TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

UNIVERSIDAD ANDINA

NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LEMNA MINOR EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL DISTRITO DE ROSASPATA, 2025

TESIS PRESENTADA POR:

Bach. YESICA MANINDI APAZA MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL

JULIACA – PERÚ

2026

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

UNIVERSIDAD ANDINA

NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LEMNA MINOR EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL DISTRITO DE ROSASPATA, 2025

TESIS PRESENTADA POR:

Bach. YESICA MANINDI APAZA MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL

APROBADA POR EL JURADO REVISOR:

PRESIDENTE : Dr. RONALD MADERA TERÁN

PRIMER MIEMBRO : Dr. FRITZ WILLY MAMANI APAZA

SEGUNDO MIEMBRO : M.Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA

ASESOR DE TESIS : Mgtr. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: SANEAMIENTO AMBIENTAL – P22

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

RESOLUCIÓN DECANAL N° 0214-2026-D-UI-FICP-UANCV

Juliaca, 22 de abril del 2026

VISTO: El expediente **N° 2026-CU-002760** presentado por el (la) Bachiller: **YESICA MANINDI APAZA MAMANI** estudiante de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN.**

CONSIDERANDO:

Que, el (la) Bach. **YESICA MANINDI APAZA MAMANI,** quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN** de la Tesis Titulada: **EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LEMNA MINOR EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL DISTRITO DE ROSASPATA, 2025**, la misma que pertenece a la línea de investigación **SANEAMIENTO AMBIENTAL** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental.**

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en concordancia con el dictamen de similitud.

De conformidad al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 24, Art. 28 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- **APROBAR**, la **NOMINACIÓN DE JURADOS** integrado por los siguientes docentes:

- **Presidente** : Dr. RONALD MADERA TERÁN
- **1er Miembro** : Dr. FRITZ WILLY MAMANI APAZA
- **2do Miembro** : M.Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA

ARTICULO SEGUNDO. – **RECONOCER** como asesor de la investigación (tesis) de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras al (a la) docente, **Mgtr. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS.**

ARTICULO TERCERO. – **APROBAR,** la **FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS** de él (la) bachiller: **YESICA MANINDI APAZA MAMANI;** del informe final de la investigación (tesis) titulada: **EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LEMNA MINOR EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL DISTRITO DE ROSASPATA, 2025** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental.** de acuerdo al siguiente detalle:

- **FECHA** : Miercoles 29 de abril del 2026
- **HORA** : 08:00 hr
- **LUGAR** : Aula 406 - FICP

ARTÍCULO CUARTO.- **DISPONER** que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.

Dr. Ronald Madera Terán
DECANO (e)
CIP: 66975

Dr. Fritz Willy Mamani Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.
Archivo
Interesado (a)

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

RESOLUCIÓN DECANAL N° 1350-2025-D-UI-FICP-UANCV

Juliaca, 20 de octubre del 2025

VISTO: El expediente **N° 2025-CU-9697** por el señor (a): **YESICA MANINDI APAZA MAMANI** quien solicita **REVISIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (borrador de tesis)**, el PROVEIDO – **N° 979-2025**-UI-FICP-UANCV/J, y la **FICHA DE OPINIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACION (BORRADOR DE TESIS)** formato **N° 061 - 2025** del integrante del comité de investigación **EPISA** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

CONSIDERANDO:

Que, el señor (a): **YESICA MANINDI APAZA MAMANI,** ha presentado su informe final de la investigación (borrador de tesis) Titulada: **EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LEMNA MINOR EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL DISTRITO DE ROSASPATA, 2025**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental.**

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación **M.Sc. Jesús Esteban Castillo Machaca** de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión del informe final de la investigación (borrador de tesis) formato N° 061 - 2025 **aprobando** el informe final de la investigación (borrador de tesis) titulado: **EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LEMNA MINOR EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL DISTRITO DE ROSASPATA, 2025**, Correspondiente a la línea de investigación **SANEAMIENTO AMBIENTAL.**

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducentes a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y estando a la opinión favorable del comité de investigación respecto al informe final de la investigación (borrador de tesis).

Estando, con la opinión favorable del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 27 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR, el **INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (BORRADOR DE TESIS)**, para la **REVISIÓN DE SIMILITUD TURNITIN,** presentado por el señor (a): **YESICA MANINDI APAZA MAMANI,** para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario y Ambiental, con el Tema Titulada: **EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LEMNA MINOR EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL DISTRITO DE ROSASPATA, 2025** correspondiente a la línea de investigación **SANEAMIENTO AMBIENTAL,** en virtud a los considerandos expuestos.

ARTÍCULO SEGUNDO.- RATIFICAR como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** al (a la), **Mgtr. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS.**

ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.

UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CS. PURAS
Dr. OSCAR V. VIAMONTE CALLA
DECANO (e)
CIP. 32730

UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
Dr. Fritz Willy Mamani Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.
Archivo
interesado (a)

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

RESOLUCIÓN DECANAL N° 1040-2025-D-UI-FICP-UANCV

Juliaca, 10 de septiembre del 2025

VISTO: El expediente N° 2025-CU- 6333, presentado por el señor (a) YESICA MANINDI APAZA MAMANI solicitando APROBACIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN el PROVEIDO – N° 744 -2025-UI-FICP-UANCV/J, y la FICHA DE OPINIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN formato N° 061-2025 del integrante del comité de investigación EPISA de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

CONSIDERANDO:

Que, el señor (a): YESICA MANINDI APAZA MAMANI ha presentado su propuesta de investigación Titulada: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LEMNA MINOR EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL DISTRITO DE ROSASPATA, 2025, para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario y Ambiental.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación MSc. Jesus Esteban Castillo Machaca de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión de la propuesta de investigación formato N° 061-2025- aprobando la propuesta de investigación titulada: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LEMNA MINOR EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL DISTRITO DE ROSASPATA, 2025.

Que, es requisito indispensable contar con un asesor docente ordinario y/o contratado de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras con un mínimo de cinco años de docencia, grado de doctor o magister y experiencia en la línea a investigar, o deberá estar acreditado por Resolución 0989-2022-UANCV-CU-R, quien asumirá como asesor de la propuesta de investigación, según el área o grado.

Estando, con la opinión favorable de la propuesta de investigación del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 25 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR, la **PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN**, presentado por el señor (a): YESICA MANINDI APAZA MAMANI, para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario y Ambiental, con el Tema Titulada: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LEMNA MINOR EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL DISTRITO DE ROSASPATA, 2025 correspondiente a la línea de investigación SANEAMIENTO AMBIENTAL.

La misma que deberá proceder con la ejecución de la propuesta de Investigación aprobado de acuerdo a lo establecido en el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales.

ARTÍCULO SEGUNDO.- RECONOCER como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** de al (a la) docente Mgtr. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS.

ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.

UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CS. PURAS
Dr. OSCAR V. VIAMONTE CALLA
DECANO (e)
CIP. 32730

UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
Dr. Fritz Willy Mamani Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.
Archivo 2025
Interesado (a)

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

YESICA MANINDI APAZA MAMANI

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LEMNA MINOR EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUAS RESIDUA...

Trabajos de tesis para ingreso a repositorio

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::13016:604070747

Fecha de entrega
1 jul 2026, 16:08 GMT-5

Fecha de descarga
2 jul 2026, 21:39 GMT-5

Nombre del archivo
T036_70922537_T.docx

Tamaño del archivo
9.4 MB

165 páginas

29.181 palabras

164.950 caracteres

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

12% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

8% Fuentes de Internet
2% Publicaciones
9% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º 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 complementarios

Título de la Tesis	
EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LEMNA MINOR EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL DISTRITO DE ROSASPATA, 2025	
Datos de autor	
Nombres y apellidos	YESICA MANINDI APAZA MAMANI
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	70922537
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0009-0151-6985
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	02383061
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-5101-4264
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	RONALD MADERA TERÁN
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02429150
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	FRITZ WILLY MAMANI APAZA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02306659
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	01323821

Datos de investigación	
Línea de investigación	Saneamiento Ambiental – P22
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	**País**: Perú **Departamento**: Puno **Provincia**: Huancané **Distrito**: Rosaspata **Coordenadas**: **Latitud**: -15.23427 **Longitud**: -69.52727  **URL Maps:** https://goo.gl/maps/tdnFgpTKQn6TfuTY8?g_st=aw
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Setiembre 2025 – Abril 2026
URL de disciplinas OCDE https://concytec-pe.github.io/Peru-CRIS/vocabularios/ocde_ford.html-Librería	**Ingeniería ambiental** https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.00 **Ciencias del medio ambiente** https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo YESICA MANINDI APAZA MAMANI, identificado con DNI Nro. 70922537, en mi condición de egresado de:

☒ **Escuela Profesional**

☐ **Programa de Segunda Especialidad,**

☐ **Programa de Maestría o Doctorado**

INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL,

informo que he elaborado el/la ☒ **Tesis** o ☐ **Trabajo de Investigación,** ☐ **Trabajo Académico** denominada:

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LEMNA MINOR EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL DISTRITO DE ROSASPATA, 2025

Asesorado por: Mgtr. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como suyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Juliaca 08 de Junio del 2026

Firma del Asesor (obligatoria)	Firma del Estudiante (obligatoria)	Huella

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

DEDICATORIA

A él, por mostrarme el camino, darme el aliento que necesito y levantarme cada día, permitiéndome superar cualquier tropiezo que aparece en el camino y alcanzar las metas y sueños que me propuse.

A mis viejos y hermanos, que han sido el pilar fundamental en mi crecimiento como profesional, por regalarme su amor, su entrega, sus palabras sabias y sus medios para que pudiera llegar hasta aquí.

Yesica Manindi Apaza Mamani

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

AGRADECIMIENTO

A Él, que ha sido mi rumbo y mi ilusión, por quedarse a mi lado en cada paso, por darme esa fuerza que me ayudaba a levantarme cuando más lo necesitaba, por prestarme la determinación para seguir con mis estudios y poder cerrar esta etapa bien. Por sostener cada uno de mis pasos y cada meta que me puse, para no perder el rumbo en esta travesía que es la vida.

También le doy las gracias a mi casa de estudios, la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, sobre todo a la escuela profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, y a todo su equipo de profesores, por todo lo que me enseñaron durante este proceso. A los miembros del jurado y a mi asesor, por su respaldo y por cada granito de arena que me ofrecieron y sugerencias durante el desarrollo del trabajo de investigación.

Yesica Manindi Apaza Mamani

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....i

AGRADECIMIENTO ii

ÍNDICE GENERAL.....iii

ÍNDICE DE TABLAS viii

ÍNDICE DE FIGURAS x

RESUMEN xii

ABSTRACT.....xiii

INTRODUCCIÓN xiv

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Análisis de la situación problemática. 16

1.2. Planteamiento del problema. 18

1.2.1. Problema general 18

1.2.2. Problemas específicos 19

1.3. Objetivos de la investigación 19

1.3.1. Objetivo general 19

1.3.2. Objetivos específicos..... 19

1.4. Justificación de la investigación..... 20

1.4.1. Justificación Practica..... 20

1.4.2. Justificación social..... 20

1.4.3. Justificación ambiental 21

1.4.4. Justificación económica 22

1.5. Hipótesis de la investigación 22

1.5.1. Hipótesis general 22

1.5.2. Hipótesis específicas 22

1.6. Variables 23

1.6.1. Variable independiente 23

1.6.2. Variable dependiente 23

1.7. Operacionalización de variables 23

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación 25

2.1.1. Antecedentes internacionales 25

2.1.2. Antecedentes nacionales 29

2.1.3. Antecedentes regionales 37

2.2. Bases teóricas 41

2.2.1. Aguas residuales 41

2.2.2. Aguas residuales domesticas 42

2.2.3. Nitrógeno y fósforo como contaminantes 45

2.2.4. Fitorremediación 48

2.2.5. Tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas 49

2.2.6. Propiedades de las plantas acuáticas en sistemas de tratamiento 54

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

2.2.7. Lemna minor (lenteja de agua) en el tratamiento de aguas residuales domésticas 54
2.2.8. Remoción de N y P por Lemna minor 61
2.2.9. Factores que influyen en la eficiencia 65
2.3. Marco conceptual 67
2.3.1. Aguas residuales domésticas 67
2.3.2. Nitrógeno en aguas residuales 68
2.3.3. Fósforo en aguas residuales 68
2.3.4. Macrófitas acuáticas 68
2.3.5. Lemna minor (lenteja de agua) 69
2.3.6. Fitorremediación 69
2.3.7. Remoción de nitrógeno y fósforo por Lemna minor 69
2.3.8. Tratamiento experimental con Lemna minor 70
2.3.9. Condiciones de campo a la intemperie 70
2.3.10. Eficiencia de remoción 71
2.3.11. Límites Máximos Permisibles (LMP) 71

CAPITULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Diseño de investigación 72
3.2. Tipo de investigación 73
3.3. Nivel de investigación 73
3.4. Enfoque de investigación 74

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

3.5. Población y muestra 74

3.5.1. Población 74

3.5.2. Muestra 75

3.6. Materiales y equipos 75

3.7. Técnicas e instrumentos 77

3.7.1. Técnicas 77

3.7.2. Instrumentos 78

3.8. Lugar de estudio 79

3.9. Procedimiento metodológico: 82

3.9.1.Procedimiento para el objetivo específico 1: Determinar las concentraciones iniciales de nitrógeno y fósforo en las aguas residuales domésticas del distrito de Rosaspata. 82

3.9.2.Procedimiento para el objetivo específico 2: Aplicar el tratamiento experimental con Lemna minor en condiciones de campo a la intemperie y medir las concentraciones finales de nitrógeno y fósforo tras el tratamiento. 85

3.9.3.Procedimiento para el objetivo específico 3: Analizar la eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo lograda por Lemna minor comparando los valores iniciales y finales, para establecer su capacidad depuradora. 92

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados 96

4.1.1. Determinar las concentraciones iniciales de nitrógeno y fósforo en las aguas residuales domésticas del distrito de Rosaspata. 96

4.1.2. Aplicar el tratamiento experimental con Lemna minor en condiciones de campo a la intemperie y medir las concentraciones finales de nitrógeno y fósforo tras el tratamiento. 101

4.1.3. Analizar la eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo lograda por Lemna minor comparando los valores iniciales y finales, para establecer su capacidad depuradora. 114

4.2. Discusiones 128

CONCLUSIONES 131

RECOMENDACIONES 133

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 135

ANEXOS 144

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables de la presente investigación. 23

Tabla 2 Principales constituyentes de las aguas residuales a reducir. 45

Tabla 3 Formas del nitrógeno presentes en aguas residuales domésticas y sus características. 46

Tabla 4 Formas del fósforo y sus características en aguas residuales. 47

Tabla 5 Tipos y procesos de fitorremediación. 48

Tabla 6 Funciones de las plantas en sistemas de tratamiento acuático. 54

Tabla 7 Mecanismos directos e indirectos de remoción de N y P por Lemna minor. 62

Tabla 8 Rangos típicos de remoción de N y P por Lemna minor según estudios científicos. 63

Tabla 9 Factores que influyen en la remoción de nitrógeno y fósforo. 67

Tabla 10 Coordenadas UTM de los puntos de estudio de la investigación (área de muestreo y del área experimental). 80

Tabla 11 Resultados iniciales de los parámetros de calidad de agua residual doméstica – Repetición 1 (R1), del distrito de Rosaspata, 2025. 97

Tabla 12 Resultados iniciales de los parámetros de calidad de agua residual doméstica – Repetición 2 (R2), del distrito de Rosaspata, 2025. 98

Tabla 13 Variación temporal de nitrógeno y fósforo en el estanque 1 durante el tratamiento con Lemna minor 101

Tabla 14 Variación temporal de nitrógeno y fósforo en el estanque 2 durante el tratamiento con Lemna minor 103

Tabla 15 Variación promedio temporal de nitrógeno total y fósforo total durante el tratamiento con Lemna minor en condiciones de campo (Juliaca, 2025)... 109

Tabla 16 Eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo mediante Lemna minor en el estanque 1 al finalizar el tratamiento (Juliaca, 2025) 124

Tabla 17 Eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo mediante Lemna minor en el estanque 2 al finalizar el tratamiento (Juliaca, 2025). 125

Tabla 18 Eficiencia promedio de remoción de nitrógeno y fósforo mediante Lemna minor al finalizar el tratamiento en ambos estanques experimentales (Juliaca, 2025)..... 127

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Composición de las Aguas Residuales Domesticas. 44

Figura 2 Plantas acuáticas. 51

Figura 3 Morfología de Lemna minor. 56

Figura 4 Lugar de estudio: Efluente de la laguna de oxidación del distrito de Rosaspata y área experimental en Jr. Chucuito con Jr. Almagro – Juliaca. 81

Figura 5 Toma de muestras de aguas residuales domésticas en frascos y recipientes. 83

Figura 6 Obtención de macrófitas flotantes Lemna minor en el Lago Titicaca. 86

Figura 7 Adaptación de Lemna minor en tinajas transparentes previas al tratamiento. 87

Figura 8 Recolección del agua residual doméstica, del efluente de la laguna de oxidación del distrito de Rosaspata. 87

Figura 9 Dimensiones del estanque utilizado para los tratamientos experimentales con Lemna minor. 88

Figura 10 Unidades experimentales acondicionadas con Lemna minor durante el tratamiento en condiciones de campo (Juliaca, 2025). 89

Figura 11 Concentración inicial de nitrógeno total (N) en las dos repeticiones comparada con la Norma Internacional AG-CC-01. 99

Figura 12 Concentración inicial de fósforo total (P) en las dos repeticiones comparada con el ECA para agua, Categoría 4. 100

Figura 13 Comportamiento del nitrógeno total en el estanque 1 durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025). 104

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

Figura 14 Comportamiento del Fósforo total en el estanque 1 durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025). 106

Figura 15 Comportamiento del Nitrógeno total en el estanque 2 (E2) durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025). 107

Figura 16 Comportamiento del Fósforo total en el estanque 2 (E2) durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025). 108

Figura 17 Comportamiento promedio de Nitrógeno total durante el tratamiento con Lemna minor. 111

Figura 18 Comportamiento promedio del Fósforo total durante el tratamiento con Lemna minor. 113

Figura 19 Porcentaje de remoción (%) del Nitrógeno total en el estanque 1 durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025). 115

Figura 20 Porcentaje de remoción (%) del Fósforo total en el estanque 1 durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025). 116

Figura 21 Porcentaje de remoción (%) del Nitrógeno total en el estanque 2 (E2) durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025). 118

Figura 22 Porcentaje de remoción (%) del Fósforo total en el estanque 2 (E2) durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025). 119

Figura 23 Porcentaje promedio de remoción (%) del Nitrógeno total durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025). 121

Figura 24 Porcentaje promedio de remoción (%) del Fósforo total durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025). 122

RESUMEN

Este trabajo buscaba medir qué tan capaz es la Lemna minor para eliminar el nitrógeno y fósforo que traen consigo las aguas domésticas del distrito de Rosaspata, 2025. La metodología aplicada respondió a un diseño experimental, bajo un tipo de investigación experimental, nivel explicativo y enfoque cuantitativo, desarrollándose el tratamiento en dos estanques experimentales instalados a la intemperie en Juliaca, utilizando 20 L de agua residual por unidad. El procedimiento incluyó la caracterización inicial de nutrientes, la instalación del tratamiento con Lemna minor recolectada en su/ hábitat natural, el monitoreo periódico de N y P intercalo desde el 18/09/2025 hasta el 06/10/2025. Los resultados obtenidos evidenciaron reducciones significativas de nitrógeno y fósforo en ambos estanques tras la aplicación del tratamiento con Lemna minor. En el estanque 1, el nitrógeno total redujo de 65.7 mg/L a 19 mg/L, alcanzando una eficiencia de remoción del 71.1%, mientras que el fósforo total se redujo de 12.7 mg/L a 4.1 mg/L, equivalente a un 67.7% de remoción. En el estanque 2, el nitrógeno total pasó de 68.5 mg/L a 21 mg/L, logrando una eficiencia de 69.3%, y el fósforo disminuyó de 11.9 mg/L a 4.2 mg/L, lo que representa una remoción del 64.7%. Con base en ello, se concluye que Lemna minor constituye una alternativa biotecnológica factible para el tratamiento de aguas residuales domésticas en pequeñas localidades del altiplano, debido a su alta eficiencia, fácil adaptación y bajo costo operativo.

Palabras clave: Lemna minor, nitrógeno, fósforo, eficiencia de remoción, aguas residuales.

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the effectiveness of theorem minor in removing nitrogen and phosphorus from domestic wastewater in the Rosaspata district in 2025. The methodology employed an experimental design, with an explanatory level and a numerical procedure. The treatment was carried out in two outdoor experimental ponds in Juliaca, using 20 L of wastewater per pond. The procedure included initial nutrient characterization, installation of the treatment using Lemna minor collected from its natural habitat, and periodic monitoring of nitrogen and phosphorus levels from September 18, 2025, to October 6, 2025. The results showed significant reductions in nitrogen and phosphorus in both ponds after the application of the Lemna minor treatment. In pond 1, total nitrogen decreased from 65.7 mg/L to 19 mg/L, achieving a removal efficiency of 71.1%, while total phosphorus was reducing from 12.7 mg/L to 4.1 mg/L, equivalent to a 67.7% removal rate. In pond 2, total nitrogen decreased from 68.5 mg/L to 21 mg/L, achieving an efficiency of 69.3%, and phosphorus decreased from 11.9 mg/L to 4.2 mg/L, representing a 64.7% removal rate. Based on these results, it is concluded that theorem minor constitutes a viable biotechnological alternative for the therapy of domestic effluent in small communities of the Andean highlands, due to its high efficiency, ease of adaptation, and low operating cost.

Keywords: Lemna minor, nitrogen, phosphorus, removal efficiency, wastewater.

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales domésticas representan una de las orígenes principales de deterioro ambiental hídrica en las zonas rurales y urbanas de países en desarrollo, debido a que contienen elevadas cargas de sustancia orgánica, elementos nutrientes y microorganismos que pueden alterar significativamente la calidad de los cuerpos de agua receptores (Metcalf & Eddy, Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento y recuperación de recursos (5.ª ed.), 2016). La acumulación desmedida de ciertos elementos, como el nitrógeno y el fósforo genera procesos de eutrofización, afectando los ambientes acuáticos y acceso al recurso hídrico y la salud pública (Correll, 1998).

En este contexto, las plantas acuáticas flotantes, especialmente Lemna minor, han demostrado ser una alternativa prometedora para la remoción de nutrientes debido a su rápido crecimiento, alta tasa de absorción y capacidad de adaptarse a diversas condiciones ambientales (Zimmo, Van der Steen, & Gijzen, 2004). Lemna minor es reconocida por su eficiencia para asimilar nitrógeno y fósforo directamente del agua, contribuyendo a la reducción de estos compuestos a través de procesos de bioacumulación y asimilación metabólica (Landesman, Parker, & Prince, 2005).

En el distrito de Rosaspata, la falta de instalaciones apropiadas para limpiar las aguas servidas domésticas constituye un obstáculo ambiental recurrente, lo que facilita la descarga de efluentes con altas concentraciones de nitrógeno y fósforo hacia suelos y cuerpos de agua locales. Esta situación genera impactos adversos como reducción de la calidad del agua, afectación de actividades productivas y riesgos sanitarios para la población (MINAM, 2017).

Por ello, evaluar alternativas económicas y ecoeficientes es fundamental para mitigar la carga contaminante generada por las viviendas del distrito.

