgos en la comunidad					
.06.01.01	Plan de gestión de riesgos para la comunidad	glb	1.00	750.00	750.00	
.06.02	Gestión de riesgos en la obra					
.06.02.01	Plan de gestión de riesgos de residuos en obra	glb	1.00	750.00	750.00	

Nota. Esta tabla describe el presupuesto de coste directo para la edificación de una laguna de oxidación por un total de S/. Donde la partida de Movimiento de Tierras es la más importante con S/. 84,877.26. 48,696.62 (57.4% del total) a causa de las labores de excavación, perfilado de taludes y compactado del fondo con arcilla que no permite la penetración del agua. El presupuesto que queda se reparte, en su mayor parte, entre Salud y Seguridad (S/. 9,620.00), Obras provisionales (S/. 7,460.64) e Impacto ambiental (S/. 8,020.00).

Adicionalmente se invierte en la instalación de macrófitas flotantes, la gestión de riesgos, las instalaciones sanitarias de entrada/salida y las cajas de concreto simple.

Tabla 32

Resumen del presupuesto

MODALIDAD **CONTRATA**

Concepto/Componente	Porcentaje/Condición	Monto (S/.)
COSTO DIRECTO	**Base**	**S/ 84,897.26**
GASTOS GENERALES FIJOS	**3.00%**	**S/ 2,546.92**
Elaboración de Expediente Técnico / EIA	Especialista	S/ 1,273.46
Gastos de licitación, contratos y notariales	Trámites	S/ 424.49
Garantías y Seguros (Cartas fianza, SCTR, CAR)	Pólizas	S/ 848.97
GASTOS GENERALES VARIABLES	**7.00%**	**S/ 5,942.81**
Personal Profesional (Residente, Prevencionista, Topógrafo)	Meses de obra	S/ 3,395.89
Personal Administrativo y Auxiliar (Almacenero, Guardián)	Meses de obra	S/ 1,273.46
Oficinas, Almacén, Equipos y Servicios (Agua, Luz, Internet)	Operación	S/ 424.49
Movilidad, Viáticos y Traslado de Equipos Pesados	Logística	S/ 848.97
UTILIDAD	**5.00%**	**S/ 4,244.86**
GASTOS POR SUPERVISIÓN DE OBRA	**6.00%**	**S/ 5,093.84**
EVALUACIÓN DE EXPEDIENTE TÉCNICO	**Monto fijo**	**S/ 2,500.00**
SUBTOTAL GENERAL	**-**	**S/ 105,225.68**
IGV	**18.00%**	**S/ 18,940.62**
PRESUPUESTO TOTAL DEL PROYECTO	**-**	**S/ 124,166.31**

Nota. Bajo la modalidad de ejecución por contrata, el costo directo de S/. 84,897.26 se incrementa con Gastos Generales del 10.00% (3.00% fijos y 7.00% variables, sumando S/. 8,489.73), una Utilidad del 5.00% (S/. 4,244.86), Supervisión del 6.00% (S/. 5,093.84) y una Evaluación de Expediente fija de S/. 2,500.00, consolidando un subtotal que, con el 18.00% de IGV (S/. 18,940.62), define el Presupuesto Total del Proyecto en S/. 124,166.31.

5.2.2. Análisis de riesgos y medidas de contingencia

La implementación de la alternativa propuesta puede estar condicionada por factores ambientales, técnicos y operativos que podrían afectar su funcionamiento, eficiencia y sostenibilidad durante su periodo de operación. En este sentido, resulta necesario identificar los principales riesgos que podrían presentarse en la laguna de oxidación con Pontederia crassipes, considerando aspectos relacionados con la disponibilidad y permanencia de la biomasa vegetal, las condiciones climáticas, el comportamiento hidráulico, la estabilidad de

la infraestructura y las actividades de operación y mantenimiento. A partir de esta identificación, se establecen medidas preventivas y de contingencia orientadas a reducir la probabilidad de ocurrencia de estos eventos o limitar sus posibles efectos sobre el desempeño del sistema.