Este trabajo tiene como propósito medir la eficiencia de Lemna minor para sacar de nitrógeno y fósforo presentes en aguas sucias domésticas del distrito de Rosaspata, mediante un experimento desarrollado en condiciones de campo a la intemperie. Para ello, se determinan inicialmente las concentraciones de nitrógeno y fósforo, se aplica el tratamiento experimental utilizando estanques ubicados en el exterior y finalmente se analiza la eficiencia de remoción comparando los valores iniciales y finales. Este enfoque permitirá conocer la capacidad depuradora de Lemna minor en condiciones reales, aportando evidencia para su implementación en zonas rurales con limitaciones tecnológicas.

Este estudio está organizado en cuatro capítulos. El **Capítulo I** aborda el planteamiento del problema, analizando la situación problemática en el ámbito internacional, nacional y local, a partir de la cual se formulan las preguntas y objetivos del estudio. El **Capítulo II** corresponde al marco teórico, donde se expone la base conceptual y científica relacionada con Lemna minor, los nutrientes y el tratamiento de aguas sucias. El **Capítulo III** detalla la metodología aplicada, detallando el tipo y diseño de investigación, las unidades experimentales, materiales, ubicación y procedimientos aplicados en condiciones de campo. El **Capítulo IV** presenta los resultados obtenidos para cada objetivo específico y la discusión respectiva con base en estudios previos. Finalmente, se exponen las conclusiones derivadas del estudio y las recomendaciones orientadas a futuros investigadores.

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Análisis de la situación problemática.

A escala mundial, la descarga de aguas residuales urbanas y domésticas con altas concentraciones de nitrógeno y fósforo es una de los principales motivos de contaminación de ríos, lagos y embalses, generando floraciones algales, La desaparición de variedad biológica y los peligros para el bienestar de las personas (Preisner, 2021). La mayor parte de estos nutrientes proviene de efluentes municipales insuficientemente tratados, que incrementan la carga de nitrógeno y fósforo en los cuerpos receptores, sobre todo en naciones en vías de desarrollo, donde las redes de saneamiento es reducida. Frente a este escenario, diversas investigaciones han evaluado tecnologías de bajo costo basadas en macrófitas acuáticas; en particular, Lemna minor ha demostrado alta capacidad para remover nitrógeno y fósforo en distintos tipos de aguas residuales, tanto en sistemas controlados como bajo condiciones ambientales (Yang, Wu, Hao, & He, 2008).

En el Perú, la gobernanza del agua y el saneamiento enfrenta importantes brechas: aunque se ha ampliado la cobertura de agua potable, el tratamiento de aguas residuales sigue siendo insuficiente, y una proporción significativa de efluentes domésticos se vierten a ríos y lagunas con tratamiento parcial o nulo

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

(OECD, 2021). Estudios recientes reportan que las aguas grises domésticas peruanas presentan elevadas cargas de materia orgánica, amonio y fósforo, aportando al daño de la calidad del agua y al incremento de riesgos sanitarios para las poblaciones cercanas (Ortega Quispe, 2024). Además, trabajos académicos sobre sistemas de tratamiento municipales muestran que muchas plantas operan por debajo de su capacidad o sin monitoreo adecuado, lo que limita la remoción efectiva de nutrientes y agrava la contaminación de cuerpos receptores (Copari, 2022). En este contexto, el uso de tecnologías naturales como humedales y sistemas con Lemna minor emerge como alternativa viable para complementar o reemplazar tratamientos convencionales de mayor costo energético y operativo (Jiménez Cutipa, 2023).

La región Puno presenta una problemática crítica asociada al vertido de aguas servidas domésticas hacia la cuenca del Lago Titicaca y sus afluentes, donde múltiples ciudades descargan efluentes con tratamiento deficiente o inexistente, superando frecuentemente los ECA para parámetros como DBO y nutrientes. Un diagnóstico regional de sistemas de tratamiento alrededor del lago señala que una parte importante de las plantas de aguas residuales se encuentra en estado regular o malo, con baja eficiencia para remover contaminantes y sin monitoreo sistemático de afluentes y efluentes. Asimismo, se ha estimado que Puno y Juliaca concentran gran parte de la carga de aguas grises domésticas de la cuenca, pero otras localidades como Huancané, Azángaro y Santa Rosa también aportan descargas significativas que afectan ríos y suelos de la región (Medrano, Mamani , Muñoz, Díaz, & Medrano, 2020).

El distrito de Rosaspata, ubicado en la provincia de Huancané, forma parte de la cuenca alta que drena hacia el Lago Titicaca y se caracteriza por un contexto rural donde históricamente han existido limitaciones en los servicios de saneamiento básico, incluyendo el manejo y tratamiento de aguas grises domésticas. Documentos oficiales del sector vivienda registran proyectos de "mejoramiento del servicio de agua potable y saneamiento básico" en diversos sectores del distrito, lo que evidencia la necesidad de intervenir para reducir la contaminación asociada a descargas domésticas sin tratamiento adecuado (MVCS, 2019). A nivel de la unidad hidrográfica Huancané se ha identificado la presencia de aguas servidas caseras que se arrojan a fuentes de agua en la superficie y a la tierra, vinculadas al crecimiento poblacional y a la ausencia de infraestructuras eficientes de depuración (ANA, 2019). En este escenario, es probable que en Rosaspata una fracción importante de las aguas residuales domésticas se descargue directamente al entorno o a sistemas de disposición rudimentarios, contribuyendo a la acumulación de nitrógeno y fósforo y representando un riesgo para la calidad del agua y la salud de la población; por ello, evaluar la eficiencia de Lemna minor en la remoción de estos nutrientes se plantea como una alternativa pertinente, de bajo costo y acorde con las condiciones locales del distrito.

1.2. Planteamiento del problema.

1.2.1. Problema general

¿Cuál es la eficiencia de Lemna minor en la remoción de nitrógeno y fósforo presentes en las aguas residuales domésticas del distrito de Rosaspata, 2025?

1.2.2. Problemas específicos

a) ¿Cuáles son las concentraciones iniciales de nitrógeno y fósforo en las aguas residuales domésticas del distrito de Rosaspata?
b) ¿Cuáles son las concentraciones finales de nitrógeno y fósforo después de aplicar el tratamiento experimental con Lemna minor en condiciones de campo a la intemperie?
c) ¿Cuál es la eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo lograda por Lemna minor al comparar las concentraciones iniciales y finales, y qué capacidad depuradora presenta?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia de Lemna minor en la remoción de nitrógeno y fósforo presentes en aguas residuales domésticas del distrito de Rosaspata, 2025.

1.3.2. Objetivos específicos

a) Determinar las concentraciones iniciales de nitrógeno y fósforo en las aguas residuales domésticas del distrito de Rosaspata.
b) Aplicar el tratamiento experimental con Lemna minor en condiciones de campo a la intemperie y medir las concentraciones finales de nitrógeno y fósforo tras el tratamiento.
c) Analizar la eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo lograda por Lemna minor comparando los valores iniciales y finales, para establecer su capacidad depuradora.

1.4. Justificación de la investigación

1.4.1. Justificación Practica

El uso de Lemna minor como alternativa de tratamiento de aguas residuales representa una solución práctica debido a su fácil implementación, rápida adaptación y mínima necesidad de infraestructura especializada, lo cual permite que comunidades rurales puedan aplicarla sin requerir conocimientos técnicos avanzados (Landesman, Parker, & Prince, 2005). Esta especie posee una alta capacidad de crecimiento y puede instalarse en estanques, balsas o recipientes simples, convirtiéndola en una herramienta eficiente para disminuir nutrientes como nitrógeno y fósforo en entornos con limitaciones tecnológicas (Zimmo, Van der Steen, & Gijzen, 2004).

Asimismo, desarrollar el experimento en condiciones de campo a la intemperie permite validar la efectividad de Lemna minor en situaciones reales, considerando que muchos sistemas de tratamiento en zonas rurales operan bajo condiciones ambientales variables (Reddy & DeBusk, 1987). La investigación ofrece resultados directamente aplicables en el distrito de Rosaspata, donde las soluciones prácticas y de bajo costo son esenciales para mejorar la gestión de aguas residuales domésticas (MINAM, 2017).

1.4.2. Justificación social

La presencia de aguas residuales domésticas sin tratamiento adecuado genera riesgos sanitarios para la población, incluyendo enfermedades gastrointestinales y contaminación de fuentes usadas para consumo humano o actividades productivas (Metcalf & Eddy, Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento y recuperación de recursos (5.ª ed.), 2016). Evaluar una alternativa

como Lemna minor permite generar evidencia que contribuya a reducir estos riesgos, mejorando la calidad del agua y, en consecuencia, la salud pública del distrito de Rosaspata (Correll, 1998).

Además, la implementación de tecnologías naturales como Lemna minor promueve la participación comunitaria, ya que su mantenimiento es sencillo y puede ser gestionado por familias o juntas vecinales. Esto fortalece la responsabilidad local frente al manejo del recurso hídrico y fomenta prácticas de protección del ambiente, generando beneficios sociales sostenibles (Vulpe, Bărbulescu, & Grigorescu, 2025).

1.4.3. Justificación ambiental

La manifestación de nitrógeno y fósforo en cuerpos de agua genera eutrofización, pérdida de biodiversidad y degradación de ecosistemas acuáticos, procesos ampliamente documentados en la literatura ambiental internacional (Preisner, 2021). En este contexto, el uso de Lemna minor permite reducir significativamente estos nutrientes mediante procesos de bioasimilación, favoreciendo la mejora de la pureza del agua y a la mitigación del impacto ambiental (Yang, Wu, Hao, & He, 2008).

Asimismo, los sistemas de tratamiento que emplean en macrófitas

flotantes son reconocidos como alternativas ecológicas que no generan impactos secundarios y funcionan imitando procesos naturales de filtración biológica (Reddy & DeBusk, 1987). Su aplicación en zonas rurales como Rosaspata favorece el equilibrio ecológico local y reduce la presión sobre los ecosistemas asociados a la cuenca del Altiplano, donde la contaminación por aguas residuales representa un problema recurrente (MINAM, 2017).

1.4.4. Justificación económica

El tratamiento convencional de aguas residuales requiere infraestructura costosa, consumo energético y personal especializado, lo cual dificulta su implementación en contextos rurales con recursos limitados. En contraste, Lemna minor constituye una alternativa económica debido a su disponibilidad natural, facilidad de reproducción y bajo costo de mantenimiento, lo que permite su adopción sin comprometer el presupuesto de municipalidades o familias (Landesman, Parker, & Prince, 2005).

Además, al reducir las cargas de nitrógeno y fósforo, se minimizan gastos asociados a la mitigación de impactos ambientales y sanitarios, como la descontaminación de cuerpos de agua o la atención de enfermedades asociadas con el manejo inadecuado de aguas residuales. La viabilidad económica de Lemna minor en tratamientos descentralizados la convierte en una opción sostenible para el distrito de Rosaspata y otras localidades con condiciones similares (Vulpe, Bărbulescu, & Grigorescu, 2025).

1.5. Hipótesis de la investigación

1.5.1. Hipótesis general

Lemna minor presenta una alta eficiencia en la remoción de nitrógeno y fósforo de las aguas residuales domésticas del distrito de Rosaspata, 2025.

1.5.2. Hipótesis específicas

H.E.1: Las aguas residuales domésticas del distrito de Rosaspata presentan concentraciones iniciales elevadas de nitrógeno y fósforo antes del tratamiento con Lemna minor.

H.E.2: Después del tratamiento experimental con Lemna minor en condiciones de campo a la intemperie, las concentraciones finales de nitrógeno y fósforo disminuyen significativamente.

H.E.3: La eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo lograda por Lemna minor es significativa al comparar las concentraciones iniciales y finales, demostrando su capacidad depuradora.

1.6. Variables

1.6.1. Variable independiente

- Tiempo de permanencia de la Lemna minor.

1.6.2. Variable dependiente

- Remoción de nitrógeno y fósforo de las aguas residuales domésticas.

1.7. Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalización de variables de la presente investigación.

Variable	Dimensión	Indicador	Unidad de medida / Escala	Técnica
Variable independiente: tiempo de permanencia de *Lemna minor*	Remoción de nutrientes	Porcentaje de remoción de nitrógeno	% de remoción	Análisis de laboratorio y cálculo estadístico
		Porcentaje de remoción de fósforo	% de remoción	Análisis de laboratorio y cálculo estadístico

Variable dependiente: Remoción de nitrógeno y fósforo de las aguas residuales domésticas	Nitrógeno en aguas residuales	Concentración inicial de nitrógeno	mg/L	Análisis de laboratorio
		Concentración final de nitrógeno	mg/L	Análisis de laboratorio
	Fósforo en aguas residuales	Concentración inicial de fósforo	mg/L	Análisis de laboratorio
		Concentración final de fósforo	mg/L	Análisis de laboratorio

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

El artículo presentado por Zimmo (2004), en su estudio tuvo como finalidad evaluar la eficiencia de Lemna minor para extraer nitrógeno y fósforo en lagunas de tratamiento de aguas residuales. Aplicando una metodología de tipo experimental, diseño cuasi–experimental y nivel explicativo, mediante estanques expuestos a la intemperie durante 12 semanas, donde se utilizaron aguas residuales domésticas con concentraciones iniciales de 62 mg/L de nitrógeno y 11 mg/L de fósforo; después del tratamiento, las concentraciones finales fueron 23 mg/L de nitrógeno y 6 mg/L de fósforo, alcanzando remociones del 63 % de N y 45 % de P, lo que evidencia la capacidad de Lemna minor para reducir nutrientes en sistemas naturales. Concluyendo que esta especie es más eficiente que los sistemas algales tradicionales y adecuada para contextos rurales sin infraestructura avanzada.

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

Por otro lado, Landesman et al. (2005), en su artículo titulado "Modelización del crecimiento de lenteja de agua en sistemas de tratamiento de aguas hidricos", tuvo como finalidad modelar el crecimiento de Lemna minor y determinar su capacidad depuradora en aguas residuales municipales. Para ello aplicaron una metodología de tipo experimental aplicada, con diseño completamente controlado y nivel explicativo, utilizando seis estanques rectangulares de 200 L ubicados al aire libre durante 21 días continuos, en los que se mantuvieron condiciones semejantes a un sistema descentralizado de tratamiento. Para ello, se inoculó Lemna minor con una densidad inicial de 250 g/m², y las aguas residuales presentaron concentraciones iniciales de 48 mg/L de nitrógeno total y 9 mg/L de fósforo total. Los resultados mostraron que al término del tratamiento las concentraciones finales fueron 14 mg/L de nitrógeno y 4 mg/L de fósforo, equivalentes a remociones del 70 % y 55 %, respectivamente; además, la biomasa aumentó en más del 180 %, pasando de 250 g/m² a 700 g/m², lo cual indicó una tasa de crecimiento de 18 g/m²/día. Concluyendo que el rápido incremento de biomasa de Lemna minor está estrechamente vinculado a la absorción de nutrientes, lo que la hace en una planta altamente eficaz para sistemas de tratamiento descentralizados, sostenibles y de bajo costo operativo.

En cambio, Iqbal et al. (2019), en su artículo denominada "Eficiencia de crecimiento y depuración de nutrientes de la lenteja de agua en condiciones climáticas naturales", tuvieron como objetivo evaluar la eficiencia de Lemna minor en la remoción de nitrógeno y fósforo bajo condiciones ambientales naturales. El estudio fue experimental, con un diseño comparativo y nivel

explicativo, utilizando tanques de 50 L expuestos al sol durante 10 días, con réplicas en unidades con planta y sin planta (control). Las concentraciones iniciales fueron 70 mg/L de N y 12 mg/L de P, y se realizaron muestreos diarios con análisis por espectrofotometría, digestión ácida y técnicas colorimétricas. Los resultados mostraron que el tratamiento con Lemna minor redujo el nitrógeno a 26 mg/L y el fósforo a 5.7 mg/L, correspondientes a remociones del 63 % para N y 52 % para P. En contraste, los tanques control apenas redujeron 12 % de N y 7 % de P. La biomasa aumentó 230 %, lo que evidenció que la absorción vegetal fue el mecanismo dominante. Se concluye que Lemna minor mantiene una eficiencia depuradora elevada incluso bajo condiciones ambientales extremas, como altas temperaturas, radiación solar intensa y fluctuaciones climáticas propias de regiones semiáridas, demostrando que su capacidad de remoción no depende de condiciones de laboratorio sino que responde satisfactoriamente en ambientes reales; ello la convierte en una opción firme, duradera y flexible para el procesamiento descentralizado de aguas hidricas en zonas rurales con limitaciones tecnológicas.

El artículo de Zhang, Feng y Liu (2020), titulada “Mejora de la eliminación de nutrientes a través del uso de Lemna minor en aguas residuales domésticas”, evaluaron la eficiencia de Lemna minor en la depuración de nitrógeno y fósforo bajo condiciones ambientales propias de regiones semiáridas. Aplicando una metodología de tipo experimental aplicada, con un diseño comparativo con grupo control y nivel explicativo, donde se emplearon tanques de 50L colocados completamente a la intemperie durante 10 días, expuestos a fluctuaciones de temperatura entre 27–38 °C y radiación solar intensa, simulando un sistema real

de tratamiento rural. El procedimiento incluyó una densidad inicial uniforme de Lemna minor de 150 g/m², muestreos diarios. Los resultados indicaron que las aguas residuales tenía una manifestación inicial de 70 mg/L de nitrógeno y 12 mg/L de fósforo, reduciéndose tras el tratamiento a 26 mg/L de nitrógeno y 5.7 mg/L de fósforo, lo que corresponde a remociones del 63 % para N y 52 % para P; mientras que en los tanques control las reducciones fueron mínimas (12 % en N y 7 % en P). Adicionalmente, se registró un incremento de 230 % en biomasa, una cobertura superficial total del estanque después de 5 días y una disminución de turbidez del 28 %, demostrando un efecto combinado de bioasimilación, sombreamiento y reducción de microalgas. Se concluye que Lemna minor presenta una eficiencia depuradora notable incluso bajo condiciones ambientales extremas, manteniendo una alta tasa de absorción de nutrientes, crecimiento acelerado y capacidad para modificar positivamente la calidad del agua; lo que confirma su potencial como tecnología natural, económica y robusta para el tratamiento descentralizado de aguas hídricas en zonas rurales con infraestructura limitada, evidenciando ventajas operativas frente a sistemas que requerirían control climático o equipamiento especializado.

En cambio, Vulpe et al. (2025) en su revisión titulada “Usos de Lemna minor en sistemas sostenibles de tratamiento de agua”, analizaron de manera exhaustiva la evidencia científica disponible sobre la eficiencia de Lemna minor en la remoción de nutrientes en diferentes tipos de aguas residuales, especialmente domésticas. Su metodología consistió en una revisión sistemática de literatura siguiendo rigurosamente el protocolo PRISMA, que incluyó la identificación inicial de 312 artículos, la eliminación de duplicados, la evaluación

mediante criterios de elegibilidad y finalmente la selección de 54 estudios publicados entre 2000 y 2024, provenientes de América, Europa y Asia. Los estudios analizados reportaron valores de concentración inicial de 50–100 mg/L de nitrógeno total y 8–20 mg/L de fósforo total, mientras que las concentraciones finales fluctuaron entre 10–45 mg/L de N y 3–10 mg/L de P, lo que representa remociones promedio del 40–85 % para nitrógeno y 30–70 % para fósforo, dependiendo del clima, densidad vegetal y tiempo de exposición. Asimismo, se identificaron estudios donde Lemna minor redujo la eutrofización en un 30–40 % debido al sombreado que genera sobre la columna de agua. Se concluye que Lemna minor se consolida como una de las macrófitas flotantes más eficientes, versátiles y sostenibles para sistemas de tratamiento descentralizado, ya que mantiene altos porcentajes de remoción en condiciones climáticas diversas, requiere baja inversión, es fácil de manejar y puede implementarse tanto en ambientes controlados como en condiciones de campo, lo que la convierte en una tecnología apropiada para comunidades rurales con limitaciones técnicas y económicas.

2.1.2. Antecedentes nacionales

En la investigación de Álvarez y Muñoz (2021) tuvieron como objetivo evaluar la capacidad de estas especies para remover nitrógeno, fósforo y materia orgánica. El estudio utilizó una metodología experimental aplicada, con diseño cuasi-experimental, empleando unidades experimentales de 40 L bajo condiciones ambientales reales durante 12 días. Las muestras fueron analizadas mediante métodos APHA para N total, P total, DBO y DQO. De acuerdo con los resultados obtenidos, Al principio, las muestras de aguas servidas domésticas

tenían, en cuanto a nutrientes, un nivel de 56 mg/L de nitrógeno total y 8.05 mg/L de fósforo total. Respecto a la materia orgánica, los valores iniciales arrojaron 165 mg/L de demanda bioquímica de oxígeno y 383.8 mg/L de demanda química de oxígeno. Luego de aplicar el proceso con las dos especies, el tratamiento con Lemna minor logró sacar un 60.81% del nitrógeno total, un 53.80% del fósforo total, un 78.71% de la DBO5 y un 83.64% de la DQO, por otro lado, al emplear Lemna gibba se alcanzaron porcentajes de eliminación del 61.32% para nitrógeno total, 57.37% para fósforo total, 77.46% para DBO5 y 80.99% para DQO, en ese orden. En cuanto a la medición de la velocidad específica de crecimiento de Lemna minor, Lemna gibba y su mezcla, al día 17 se registraron valores de 0.1186 d^{-1}, 0.1203 d^{-1} y 0.1229 d^{-1}, cifras que dependieron directamente de qué tantos nutrientes había disponibles. Para cerrar, el uso de Lemna minor, Lemna gibba y la combinación de ambas permitió una muy buena capacidad de limpieza de nutrientes y material orgánico presente en las aguas servidas del distrito de Independencia.

En cambio, Loconi y Purizaca (2023) en su investigación tuvo como objetivo de evaluar la capacidad de fitorremediación de estas macrófitas en aguas residuales de origen agroindustrial y doméstico mezclado. La metodología fue experimental, con diseño comparativo entre dos especies de macrófitas y un grupo control sin plantas, empleando estanques de 60 L durante 15 días. Los análisis siguieron los métodos APHA, midiendo nitrógeno total, amonio, nitratos, fósforo total, turbidez y DQO. Según el informe oficial, Lemna minor presentó una reducción significativamente mayor en los parámetros evaluados, especialmente en nitrógeno total y amonio, logrando reducciones porcentuales

superiores a las alcanzadas por Salvinia spp.; por ejemplo, Lemna minor redujo el nitrógeno total en más del 40 %, mientras que Salvinia spp. solo alcanzó reducciones cercanas al 25–30 %, y el grupo control no superó el 10 %. Asimismo, la turbidez disminuyó más del 35 % con Lemna minor, en comparación con un 18–22 % con Salvinia spp. y menos del 10 % en el control. La DQO también mostró reducciones notables, siendo Lemna minor la especie con mayor eficiencia relativa. Estas diferencias fueron atribuidas a la mayor tasa de aumento de Lemna minor, su cobertura densa y su mayor habilidad de bioasimilación. Se finalizo que Lemna minor es una herramienta óptima para la remoción de nutrientes en zonas con limitados tratamientos formales de aguas residuales.

Tomando en cuenta a Rivera et al. (2024) tuvo como finalidad de evaluar comparativamente la eficaz fitorremediadora de Lemna minor y Eichhornia crassipes en la reducción de sólidos totales y sólidos disueltos en aguas residuales domésticas, aplicando una metodología experimental, con un diseño completamente aleatorizado, empleando tres tratamientos (control, Lemna minor y Eichhornia crassipes) y analizando estadísticamente los resultados mediante ANOVA y la prueba post hoc de Bonferroni a un 95 % de confianza. los hallazgos reflejaron diferencias estadísticamente relevantes entre los distintos procedimientos aplicados para los sólidos totales ($F = 686163$, $p = 0.000$) y sólidos disueltos ($F = 970710$, $p = 0.000$), confirmándose mediante Bonferroni que Lemna minor presentó las menores concentraciones finales y las mayores diferencias de medias respecto al grupo control (−470.33 mg/L para sólidos disueltos y −440.00 mg/L para sólidos totales), superando también a Eichhornia

crassipes. Las comparaciones indicaron que ambos helechos acuáticos ejercieron efecto fitorremediador, pero Lemna minor fue estadísticamente superior, demostrando mayor capacidad para absorber sólidos disueltos y totales. Los autores concluyen que Lemna minor es la especie más eficaz en la depuración de aguas hidricas domésticas debido a su mayor estabilidad fisiológica y menor susceptibilidad a clorosis durante el experimento.

En cambio, Carbajal (2024) en su tuvo como finalidad evaluar la capacidad depuradora de Lemna minor en aguas residuales urbanas provenientes de la laguna facultativa “San Francisco”, aplicando un diseño experimental comparativo con dos sistemas operados durante 30 días y tiempos de retención de 10 días. Ambos sistemas fueron instalados en estanques de vidrio bajo condiciones controladas, diferenciándose solo por la presencia de Lemna minor. Los hallazgos mostraron que el tratamiento con Lemna minor alcanzó una remoción del 99 % de nitrógeno amoniacal, reduciendo prácticamente la totalidad del contenido inicial reportado en el afluente; mientras que el sistema control solo logró reducciones mínimas, inferiores al 20 %. Similarmente, Lemna minor logró una disminución del 77 % de fósforo total, mostrando que más de tres cuartas partes del fósforo presente en el agua fueron retenidas o incorporadas por la biomasa, mientras que el sistema sin planta apenas registró reducciones cercanas al 10–15 %. Estas diferencias evidenciaron que el sistema con Lemna minor alcanzó concentraciones finales de nutrientes significativamente menores en comparación con el control, confirmando que la cobertura vegetal incrementó la bioasimilación, redujo la disponibilidad de luz para microorganismos competidores y aceleró la

sedimentación natural. En conclusión, Lemna minor demostró ser altamente eficaz con el fin de remover nitrógeno y fósforo en sistemas lagunares facultativos, posicionándose como una tecnología ecológica, económica y perfectamente adaptable para el tratamiento de aguas residuales urbanas en la costa peruana.

Por otro lado, en la investigación de Campos (2022) tuvo como finalidad determinar la eficiencia comparativa de Lemna minor y Eichhornia crassipes en la remoción de nitratos, fosfatos y sulfatos. La investigación fue experimental, con diseño completamente aleatorizado, aplicando tres tratamientos: T1 (Lemna minor), T2 (Eichhornia crassipes) y T3 (combinación de ambas), cada uno con tres repeticiones en estanques de 100 litros de agua grises doméstica, monitoreados durante tres meses mediante evaluaciones mensuales del contenido de nitratos, fosfatos y sulfatos siguiendo protocolos estándar. Los resultados demostraron una elevada capacidad de remoción de nitratos y fosfatos en todos los tratamientos, logrando Lemna minor (T1) una extracción de 82.58 % de nitratos y 69.26 % de fosfatos, mientras que Eichhornia crassipes (T2) alcanzó 82.36 % de nitratos y 99 % de fosfatos, y el tratamiento combinado (T3) obtuvo 83.3 % de nitratos y 99 % de fosfatos, evidenciando que la presencia de macrófitas incrementa significativamente la depuración de nutrientes. No obstante, ninguno de los tratamientos logró remover sulfatos de manera efectiva, manteniéndose niveles similares al inicio del experimento. La evaluación estadística arrojó que no hubo diferencias de peso entre los tratamientos para la depuración de nitratos y fosfatos, aunque todos mostraron alta eficiencia para dichos parámetros, mientras que para sulfatos no se observó efecto

fitorremediador. En conclusión, Lemna minor y Eichhornia crassipes demostraron ser alternativas viables para la depuración de nitratos y fosfatos en aguas hidricas domésticas en condiciones de campo en Cajamarca.

Sin embargo, Aquino (2022) en su tesis desarrolló un estudio cuyo objetivo fue determinar la eficiencia de Lemna minor en la depuración de nutrientes de aguas residuales procedentes de estanques de crianza de peces. La investigación aplicó un enfoque experimental, considerando cuatro tratamientos con diferentes volúmenes de agua residual (T1=500 mL, T2=250 mL, T3=125 mL y T4=62.5 mL), a los cuales se introdujeron 20 g de Lemna minor en recipientes plásticos de 500 mL con superficie útil de 78.4 cm^2, manteniendo la temperatura del agua a 21 ± 0.5 °C. Los ensayos tuvieron una duración de 14 días, evaluándose parámetros fisicoquímicos antes y después del tratamiento, tales como DBO_5, fósforo total, nitrógeno total, pH, sólidos suspendidos totales y conductividad eléctrica. Los hallazgos mostraron que Lemna minor logró remociones significativas: 88.9 % para DBO_5, 40.49 % para fósforo total, 67.08 % para nitrógeno total y 49.96 % para materia suspendidos, además de una disminución del pH de 6.8 a 6.4. La biomasa de Lemna minor incrementó notablemente, registrándose su mayor crecimiento en el tratamiento T1 con un aumento del 33.5 %, lo cual indica una alta actividad metabólica asociada a la absorción de nutrientes. El estudio concluyó que Lemna minor es altamente eficiente en la remoción de nitrógeno y materia orgánica en efluentes de piscicultura, ubicándola como una opción amigable con el ambiente y factible para la depuración de efluentes de bajo costo y fácil implementación.

En la investigación realizada por Castillo (2017) con el objetivo de determinar la eficaz depuradora de Lemna sp y Eichhornia crassipes en la eliminación de nutrientes en un sistema real de tratamiento. El estudio aplicó una metodología experimental de campo con un monitoreo continuo durante seis meses, evaluando parámetros de nitrógeno total, nitratos, fósforo total, fosfatos y oxígeno disuelto, mediante muestreos mensuales en el afluente y efluente de cada tratamiento, además de mediciones semanales de temperatura, pH, caudal y tiempo de contención hidráulica en tres puntos de monitoreo: PM1 (tanque de distribución), PM2 (sistema con Lemna sp) y PM3 (sistema con Eichhornia crassipes). Los resultados mostraron que Lemna sp alcanzó eficiencias de 52 % en nitrógeno total, 37 % en nitratos, 31 % en fósforo total y 34 % en fosfatos, mientras que Eichhornia crassipes presentó valores superiores, logrando 61 % de remoción de nitrógeno total, 34 % de nitratos, 73 % de fósforo total y 68 % de fosfatos, evidenciando un desempeño significativamente mayor en la eliminación de nutrientes. El oxígeno disuelto aumentó de un valor promedio de 1.48 mg/L en PM1 a 2.51 mg/L en el sistema con Lemna sp y a 3.06 mg/L en el sistema con Eichhornia crassipes. Asimismo, la temperatura promedio varió de 19.02 °C en el tanque de distribución a 18.74 °C en PM2 y 18.63 °C en PM3, mientras que el pH mostró incrementos y ajustes fisiológicos: de 7.66 en PM1 pasó a 8.08 en PM2 y descendió a 7.25 en PM3. El caudal de operación fue de 0.030 L/min logrando un tiempo de acumulación hidráulica de 5 días para cada sistema en serie. En conclusión, el estudio determinó que Eichhornia crassipes mostró los ritmos más elevados de extracción de nutrientes gracias a sus rasgos internos, consolidándose como una alternativa biotecnológica eficiente, sostenible y

adaptable para la mejora de la calidad de aguas hidricas domésticas en sistemas reales de tratamiento.

En su investigación de Quispe et al. (2021) desarrollaron una investigación cuyo objetivo fue determinar la eficiencia depuradora de Eichhornia crassipes y Lemna minor en la eliminación de nitrógeno (N) y fósforo (P) de aguas hídricas municipales tratadas en la planta de recuperación de EMAPACOP S.A. La metodología aplicada fue experimental y explicativa, realizando ensayos tanto a nivel de laboratorio como en condiciones controladas de crecimiento, donde se cultivaron ambas especies durante cuatro meses bajo condiciones reguladas de luz, temperatura y pH, y se evaluaron sus capacidades de remoción durante 5 días. Las plantas fueron sometidas a pruebas de crecimiento en aguas residuales municipales y posteriormente expuestas a muestras experimentales, analizándose concentraciones iniciales y finales de nitrógeno y fósforo. Los resultados mostraron que Eichhornia crassipes logró remover 70–80 % del nitrógeno y 55–60 % del fósforo, mientras que Lemna minor alcanzó reducciones menores pero consistentes, situándose en rangos intermedios de eficiencia. Además, el tratamiento experimental evidenció disminuciones de 0.34 mg/L a 0.09 mg/L en nitrógeno y de 5 mg/L a 0.53 mg/L en fósforo, mostrando una fuerte capacidad bioasimiladora de nutrientes por parte de ambas especies. Estos valores confirmaron que las macrófitas emergentes y flotantes pueden mejorar significativamente la calidad de aguas residuales urbanas y disminuir el riesgo de eutrofización en cuerpos receptores. En conclusión, las dos especies demostraron potencial para ser empleadas

como tecnologías verdes de bajo costo, siendo Eichhornia crassipes la de mayor eficiencia en la remoción de nutrientes.

2.1.3. Antecedentes regionales

En la investigación de Pari (2024) desarrolló un estudio orientado a evaluar la eficiencia de dos especies hidrófitas Lemna minor e Hydrocotyle vulgaris en la depuración de aguas residuales domésticas mediante procesos de rizofiltración en condiciones reales del altiplano puneño. La investigación utilizó una metodología experimental de enfoque cuantitativo, con un tipo de investigación aplicada y muestreo no probabilístico por conveniencia, tomando 480 litros de agua residual para tratamiento y 500 mL para análisis en laboratorio. Se establecieron cuatro tratamientos con concentraciones de 20 unidades/m² de Hydrocotyle vulgaris y Lemna minor, con tiempos de disminución hidráulica de 4 y 6 días, respectivamente, realizando mediciones de parámetros como sólidos totales, turbidez, nitrógeno total, amonio, fosfatos y conductividad. Los resultados demostraron que Lemna minor alcanzó una efectividad promedio de 75.96 % en la rizofiltración del agua residual, mientras que Hydrocotyle vulgaris obtuvo una eficiencia ligeramente superior de 80.29 %, evidenciando que ambas especies presentan capacidad significativa para remover contaminantes. Asimismo, el análisis estadístico realizado mediante ANOVA en el software SPSS, con un nivel de significancia del 5 %, arrojó un valor p de 0.046, indicando diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. El estudio concluye que tanto Lemna minor como Hydrocotyle vulgaris presentan un alto potencial para la eliminación de aguas depuradas domésticas en sistemas

naturales de bajo costo dentro de la región Puno, constituyendo alternativas viables para tratamientos descentralizados en zonas rurales como Cabanillas.

Por otro lado, Calisaya (2023) en su investigación desarrolló una investigación orientada a evaluar la evolución temporal de la cobertura de Lemna gibba en la bahía interior del Lago Titicaca mediante técnicas avanzadas de teledetección. El estudio empleó una metodología cuantitativa, observacional y longitudinal, basada en el análisis de 96 imágenes satelitales Landsat 7 correspondientes al período 2013–2020, todas obtenidas del catálogo oficial de la USGS. Las imágenes fueron descargadas en formato multiespectral de la banda 5, lo que permitió identificar con precisión la cobertura vegetal flotante asociada a la lenteja de agua. Para ello, se aplicó un algoritmo matemático de clasificación del área cubierta por Lemna gibba mediante conteo de píxeles, procesando las 12 imágenes correspondientes a cada año del periodo de estudio. Posteriormente, la autora estableció una correlación estadística entre el tiempo (años) y la extensión de la planta invasora, obteniendo una ecuación de regresión lineal: Proliferación de cobertura de Lemna gibba = –696.674 + 0.353 (año). El análisis permitió determinar que la tendencia anual de crecimiento fue de 31.77 m² por año, evidenciando un incremento sostenido de la proliferación de la macrófita flotante en la bahía interior de Puno. El estudio concluye que la presencia creciente de Lemna gibba está asociada a la eutrofización del lago y al incremento de nutrientes provenientes de descargas domésticas y agrícolas, generando un impacto ecológico significativo.

En la investigación de Choquehuanca y Apaza (2019) realizaron un estudio exhaustivo sobre la capacidad depuradora de las lagunas primarias y

secundarias ubicadas en el sistema de tratamiento municipal de Juliaca, situado a más de 3 800 m s. n. m. La investigación aplicó una metodología descriptiva–experimental, con un monitoreo mensual durante seis meses, en el cual se analizaron parámetros de nitrógeno total, nitratos, fósforo total y fosfatos, además de parámetros complementarios como pH, temperatura, conductividad y DBO, siguiendo los protocolos APHA. Los resultados evidenciaron reducciones significativas pese al clima frío característico del altiplano: en la laguna primaria se registró una remoción del 37 % de nitrógeno total y 28 % de fósforo total, mientras que la laguna secundaria logró aumentar la eficiencia a 55 % en nitrógeno total y 42 % en fósforo total, atribuyéndose estas mejoras al mayor tiempo de retención hidráulica y a la mayor presencia de macrófitas nativas como totora y llacho, que favorecen procesos de bioasimilación y sedimentación de nutrientes. El estudio concluye que, aunque no se empleó Lemna minor, los resultados demuestran que las plantas acuáticas altoandinas influyen significativamente en la reducción de nutrientes y constituyen un antecedente directo para investigaciones con especies de crecimiento rápido como Lemna minor en la región Puno.

Por otro lado, Mamani y Hancco (2020) en su tesis tuvo como objetivo evaluaron la eficiencia de especies acuáticas del altiplano: principalmente Schoenoplectus tatorae (totora) y Potamogeton pectinatus, en la reducción de nutrientes en aguas altamente contaminadas provenientes de descargas domésticas. La metodología aplicada fue experimental, utilizando biofiltros naturales y ensayos controlados durante 21 días, en los cuales se instalaron macrófitas en tanques de 60 L con tres repeticiones por especie, realizando

muestreos semanales de nitrógeno total, amonio, nitratos, fósforo total y fosfatos. Los resultados mostraron que la totora alcanzó remociones del 64 % de nitrógeno total, 51 % de fósforo total y reducciones parciales de nitratos, mientras que Potamogeton pectinatus obtuvo 48 % de eliminación de nitrógeno total y 37 % de fósforo total, demostrando un menor pero igualmente significativo desempeño. Los autores atribuyen las mayores eficiencias de la totora a su biomasa abundante, su capacidad de formar rizomas extensos y su mayor tasa metabólica incluso en temperaturas inferiores a 12 °C. Este estudio constituye un antecedente directo para evaluar el comportamiento de macrófitas flotantes como Lemna minor en la región Puno, pues evidencia que la fitorremediación es viable bajo condiciones altoandinas.

Sin embargo, Canales (2010) tuvo como finalidad evaluar la proliferación, biomasa y dinámica ecológica de Lemna gibba (lenteja de agua) en la bahía interior de Puno, con el propósito de determinar su crecimiento estacional y su relación con el proceso de eutrofización generado por descargas domésticas. El estudio aplicó una metodología ecológica–cuantitativa, realizando muestreos de campo sistemáticos durante diferentes épocas del año y midiendo parámetros como densidad biomásica (kg/m²), temperatura del agua, pH y concentración de nutrientes (N, P). Los hallazgos indicaron que la biomasa promedio de Lemna gibba en la bahía interior alcanzó valores significativos, con un máximo registrado durante la época cálida, cuando la temperatura del agua varió entre 6.3 °C y 13.7 °C, condiciones que favorecieron un incremento acelerado de la cobertura vegetal. Asimismo, se determinó que las altas concentraciones de nutrientes (N y P) provenientes del deficiente procesamiento de las aguas

servidas urbanas potenciaron la proliferación de la macrófita, formando extensas capas superficiales que afectaron la oxigenación del lago y aceleraron el proceso de eutrofización. El autor señaló que la presencia excesiva de Lemna gibba puede generar impactos ecológicos negativos, como el bloqueo de la luz solar, disminución del oxígeno disuelto y desplazamiento de especies nativas. Sin embargo, se resalta que esta especie presenta un elevado potencial de aprovechamiento en sistemas de fitorremediación debido a su gran facultad para asimilar nutrientes, lo cual representa una oportunidad para desarrollar estrategias de manejo sostenible. En conclusión, se determinó que la proliferación de Lemna gibba está vinculada directamente a la alta carga de elementos nutritivos en la ensenada interna de Puno y se requiere un manejo técnico adecuado para equilibrar su función ecológica y controlar sus efectos negativos en el ecosistema.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Aguas residuales

Vienen de lo que usamos en casa o de los desechos industriales, tanto dentro como fuera de las ciudades. Luego de pasar por algún proceso, suelen mostrar cambios en sus propiedades habituales: el nivel de pH, la turbiedad, el color, el olor, la conductividad eléctrica, los sólidos en suspensión. Además, muchas veces traen consigo sustancias orgánicas, compuestos químicos y otras cosas más (Moscoso Cavallini & Egocheaga Young, 2004).

Las aguas servidas también se conocen como aguas dispersoras, porque traen muchas impurezas de distintos tamaños y con distinta composición química. Una buena parte de esas impurezas se puede sacar dejándolas

decantar, pero muchas otras se quedan flotando o suspendidas por lo pequeñas que son (Llampi Pineda, 2023).

Son desperdicios líquidos y basura sólida generados por el quehacer cotidiano de las personas y que vienen de las viviendas, trabajos, y entidades, vienen de fábricas, tiendas y otras actividades. Todo eso lo recolecta el alcantarillado y lo lleva hasta una planta de tratamiento o directo al lugar donde se descarga finalmente. El flujo de estas aguas no es parejo durante el día. Por ejemplo, en los sistemas de alcantarillado separativos, el flujo baja un montón durante la madrugada. Y según el tamaño del pueblo o ciudad al que dan servicio, ese caudal más pesado puede llegar a ser hasta tres veces más grande que el caudal promedio del día. Así que estas aguas suelen traer un montón de cosas, tanto naturales como hechas por el hombre, y algunas pueden ser más o menos peligrosas para la gente, los bichos y el medioambiente. (Váscones, 2017).

2.2.2. Aguas residuales domesticas

Las aguas servidas de las casas, oficinas y locales comerciales se juntan todas y viajan por tuberías bajo tierra hasta llegar a una laguna de estabilización, que casi siempre queda retirada de la ciudad. (Requena Maldonado, 2023).

A las aguas que salen del uso en casas o fábricas les decimos aguas servidas. También se conocen como aguas residuales o aguas negras. Se llaman residuales porque, después de usarlas, se convierten en un desecho, algo que ya no le sirve a quien la usó directamente. Y lo de negras les viene por el tono que suelen tener (Albarracín Heredia, 2018).

Algunos especialistas marcan una distinción entre aguas sucias y efluentes contaminados, aclarando que las primeras provendrían del consumo en los hogares y las segundas serían la combinación de aguas caseras e industriales. De cualquier forma, están formadas por todas esas aguas que terminan en el sistema de drenaje sin que nadie las trate después de usarlas (Quispe Humire, 2013).

Las aguas servidas que juntan los vecinos y los municipios terminan yéndose, al final del día, a algún río, lago o al suelo mismo. La pregunta complicada es: ¿qué tantos contaminantes traen esa agua y hasta qué punto hay que limpiarlos para no dañar el entorno? Eso no se puede responder igual para todos los casos. Para saberlo hay que mirar bien lo que pasa en cada lugar, sus condiciones y sus necesidades. Y ahí se usan tanto los conocimientos científicos como la experiencia que ya se tiene en ingeniería, sin olvidar respetar las leyes y las normas que ya existen sobre la calidad del agua. Asimismo, Las aguas servidas traen compuestos orgánicos e inorgánicos que pueden hacer daño, además de bichos microscópicos que causan enfermedades. Para sacar o desactivar esos contaminantes se necesita aplicar procesos físicos, químicos y también microbiológicos. En el caso de las aguas grises de las casas, su mezcla incluye las aguas grises, las aguas grises (las que salen de lavar, bañarse y cocinar) y las que vienen de procesar alimentos (Larico Mamani, 2017).

Composición de las aguas residuales domésticas

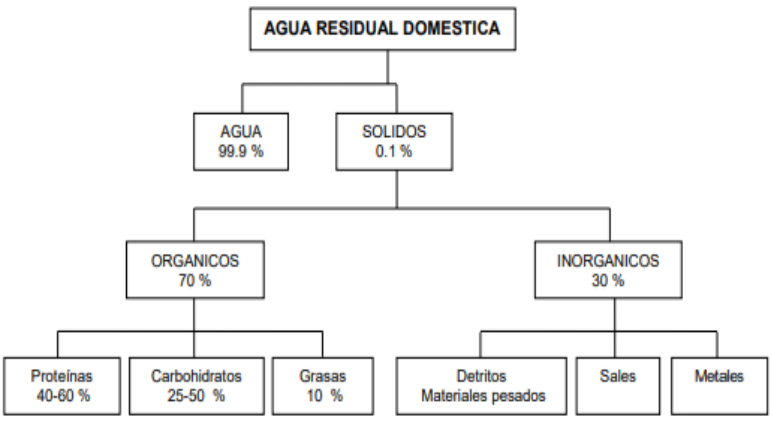
Las aguas servidas de las casas son casi pura agua, como un 99.9% si nos fijamos en su peso. El resto, ese 0.1%, son sólidos que quedan flotando o suspendidos. Y de esa pequeña parte, el 70% corresponde a sustancias

orgánicas y el 30% a componentes inorgánicos como arenas, sales y metales; siendo justo ese 0.1% el que necesita procesarse en las plantas de tratamiento. La mezcla del agua sucia depende del uso que se le haya dado, y eso cambia de acuerdo a la realidad social y económica de cada comunidad, pero también influyen el clima, la cultura, cómo se usa el suelo y otras cosas más. (Quispe Humire, 2013).

Qué tantos contaminantes traen el agua y en qué cantidad depende, en buena parte, de las costumbres y la situación económica de la gente que la genera. También influye de dónde viene esa agua y cuánto caudal llega. En esencia, las aguas servidas están hechas de agua, sólidos disueltos y sólidos en suspensión. Los sólidos son la parte más chiquita (menos del 0.1% del peso), pero son los que más dolores de cabeza dan a la hora de tratarlos. El agua solo aporta el volumen y sirve para mover los sólidos de un lado a otro. (Quispe Humire, 2013).

Figura 1

Composición de las Aguas Residuales Domesticas.



Nota. Extraído del texto de Ingeniería de Aguas Residuales, citado por Metcalf y Eddy (2003).

Aproximadamente el 65% de los sólidos de origen orgánico son proteínas, tales como las albúminas, las globulinas y las enzimas. Estas proceden de las industrias o de la acción de los bichitos que habitan en el agua contaminada. La cantidad de carbohidratos que hay depende de lo que se acostumbre a comer en cada región. Aparecen en presentaciones habituales como la glucosa, la sacarosa, el almidón y la celulosa. Las grasas y aceites, bien sean de origen animal o vegetal, constituyen el tercer tipo de elemento que viene de los alimentos. (Metcalf & Eddy, Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización, 2003). En la tabla 2 se muestran los componentes que hay que bajarle a las aguas servidas.

Tabla 2

Principales constituyentes de las aguas residuales a reducir.