Tabla 33

Identificación de riesgos y medidas de contingencia de la alternativa propuesta

Riesgo identificado	Causa posible	Periodo o condición de posible ocurrencia	Consecuencia	Medida preventiva o de contingencia
Pérdida de biomasa (Pontederia crassipes)	Mortalidad de la biomasa, extracción o falta de manejo	Durante toda la etapa de operación, especialmente ante condiciones ambientales desfavorables	Disminución del aporte de la fitodepuración	Reposición de biomasa y monitoreo periódico de la cobertura vegetal
Vandalismo o extracción de elementos	Intervención de terceros	En cualquier momento durante la operación	Daño de estructuras, tuberías o pérdida de biomasa	Cerco perimétrico, señalización y vigilancia comunitaria
Sequía prolongada	Disminución de caudal y evaporación	Principalmente durante la época seca o periodos prolongados de déficit hídrico	Reducción del nivel de agua y alteración de las condiciones hidráulicas	Monitoreo del nivel de agua y verificación del funcionamiento hidráulico
Bajas temperatura o heladas	Condiciones climáticas altoandinas	Durante la temporada de bajas temperaturas y ocurrencia de heladas	Reducción del crecimiento de la biomasa vegetal	Monitoreo y reposición de plantas cuando sea necesario
Sobrecarga hidráulica	Incremento temporal del caudal	Durante lluvias intensas o eventos de incremento excepcional del caudal	Disminución del TRH y del desempeño esperado	Control del caudal de ingreso y mantenimiento de las estructuras
Inestabilidad o erosión de taludes	Lluvias, saturación o falta de mantenimiento	Durante y después de periodos de lluvias intensas; también puede desarrollarse progresivamente	Daño de la infraestructura	Inspección periódica y mantenimiento de taludes

Nota. Los principales riesgos identificados se relacionan con la pérdida de biomasa, las condiciones climáticas, la sobrecarga hidráulica, el vandalismo y la estabilidad de los taludes. Para cada riesgo se establecieron medidas preventivas o de contingencia orientadas a mantener la continuidad y el adecuado funcionamiento de la alternativa propuesta.

El análisis realizado permite identificar de manera preliminar los principales riesgos que podrían afectar el funcionamiento de la alternativa propuesta y establecer medidas orientadas a su prevención y control. Debido a que la laguna de oxidación con Pontederia

crassipes constituye una infraestructura proyectada y no dispone de un periodo de operación que permita establecer frecuencias de ocurrencia, probabilidades o niveles de riesgo con datos reales, la presente investigación se limita a una identificación cualitativa de los eventos potenciales y sus medidas de contingencia. Por ello, se recomienda que, durante una futura implementación y puesta en operación del sistema, se realice un seguimiento periódico de las condiciones hidráulicas, la biomasa vegetal, la estabilidad de la infraestructura y las actividades de operación y mantenimiento, generando registros que permitan posteriormente desarrollar una evaluación de riesgos más detallada y cuantitativa.

5.3. Discusión

Los datos obtenidos demuestran que la zona de oxidación natural con Pontederia crassipes tiene un rendimiento superior al sistema de tratamiento que se fundamenta en los tanques sépticos de la PTAR Pancarhuaylla. Según la valoración fisicoquímica, se redujo la DBO_5 de 35.4 mg/L a 5.6 mg/L, la DQO de 91.2 mg/L a 13.8 mg/L y los SST de 120 mg/L a 70 mg/L; esto es, una disminución del 84.2 %, del 84.9 % y del 41.7 %, respectivamente. Igualmente, los coliformes termotolerantes bajaron de 220,000 NMP/100 mL a 200 NMP/100 mL, obteniendo así una eliminación cercana al 99.91 %. La eficacia del sistema natural para disminuir la carga microbiológica y orgánica en las aguas residuales de uso doméstico es mayor, como lo evidencian estos resultados.

Lo reportado por Vanegas Gómez (2021) y Calderón y Salinas (2023) es consistente con los hallazgos: las macrófitas acuáticas colaboran de manera importante en la eliminación de microorganismos patógenos, sólidos suspendidos y materia orgánica a través de la sedimentación, la absorción de nutrientes y la actividad microbiana vinculada al sistema radicular. Asimismo, los resultados apoyan la teoría de los sistemas de fitodepuración, que sostiene que las plantas acuáticas son un elemento esencial para mejorar la calidad del agua residual.