Contaminantes	Importancia
Sólidos Suspendidos	Generan capas de lodo y crean ambientes sin oxígeno cuando se tiran a los ecosistemas.
Materia orgánica	Está hecha de proteínas, carbohidratos y grasas. Para medirla se usan los indicadores DBO y DQO. Le quita oxígeno al agua y provoca que se quede sin aire si no se trata.
Patógenos	Generan capas de lodo y crean ambientes sin oxígeno cuando se tiran a los ecosistemas.
Nutrientes	Nitrógeno y fósforo, junto al carbono, son nutrientes esenciales. Generan crecimiento excesivo de algas y condiciones anaerobias en cuerpos de agua.
Contaminantes importantes	Sustancias orgánicas e inorgánicas que generan cambios en los genes, mutaciones y que pueden dar cáncer
Materia orgánica refractaria	Resistente a métodos convencionales. Incluye detergentes, fenoles y pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Vienen de fábricas. Se pueden sacar y volver a usar.
Compuestos orgánicos disueltos	Sustancias como sodio, calcio y sulfato. Deben removerse si se va a reutilizar el agua.
Temperatura	Afecta la solubilidad de gases, la actividad microbiana, la viscosidad y varía según las estaciones.

Color	Aguas frescas: ligeramente gris. Aguas sépticas: gris oscuro o negro.
Olor	Efluentes recientes: más o menos tolerable. Aguas en descomposición: hedor molesto. Aguas industriales: depende del proceso.
Turbiedad	Provocada por sólidos suspendidos. Aguas frescas presentan menor turbiedad que las contaminadas.

Nota. Recopilado del texto Ingeniería de Aguas Residuales, citado por Metcalf y Eddy (2003).

2.2.3. Nitrógeno y fósforo como contaminantes

El nitrógeno y el fósforo son elementos clave para que crezcan las plantas que viven en el agua, algas y microorganismos, pero en concentraciones elevadas funcionan como contaminantes que deterioran los ecosistemas acuáticos. Ambos elementos son aportados principalmente por aguas residuales domésticas, actividades agrícolas y descargas industriales, generando incrementos anormales de biomasa vegetal y afectando el estado del agua en ríos y lagunas y humedales. Cuando estos nutrientes se acumulan por encima de los niveles naturales, el ecosistema experimenta un desequilibrio conocido como eutrofización, caracterizado por proliferación excesiva de algas y macrófitas flotantes (Smith, Tilman, & Nekola, 1999).

El nitrógeno se presenta en diversas formas químicas dentro de las aguas residuales, tales como amonio, nitrato, nitrito y nitrógeno orgánico, siendo el amonio la forma dominante en efluentes domésticos crudos debido a la degradación de la urea y proteínas (Metcalf & Eddy, 2016). Las transformaciones del nitrógeno están influenciadas por procesos microbianos como la nitrificación y la desnitrificación, los cuales están sujetos a la presencia de oxígeno

y materia orgánica en el agua. En concentraciones elevadas, los compuestos nitrogenados promueven el crecimiento excesivo de algas y pueden resultar tóxicos para organismos acuáticos, afectando procesos fisiológicos esenciales como el transporte de oxígeno (Camargo & Alonso, 2006).

Tabla 3

Formas del nitrógeno presentes en aguas residuales domésticas y sus características.

Forma de Nitrógeno	Símbolo	Origen principal en aguas domésticas	Impacto ambiental	Observaciones
Amonio	NH_4^+	Degradación de materia orgánica, orina	Puede ser tóxico para peces; consume oxígeno durante la nitrificación	Forma predominante en agua residual doméstica
Nitritos	NO_2^-	Intermedio en la nitrificación	Altamente tóxico para organismos acuáticos	Indica procesos biológicos incompletos
Nitratos	NO_3^-	Oxidación de nitritos	Causa eutrofización; riesgo sanitario en humanos	Forma final del nitrógeno oxidado
Nitrógeno orgánico	N-org	Restos orgánicos, proteínas, excretas	Se descompone liberando amonio	Presente en sólidos y efluentes crudos

Nota. Tabla extraída de los "Efectos ecológicos y toxicológicos de la contaminación por nitrógeno inorgánico", citado por Camargo y Alonso (2006).

El fósforo, por su parte, se encuentra principalmente en forma de fosfatos orgánicos e inorgánicos, derivados de detergentes, jabones, restos alimenticios y excretas humanas, lo que convierte a las aguas residuales domésticas en una de sus principales fuentes. A diferencia del nitrógeno, el fósforo es el nutriente limitante en la mayoría de ecosistemas acuáticos, por lo que incluso pequeñas

cantidades pueden desencadenar crecimientos explosivos de fitoplancton y macrófitas. Además, el fósforo tiende a unirse a sedimentos y partículas suspendidas, favoreciendo su permanencia en el ecosistema incluso cuando cesa la descarga de contaminantes (House, 2003).

Tabla 4

Formas del fósforo y sus características en aguas residuales.

Forma de Fósforo	Símbolo	Origen doméstico	Impacto ambiental	Comportamiento en el agua
Fosfato inorgánico	PO_4^{3-}	Detergentes, jabones	Potencia el crecimiento de algas	Se disuelve fácilmente
Fosfato orgánico	P-org	Restos de alimentos, excretas	Se mineraliza a PO_4^{3-}	Asociado a sólidos suspendidos
Polifosfatos	$(PO_3^-)_n$	Productos de limpieza	Se hidrolizan a PO_4^{3-}	Persisten en el ambiente

Nota. Tabla extraída del "Ciclo geoquímico del fósforo en los ríos", citado por House (2003).

La combinación de nitrógeno y fósforo genera un impacto sinérgico dentro de las masas de agua, apurando el fenómeno de enriquecimiento excesivo por nutrientes y provocando disminuciones significativas en el oxígeno disuelto, mortandad de peces, malos olores y alteraciones profundas en la biodiversidad acuática. Este fenómeno, además de comprometer la salud de los ecosistemas, les pega de lleno a las comunidades que viven del agua para tomar y para sembrar, pesca o recreación. En este contexto, la eliminación de estos nutrientes se ha convertido en una prioridad ambiental, favoreciendo el desarrollo de tecnologías alternativas como la fitorremediación, las cuales permiten remover nitrógeno y fósforo de forma ecológica y a bajo costo (Vymazal, 2013).

2.2.4. Fitorremediación

Mentaberry (2011) explica que la fitorremediación viene siendo un montón de técnicas que usan plantas para descomponer, absorber o desintoxicar sustancias orgánicas, radiactivas, inorgánicas y químicas. Esto funciona siempre que las plantas tengan la capacidad de agarrar, guardar, romper o cambiar esas cosas a versiones menos dañinas. Para la EPA (1996), esto se destaca por ser una forma de limpieza que no necesita mucha intervención y que además se ve bonita. Aprovecha lo que pueden hacer los vegetales y la luz solar para procesar un montón de agentes nocivos diferentes. En este método, las plantas actúan como atrapas o depuradores naturales: degradan las sustancias dañinas o los procesan igual que harían los microorganismos. Al final, los convierten en cosas menos dañinas y más tranquilas por ejemplo, bióxido de carbono, agua y compuestos minerales (Peña, Carter, & Ayala, 2001).

Tabla 5

Tipos y procesos de fitorremediación.

Tipo	Proceso involucrado	Contaminación tratada
Fitoextracción	Se utilizan plantas para juntar los contaminantes en las partes que se pueden cortar (sobre todo lo que está por encima del suelo).	Varios tipos de agua sucia que traen metales pesados como cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, selenio y zinc.
Rizofiltración	Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y degradar contaminantes a partir de efluentes líquidos cargados con metales o compuestos orgánicos.	Aguas contaminadas con cadmio, cromo, cobre, plomo, selenio, zinc, isótopos radiactivos y compuestos fenólicos.
Fitoestabilización	Las plantas tolerantes se usan para reducir su movilidad y evitar el paso de estos al transporte.	Escurrimientos de desperdicios de minas, aguas servidas. Sugerido para sustancias derivadas del fenol y con cloro.

Fitoestimulación	Se aprovechan las secreciones de las raíces para favorecer el crecimiento de bichos descomponedores (bacterias y hongos).	Hidrocarburos derivados del petróleo, gasolina, aromáticos (benceno, tolueno, xilenos), tricloroetileno y explosivos nitroaromáticos.
Fitovolatilización	Las plantas agarran y transforman los contaminantes y compuestos orgánicos, y después los sueltan al aire.	Aguas residuales agropecuarias; metil-ter-butil éter (MTBE), solventes triclorometano, cloruro de vinilo y tetracloroeteno (contaminación industrial y agroindustrial).
Fitodegradación	Las plantas de agua y de tierra agarran, guardan y descomponen sustancias orgánicas para convertirlas en otras cosas que son menos dañinas o que ya no hacen daño.	Aguas sucias del campo y la ganadería; balas y proyectiles (TNT, DNT, RDX), hidrocarburos, nitroaromáticos, pesticidas, fosfatos, fenoles y nitritos, etc.

Nota. Tabla extraída de la "Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales", citado por Arias (2010).

2.2.5. Tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas

Esta técnica se está usando bastante hoy en día, sobre todo en Europa. Básicamente son lagunas o canales que tienen entre 0.4 y 1.5 metros de hondo, por donde corre agua sucia. Ahí crece alguna planta flotante. Algunas de las que se pueden usar son el jacinto de agua, la lenteja de agua y la azolla. (Romero, 2004).

Las macrófitas acuáticas son plantas superiores que crecen total o parcialmente sumergidas en ambientes acuáticos dulces o salobres, desempeñando un papel fundamental en el equilibrio ecológico de ríos, lagos y humedales. Estas especies poseen adaptaciones de forma y de función que les facilitan mantenerse con vida en condiciones de saturación hídrica, tales como

tejidos aerénquimos, raíces poco desarrolladas y alta capacidad de flotación. Su presencia contribuye al ciclo de nutrientes, la oxigenación del agua y la depuración natural de contaminantes, por lo que son consideradas bioindicadores clave en estudios de calidad ambiental (Wetzel, 2001).

Mirándolo desde lo ambiental, las macrófitas acuáticas se clasifican en cuatro grandes grupos: macrófitas emergentes, sumergidas, flotantes libres y flotantes fijas. Las especies flotantes libres, como Lemna minor, poseen mayor capacidad para cubrir extensas áreas superficiales y absorber nutrientes de forma rápida, dado que sus raíces penden directamente dentro de la masa de agua sin estar ancladas al sustrato. Este tipo de macrófitas es de especial interés en sistemas de tratamiento, ya que su crecimiento acelerado permite una extracción eficiente de nitrógeno y fósforo, reduciendo la eutrofización en cuerpos de agua (Brix, 2017).

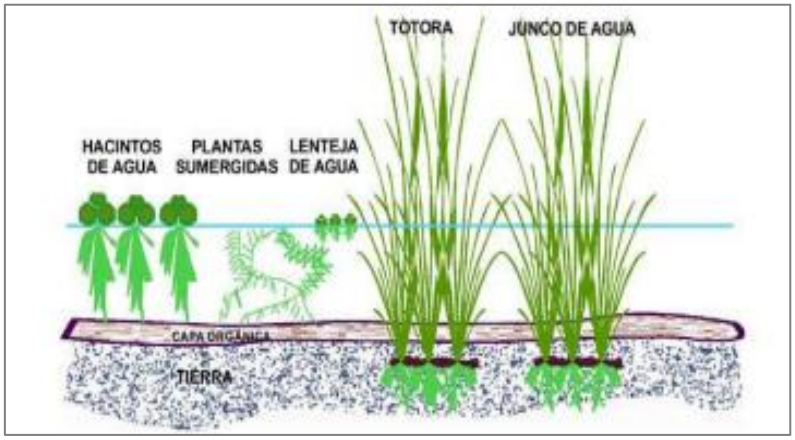
Entre las macrófitas acuáticas más empleadas en tratamiento de aguas destacan Lemna minor, Eichhornia crassipes y Pistia stratiotes, debido a su rápida tasa de crecimiento y alta eficiencia en la extracción de nutrientes. Lemna minor, en particular, es ampliamente utilizada debido a su tolerancia a variaciones de temperatura, pH y carga orgánica, así como a su capacidad para duplicar su biomasa en pocos días bajo condiciones óptimas (Ziegler, Adelmann, Zimmer, Schmidt, & Appenroth, 2015).

Las macrófitas acuáticas también presentan ventajas logísticas para su manejo. Al acumular altas cantidades de biomasa en poco tiempo, permiten cosechas periódicas que garantizan una extracción continua de nutrientes del sistema. La biomasa extraída puede ser valorizada como abono, alimento para animales, biomasa energética o materia prima para compostaje, lo cual agrega

un componente sostenible al proceso de remediación (Alaerts, Mahbub, Kelderman, & Van der Steen, 2013).

Figura 2

Plantas acuáticas.



Nota. Figura extraída de "Fitorremediación mediante usos de dos especies vegetales Lemna Minor y Eichornia Crassipes en aguas residuales", citado por Flores y Mauiuxi (2012).

De acuerdo a la forma y la fisiología se tiene una clarificación simple y clara de las macrofitas acuáticas:

2.2.6.1. Plantas Flotantes

Las plantas flotantes se subdividen en enraizadas y libres (Ramos Montaño, Cardenas Avella, & Herrera Martinez, 2013).

- **Plantas flotantes enraizadas:** Las hojas y la parte de las flores descansan sobre la capa superficial del agua mientras que las raíces están pegadas al fondo.
- **Plantas flotantes libres:** Sacan sus hojas en la superficie y las raíces quedan colgando sueltas dentro del agua.

- Las plantas que flotan con raíces agarradas y las que flotan libres crecen igual o más rápido que las que salen del agua. La ventaja es que, aunque las emergentes tienen menos tejidos para respirar, las flotantes pueden aprovechar el CO2 que ellas mismas sueltan al respirar y que queda guardado en sus bolsas de aire. Las más comunes para hacer humedales son el lirio acuático. (Eichhornia crassipes), ombligo de Venus (Hydrocotyle ranunculoides), y plantas de los géneros: Spirodela, Lemna, Wolffia (Sandoval Vilchez, 2019).

2.2.6.2. Plantas Sumergidas

Las plantas acuáticas que viven sumergidas han llegado al punto más alto de adaptación al agua. Pueden desarrollar sus partes para hacer fotosíntesis y reproducirse debajo del agua, incluso cuando no hay mucha luz (Ramos Montaño, Cardenas Avella, & Herrera Martinez, 2013).

Las plantas que viven bajo el agua crecen más despacio que los otros dos tipos. Esto pasa porque dentro del agua hay menos luz y el CO2 se mueve más lento. Pero eso sí, estas plantas también pueden tomar CO2 de otros lados, como de los carbonatos, del CO2 que sueltan los sedimentos cuando no hay oxígeno, o mediante el proceso de volver a fijar el CO2 del ciclo del carbono. Algunas de las especies que se usan en humedales hechos por el hombre son: Myriophyllum aquaticum, Elodea canadienses, y Potamogeton crispus (Sandoval Vilchez, 2019).

a. Ventaja:

Lo mejor de estos sistemas es que las raíces tienen mucho contacto con el agua sucia, porque el agua las moja por completo. Eso hace que se limpie un montón de materia orgánica, gracias a los microorganismos que se pegan a las raíces o gracias a las mismas raíces directamente (Sandoval Vilchez, 2019).

b. Desventaja:

El problema más grande de los sistemas que usan plantas flotantes es que no pueden acumular mucha biomasa. Por eso hay que estar sacando parte de esas plantas de vez en cuando para que sigan creciendo, y eso hace que el proceso salga más caro porque se necesita gente que lo haga. Otra pega es que se llenan de mosquitos, que pueden pasar enfermedades, y eso obliga a poner estos sistemas bien lejos de donde vive la gente (Sandoval Vilchez, 2019).

2.2.6.3. Plantas Emergentes

Las plantas emergentes tienen la parte de abajo por debajo de la superficie del agua, mientras que las partes para reproducirse las desarrollan por fuera, en el aire (Ramos Montaño, Cardenas Avella, & Herrera Martinez, 2013).

Las plantas que sobresalen del agua se distinguen porque hacen mucha fotosíntesis y crecen un montón. Las especies más comunes de este tipo son: tule (Typhia sp.), juncos (Scirup sp.) y carrizos (Phragmites sp.) (Ramos Montaño, Cardenas Avella, & Herrera Martinez, 2013).

2.2.6. Propiedades de las plantas acuáticas en sistemas de tratamiento

Los vegetales cumplen una labor fundamental dentro de estos sistemas, y sus funciones más importantes son:

- Ventilar las raíces y darles oxígeno a los bichos microscópicos que habitan en el entorno de la raíz.
- Captación de nutrientes (nitrógeno y fósforo).
- Sacar contaminantes absorbiéndolos directo en sus tejidos.
- Colado de los sólidos gracias a la malla que arma su sistema de raíces. (García, 2012).

Tabla 6

Funciones de las plantas en sistemas de tratamiento acuático.

Parte	Funciones
Raíces y/o tallos en la columna de agua	Superficie sobre la cual la bacteria crece. Medio de filtración y adsorción de sólidos. Atenúan la luz del sol y previenen el crecimiento de algas.
Tallos y/o hojas sobre la superficie del agua	Reducen los efectos del viento; permiten la transferencia de gases entre la atmósfera y el agua. Importantes en el intercambio de gases hacia y desde las zonas hundidas del vegetal.

Nota. Tabla extraída de la "Tecnología para el tratamiento de aguas servidas", citado por Pérez y Camacho (Pérez & Camacho, 2011).

2.2.7. Lemna minor (lenteja de agua) en el tratamiento de aguas residuales domésticas

Valero (2006) Dice que esta planta avisa cuando el agua está llena de nutrientes (eutrófica), con muchos nitratos y fosfatos, y por lo tanto no es apta para tomar. Además, aguanta mejor el frío que el jacinto. Forma colonias

chiquitas que se desarrollan en agua con muchos elementos nutritivos, un nivel de acidez entre 5 y 9 (lo óptimo es de 6.5 a 7.5) y temperaturas que van de 6 a 33°C. En regiones templadas, en cuanto la temperatura baja de 6 o 7 grados, salen colonias pequeñas pero apretadas. Estas plantas absorben los nutrientes del agua sucia y se les ha visto que son buenas para sacar rápido algunos metales como el zinc, el manganeso y el hierro. También sirven para quitar un montón de nitrógeno, fósforo y potasio de las aguas servidas. (García, 2012). La Lemna minor es una plantita flotadorcita que vive en el agua, chiquitita, y que todo el mundo conoce como lenteja de agua la cual según Jaramillo y Flores (2012) los clasifica taxonómicamente en:

Reino: Plantae

División: Fanerógama Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Familia: Lemnaceae

Género: Lemna

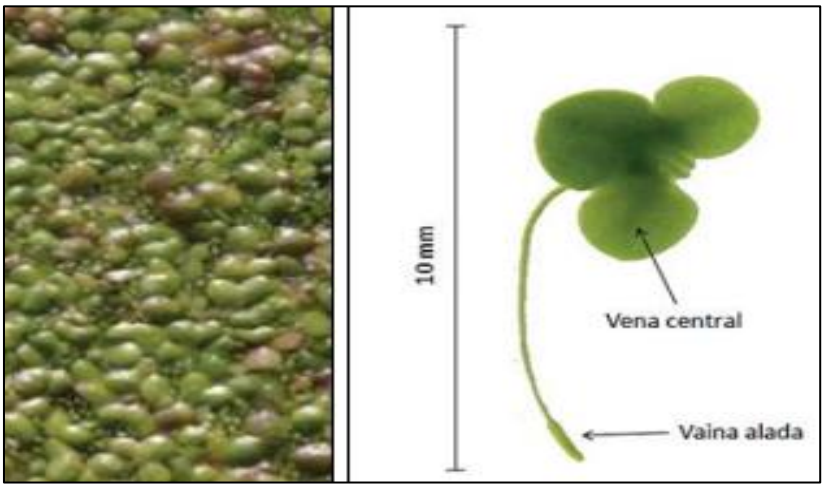
Especie: minor L

A continuación, Aquí se ve la forma de la *Lemna minor*. Mide unos 10 mm y tiene una hojita de color verde o verde amarillento. Depende mucho de la luz para poder vivir bien. Las raíces cortas suelen estar debajo de la lámina y le sirven para absorber los nutrientes del agua y así poder crecer. En muchos lugares del mundo, a esta planta la consideran una plaga porque se expande muy rápido. Eso mismo ha hecho que se use como comida para peces y también como material para limpiar aguas contaminadas. Estas plantas aguantan bastante bien la falta de luz. En cuanto al pH, hay estudios que muestran que se

adaptan tanto a ambientes bien ácidos como bien alcalinos. Se reproducen de forma asexual por gemación (que es cuando echan brotes chiquitos) y crecen muy rápido cuando están al aire libre.(Curt, 2010).

Figura 3

Morfología de Lemna minor.



Nota. Imagen extraída de "Toxicidad de la mezcla binaria de los plaguicidas Metomilo y Rotenona en la lenteja de agua Lemna minor", citado por Hidalgo-Nicho y Lannacone (Hidalgo Nicho & Lannacone, 2020).

2.2.8.1. Parámetros de crecimiento de Lemna minor

a. **Temperatura:** La *Lemna minor* aguanta bien las temperaturas altas, pero donde mejor crece es entre 15 y 18 grados. Se ha visto que también puede soportar hasta 5 grados, lo que le permite sobrevivir y seguir creciendo incluso en condiciones bien duras. Por eso esta planta se ajusta a casi cualquier temperatura, sobre todo si los cambios duran poco. En cuanto a la luz, resulta que responde muy rápido a este estímulo (Arroyave, 2004).

b. **Iluminación:** La luz del sol es algo que la *Lemna minor* aprovecha muy bien, y eso es posible gracias a sus pigmentos, que le sirven como energía para varios procesos de su organismo. Hay ciertos niveles de luz, ni muy poca ni muy exagerada, que ayudan a que esta planta crezca mejor. También está comprobado que la temperatura influye bastante en qué tan bien usa la energía que viene de la luz (Arroyave, 2004).

c. **Densidad y cosecha:** Si uno va a sembrar y recoger la lenteja de agua, hay que tener en cuenta lo siguiente:

- Que los vegetales ocupen por completo toda la zona superficial que se está evaluando.
- Que los sistemas tengan poca profundidad para que las lentejas puedan aprovechar casi todos los nutrientes.
- Que el agua esté llena de materiales tanto orgánicos como inorgánicos.
- Esta planta depende de qué tan juntas estén, no solo para reproducirse sino también para cosas básicas como la fotosíntesis. Eso podría significar que haya menos probabilidades de que se multipliquen en el espacio que se mide.

2.2.8.2. Composición química del agua para el desarrollo de Lemna minor

A los de la familia Araceae les dicen "lentejas de agua" y se encuentran por todo el mundo, incluso en regiones bien extremas. La mayoría de ellos se han visto en climas tropicales y en algunas zonas

templadas. Crecen un montón en aguas que tienen muchos nutrientes, sobre todo concentraciones elevadas de nitrógeno y fósforo. Eso va a determinar qué tan nutritiva es esta planta (Luevano, 2016). Luego se explican cómo se comporta esta planta frente a distintos parámetros fisicoquímicos:

a. **pH:** Las Araceae tienen distintas adaptaciones y pueden crecer bien en ciertos rangos óptimos. Alguien hizo pruebas con plantas como Spirodela punctata, Lemna minor y Wolfia australiana McLay (1976) Los pH que usaron fueron 7, 6.2 y 5, en ese orden. La tolerancia de estas plantas va desde lo ácido hasta lo alcalino.
b. **Salinidad y conductividad:** Como la lenteja de agua necesita muchos nutrientes, eso también significa que aguanta bien los niveles altos de sal. Hay reportes de que puede tolerar varios problemas, sobre todo estos contaminantes. Alguien encontró que algunas especies de Araceae sembradas en aguas salinas logran crecer un montón incluso con niveles superiores a 4000 mS/cm. Oron et al. (1987) Esta capacidad de la *Lemna minor* para resistir la sal es muy importante para poder usarla en masas de agua, con la meta de disminuir la salinidad en lagunas de procesamiento de aguas servidas y de paso rebajar también la salinidad de los vertidos finales.
c. **Nitrógeno:** La *Lemna minor* es una planta que puede crecer en un montón de condiciones distintas en cuanto a la comida. Los niveles ideales de tolerancia al nitrógeno son bien variados. Se

han visto valores entre 0.6 y 70 mg/L como óptimos, y como tope máximo, valores entre 200 y 2800 mg/L (Landolt, Investigaciones biosistemáticas en la familia de las lentejas de agua (Lemnaceae).La familia de las Lemnaceae: un estudio monográfico, 1986).

La *Lemna minor* normalmente puede aprovechar el nitrógeno en diferentes formas, como iones de amonio o iones de nitrato, mostrando mediante varias investigaciones una fuerte preferencia por el nitrógeno amoniacal. Este último elemento se encuentra justo en el intermedio entre el amonio y el amoníaco. El pH del agua va a determinar cómo se reparte este nutriente. Además, está más que comprobado que esa forma intermedia del amoníaco (NH_4^+) es bastante venenosa para la mayoría de las plantas, incluso en cantidades chiquitas. Pero la *Lemna minor* es distinta, porque usa el nitrógeno para fabricar aminoácidos y proteínas. (Córdoba, y otros, 2010).

d. **Fósforo:** El fósforo es otro nutriente que ayuda un montón a que crezca la *Lemna minor*. Los ortofosfatos son la principal fuente de fósforo que se ha identificado para este grupo de plantas. Además de poder absorber nutrientes de manera eficiente, la lenteja de agua también aguanta niveles altos de nutrientes en el agua sucia. Por ejemplo, se ha visto que la *Spirodela polyrrhiza* crece un montón cuando hay 1,5 gramos

por litro de fósforo. Esta gran resistencia a los nutrientes resulta muy práctica para procesar aguas servidas, ya que allí las cantidades de nutrientes suelen ser bastante elevadas (de 30 a 100 mg/L de fósforo)(Cheng, y otros, 2002).

e. **Materia orgánica:** La *Lemna minor* usa los carbohidratos como su fuente de energía, especialmente cuando no hay luz de sobra. Cuando la luz es óptima, los azúcares estimulan el crecimiento se nota en un aumento de la masa vegetal de la lenteja de agua. Hace poco, se ha comprobado que la luz es el elemento clave que regula el desarrollo de esta planta en ambientes con exceso de nutrientes y presencia de material orgánico (Karlsson, Bystrom, Ask, Persson , & Jansson, 2009).

f. **Oxígeno disuelto:** Este factor tiene mucho peso en la multiplicación de las células. Es clave en el desarrollo de Lemna minor, ya que al ser una planta que flota, capta el oxígeno que necesita de la atmósfera (Jaramillo Henao & Zapata Márquez, 2008).

g. **Dióxido de carbono:** El bióxido de carbono es una fuente de carbono no orgánico que les aporta energía a vegetales como la Spirodela polyrrhiza y la Lemna minor. Estudios recientes cuentan que las lentejas de agua convierten el CO2 en carbohidratos empleando el mismo proceso fundamental del ciclo de Calvin o del ciclo reductor de pentosas fosfato. Como

resultado, el carbono que absorben puede aumentar la producción de azúcar y ayudar a que los tejidos de la planta lo guarden. Las lentejas de agua que crecen con niveles altos de CO2 pueden tener ciertas ventajas sobre otros grupos de plantas. Primero, algunas tienen estomas que no funcionan bien (están hacia arriba) y nunca se cierran, lo que ayuda a que intercambien de gases con el entorno de manera más sencilla. Aparte, la fotosíntesis en vegetales de metabolismo C3 (como las lentejas de agua) puede potenciarse si se aumenta el CO2 en cualquier sistema (Mohedano, Costa, & Belli Filho, 2016).

2.2.8. Remoción de N y P por Lemna minor

La eliminación de nitrógeno (N) y fósforo (P) mediante Lemna minor es uno de los mecanismos más estudiados dentro de la fitorremediación, debido a la capacidad de esta macrófita flotante para absorber y asimilar nutrientes directamente desde la columna de agua. Lemna minor utiliza compuestos nitrogenados (amonio, nitratos y nitrógeno orgánico) y fosfatos como elementos esenciales para la síntesis de proteínas, aminoácidos, ácidos nucleicos y fosfolípidos, lo que convierte a estos nutrientes en insumos principales para su rápido crecimiento. Gracias a su elevada tasa de duplicación de biomasa, que puede ocurrir cada 2 a 4 días, la planta logra incorporar grandes cantidades de N y P en sus tejidos, reduciendo significativamente las concentraciones presentes en aguas residuales domésticas (Ziegler, Adelmann, Zimmer, Schmidt, & Appenroth, 2015).

Tabla 7

Mecanismos directos e indirectos de remoción de N y P por Lemna minor.

Mecanismo	Tipo	Nutriente afectado	Descripción
Absorción celular	Directo	N – P	Captación inmediata de NH_4^+, NO_3^- y PO_4^{3-} a través de raíces y frondes.
Asimilación metabólica	Directo	N – P	Incorporación de nutrientes en proteínas, ARN, ADN y membranas.
Bioacumulación	Directo	N – P	Acumulación de nutrientes en tejidos vegetales.
Adsorción radicular	Indirecto	P	Retención de fosfatos en la superficie radicular.
Nitrificación/desnitrificación	Indirecto	N	Microorganismos asociados transforman nitrógeno en N_2 gaseoso.
Sombreamiento	Indirecto	P	Reducción de algas → disminuye demanda de fósforo.

Nota. Tabla extraída de las "Lentejas de agua para la remediación del agua y la producción de biomasa", citado por Ziegler et al. (2015).

En cuanto al nitrógeno, Lemna minor presenta preferencia por el amonio (NH_4^+) debido a que su incorporación metabólica requiere un menor gasto energético en comparación con los nitratos (NO_3^-), que necesitan ser reducidos antes de ser asimilados. Esta afinidad favorece una remoción eficiente de nitrógeno en aguas residuales domésticas, donde el amonio suele ser la forma predominante. Además, el sistema radicular de la planta proporciona un microambiente favorable para la actividad de bacterias nitrificantes y desnitrificantes, lo cual complementa la reducción de compuestos nitrogenados mediante transformaciones biogeoquímicas. Estas interacciones planta-microorganismos explican por qué sistemas basados en Lemna minor alcanzan remociones superiores al 60 % de nitrógeno total en estudios de campo y laboratorio (Alaerts, Mahbub, Kelderman, & Van der Steen, 2013).

Respecto al fósforo, Lemna minor absorbe fosfatos inorgánicos (PO_4^{3-}) a través de sus frondes y raíces, incorporándolos rápidamente en procesos metabólicos como la formación de ATP, membranas celulares y moléculas estructurales. A diferencia del nitrógeno, el fósforo es un nutriente limitante en la mayoría de ecosistemas acuáticos; por ello, pequeñas reducciones en su concentración pueden generar avances notables en la pureza del agua. La remoción de fósforo mediante Lemna minor no solo depende del crecimiento de la biomasa, sino también de la adsorción de fosfatos en la superficie de las raíces y la posible retención en sedimentos debido al sombreado producido por la planta. Aunque la eficiencia puede ser ligeramente menor que la del nitrógeno, diversos estudios han reportado remociones de entre 40 % y 75 % en aguas residuales urbanas y domésticas (Rezania, Ponraj, Din, Taib, & Sairan, 2016).

Tabla 8

Rangos típicos de remoción de N y P por Lemna minor según estudios científicos.

Autor / Año	Tipo de agua	Remoción de N (%)	Remoción de P (%)
Iqbal et al. (2019).	Aguas residuales domésticas	63 %	52 %
Landesman et al. (2005).	Aguas municipales	70 %	55 %
Appenroth et al. (2017).	Aguas con alto N y P	65–80 %	40–60 %
Rezania et al. (2016).	Aguas residuales sintéticas	55–75 %	45–68 %
Aquino (2022), Perú.	Afluentes acuícolas	67 %	40 %
Campos (2022), Perú	Aguas domésticas	82 %	69 %

Nota. Tabla extraída de diversos autores que ya se mencionaron referente a los rangos típicos de remoción de N y P por Lemna minor según estudios científicos.

La eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo mediante Lemna minor está influenciada por factores como temperatura, pH, concentración inicial de nutrientes, tiempo de retención hidráulica y densidad de biomasa. Temperaturas entre 20 y 28 °C incrementan la actividad fisiológica de la planta, maximizando la captación de nutrientes (Landesman, Parker, & Prince, 2005). De igual forma, tiempos de retención entre 7 y 15 días suelen generar los mejores resultados, dado que permiten múltiples ciclos de duplicación de biomasa. En condiciones de campo, donde el ambiente no es controlado, la planta mantiene una eficiencia destacable, razón por la cual es ampliamente utilizada en sistemas descentralizados de tratamiento en comunidades rurales (Iqbal, Baig, & Yousaf, 2019).

2.2.9. Factores que influyen en la eficiencia

Uno de los factores más críticos es la temperatura, ya que regula la actividad metabólica y la velocidad de crecimiento de Lemna minor. Temperaturas entre 20 °C y 28 °C permiten tasas máximas de duplicación de biomasa y mayor absorción de nutrientes, mientras que temperaturas por debajo de 10 °C o superiores a 30 °C reducen drásticamente la eficiencia de remoción (Appenroth, 2017). En sistemas de campo, esta variable suele fluctuar, por lo que la planta muestra adaptaciones que le permiten mantener niveles aceptables de fitorremediación, aunque con menor velocidad (Iqbal, Baig, & Yousaf, 2019).

- **El pH del agua**: influye en la remoción de nutrientes, ya que determina la disponibilidad y forma química del nitrógeno y fósforo. Los mejores resultados se obtienen dentro de un rango de pH entre 6 y 8, en el cual las raíces absorben con mayor facilidad amonio (NH_4^+) y fosfatos (PO_4^{3-})

(Rezania, Ponraj, Din, Taib, & Sairan, 2016). Valores extremos de pH pueden afectar la integridad celular de la planta y disminuir la actividad microbiana en la rizosfera, reduciendo procesos como la nitrificación y la asimilación metabólica (Vymazal, 2013).

- **El tiempo de retención hidráulica (TRH)**: es otro factor determinante para la eficiencia del sistema. Un TRH adecuado permite que la planta complete ciclos de crecimiento, absorba nutrientes y promueva la actividad microbiana asociada. Estudios en sistemas experimentales indican que tiempos entre 7 y 15 días generan las mayores tasas de remoción, mientras que períodos demasiado cortos limitan la absorción efectiva de N y P. En sistemas a la intemperie, el TRH depende del volumen del estanque y de la cantidad de agua residual tratada diariamente (Körner & Vermaat, 2020).
- **La densidad inicial de biomasa:** es fundamental para maximizar la eficiencia. Densidades intermedias de cobertura (60–80 %) permiten un área más amplia de encuentro entre raíces y líquido, sin generar sombreamiento excesivo entre frondes. Una densidad demasiado alta puede reducir la entrada de luz y oxígeno, afectando el crecimiento, mientras que una densidad muy baja reduce el área en funcionamiento que está al alcance para la captación de elementos nutritivos (Alaerts, Mahbub, Kelderman, & Van der Steen, 2013).
- **Concentración inicial de nutrientes:** influye directamente en la tasa de remoción. Lemna minor presenta alta eficiencia cuando las concentraciones de N y P se encuentran dentro de rangos moderados, ya que en concentraciones extremadamente altas la planta puede presentar

estrés fisiológico, clorosis y disminución del crecimiento. En aguas residuales domésticas típicas, la especie mantiene un desempeño eficiente debido a que el amonio y fosfatos están disponibles en cantidades que estimulan el crecimiento sin exceder su capacidad de tolerancia (Rejmánková, 2011).

Tabla 9

Factores que influyen en la remoción de nitrógeno y fósforo.

Factor	Efecto sobre la remoción	Consideración en sistemas reales
Temperatura	Remoción entre 20–28 °C	En zonas altoandinas disminuye ligeramente
pH	Óptimo 6–8	Extremadamente alto o bajo inhibe absorción
Tiempo de retención	A mayor TRH → mayor remoción	TRH ideal: 7–15 días
Biomasa inicial	Densidades intermedias son óptimas	Evitar sobrepoblación
Radiación solar	Aumenta crecimiento y absorción	El sombreado excesivo reduce eficiencia

Nota. Tabla extraída de la “Eficiencia de crecimiento y eliminación de nutrientes de la lenteja de agua en condiciones climáticas naturales”, citado por Iqbal et al. (2019).

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domésticas son aquellas aguas generadas por las actividades cotidianas de las viviendas, tales como el consumo de agua para la cocina, baños, lavado de ropa y limpieza de viviendas. Estas aguas generalmente traen una combinación de agentes nocivos como sustancias

orgánicas, elementos nutritivos, microbios dañinos y químicos caseros, los cuales pueden perjudicar el estado del agua en ecosistemas naturales si no son adecuadamente tratadas (Metcalf & Eddy, Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización, 2003).

2.3.2. Nitrógeno en aguas residuales

El nitrógeno es un nutriente esencial que se encuentra en aguas residuales principalmente como nitrógeno total, incluyendo formas como amonio (NH_4^+), nitratos (NO_3^-), nitritos (NO_2^-) y compuestos orgánicos nitrogenados. El amonio suele ser la forma predominante en aguas residuales recientes debido a la descomposición de materia orgánica, siendo altamente tóxico para ecosistemas acuáticos cuando alcanza concentraciones elevadas (Camargo & Alonso, 2006).

2.3.3. Fósforo en aguas residuales

El fósforo forma parte de detergentes, materia orgánica, restos de alimentos y excretas, encontrándose en aguas residuales como fosfatos (PO_4^{3-}), polifosfatos y fósforo orgánico. A diferencia del nitrógeno, el fósforo no posee una fase gaseosa, lo que facilita su acumulación en ecosistemas acuáticos. Incluso concentraciones pequeñas pueden desencadenar un rápido crecimiento de microalgas y macrófitas, intensificando los procesos de eutrofización (Correll, 1998).

2.3.4. Macrófitas acuáticas

Las plantas acuáticas son vegetales que crecen parcial o totalmente sumergidas en ecosistemas acuáticos y cumplen funciones fundamentales en la remoción de contaminantes, incluyendo nutrientes, metales pesados y materia orgánica. Estas plantas permiten incrementar la oxigenación, mejorar la

sedimentación de sólidos y promover la actividad microbiana en la zona de raíces, lo cual intensifica la depuración natural del agua (Vymazal, 2013).

2.3.5. Lemna minor (lenteja de agua)

Lemna minor es una macrófita acuática flotante compuesta por pequeñas frondes que se multiplican rápidamente por vía vegetativa, formando mantos densos sobre la superficie del agua. Su estructura simple, alta tasa de crecimiento y capacidad de absorber nutrientes directamente del agua la convierten en una especie ideal para procesos de fitoextracción de nitrógeno y fosfatos (Landolt & Kandeler, La familia Lemnaceae., 1987). Además, esta especie tolera diferentes condiciones ambientales y puede sobrevivir en aguas residuales domésticas con altos contenidos de carga orgánica, facilitando su uso en sistemas rurales y de bajo costo (Appenroth, 2017).

2.3.6. Fitorremediación

La fitorremediación es una técnica que usa plantas para absorber, cambiar, inmovilizar o degradar los contaminantes que hay en el suelo o aguas. En el caso de aguas residuales, esta técnica incluye procesos como fitoextracción, rizofiltración y fitodegradación, los cuales dependen del sistema radicular, la biomasa generada y la fisiología de la planta (Arias, Betancur, Gómez, Salazar, & Hernández, 2010).

2.3.7. Remoción de nitrógeno y fósforo por Lemna minor

La remoción de nitrógeno por Lemna minor se basa en la absorción directa de amonio y nitratos para la síntesis de aminoácidos y proteínas, acompañada de procesos microbianos asociados como nitrificación y desnitrificación en la

rizosfera. Su alta eficiencia se asocia a su rápido crecimiento y a la capacidad de duplicar su biomasa en pocos días (Ziegler, Adelmann, Zimmer, Schmidt, & Appenroth, 2015).

En el caso del fósforo, la planta absorbe fosfatos para la síntesis de fosfolípidos y ATP, retirándolo directamente de la columna de agua. La remoción depende de la concentración inicial, temperatura, pH y densidad de cobertura de la biomasa. Bajo condiciones óptimas, Lemna minor puede remover entre 40 % y 85 % de N y entre 30 % y 77 % de P, dependiendo del tipo de agua residual y tiempo de retención (Iqbal, Baig, & Yousaf, 2019).

2.3.8. Tratamiento experimental con Lemna minor

El tratamiento experimental con Lemna minor consiste en la aplicación controlada de esta macrófita flotante en estanques, balsas o contenedores que contienen aguas residuales domésticas con el fin de evaluar su capacidad para remover nutrientes como nitrógeno y fósforo. Esta clase de proceso se apoya en la fitorremediación, un método que usa vegetales acuáticos para captar, modificar y almacenar agentes contaminantes que hay en el agua, aprovechando su crecimiento rápido y su elevada tasa de asimilación de nutrientes (Appenroth, 2017).

2.3.9. Condiciones de campo a la intemperie

Las condiciones de campo a la intemperie se refieren a la realización de un experimento en un ambiente natural sin control artificial de variables como temperatura, radiación solar, viento, pH o fluctuaciones climáticas, permitiendo evaluar el comportamiento real de un sistema biológico expuesto directamente al entorno (FAO, 2020).

2.3.10. Eficiencia de remoción

Se refiere al porcentaje de disminución de un contaminante presente en un agua residual antes y después de aplicar un tratamiento, expresando la capacidad del sistema para eliminar o reducir la cantidad de sustancias como nitrógeno y fósforo. Este indicador permite evaluar el desempeño de tecnologías naturales como Lemna minor y compararlo con otros métodos de tratamiento (Metcalf & Eddy, 2003).

2.3.11. Límites Máximos Permisibles (LMP)

Son los números fijados por los que mandan nacionales e internacionales para los parámetros de calidad del agua. Estos límites aseguran que el efluente tratado cumpla con las condiciones mínimas para evitar efectos perjudiciales sobre los hábitats acuáticos y el bienestar de la gente. En Perú, el Reglamento de Calidad del Agua establece los LMP para diversos parámetros físico-químicos y microbiológicos, que deben ser cumplidos por las PTARs (Ministerio del Ambiente, 2019).

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

CAPITULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Diseño de investigación

El diseño de investigación corresponde a un diseño experimental de tipo pre–experimental con pre–prueba y post–prueba en un solo grupo, ya que se realiza la medición inicial de las concentraciones de nitrógeno y fósforo en el agua residual doméstica (pre–prueba), se aplica el tratamiento experimental mediante la introducción de Lemna minor bajo condiciones de campo a la intemperie (tratamiento), y finalmente se evalúa nuevamente la concentración de los nutrientes (post–prueba) para determinar el efecto de la planta. En este diseño no existe un grupo de control formal, debido a que el objetivo principal es analizar la capacidad depuradora de Lemna minor en condiciones reales de exposición (Hernández & Fernández, 2010). El tratamiento se ejecuta en 02 estanques experimentales dispuestos al aire libre, permitiendo que variables ambientales como temperatura, luminosidad y pH actúen de forma natural, lo cual fortalece la validez ecológica del estudio.

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

3.2. Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada, dado que implica la manipulación directa de la variable independiente en este caso, la aplicación de Lemna minor sobre el agua residual doméstica, con el propósito de notar las variaciones producidos en la variable dependiente, representada por la remoción de nitrógeno y fósforo. En este tipo de estudio, el investigador controla el proceso de intervención biológica mediante la instalación de un sistema experimental compuesto por estanques preparados específicamente para el desarrollo de la macrófita bajo condiciones naturales. La investigación experimental permite evaluar la efectividad del tratamiento vegetal, medir cuantitativamente la brecha entre las mediciones al principio y al término de los nutrientes y demostrar el efecto depurador de la planta.

3.3. Nivel de investigación

El nivel de investigación es explicativo, ya que busca determinar la causa–efecto entre la aplicación de Lemna minor (causa) y la disminución de nitrógeno y fósforo en el agua residual doméstica (efecto). Este nivel implica no solo describir y medir los valores de los nutrientes, sino también explicar de qué manera y con qué eficiencia la planta influye en la remoción de contaminantes. La investigación no solo se queda mirando el suceso, sino que que pretende comprender los mecanismos de absorción, asimilación y bioacumulación que explican por qué Lemna minor genera cambios significativos en la calidad del agua. Además, el nivel explicativo implica analizar cómo factores ambientales, como temperatura, luminosidad y disponibilidad de nutrientes, modulan la eficacia del tratamiento (Hernández & Fernández, 2018).

3.4. Enfoque de investigación

El enfoque de la investigación es cuantitativo, dado que se centra en la recolección, análisis e interpretación de datos numéricos obtenidos mediante mediciones de laboratorio de las concentraciones de nitrógeno y fósforo antes y después del tratamiento con Lemna minor. El enfoque cuantitativo permite realizar comparaciones objetivas, aplicar fórmulas de eficiencia de remoción, elaborar tablas y gráficos, y emplear análisis estadísticos que respalden los resultados obtenidos. La medición precisa de los contaminantes a través de métodos instrumentales estandarizados garantiza la validez de los datos y la replicabilidad del estudio. Además, este enfoque se adecúa correctamente al objetivo de evaluar causabilidad, dado que cuantifica la magnitud del efecto del tratamiento experimental. El enfoque cuantitativo también facilita la interpretación del comportamiento de la planta bajo condiciones reales de campo, permitiendo identificar patrones de respuesta, variaciones y tendencias que fortalecen la interpretación científica del proceso de fitorremediación (Hernandez, Fernandez, & Baptista, 2014).

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

El grupo que se estudió son todas las aguas servidas que se producen en el distrito de Rosaspata, específicamente aquellas que ingresan y son tratadas de manera primaria en la laguna de oxidación del distrito. Este conjunto de aguas representa la totalidad del efluente doméstico que posteriormente es descargado hacia el cauce natural cercano. La población comprende los diferentes volúmenes de agua residual que mantienen características similares en

composición química, presencia de nutrientes y variaciones típicas de aguas domésticas rurales. Dichas aguas residuales contienen concentraciones variables de nitrógeno y fósforo, las cuales son representativas de las descargas domésticas locales y constituyen la base para evaluar la eficiencia depuradora de Lemna minor.

3.5.2. Muestra

La muestra se componía de un total de 40 litros de agua sucia doméstica, obtenida directamente del efluente de la laguna de oxidación del distrito de Rosaspata. Este volumen fue previamente homogenizado y distribuido equitativamente en dos estanques experimentales, cada uno con dimensiones de 60 cm × 22.2 cm × 30 cm y con una capacidad efectiva de 20 litros por estanque, generando una columna de agua aproximada de 15 cm. La selección del volumen y la distribución obedecen a criterios experimentales que permiten asegurar una adecuada interacción entre el agua y la biomasa de Lemna minor bajo condiciones controladas de exposición a la intemperie. Esta representatividad permite evaluar de manera válida la capacidad depuradora de la planta dentro de un sistema simulado de tratamiento secundario.