Desde una perspectiva normativa, los dos sistemas satisfacen los Límites Máximos Permisibles para los parámetros físico-químicos evaluados que se encuentran en el D.S. N.º 003-2010-MINAM. No obstante, el sistema tradicional detectó una concentración de coliformes termotolerantes de 220,000 NMP/100 mL, lo que sobrepasó con creces el límite regulatorio de 10,000 NMP/100 mL. Por el contrario, el sector de oxidación natural mostró solo 200 NMP/100 mL, lo que cumplió con los LMP y los Estándares de Calidad Ambiental para agua fijados en el D.S. N° 002-2008-MINAM para la Categoría III, que está vinculada al riego de vegetales y a la bebida de animales. Esto demuestra un potencial más elevado para reutilizar de manera segura el agua tratada en labores agrícolas.

Por otra parte, los hallazgos de la PTAR Pancarhuaylla están relacionados con lo que García Ávila y sus colaboradores (2023) afirman, que es que los tanques sépticos funcionan sobre todo como un tratamiento primario y tienen restricciones en cuanto a la eliminación de microorganismos patógenos si no incluyen procesos adicionales de tratamiento. Esta circunstancia explicaría la deficiencia microbiológica detectada en el sistema actual.

La calicata C-1, que corresponde a la PTAR, fue categorizada con respecto a las condiciones geotécnicas como suelo tipo CL (arcilla de plasticidad media), con un límite líquido medio de 57.71 % y una mayoría de partículas finas que se retuvieron en la malla N.º 200. Estos rasgos señalan que el suelo tiene poca permeabilidad, lo que podría restringir la infiltración del efluente en las zanjas de percolación y tener un impacto negativo sobre el funcionamiento del sistema convencional. Este resultado concuerda con lo que Castellanos y Mamani (2021) afirman, a saber: las propiedades físicas del suelo tienen un impacto directo en la eficacia de los sistemas de tratamiento y disposición final de aguas residuales.

En cambio, la calicata C-2 del área de oxidación natural fue catalogada como suelo orgánico de tipo PT, con un promedio de límite líquido del 75.67 % y una humedad del 28.21

%. A pesar de que este tipo de terreno necesita acciones para estabilizarlo e impermeabilizarlo con el fin de asegurar la estabilidad de la infraestructura, su baja permeabilidad ayuda a mantener el nivel hidráulico requerido para que una laguna de oxidación funcione. Por lo tanto, las características geotécnicas detectadas apoyan la viabilidad técnica de la opción sugerida.

La laguna de oxidación tiene beneficios significativos en comparación con el sistema tradicional en términos operativos. Su desempeño se basa, sobre todo, en procesos naturales y necesita tareas fundamentales como monitoreo, control de macrófitas y mantenimiento de taludes. Selerio (2024) y Angulo & Martínez (2021) afirman que los sistemas naturales de tratamiento requieren menos exigencias técnicas y son más fáciles de operar en poblaciones rurales. Estos hallazgos coinciden con las observaciones realizadas por ellos.

En términos de análisis económico, existe una diferencia importante entre las dos opciones. La inversión total calculada para la PTAR es de S/ 4,698,067.87; la laguna de oxidación, en cambio, necesita una inversión proyectada de S/ 124,166.31, lo que equivale a una disminución aproximada del 97.36 %. Además, los gastos anuales de mantenimiento y operación bajan de S/ 6,500.00 a S/ 4,820.00, lo que representa un ahorro del 25.85%. Asimismo, el costo por unidad de tratamiento disminuye de S/ 0.41/m^3 a S/ 0.30/m^3. Estos hallazgos son congruentes con lo que Altafin (2021) ha mencionado, resaltando que los sistemas naturales representan opciones económicamente más sostenibles por el hecho de tener costos de construcción, operación y mantenimiento más bajos.

Para concluir, la falta de ensayos específicos de percolación que posibilitaran una evaluación directa de la capacidad infiltrante del terreno vinculado a las zanjas de percolación fue una de las limitaciones más importantes del estudio. Además, se llevó a cabo la evaluación del sistema natural en una zona de oxidación existente y no en una laguna

creada y monitoreada durante un largo periodo. No obstante, los resultados conseguidos posibilitan deducir que la puesta en marcha de una laguna de oxidación con Pontederia crassipes es una opción factible desde el punto de vista técnico, ambiental y económico para optimizar la gestión de las aguas residuales en el área de Pancarhuaylla.

VI. Conclusiones

1. La hipótesis general de la investigación se confirma: el sistema de laguna de oxidación con Pontederia crassipes tiene un rendimiento técnico, operativo y económico superior al del sistema de tanques sépticos en lo que respecta a la depuración de aguas residuales en el área de Pancarhuaylla.

2. En relación con el primer objetivo específico, la laguna de oxidación con Pontederia crassipes logró índices más altos de eliminación de carga contaminante, alcanzando eficiencias de DBO_5 entre 70 y 85 %, DQO entre 65 y 80 % y SST hasta un 75 %, lo que representa una mejora significativa en comparación con el sistema de tanques sépticos, que presentó remociones limitadas y concentraciones altas de coliformes termotolerantes.

3. En relación con el segundo objetivo específico, se determinó en el análisis geotécnico que las condiciones del suelo de la zona analizada tienen características apropiadas para que la laguna de oxidación propuesta funcione y se implemente de manera segura, asegurando así estabilidad estructural y compatibilidad con la infraestructura sanitaria proyectada.

4. En cuanto al tercer objetivo específico, la laguna de oxidación con Pontederia crassipes necesita menos intervención técnica y mantenimiento que los tanques sépticos, ya que su operación se fundamenta sobre todo en procesos naturales de depuración, lo cual disminuye la demanda de operaciones especializadas.

5. En relación con el cuarto objetivo específico, la laguna de oxidación mostró una mejor relación entre costo y efectividad, así como sostenibilidad financiera, debido a que requería menos costos de inversión, operación y mantenimiento a lo largo de su ciclo vital. Así se convirtió en una opción económicamente factible para comunidades rurales altoandinas.

VII. Recomendaciones

1. Se aconseja que las instituciones encargadas del saneamiento rural analicen la posibilidad de usar lagunas de oxidación con Pontederia crassipes como opción adicional o reemplazo de sistemas que solo se basan en tanques sépticos en comunidades parecidas a Pancarhuaylla.

2. Con el objetivo de confirmar su rendimiento a largo plazo, se aconseja llevar a cabo proyectos piloto a escala real que posibiliten observar el comportamiento microbiológico, hidráulico y operativo de las lagunas de oxidación con Pontederia crassipes en distintas estaciones del año.

3. Con el fin de asegurar que se cumplan los Límites Máximos Permitidos establecidos por la normativa ambiental vigente, se aconseja implementar programas periódicos para monitorear la calidad del agua, que incluyan tanto parámetros microbiológicos como físico-químicos.

4. Se recomienda establecer planes de operación y mantenimiento para el manejo de la biomasa vegetal, incluyendo cosechas periódicas de Pontederia crassipes, a fin de mantener la eficiencia de remoción de contaminantes y evitar procesos de colmatación.

5. Se recomienda que futuras investigaciones incorporen evaluaciones de nutrientes como nitrógeno y fósforo, análisis estacionales y estudios de ciclo de vida, con el propósito de

ampliar el conocimiento sobre la sostenibilidad ambiental y económica de los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales en zonas altoandinas.

VIII. Referencias

Altafin, I. (mayo de 2021). *Banco Interamericano de Desarrollo (BID).* Obtenido de Banco Interamericano de Desarrollo (BID): https://publications.iadb.org/es/innovaciones-en-el-desarrollo-e-implementacion-de-humedales-construidos-para-el-tratamiento-de

Angulo Urpeque, J. M., & Martinez Varillas, A. (- de - de 2021). *Repositorio Institucional UPN.* Obtenido de Repositorio Institucional UPN: https://repositorio.upn.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/c198e4ef-5284-4696-b832-b808883d41fc/content

Auccatinco Hirpahuanca, R. (2021). *Repositorio Institucional - U Continental.* Obtenido de Evaluación de la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales en el distrito de Cusipata, provincia Quispicanchi – Cusco: https://repositorio.continental.edu.pe/item/aa5a2f32-45f6-4b31-93e6-fceef1e17c2c

Ballón Durand, K. A. (2021). *ALICIA.* Obtenido de Fitorremediación de aguas residuales domésticas con la especie Eichhornia crassipes en el distrito de Yarabamba, Arequipa - 2021: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCON_6e11c4580ca569280f22c469af61218d/Details

Bosstech. (28 de agosto de 2025). *BOSS TECH*. Obtenido de Retos del tratamiento de agua en los Andes peruanos: https://bosstech.pe/blog/retos-tratamiento-agua-andes-peruanos/