3.6. Materiales y equipos

Las cosas, máquinas y materiales que se usaron en este estudio fueron estos:

a. Materiales

- Tubos de ensayo estandarizados (para N y P).
- Celdas plásticas o de vidrio para espectrofotómetro.
- Pipetas graduadas de diferentes volúmenes.
- Micropipetas automáticas (10, 100, 1000 µL).

- Probetas de 25, 50 y 100 mL.
- Matraces aforados.
- Vasos de precipitación.
- Embudos de separación o embudos normales.
- Papel filtro y filtros de membrana.
- 02 estanques de plásticos rectangulares.
- Balde plástico para homogenización del agua residual.
- Botellas y frascos esterilizados para toma de muestras.
- Cooler para el traslado de las muestras.
- Guantes de nitrilo para manipulación de muestras.
- Cubetas o bandejas para manejo de la planta.
- Cinta métrica para registro de dimensiones.
- Bolsas de polietileno para transporte auxiliar.
- Etiquetas adhesivas y marcadores permanentes.

b. Equipos

- Espectrofotómetro UV–Vis.
- Balanza analítica de alta precisión.
- Agitador magnético.
- Autoclave (para esterilizar materiales).
- Refrigeradora o incubadora para conservación temporal.
- Sistema de digestión (para métodos de N total y P total).
- pH–metro portátil.
- Termómetro digital o analógico para agua.
- GPS para ubicación del punto de muestreo.

- Celular para registro documental.

c. Insumos

- Biomasa fresca de Lemna minor saludable.
- Agua residual doméstica del efluente de la laguna de oxidación.
- Reactivo para determinación de Nitrógeno total.
- Reactivo para determinación de P total por método colorimétrico (ácido ascórbico o vanadato–molibdato).
- Agua destilada y desionizada.
- Soluciones patrón para calibración de N y P.
- Solución buffer para calibración del pH–metro.
- Alcohol para desinfección.

3.7. Técnicas e instrumentos

Según Hernández, Fernández & Batista (2014) la recolección de datos consiste en aplicar un conjunto organizado de procedimientos destinados a obtener información válida y confiable para responder a los objetivos de investigación. En este estudio, la obtención de datos se basó en técnicas experimentales, observacionales e instrumentales que permitieron registrar las condiciones del agua sucia antes y luego de limpiarla con Lemna minor.

3.7.1. Técnicas

En este estudio se usaron estos métodos para juntar la información:

- **Observación directa:** Se empleó para registrar las condiciones físicas y ambientales del experimento, tales como temperatura, pH, cambios visuales en la biomasa de Lemna minor y el

comportamiento del agua residual durante el periodo de tratamiento a la intemperie.

- **Muestreo de agua residual:** Esta técnica permitió obtener muestras representativas del agua residual tanto antes como después del tratamiento experimental, siguiendo procedimientos de recolección, preservación y transporte establecidos en protocolos ambientales.
- **Análisis fisicoquímico instrumental** Se aplicó para determinar en laboratorio las concentraciones iniciales y finales de nitrógeno y fósforo, utilizando métodos estandarizados conforme a APHA (American Public Health Association).
- **Registro fotográfico:** Se utilizó para documentar el proceso experimental, la instalación de los estanques, la cobertura vegetal, el comportamiento de la macrófita y los cambios ocurridos durante el tratamiento.

3.7.2. Instrumentos

En correspondencia con las técnicas aplicadas, los instrumentos utilizados fueron los siguientes:

- **Ficha de observación de campo:** Instrumento asociado a la técnica de observación directa, donde se registraron variables ambientales (temperatura, pH y condiciones climáticas), así como el crecimiento, coloración y estado de Lemna minor durante el tratamiento.
- **Ficha de muestreo de agua residual:** Instrumento correspondiente al muestreo de agua, en el cual se consignaron los

volúmenes extraídos, hora de recolección, punto de recolección, preservación y traslado de las muestras al laboratorio.

- **Hoja de resultados de laboratorio (formato APHA):** Instrumento vinculado al análisis fisicoquímico instrumental, donde se registraron las concentraciones de nitrógeno y fósforo obtenidas mediante espectrofotometría, tanto para muestras iniciales como finales.
- **Registro fotográfico digital:** Instrumento asociado a la técnica de registro fotográfico, utilizado para documentar visualmente cada etapa del experimento mediante cámara o dispositivo móvil, permitiendo respaldar y verificar los cambios observados en el sistema de tratamiento.

3.8. Lugar de estudio

El presente estudio se desarrolló en dos entornos complementarios. En primer lugar, la recolección de muestras de agua sucia se hizo en el vertido de la laguna de oxidación del distrito de Rosaspata, provincia de Huancané, región Puno, la cual recibe y trata las descargas domésticas de la población antes de ser vertidas al cauce natural más cercano. Esta fuente constituye el suministro principal del agua utilizada para los ensayos experimentales.

En segundo lugar, el diseño experimental con Lemna minor se llevó a cabo en la ciudad de Juliaca, específicamente en la intersección del Jirón Chucuito con Jirón Almagro, donde se instalaron dos estanques de plásticos en un espacio abierto del domicilio del investigador. Este ambiente permitió trabajar a la intemperie, simulando condiciones reales de campo. La elección de este lugar garantizó una exposición natural del sistema experimental a las

características climáticas de Juliaca, como radiación solar intensa durante el día, bajas temperaturas nocturnas y viento moderado, factores que influyen directamente en el comportamiento de Lemna minor y en la eficiencia del tratamiento aplicado.

Tabla 10

Coordenadas UTM de los puntos de estudio de la investigación (área de muestreo y del área experimental).

Código	Ubicación/Lugar	Coordenadas	
		Este	Norte
P-1	Efluente de la laguna de oxidación del distrito de Rosaspata.	443464.00	8316446.95
P-2	Área experimental en Jr. Chucuito con Jr. Almagro – Juliaca.	379279.00	8285170.00

Nota. Las coordenadas UTM fueron obtenidas in situ mediante un receptor GPS de mano (datum WGS84), lo que permitió georreferenciar con precisión el punto de muestreo del efluente y el área experimental donde se desarrollaron los ensayos con Lemna minor.

Ahora, en la figura 4 se ven las fotos satelitales que señalan el lugar preciso del punto donde se tomó la muestra del efluente en Rosaspata como del área experimental en Juliaca, permitiendo visualizar el entorno espacial donde se llevó a cabo cada etapa del estudio.

Figura 4

Lugar de estudio: Efluente de la laguna de oxidación del distrito de Rosaspata y área experimental en Jr. Chucuito con Jr. Almagro – Juliaca.



Nota. Imagen elaborada a partir de capturas satelitales obtenidas de Google Earth Pro (2025). Se muestran los dos puntos de estudio georreferenciados: (i) el efluente de la laguna de oxidación del distrito de Rosaspata y (ii) el área experimental situada en la intersección del Jr. Chucuito con Jr. Almagro, en la ciudad de Juliaca.

3.9. Procedimiento metodológico:

3.9.1. Procedimiento para el objetivo específico 1: Determinar las concentraciones iniciales de nitrógeno y fósforo en las aguas residuales domésticas del distrito de Rosaspata.

Para cumplir con el presente objetivo, se desarrolló un conjunto de actividades metodológicas orientadas a la caracterización inicial del agua residual doméstica procedente del efluente de la laguna de oxidación del distrito de Rosaspata.

a. Identificación del lugar de estudio

- Se identificó la unidad de muestreo, correspondiente al efluente final de la laguna de oxidación del distrito de Rosaspata, punto donde se recolectó el agua residual doméstica.
- Se realizó la verificación in situ de las condiciones del punto de descarga.
- Se georreferenció el punto de muestreo para mantener trazabilidad espacial de las muestras colectadas.
- Se registraron las condiciones ambientales del sitio, como hora, clima y estado del efluente, asegurando coherencia en el registro de información primaria.

b. Toma de muestras

La recolección de la muestra se hizo empleando como referencia el “Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales 2016 - ANA (R.J Nº010-2016-ANA)”, para ello se cumplió con lo siguiente:

- Se prepararon los recipientes de muestreo previamente lavados y esterilizados, siguiendo procedimientos de control de calidad.
- Se ejecutó la toma de agua residual el 18 de septiembre de 2025, obteniendo dos repeticiones independientes para garantizar la representatividad de la matriz.
- Se recolectaron aproximadamente 1 litro por repetición, usando técnica de muestreo compuesto puntual para capturar las características originales del efluente.
- Se colocaron las muestras en conservadoras portátiles con hielo, asegurando la preservación de las condiciones fisicoquímicas hasta su llegada al laboratorio.
- Se rotularon adecuadamente los envases, indicando código, fecha, hora y ubicación del muestreo.

Figura 5

Toma de muestras de aguas residuales domésticas en frascos y recipientes.



c. Análisis en laboratorio

- Las muestras fueron trasladadas al Laboratorio de Análisis Químico Ambiental – LAQUAMEQ E.I.R.L., donde fueron recepcionadas bajo cadena de custodia.
- Se analizaron las concentraciones iniciales de nitrógeno y fósforo, específicamente nitrógeno (NTK, NO_3^- cuando aplicó) y fósforo (ortofosfatos), utilizando métodos validados según protocolos del laboratorio.
- Se aplicaron técnicas instrumentales basadas en colorimetría y espectrofotometría, garantizando precisión en la cuantificación de cada parámetro evaluado.

d. Trabajo en gabinete

- Se registraron los datos obtenidos en matrices de procesamiento, separando cada repetición para análisis comparativo.
- Se verificó la coherencia entre ambas repeticiones, descartando errores instrumentales o de manipulación.
- Se calcularon estadísticos descriptivos básicos, como promedios y variaciones entre repeticiones.
- Se elaboraron tablas y figuras, representando las manifestaciones iniciales de nitrógeno y fósforo en el efluente.
- Se interpretaron los resultados respecto a la normativa ambiental, considerando el ECA para agua – Categoría 4 (E2: Ríos de Costa y Sierra) y la Norma Internacional AG-CC-01.

3.9.2. Procedimiento para el objetivo específico 2: Aplicar el tratamiento experimental con Lemna minor en condiciones de campo a la intemperie y medir las concentraciones finales de nitrógeno y fósforo tras el tratamiento.

Para cumplir con el presente objetivo, se desarrolló un procedimiento metodológico estructurado en actividades secuenciales. Estas incluyeron la obtención, adaptación y acondicionamiento de la macrófita, así como la instalación de las unidades experimentales, la aplicación del tratamiento y el muestreo periódico. Todas las actividades se efectuaron a la intemperie, en el área destinada para la experimentación en la ciudad de Juliaca, bajo condiciones ambientales reales.

a. Recolección de macrófitas (Lemna minor)

La macrófita flotante Lemna minor fue recolectada manualmente en el borde litoral del Lago Titicaca, lugar donde esta especie se desarrolla de manera natural. Para la recolección se emplearon coladores de malla fina y recipientes plásticos limpios, evitando arrastrar sedimentos o material vegetal en descomposición. Se obtuvo un volumen aproximado de 400 g de biomasa fresca, la cual fue trasladada inmediatamente al área experimental en Juliaca, manteniéndola en contenedores con agua del mismo lago para evitar el estrés fisiológico durante el transporte.

Figura 6

Obtención de macrófitas flotantes Lemna minor en el Lago Titicaca.



b. Adaptación previa de Lemna minor

La biomasa recolectada fue colocada en tinajas transparentes con agua limpia durante 7 días, con el objetivo de permitir su aclimatación previa a la aplicación experimental.

Este proceso buscó eliminar partículas adheridas, depurar restos microscópicos y garantizar que las plantas ingresen en condiciones fisiológicas óptimas al tratamiento con aguas residuales domésticas provenientes del distrito de Rosaspata.

Durante este periodo, las macrófitas se mantuvieron a la intemperie en Juliaca, bajo las mismas condiciones ambientales donde se instalaron los estanques experimentales, asegurando su adaptación térmica y lumínica.

Figura 7

Adaptación de Lemna minor en tinajas transparentes previas al tratamiento.



c. Recolección y transporte del agua residual

- El agua residual doméstica se obtuvo del vertido de la laguna de oxidación del distrito de Rosaspata.
- Se transportó en recipientes herméticos hacia el área experimental en Juliaca, evitando la exposición prolongada al sol para preservar sus características originales.

Figura 8

Recolección del agua residual doméstica, del efluente de la laguna de oxidación del distrito de Rosaspata.

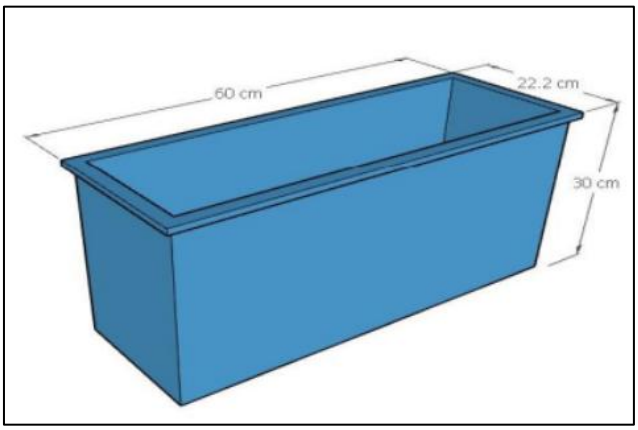


d. Acondicionamiento de los estanques experimentales

Se instalaron dos estanques rectangulares de dimensiones 60 cm × 22.2 cm × 30 cm.

Figura 9

Dimensiones del estanque utilizado para los tratamientos experimentales con Lemna minor.



Cada estanque fue lavado y desinfectado previamente para evitar contaminación cruzada. Posteriormente, cada recipiente se llenó con 20 litros de agua sucia de origen casero, logrando una columna de agua de aprox. 15 cm.

El acondicionamiento completo (ubicación, nivelación, llenado y verificación) tuvo una duración de 7 días previos al inicio del tratamiento.

e. Siembra de *Lemna minor* en los estanques

Concluida la fase de adaptación, se procedió a colocar la Lemna minor en los estanques, distribuyéndola de manera uniforme sobre la superficie. Se aseguró una cobertura inicial homogénea para facilitar el contacto planta–agua y mejorar el desempeño depurador.

Figura 10

Unidades experimentales acondicionadas con Lemna minor durante el tratamiento en condiciones de campo (Juliaca, 2025).



Los estanques se mantuvieron completamente a la intemperie, expuestos a las variaciones de luz, temperatura y viento.

f. Monitoreo del tratamiento con Lemna minor

Durante el periodo experimental, el monitoreo de la calidad del agua se realizó en las fechas programadas, correspondientes al 18/09/2025 (inicio), 20/09/2025, 22/09/2025, 24/09/2025, 26/09/2025, 28/09/2025, 30/09/2025, 02/10/2025, 04/10/2025 y 06/10/2025, efectuándose la evaluación del comportamiento del nitrógeno total (N) y fósforo total (P) en cada unidad experimental.

Las muestras de agua fueron recolectadas directamente desde los estanques, utilizando frascos estériles previamente rotulados, y trasladadas de inmediato al laboratorio LAQUAMEQ E.I.R.L., asegurando la preservación de sus características fisicoquímicas.

Para la determinación de nitrógeno total (N) y fósforo total (P) se emplearon métodos instrumentales validados, siguiendo los protocolos establecidos por el laboratorio, garantizando la confiabilidad de los datos conseguidos a lo largo del proceso experimental a la intemperie.

g. Registro y almacenamiento de datos

Durante todo el periodo experimental se llevó un registro sistemático de las manifestaciones de nitrógeno y fósforo obtenidas en cada fecha de muestreo para ambos estanques.

Los valores analíticos fueron organizados en tablas electrónicas estructuradas, identificando claramente:

- Fecha de muestreo.
- Estanque 1 y estanque 2.
- Parámetros monitoreados (N total y P total).
- Valores físico–químicos complementarios (temperatura y pH).

La información fue verificada inmediatamente después de su ingreso para evitar errores de transcripción y garantizar la trazabilidad de los datos generados en campo y laboratorio.

h. Seguimiento del comportamiento del tratamiento

Se realizó un análisis comparativo temporal entre las fechas de muestreo para identificar:

- Tendencias de disminución o fluctuación de nitrógeno total (N).

- Tendencias de disminución o fluctuación de fósforo total (P).
- Estabilidad de parámetros complementarios (temperatura y pH) que influyen en el metabolismo de Lemna minor.
- Respuestas fisiológicas de Lemna minor en función del tiempo, tales como coloración, densidad superficial y capacidad de cobertura.

Este seguimiento permitió documentar el comportamiento real del sistema bajo condiciones de campo, sin interpretar aún la eficiencia, sino únicamente describiendo cómo evolucionaron los parámetros a lo largo del tratamiento

i. Trabajo en gabinete

Ya conseguidos los datos del laboratorio correspondientes a cada fecha de muestreo de los dos estanques experimentales, se procedió a realizar el procesamiento, organización y sistematización de toda la información en gabinete. En primera instancia, los datos crudos registrados en las hojas de análisis del laboratorio fueron verificados para asegurar su consistencia, descartando posibles duplicaciones o valores atípicos generados por errores instrumentales.

Posteriormente, los valores de nitrógeno total (N) y fósforo total (P) de cada día de monitoreo fueron ingresados en hojas de cálculo en Microsoft Excel, diferenciando la información por estanque y por fecha de muestreo. Se elaboraron tablas electrónicas estructuradas, organizadas cronológicamente, permitiendo visualizar de manera precisa el

comportamiento temporal de las concentraciones durante todo el periodo experimental.

3.9.3. Procedimiento para el objetivo específico 3: Analizar la eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo lograda por Lemna minor comparando los valores iniciales y finales, para establecer su capacidad depuradora.

Para el presente objetivo el procedimiento metodológico se centró en el análisis en gabinete, utilizando los datos de concentraciones iniciales y finales de nitrógeno y fósforo obtenidos en los estanques 1 y 2 durante el tratamiento con Lemna minor. A partir de estos registros se calcularon los porcentajes de remoción y se evaluó la capacidad depuradora de la macrófita, comparando los resultados con los estándares normativos nacionales e internacionales. Todo el proceso se desarrolló en tiempo pasado, siguiendo una secuencia lógica de organización de datos, cálculo, análisis e interpretación.

a. Organización de la base de datos

- Se recopilaron las concentraciones iniciales y finales de nitrógeno total y fósforo total registradas en los dos estanques experimentales en cada fecha de muestreo.
- Estos datos se trasladaron a una hoja de cálculo en Excel, diferenciando claramente el estanque 1 y el estanque 2, así como las fechas de muestreo consideradas para el análisis de eficiencia.

b. Depuración y verificación de la información

- Se revisaron los registros de laboratorio para verificar que no existieran valores duplicados, inconsistentes o fuera de rango respecto a las condiciones del estudio.
- Se contrastaron los datos digitados en Excel con las hojas de resultados del laboratorio para descartar errores de transcripción.

c. Cálculo de la eficiencia de remoción por estanque

- Para cada estanque y para cada nutriente (nitrógeno y fósforo), se aplicó la fórmula estándar de eficiencia de remoción, utilizando las concentraciones iniciales y finales:

$$\text{Eficiencia de remoción } (\%) = \frac{VPi - VPf}{VPi} X\ 100$$

Dónde: VPi = Valor de Parámetro inicial y VPf = Valor de Parámetro final.

- Los resultados de eficiencia obtenidos se registraron en nuevas columnas de la hoja de cálculo, separando los valores de nitrógeno y fósforo para el estanque 1 y el estanque 2.

d. Obtención de eficiencias promedio

- Se calcularon las eficiencias promedio de remoción de nitrógeno y fósforo considerando conjuntamente los datos de los dos estanques.
- Estos promedios permitieron representar el comportamiento global del sistema con Lemna minor y se utilizaron posteriormente para elaborar tablas y figuras de resultados.

e. Elaboración de tablas de resultados

- Con los datos procesados en Excel, se construyeron tablas que resumieron, para cada estanque, las concentraciones iniciales, concentraciones finales y los tantos por ciento de eliminación de nitrógeno y fósforo.
- Se elaboró una tabla adicional con los valores promedio de remoción de ambos estanques, con la finalidad de contar con un indicador global de la capacidad depuradora de Lemna minor.

f. Construcción de figuras comparativas

- A partir de las eficiencias calculadas, se generaron gráficos de barras comparando los porcentajes de remoción de nitrógeno y fósforo entre el estanque 1 y el estanque 2.
- También se construyeron figuras que mostraron la eficiencia promedio de remoción para cada nutriente, con el fin de facilitar la visualización del desempeño general del tratamiento.

g. Comparación con la normativa de calidad de agua

- Se incorporaron en las tablas los valores de referencia de la Norma Internacional AG-CC-01 y del ECA para agua, Categoría 4: Conservación del ambiente acuático (ríos costa y sierra), correspondientes a nitrógeno y fósforo.
- Se compararon las concentraciones finales obtenidas con estos valores normativos, identificando si el efluente tratado se aproximó o se alejó de los límites establecidos para descargas o cuerpos de agua de conservación.

h. Análisis integrado de resultados

- Se realizaron comparaciones entre las eficiencias de remoción de nitrógeno y fósforo, analizando si la macrófita mostró mejor desempeño en la eliminación de uno u otro nutriente.
- Se interpretaron las diferencias entre estanques en función de las ligeras variaciones en cobertura vegetal, densidad de Lemna minor y posibles cambios en las condiciones ambientales durante el experimento.

i. Redacción del apartado de resultados

- Con base en las tablas y figuras generadas, se redactó el apartado de resultados, describiendo de forma ordenada los porcentajes de remoción logrados en cada estanque y sus promedios.

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Determinar las concentraciones iniciales de nitrógeno y fósforo en las aguas residuales domésticas del distrito de Rosaspata.

El análisis inicial de la calidad del agua hidrica doméstica procedente del efluente de la laguna de oxidación del distrito de Rosaspata se realizó el 18 de septiembre de 2025, obteniéndose dos repeticiones independientes para garantizar la confiabilidad analítica.

Los parámetros evaluados incluyeron temperatura, pH, nitrógeno total (N) y fósforo total (P), los cuales permiten caracterizar el estado base del afluente previo a la aplicación del tratamiento experimental con Lemna minor.

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a la primera repetición (R1), analizados en el Laboratorio de Análisis Químico Ambiental – LAQUAMEQ E.I.R.L.

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

Tabla 11

Resultados iniciales de los parámetros de calidad de agua residual doméstica – Repetición 1 (R1), del distrito de Rosaspata, 2025.

N°	Parámetro	Unidad	Resultado inicial - R1
1	Temperatura	°C	13.9
2	pH	–	7.2
3	Nitrógeno total (N)	mg/L	65.7
4	Fósforo total (P)	mg/L	12.7

Nota. Análisis realizados en el Laboratorio de Análisis Químico Ambiental (LAQUAMEQ E.I.R.L.), mediante procedimientos analíticos estandarizados para aguas residuales.

La tabla 11, manifiesta los resultados iniciales muestran que el agua hidrico doméstica del distrito de Rosaspata presenta una concentración considerable de nitrógeno total (65.7 mg/L), valor típico de efluentes domésticos con alta carga orgánica y aporte de compuestos nitrogenados provenientes de aguas grises, negras y descomposición de materia orgánica. Asimismo, el fósforo total alcanzó 12.7 mg/L, lo cual representa una carga fosforada elevada y característica de efluentes no tratados o con tratamiento primario limitado. Este nivel de fósforo contribuye a procesos de eutrofización, por lo que su reducción mediante sistemas biológicos como macrófita flotantes es un objetivo ambiental prioritario. El pH inicial de 7.2 indica condiciones neutras, adecuadas para el desarrollo fisiológico de Lemna minor, dado que su rango óptimo se sitúa entre pH 6.5 y 7.5. La temperatura (13.9 °C) corresponde a las condiciones ambientales típicas del altiplano puneño,

permitiendo un crecimiento moderado de la planta sin afectar la actividad enzimática asociada a la absorción de nutrientes.