Brito, L., Lillebo , A. I., & Teixeira, H. (marzo de 2026). *ResearchGate*. Obtenido de Distribución global de Pontederia crassipes: una revisión sistemática y bibliométrica de las variaciones de biomasa y las correlaciones ambientales.: https://www.researchgate.net/publication/403122089_Global_distribution_of_Pontederia_crassipes_a_systematic_and_bibliometric_review_of_biomass_variations_and_environmental_correlations

Calderon Rodriguez, L. T., & Salinas Cordova, D. J. (18 de mayo de 2023). *Repositorio Institucional UPN.* Obtenido de Repositorio Institucional UPN: https://repositorio.upn.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/a42e222e-9604-4f6c-ae5a-16656dbcb4e9/content

Catellanos Morales, J. J., & Mamani Ccapira, E. (- de - de 2021). *Repositorio Institucional UNSA.* Obtenido de Repositorio Institucional UNSA: https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/1aafae54-6639-4dc1-9ec7-07323eb50f24/content

Cicekalan, B., Kosar, S., Cingoz, S., Evren Ersahin, M., & Ozgun, H. (julio de 2023). *AARHUS UNIVERSITY*. Obtenido de Evaluación tecnoeconómica y ambiental de diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales.: 10.1016/j.jwpe.2023.103822

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). *Repositorio Institucional Universidad de Costa Rica.* Obtenido de Research Design. Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches.: https://repositorio.ciem.ucr.ac.cr/handle/123456789/514

Deister Moreira, F., & Oliveira Dias, E. (5 de Agosto de 2020). *Environmental Research*. Obtenido de Constructed wetlands applied in rural sanitation: A review : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935120309130

Ferrovial. (09 de noviembre de 2025). *Ferrovial*. Obtenido de Ferrovial: https://www.ferrovial.com/es/recursos/aguas-residuales/#:~:text=%C2%BFC%C3%B3mo%20tratar%20las%20aguas%20residuales,humano%20o%20de%20otros%20usos.

García Avila, F., Caraguay Palacios, C., Plaza León, P., Avilés Añazco, A., Marovelle Bustos, C., & Valdiviezo Gonzales, L. (6 de junio de 2023). *Scopus*. Obtenido de Scopus: https://www.scopus.com/pages/publications/85166165646?origin=resultslist#

Guardia Cuaresma, L. H., & Ccente Inga, R. C. (12 de mayo de 2023). *Renati.* Obtenido de Evaluación de la eficiencia de remoción de la DBO, DQO y SST del tanque Imhoff, de la planta de tratamiento de aguas residuales del distrito de Acoria, provincia de Huancavelica, departamento de Huancavelica: https://renati.sunedu.gob.pe/item/019e8e97-a045-7388-a225-4debfd6cbe07

Hazra, M., & Durso, L. M. (28 de noviembre de 2022). *MDPI*. Obtenido de Eficiencia de rendimiento de las plantas de tratamiento convencionales y los humedales artificiales para la reducción de la resistencia a los antibióticos.: https://doi.org/10.3390/antibiotics11010114

Huamani Leon, E., Huayta Astopillo, D., & Ortega Veliz, D. F. (2021). *Repositorio Institucional - U Continental.* Obtenido de Eficiencia de remoción de la especie Hydrocotyle bonariensis (redondita de agua) y Eichhornia crassipes (jacinto de agua) en las aguas residuales del río Shullcas - 2021:

https://repositorio.continental.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/3c8c37cd-fc6b-4534-ba46-34a2a9378500/content

Humanante Cabrera, J. J., Moreno Alcivar, L. C., Grijalva-Endara, A., Saldoya Tinedo, R. W., & Suárez Tomalá, J. A. (15 de junio de 2022). *Revista Manglar*. Obtenido de Eficiencia de remoción e impacto del sistema de tratamiento de aguas residuales del sector urbano y rural de la Provincia de Santa Elena: https://doi.org/10.17268/manglar.2022.022

Joachin Huaman, A., & Paredes Rios, J. L. (2021). *Repositorio Institucional - UNSAAC.* Obtenido de Eficiencia de remoción de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial en el sector de Angostura-distrito de Saylla-Cusco: https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/5025

Mark. (19 de febrero de 2024). *Capital City Training*. Obtenido de Capital City Training: https://www.capitalcitytraining.com/knowledge/capex-opex/#:~:text=El%20CAPEX%20se%20capitaliza%20en,un%20costo%20contra%20los%20ingresos.

Martelo, J., & Lara Borrero, J. A. (10 de Mayo de 2012). *Repositorio Universidad EAFIT.* Obtenido de Repositorio Universidad EAFIT: https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/ff2ec533-cc23-4d67-85a1-0ab7aaeeb0ba/content

Matsena, M. T., & Nkhalambayausi Chirwa, E. M. (- de - de 2022). *ScienceDirect*. Obtenido de ScienceDirect: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/wastewater-treatment-plant#:~:text=Las%20plantas%20de%20tratamiento%20de,y%20los%20requisitos

%20de%20vertido.&text=%C2%BFQu%C3%A9%20tan%20%C3%BAtil%20es%20esta%20definici%C3%B3n?

Metcalf y Eddy, & AECOM. (2014). *Ingeniería de tratamiento de aguas residuales y recuperación de recursos.* Seattle - EEUU: McGraw-Hill Education.

MINAM. (17 de marzo de 2010). DECRETO SUPREMO Nº 003-2010-MINAM. *El Peruano*, pág. 2.

NEOMA. (- de - de 2026). *NEOMA Diccionario de Neoglismos del Español Actual*. Obtenido de NEOMA Diccionario de Neoglismos del Español Actual: https://www.um.es/neologismos/index.php/v/neologismo/1025/fitodepuracion#:~:text=Definici%C3%B3n,aguas%20residuales%20de%20manera%20natural.

Netquest. (28 de abril de 2025). *Netquest a Bilendi Company.* Obtenido de Netquest a Bilendi Company: https://www.netquest.com/blog/estudio-cuasi-experimental#:~:text=estrategias%20de%20mercado.-,%C2%BFQu%C3%A9%20es%20un%20estudio%20cuasi%20experimental?,pol%C3%ADtica%20en%20un%20contexto%20real.

Organización Munidial de la Salud, (., & Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia , (. (2024). *UNICEF Data.* Obtenido de Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2024: special focus on inequalities.: https://data.unicef.org/wp-content/uploads/2025/09/jmp-2025-wash-households-launch.pdf

Ortega, C. (28 de abril de 2018). *QuestionPro*. Obtenido de QuestionPro: https://www.questionpro.com/blog/es/muestreo-por-conveniencia/

Osorio Rivera, M. A., Carrillo Barahona, W. E., Negrete Costales, J. H., Loor Lalvay, X. A., & Riera Guachichullca, E. J. (- de - de 2021). *Dialnet*. Obtenido de Dialnet:

https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7926905#:~:text=Las%20aguas%20residuales%20dom%C3%A9sticas%20conocidas,%2C%20zinc%2C%20y%20el%20pH.

Pacori Pacori, J., & Ginez Choque, P. A. (2023). *ResearchGate.* Obtenido de Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales y propuesta de solución en la localidad de Pucará - 2023: https://www.researchgate.net/publication/391891091_Evaluacion_de_la_planta_de_tratamiento_de_aguas_residuales_y_propuesta_de_solucion_en_la_localidad_de_Pucara_-_2023

Potosme H., X., & Berrios M., Y. (octubre de 2021). *Repositorio Universidad Nacional de Ingeniería - Nicaragua.* Obtenido de Repositorio Universidad Nacional de Ingeniería - Nicaragua: https://ribuni.uni.edu.ni/3567/1/94771.pdf

Qualtrics. (20 de julio de 2020). *Qualtrics.XM*. Obtenido de Qualtrics.XM: https://www.qualtrics.com/es-es/gestion-de-la-experciencia/investigacion/investigacion-cuantitativa/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20la%20investigaci%C3%B3n%20cuantitativa,predecir%20fen%C3%B3menos%20mediante%20datos%20num%C3%A9ricos.

Quispe Benavides, K. L., Guadalupe Baylón , N. K., Diaz Avalos, H., & Diaz Panduro, H. G. (07 de 06 de 2021). *Ciencia Latina Revista Multidiciplinar*. Obtenido de Ciencia Latina Revista Multidiciplinar: https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/491

Quispe Cusihuallpa, R., & Saldivar Quispicusi, R. (- de enero de 2025). *Repositorio institucional UTEA.* Obtenido de Repositorio institucional UTEA: https://repositorio.utea.edu.pe/items/9841eed6-4561-4b34-8cbd-658402ed47b6

Ramos Galarza, C. (- de - de 2020). *Ciencia Americana.* Obtenido de Ciencia Americana: https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7746475.pdf#:~:text=Investigaci%C3%B3n%20descriptiva%20En%20este%20alcance%20de%20la,que%20busque%20caracterizar%20el%20fen%C3%B3meno%20del%20estudio.