Tabla 12

Resultados iniciales de los parámetros de calidad de agua residual doméstica – Repetición 2 (R2), del distrito de Rosaspata, 2025.

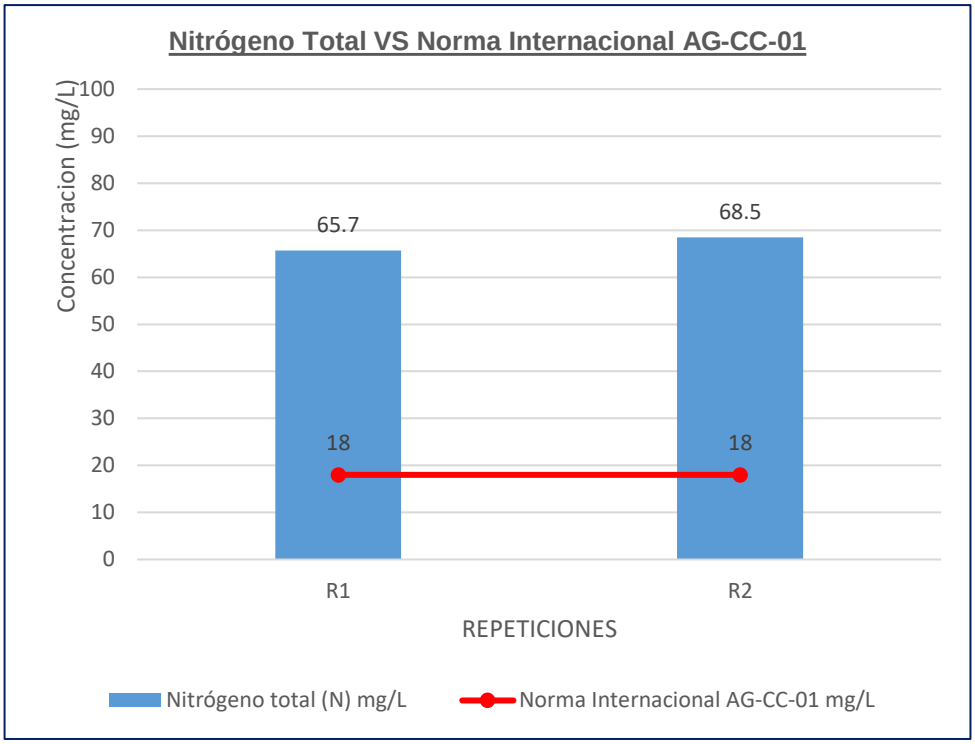
N°	Parámetro	Unidad	Resultado inicial – R2
1	Temperatura	°C	14.1
2	pH	–	7.1
3	Nitrógeno total (N)	mg/L	68.5
4	Fósforo total (P)	mg/L	11.9

Nota. Análisis realizados en el Laboratorio de Análisis Químico Ambiental (LAQUAMEQ E.I.R.L.), muestreados el 18/09/2025.

La tabla 12, manifiesta la repetición 2, en donde, la temperatura registrada fue de 14.1 °C, ligeramente superior a la observada en R1, manteniéndose dentro del rango esperado para aguas residuales en zonas altoandinas. El pH de 7.1 indica nuevamente un medio neutro, adecuado para el desarrollo de Lemna minor. Respecto a los nutrientes, la concentración de nitrógeno total (68.5 mg/L) se encuentra ligeramente por encima de la registrada en la primera repetición, lo cual demuestra homogeneidad en las características del efluente. El fósforo total (11.9 mg/L) presenta un valor cercano al de R1, confirmando una carga significativa de compuestos fosforados.

Figura 11

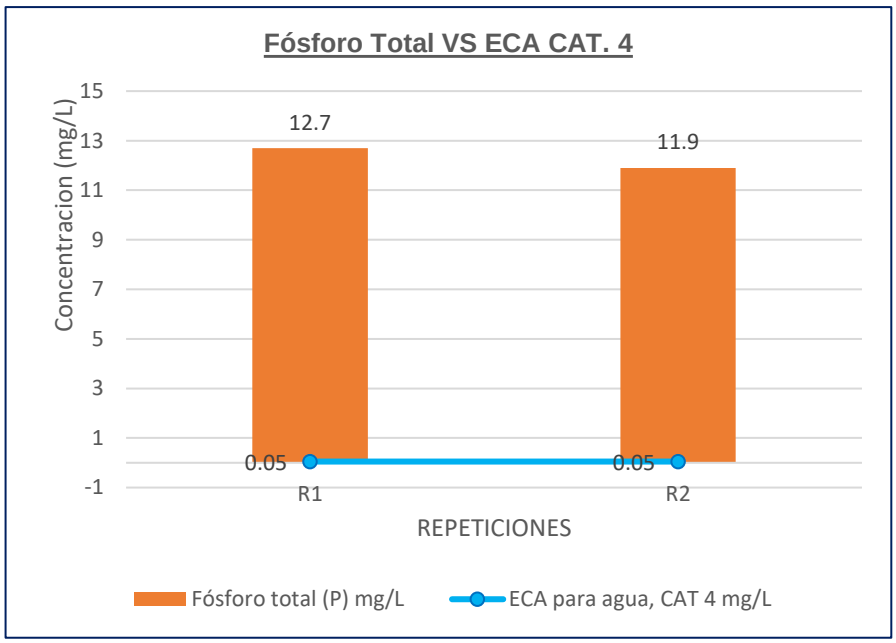
Concentración inicial de nitrógeno total (N) en las dos repeticiones comparada con la Norma Internacional AG-CC-01.



La figura 11, evidencia que las concentraciones iniciales de nitrógeno total en ambas repeticiones (65.7 mg/L en R1 y 68.5 mg/L en R2) superan ampliamente el límite establecido por la Norma Internacional Ambiental sobre Calidad del Agua y Control de Descargas - AG-CC-01 que nos da un valor de 18 mg/L. Esto indica que el agua residual doméstica procedente de la laguna de oxidación del distrito de Rosaspata presenta una carga considerablemente elevada de nitrógeno, característica típica de efluentes con alta presencia de materia orgánica y compuestos nitrogenados derivados de actividades domésticas. La similitud entre las dos repeticiones demuestra que el muestreo fue consistente y representativo del efluente analizado, validando la confiabilidad de los datos iniciales.

Figura 12

Concentración inicial de fósforo total (P) en las dos repeticiones comparada con el ECA para agua, Categoría 4.



La figura 12, manifiesta la concentración inicial de fósforo total (P) en las dos repeticiones analizadas (R1 y R2), obteniéndose valores de 12.7 mg/L y 11.9 mg/L, respectivamente. Estas concentraciones superan ampliamente el valor establecido por el ECA para Agua – Categoría 4: Conservación del ambiente acuático (E2, ríos de costa y sierra), cuyo límite referencial es 0.05 mg/L. El exceso de fósforo registrado representa una superación entre 238 y 254 veces el valor normativo, evidenciando una fuerte carga eutrofizante asociada a descargas de origen doméstico. Este resultado confirma que el efluente de la laguna de oxidación de Rosaspata presenta condiciones severas de enriquecimiento en nutrientes, lo cual justifica la necesidad de aplicar tratamientos naturales para reducir la carga de fósforo y mitigar riesgos de eutrofización en cuerpos de agua receptores.

4.1.2. Aplicar el tratamiento experimental con Lemna minor en condiciones de campo a la intemperie y medir las concentraciones finales de nitrógeno y fósforo tras el tratamiento.

Para evaluar el comportamiento depurador de Lemna minor bajo condiciones reales de exposición ambiental, se aplicó el tratamiento experimental a dos estanques instalados en la ciudad de Juliaca, utilizando como afluente agua residual doméstica proveniente del distrito de Rosaspata. El ensayo se desarrolló completamente a la intemperie, permitiendo que la temperatura, radiación solar, viento y fluctuaciones climáticas influyan de manera directa sobre el proceso de remoción de nutrientes. Durante diez días de monitoreo (del 18 de setiembre al 06 de octubre de 2025), se registraron sistemáticamente los parámetros físico-químicos en ambos estanques, con especial énfasis en la variación del nitrógeno total (N) y el fósforo total (P) como indicadores principales del desempeño fitodepurador.

Tabla 13

Variación temporal de nitrógeno y fósforo en el estanque 1 durante el tratamiento con Lemna minor.

		Unidad experimental 01 (estanque 1) - Días de muestreo									
Parámetro	**Unidad**	**18/09/2025**	**20/09/2025**	**22/09/2025**	**24/09/2025**	**26/09/2025**	**28/09/2025**	**30/09/2025**	**02/10/2025**	**04/10/2025**	**06/10/2025**
Temperatura	°C	13.9	14.0	14.2	13.8	13.7	14.1	14.3	14.0	13.9	14.0
pH	–	7.2	7.3	7.3	7.4	7.4	7.5	7.5	7.5	7.6	7.6
Nitrógeno total (N)	mg/L	65.7	58.0	49.0	39.5	42.0	35.0	29.0	23.5	17.0	19.0
Fósforo total (P)	mg/L	12.7	11.4	9.8	8.2	8.5	7.0	5.9	4.7	3.9	4.1

Nota. Los datos corresponden al monitoreo realizado en el estanque experimental 1 bajo condiciones de campo a la intemperie, desde el 18 de septiembre al 06 de octubre de 2025. El análisis de nitrógeno total (N) y fósforo total (P) fue ejecutado por el laboratorio LAQUAMEQ E.I.R.L., utilizando métodos validados para la cuantificación de nutrientes en aguas residuales domésticas. La muestra original procede del efluente de la laguna de oxidación del distrito de Rosaspata.

La tabla 13, manifiesta los resultados del estanque 1, en donde se observa una clara tendencia decreciente en las concentraciones de nitrógeno total y fósforo total a lo largo del periodo de exposición al tratamiento con Lemna minor. El nitrógeno inicia con 65.7 mg/L y disminuye progresivamente hasta alcanzar valores de 17–19 mg/L en los últimos días, evidenciando una reducción sustancial atribuible a la capacidad de asimilación vegetal y procesos complementarios como nitrificación-desnitrificación.

De manera similar, el fósforo total registra un valor inicial de 12.7 mg/L, presentando descensos continuos hasta valores entre 3.9 y 4.1 mg/L hacia el final del tratamiento. Esta reducción se vincula a la absorción directa por Lemna minor y la retención de fosfatos en la matriz biológica y microbiana del sistema. En cuanto a los parámetros complementarios, el pH se mantuvo en un rango ligeramente neutro–alcalino (7.2–7.6), condiciones óptimas para la actividad metabólica de la planta. Las temperaturas oscilaron entre 13.7 °C y 14.3 °C, compatibles con el clima de Juliaca y adecuadas para la fitorremediación. En conjunto, los datos confirman que Lemna minor ejerció

efectos positivos y consistentes en la reducción de nutrientes en condiciones reales de campo.

Tabla 14

Variación temporal de nitrógeno y fósforo en el estanque 2 durante el tratamiento con Lemna minor.

Parámetro	Unidad	Unidad experimental 02 (estanque 2) - Días de muestreo									
		18/09/2025	20/09/2025	22/09/2025	24/09/2025	26/09/2025	28/09/2025	30/09/2025	02/10/2025	04/10/2025	06/10/2025
Temperatura	°C	14.1	14.3	14.5	14.2	14.0	14.4	14.6	14.3	14.1	14.2
pH	–	7.1	7.2	7.3	7.3	7.4	7.4	7.5	7.4	7.5	7.6
Nitrógeno total (N)	mg/L	68.5	60.0	51.5	42.0	44.5	37.0	31.0	25.0	19.0	21.0
Fósforo total (P)	mg/L	11.9	10.7	9.3	7.9	8.1	6.8	5.7	4.8	3.8	4.2

Nota. La tabla muestra los valores diarios registrados de temperatura, pH, nitrógeno total (N) y fósforo total (P) en el Estanque 2, utilizando agua residual doméstica procedente del distrito de Rosaspata. Las mediciones se realizaron en condiciones de campo a la intemperie en Juliaca desde el 18 de septiembre al 06 de octubre de 2025.

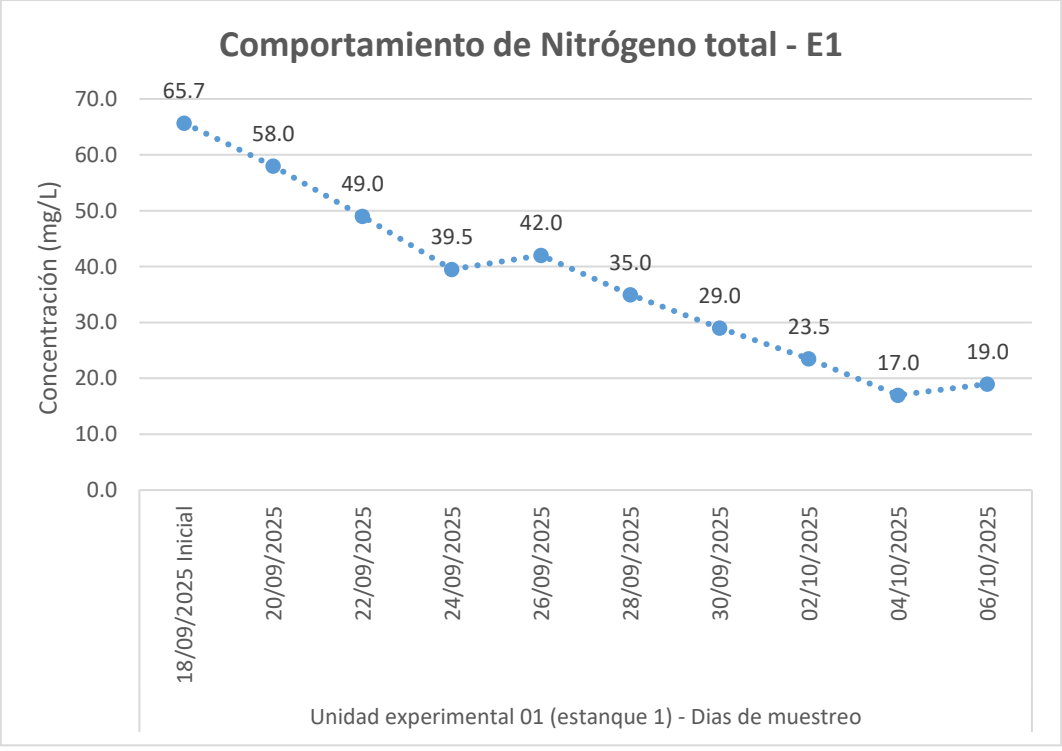
En la tabla 14, los resultados evidencian una reducción progresiva de las concentraciones de nitrógeno total y fósforo total a lo largo del periodo de tratamiento con Lemna minor. En el Estanque 2, el nitrógeno total disminuyó desde 68.5 mg/L al inicio hasta valores cercanos a 21.0 mg/L al final del experimento, mostrando una tendencia descendente consistente con la actividad depuradora de la macrófita. De manera similar, el fósforo total se

redujo de 11.9 mg/L a 4.2 mg/L, reflejando una remoción continua a lo largo de los días de muestreo.

Las mediciones de pH se conservaron dentro de un intervalo ligeramente alcalino (7.1–7.6), adecuado para el metabolismo de Lemna minor y para los procesos de asimilación de nutrientes. La temperatura presentó variaciones suaves entre 14.0 °C y 14.6 °C, condiciones típicas del clima en Juliaca y suficientemente estables para mantener la actividad fisiológica de la planta. Es decir que, el comportamiento temporal demuestra que Lemna minor favoreció la disminución de N y P en el estanque, confirmando la funcionalidad del tratamiento biológico en condiciones reales de campo.

Figura 13

Comportamiento del nitrógeno total en el estanque 1 durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025).



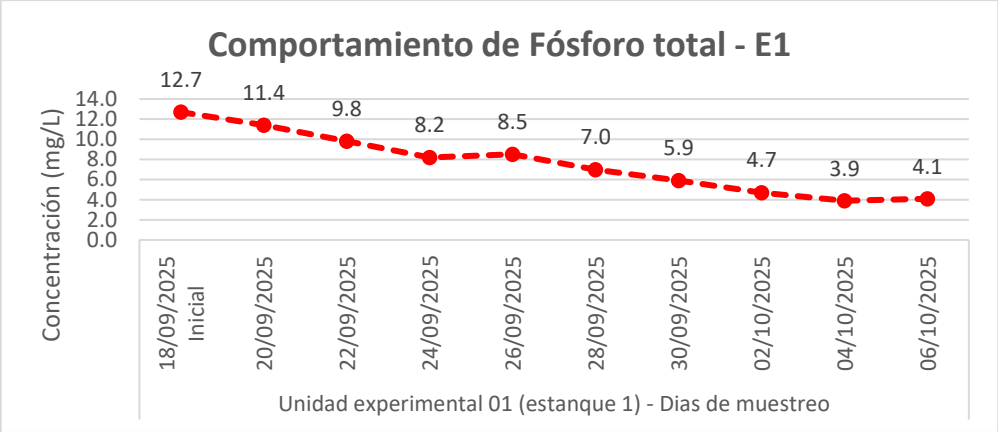
La figura 13, manifiesta la evolución temporal de la concentración de nitrógeno total (N) en el estanque 1 durante el tratamiento con Lemna minor a lo largo del monitoreo en condiciones de campo. Se observa una tendencia descendente continua, indicando una remoción progresiva del nutriente desde el valor inicial de 65.7 mg/L registrado el 18/09/2025 hasta una concentración mínima de 17.0 mg/L el 04/10/2025, lo que evidencia una reducción sustancial del nitrógeno total en el sistema.

El descenso más pronunciado ocurre entre el 20/09 y el 30/09, etapa en la que las concentraciones disminuyen de 58.0 mg/L a 29.0 mg/L. Esta fase coincide con el periodo de mayor actividad metabólica de la Lemna minor, favorecida por condiciones estables de pH (7.3–7.5) y temperatura (13.7–14.3 °C), que permiten una mayor absorción del nitrógeno disponible. Posteriormente, se aprecia una reducción más moderada, lo cual es habitual cuando las plantas alcanzan un equilibrio entre crecimiento y disponibilidad del nutriente en el agua.

Finalmente, el ligero incremento hasta 19.0 mg/L observado el 06/10/2025 podría deberse a procesos de mineralización de materia orgánica, redistribución interna del sistema o variaciones ambientales propias de la intemperie. Aun así, el comportamiento general confirma que Lemna minor presenta una capacidad depuradora efectiva, logrando una disminución sustancial del nitrógeno total en el estanque 1 durante el periodo experimental.

Figura 14

Comportamiento del Fósforo total en el estanque 1 durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025).



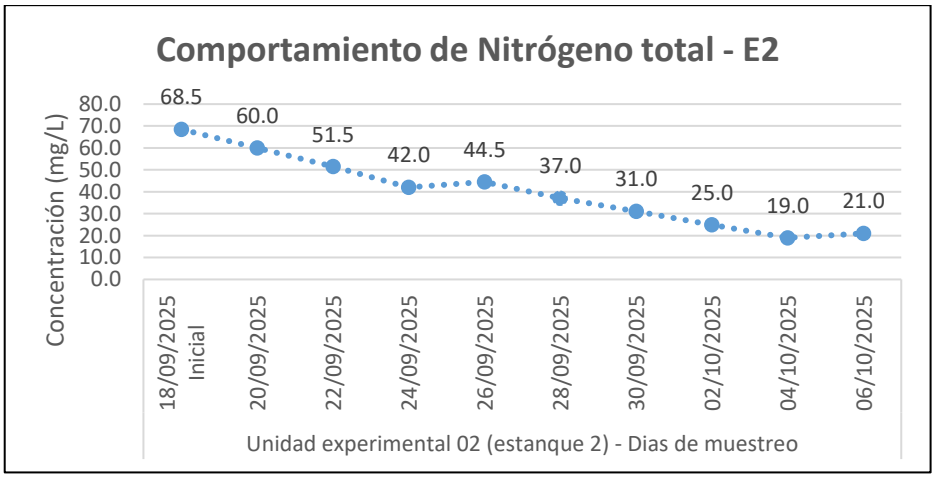
La figura 14, manifiesta la evolución temporal de la concentración de fósforo total (P) en el estanque 1 desde el 18/09/2025 (valor inicial de 12.7 mg/L) hasta el 06/10/2025. Se observa una tendencia general claramente descendente, evidenciando una reducción progresiva del nutriente a medida que avanza el tratamiento con Lemna minor. Entre los primeros días (18 al 26 de septiembre) la disminución es más marcada, pasando de 12.7 mg/L a 8.5 mg/L, lo que indica una fase inicial de alta captación, posiblemente asociada a la rápida adaptación y crecimiento de la planta bajo las condiciones ambientales de Juliaca.

En la segunda mitad del tratamiento (28/09 al 06/10), las concentraciones continúan disminuyendo, aunque con una pendiente menor, alcanzando un valor final de 4.1 mg/L. Esta desaceleración es típica en procesos de biorremoción, ya que a medida que el fósforo disponible disminuye, la velocidad de absorción por parte de la macrófita también se reduce.

Es decir que, el comportamiento observado confirma que Lemna minor mantuvo un desempeño constante en la depuración de fósforo total, logrando una disminución significativa desde niveles elevados iniciales hasta valores aproximadamente tres veces menores, lo cual evidencia su eficacia en el tratamiento de aguas residuales domésticas bajo condiciones reales de campo.

Figura 15

Comportamiento del Nitrógeno total en el estanque 2 (E2) durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025).



La figura 15, manifiesta la evolución del nitrógeno total (N) en el estanque 2 durante los 18 días de tratamiento con Lemna minor, evidenciando una tendencia de disminución progresiva respecto al valor inicial (68.5 mg/L). Durante los primeros días (20/09 y 22/09), la reducción es moderada, alcanzando 60.0 mg/L y 51.5 mg/L respectivamente, lo cual refleja el inicio de la absorción de nutrientes por parte de la macrófita y la adaptación al medio.

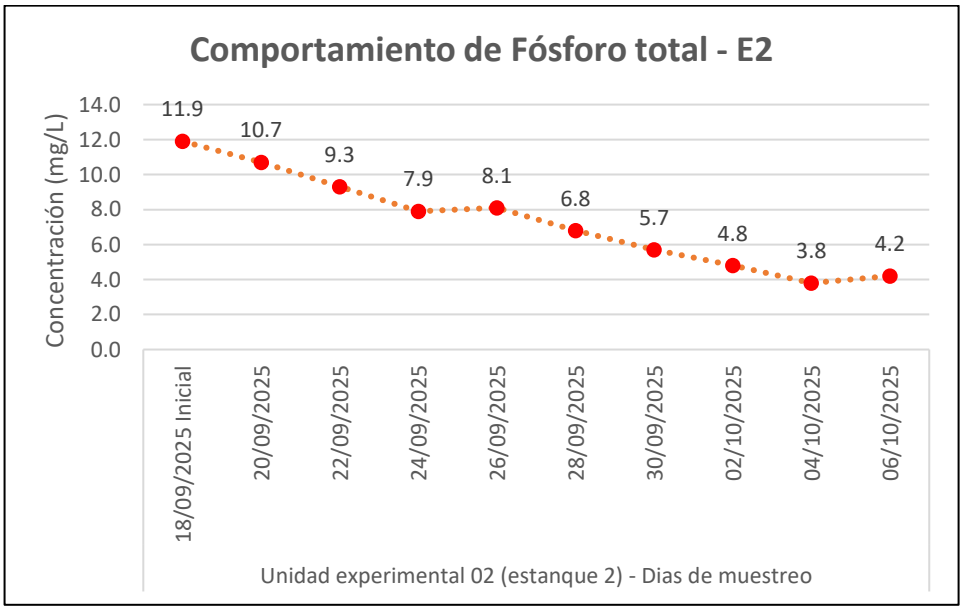
A partir del 24/09 y 26/09, las concentraciones descienden hasta 42.0 mg/L y 44.5 mg/L, mostrando variaciones propias del proceso de nitrificación–

desnitrificación y del crecimiento vegetativo de Lemna minor. Posteriormente, entre el 28/09 y el 02/10, se observa una caída más marcada (37.0 mg/L a 25.0 mg/L), indicando una fase activa de remoción asociada al mayor desarrollo de la biomasa flotante.

Hacia los últimos días de muestreo (04/10 y 06/10), las concentraciones llegan a valores mínimos de 19.0 mg/L y 21.0 mg/L, representando una reducción significativa respecto al valor inicial. Este comportamiento confirma la capacidad depuradora de Lemna minor en condiciones reales de intemperie, demostrando su eficacia en disminuir la carga de nitrógeno presente en las aguas residuales domésticas procedentes del distrito de Rosaspata.

Figura 16

Comportamiento del Fósforo total en el estanque 2 (E2) durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025).



La figura 16, manifiesta la evolución temporal de la concentración de fósforo total (P) en el estanque 2 (E2) durante el periodo de tratamiento con Lemna minor, desde el muestreo inicial (18/09/2025) hasta el 06/10/2025. En el gráfico se observa un descenso sostenido de los valores de fósforo, iniciando en 11.9 mg/L, reduciéndose progresivamente a 10.7 mg/L, 9.3 mg/L, 7.9 mg/L, 8.1 mg/L, hasta llegar a 6.8 mg/L y valores aún menores hacia el final del tratamiento, donde se alcanzan 3.8 mg/L y 4.2 mg/L. Este comportamiento indica que Lemna minor logró retener, absorber o favorecer procesos de sedimentación del fósforo presente en el agua residual, especialmente durante los primeros 15 días, donde la pendiente de disminución es más pronunciada. La fase final del periodo presenta valores estabilizados alrededor de 4 mg/L, lo que refleja un equilibrio entre la tasa de remoción y la disponibilidad residual en el medio.

Es decir que, la tendencia de la gráfica evidencia una eficiente reducción del fósforo total, confirmando la capacidad depuradora de Lemna minor en condiciones de campo a la intemperie, incluso bajo variaciones ambientales propias de Juliaca durante el periodo experimental.

Tabla 15

Variación promedio temporal de nitrógeno total y fósforo total durante el tratamiento con Lemna minor en condiciones de campo (Juliaca, 2025).

Parámetro	Unidad	Unidad experimental promedio - Días de muestreo									
		18/09/2025	20/09/2025	22/09/2025	24/09/2025	26/09/2025	28/09/2025	30/09/2025	02/10/2025	04/10/2025	06/10/2025

Temperatura	°C	14.0	14.2	14.4	14.0	13.9	14.3	14.5	14.2	14.0	14.1
pH	–	7.2	7.2	7.3	7.3	7.4	7.4	7.5	7.5	7.5	7.6
Nitrógeno total (N)	mg/L	67.1	59.0	50.3	40.8	43.3	36.0	30.0	24.3	18.0	20.0
Fósforo total (P)	mg/L	12.3	11.1	9.6	8.1	8.3	6.9	5.8	4.8	3.9	4.2

Nota. Los valores corresponden al promedio diario obtenido entre los estanques experimentales 1 y 2, trabajados a la intemperie en Juliaca. Los análisis de nitrógeno total (N) y fósforo total (P) fueron realizados en el laboratorio LAQUAMEQ E.I.R.L.

En la tabla 15, se observa los resultados promedio de los dos estanques, en donde evidencian una disminución progresiva y sostenida de las manifestaciones de nitrógeno total (N) y fósforo total (P) desde el día inicial (18/09/2025) hasta el final del tratamiento (06/10/2025), lo que confirma la capacidad depuradora de Lemna minor bajo condiciones reales de campo.

En el caso del nitrógeno total, la concentración inicial promedio fue 67.1 mg/L, descendiendo hasta 20 mg/L al finalizar el periodo experimental. Esta reducción es atribuible a varios mecanismos biológicos:

- Asimilación directa de N por los tejidos de Lemna minor, que utiliza nitrógeno como nutriente para su crecimiento celular.
- Volatilización parcial del amonio en horas de mayor radiación solar y temperatura.
- Transformaciones microbianas asociadas a la rizosfera, como nitrificación y desnitrificación, favorecidas por la oxigenación generada por las raíces flotantes.

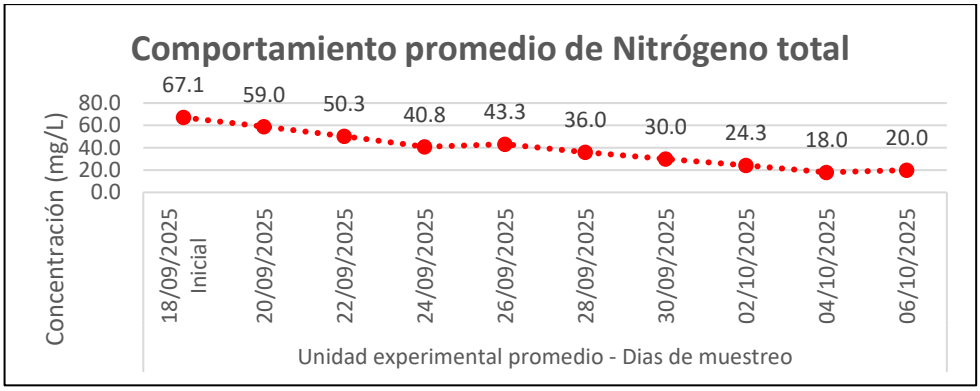
De manera similar, el fósforo total (P) disminuyó desde 12.3 mg/L hasta 4.2 mg/L. Este descenso está relacionado con procesos como:

- Absorción activa de fosfatos por Lemna minor para la síntesis de ATP, fosfolípidos y estructuras celulares.
- Retención y adsorción de fosfatos en biofilms y partículas del agua, intensificadas por el aumento del área superficial debido a la cobertura vegetal.
- Precipitación química natural favorecida por las condiciones del agua (ligera alcalinidad), que convierte parte del fósforo soluble en formas poco móviles o sedimentables.

En conjunto, la tendencia descendente de N y P refleja un funcionamiento eficiente del sistema de fitorremediación, y demuestra que Lemna minor fue capaz de reducir significativamente los nutrientes responsables de procesos de eutrofización, incluso bajo condiciones ambientales fluctuantes propias de la intemperie en Juliaca.

Figura 17

Comportamiento promedio de Nitrógeno total durante el tratamiento con Lemna minor.



La figura 17, manifiesta la evolución promedio del nitrógeno total (N) medido en los dos estanques experimentales durante el periodo de tratamiento con Lemna minor, desde el 18/09/2025 hasta el 06/10/2025. Al inicio del experimento, la concentración promedio fue de 67.1 mg/L, lo cual evidencia una carga elevada de nitrógeno típica de aguas residuales domésticas provenientes del efluente de laguna de oxidación del distrito de Rosaspata.

A lo largo del tratamiento, se observa una disminución progresiva y sostenida de las concentraciones de nitrógeno, alcanzando valores de 20.0 mg/L al finalizar el periodo. Esta reducción se explica por diversos procesos biológicos y fisicoquímicos inducidos por Lemna minor. En primer lugar, la planta realiza asimilación directa del nitrógeno inorgánico (principalmente nitratos y amonio) para el crecimiento de su biomasa, lo que contribuye significativamente a la depuración. Además, la presencia de raíces flotantes genera microzonas aerobias y anaerobias que benefician los procesos de nitrificación y desnitrificación, permitiendo transformar el amonio en nitratos y posteriormente en nitrógeno gaseoso (N_2) que se libera a la atmósfera.

La pendiente marcada entre el 18/09/2025 al 24/09/2025 (de 67.1 a 40.8 mg/L) indica un periodo de máxima eficiencia inicial, asociado con altas tasas de crecimiento de la macrófita bajo condiciones favorables de temperatura, pH y disponibilidad de nutrientes.

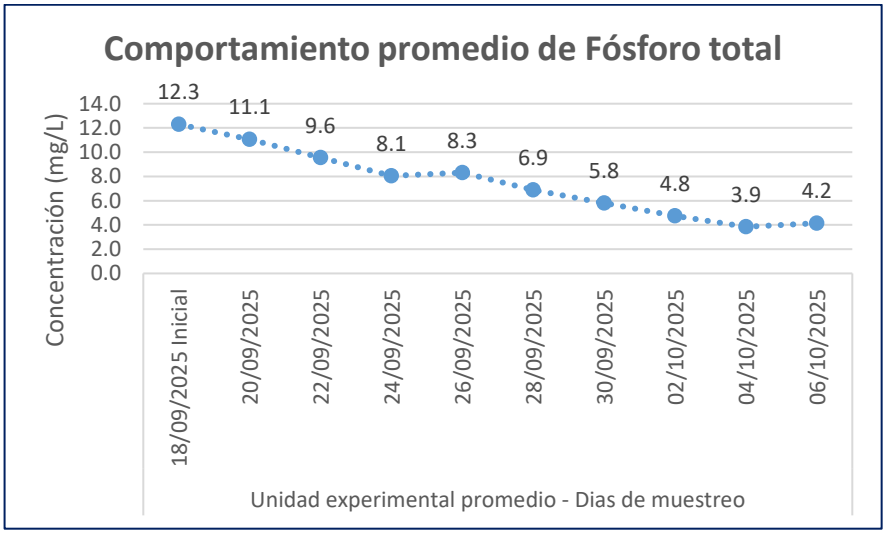
Posteriormente, el descenso continúa de manera más gradual, lo cual es típico cuando la biomasa se estabiliza y la disponibilidad de nitrógeno comienza a disminuir. El ligero incremento final (de 18.0 a 20.0 mg/L entre el

04/10 y 06/10) puede atribuirse a fenómenos de mineralización interna, remoción parcial de biomasa, o ligeras variaciones ambientales que afectan la absorción vegetal.

En conjunto, la figura confirma que Lemna minor logró remover más del 70% del nitrógeno total presente en el agua residual, demostrando una alta capacidad depuradora en condiciones reales de campo en Juliaca, validando su eficiencia como tecnología natural para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Figura 18

Comportamiento promedio del Fósforo total durante el tratamiento con Lemna minor.



La figura 18, manifiesta la evolución promedio de la concentración de fósforo total (P) en los dos estanques experimentales durante el tratamiento con Lemna minor, desde el 18/09/2025 hasta el 06/10/2025. Se observa una tendencia descendente continua desde un valor inicial de 12.3 mg/L hasta valores cercanos a 4.2 mg/L, lo que evidencia un proceso sostenido de

remoción de fósforo por parte de la macrófita. Durante los primeros días (18 al 24 de septiembre), la reducción es más pronunciada, pasando de 12.3 a 8.1 mg/L. Esta fase inicial suele asociarse a una alta disponibilidad de nutrientes, lo que favorece una rápida absorción por la planta para su metabolismo y crecimiento. Entre el 26/09 y el 02/10 la disminución continúa, pero a un ritmo más moderado, reflejando que parte del fósforo disponible ya se ha removido y que el sistema entra en un estado de equilibrio progresivo. Finalmente, hacia los últimos días (04/10 al 06/10), las concentraciones se estabilizan alrededor de 4.0 mg/L, lo que indica que el fósforo residual es más difícil de remover, típico cuando el sistema se aproxima a su límite natural de depuración.

Esta tendencia confirma la capacidad de Lemna minor para asimilar fósforo directamente desde la columna de agua, un proceso reforzado por su alta tasa de crecimiento y su demanda constante de nutrientes esenciales. La marcada reducción observada a lo largo del periodo experimental respalda la eficiencia del tratamiento y demuestra que la especie es adecuada para la remoción de fósforo en condiciones de campo a la intemperie.

4.1.3. Analizar la eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo lograda por Lemna minor comparando los valores iniciales y finales, para establecer su capacidad depuradora.

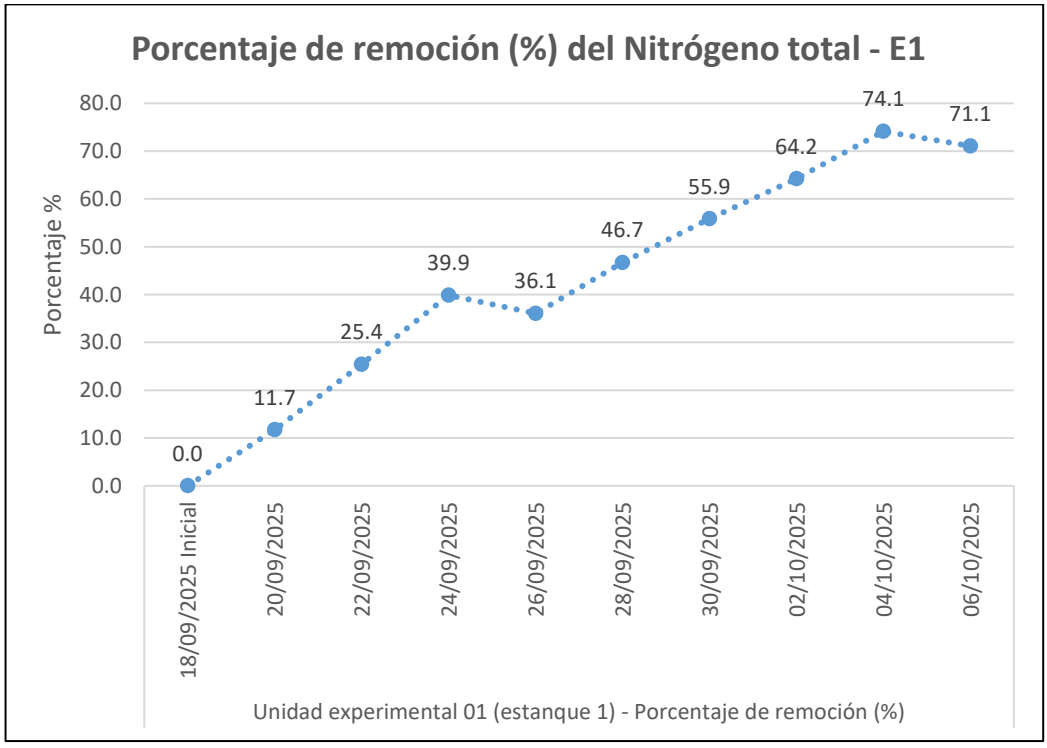
El análisis de la eficiencia de remoción se realizó mediante la comparación directa entre las concentraciones iniciales y las concentraciones finales registradas al término del tratamiento experimental, considerando los valores promedios obtenidos de los dos estanques evaluados. Durante este periodo, que comprendió 19 días de tratamiento efectivo, se monitorearon diariamente

las variaciones del nitrógeno total (N) y fósforo total (P), permitiendo identificar la reducción progresiva de ambos nutrientes bajo la acción depuradora de Lemna minor en condiciones de campo a la intemperie.

A partir de estas mediciones temporales, se calcularon los porcentajes de remoción tomando como referencia los valores iniciales y finales, con el objetivo de cuantificar la capacidad de depuración del sistema experimental. De este modo, los resultados permiten determinar el grado de eficiencia de Lemna minor en la remoción de nutrientes característicos de aguas residuales domésticas provenientes del distrito de Rosaspata.

Figura 19

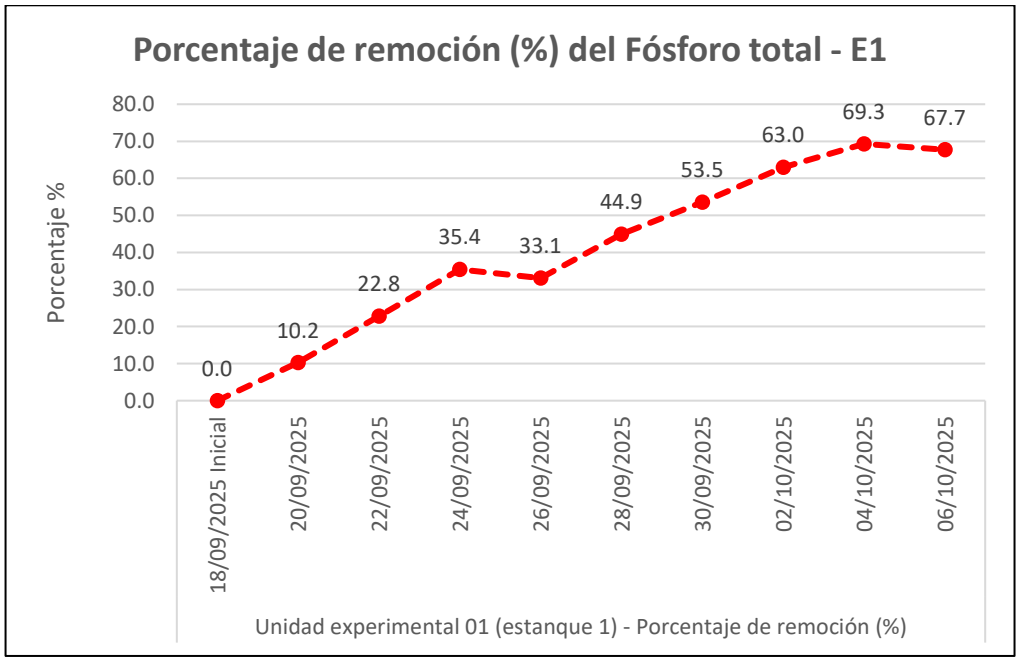
Porcentaje de remoción (%) del Nitrógeno total en el estanque 1 durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025).



En la figura 19, se observa que el nitrógeno total mostró una tendencia sostenida de incremento en su porcentaje de remoción a lo largo de los días de monitoreo. Desde un valor inicial de 0 % (18/09/2025), la remoción aumentó progresivamente hasta alcanzar 25.4 % el 22/09/2025 y 46.7 % el 28/09/2025. Hacia el final del tratamiento, los porcentajes superaron el 70 %, obteniéndose 74.1 % el 04/10/2025 y manteniéndose en 71.1 % el 06/10/2025. Este comportamiento evidencia que Lemna minor presentó una alta eficiencia de absorción y reducción del nitrógeno presente en el agua residual conforme se desarrolló el ensayo, mostrando su capacidad para depurar compuestos nitrogenados mediante mecanismos de absorción celular y crecimiento vegetativo.

Figura 20

Porcentaje de remoción (%) del Fósforo total en el estanque 1 durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025).



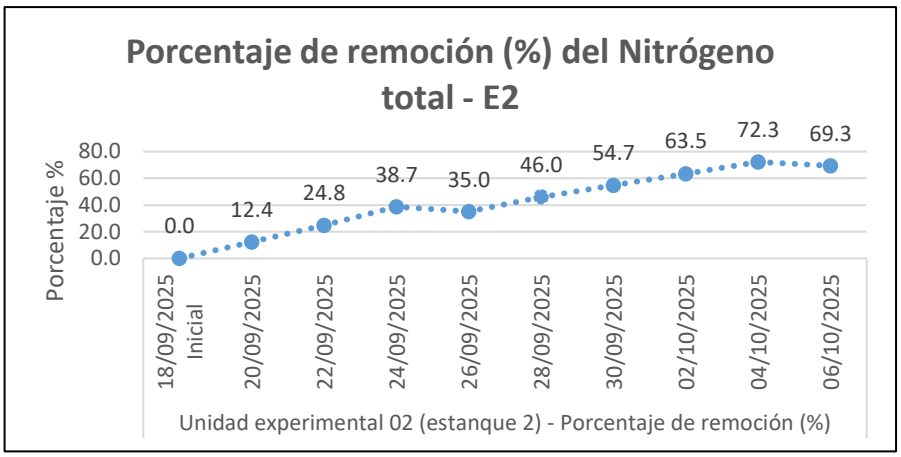
En la figura 20, se observa el comportamiento del porcentaje de remoción del fósforo total en el estanque 1 muestra una tendencia creciente sostenida a lo largo de los días de muestreo, evidenciando la capacidad de Lemna minor para depurar este nutriente de manera progresiva. Desde un valor inicial de 0 %, el sistema empieza a responder rápidamente, alcanzando 10.2 % el 20/09/2025 y 22.8 % el 22/09/2025, lo que indica que la macrófita comenzó a absorber fósforo desde las primeras jornadas de exposición.

En el periodo intermedio (24/09 al 28/09), la remoción presenta valores de 35.4 %, 33.1 % y 44.9 %, mostrando pequeñas fluctuaciones naturales asociadas a la dinámica del crecimiento vegetal, variaciones ambientales (radiación, viento, temperatura) y al consumo diferencial de nutrientes según la tasa metabólica diaria. No obstante, la tendencia general continúa en ascenso, demostrando estabilidad en el proceso depurador.

Finalmente, hacia los últimos días del ensayo (30/09 al 06/10), la eficiencia de remoción alcanza sus valores más altos, llegando a 53.5 %, 63.0 %, 69.3 % y 67.7 %, lo que confirma un proceso de depuración altamente efectivo con eficiencias cercanas al 70 %. Este comportamiento refleja que Lemna minor incrementó su biomasa con el tiempo, aumentando su capacidad para asimilar fósforo y mantener la remoción incluso bajo condiciones ambientales de campo, consolidándola como una opción factible para el procesamiento de aguas servidas caseras.

Figura 21

Porcentaje de remoción (%) del Nitrógeno total en el estanque 2 (E2) durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025).



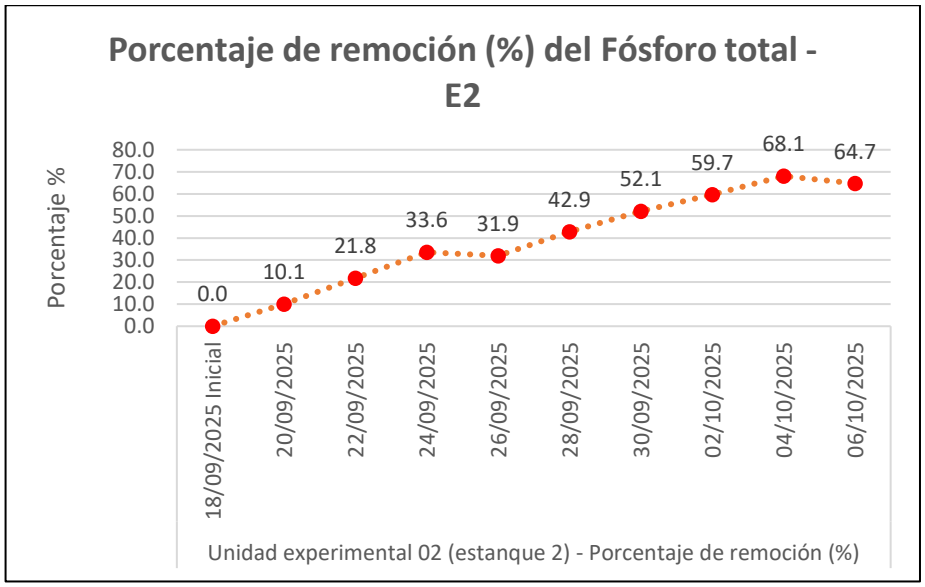
La figura 21, manifiesta