Rasool, S., Ahmad, I., Jamal, A., Farhan Saeed, M., Zakir, A., Abbas, G., . . . Caballero C., A. (26 de julio de 2023). *MDPI*. Obtenido de MDPI: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/15/11533

RNE. (2016). Norma OS.090. En -, *Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE)* (pág. 68). Lima, Perú: -.

Rodríguez Sánchez, I., Taco Palma, P., Calvo, M. J., Calvo Mamani, J., & Aguilar Lopez, M. A. (23 de marzo de 2021). *Revistas UNSAAC.* Obtenido de Eficiencia de la laguna de oxidación para el tratamiento de aguas residuales domésticas, localidad de Huaro – Cusco: https://doi.org/10.51343/cantu.v16i0.629

Salmons, J. (03 de febrero de 2023). *Sage Research Methods Community*. Obtenido de Investigación cuantitativa con diseños no experimentales: https://researchmethodscommunity.sagepub.com/blog/quantitative-research-with-non-experimental-designs?utm_source=chatgpt.com

Selerio, E. (29 de octubre de 2024). *arXiv - Cornell University.* Obtenido de arXiv - Cornell University: https://arxiv.org/pdf/2410.22484

SIDE. (2020). *Fundecoperación.* Obtenido de Lagunas de oxidación: https://fundecooperacion.org/wp-content/uploads/2020/06/Lagunas-oxidaci%C3%B3n-caf%C3%A9_acciones-clim%C3%A1ticas.pdf

Stefanakis, A. I. (2020). *MDPI.* Obtenido de Constructed Wetlands for Sustainable Wastewater Treatment in Hot and Arid Climates: Opportunities, Challenges and Case Studies in the Middle East: https://www.mdpi.com/2073-4441/12/6/1665

Valencia Espinosa, A., Durán Rodríguez, O. Y., & Ramirez Herrejón, J. P. (28 de noviembre de 2025). *Scielo*. Obtenido de Análisis del manejo de Pontederia crassipes (Liliopsida): una perspectiva integral: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972025000100067

Vanegas Gómez, E. V. (mayo de 2021). *Respositorio Institucional UNAD.* Obtenido de Eficiencia del Jacinto de Agua (Eichhornia Crassipes) en la Fitodepuración de Aguas: https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/35009/evvanegasg.pdf?seque

Vidal Guerrero, T. (2022). *Revistas UNASAM.* Obtenido de Enfoque Cuantitativo: Taxonomía desde elnivel de profundidad de la búsqueda del conocimiento: https://doi.org/10.32911/llalliq.2022.v2.n1.936

Vizcaíno Zúñiga, P., Cedeño Cedeño, R., & Maldonado Palacios, I. (- de agosto de 2023). *Revista Ciencia Latina Internacional.* Obtenido de Revista Ciencia Latina Internacional: https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/download/7658/11619/#:~:text=Investigaci%C3%B3n%20aplicada:,situaciones%20en%20el%20mundo%20real.&text=Enfoque%20pr%C3%A1ctico:%20Se%20preocupa%20por,y%20aplicabilidad%20de%20los%20resultados.&text=Uti

Von Sperling, M. (2020). *Biblioteca digital ODUCAL.* Obtenido de Introducción a la calidad del agua y al tratamiento de aguas residuales (Vol. 1): https://bibliotecadigital.oducal.com/Record/KOHA-UCATOLICA:80576/Similar?sid=4469

Vymazal, J. (2022). *MDPI.* Obtenido de The Historical Development of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: https://www.mdpi.com/2073-445X/11/2/174

Water hyacinth. (- de - de 2020). *Royal Botanic Gardens Kew*. Obtenido de Royal Botanic Gardens Kew: https://www.kew.org/plants/water-hyacinth#:~:text=s%C3%B3lo%20dos%20semanas.-,Descripci%C3%B3n%20de%20la%20planta,racimos%20de%20unas%20diez%20flores.

Yauri Gomez, R. H., & Cahuana Concha, E. (- de - de 2024). *ALICIA - CONCYTEC.* Obtenido de ALICIA - CONCYTEC: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSA_6cca5a85e242a155e91f5eec81ee6395

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes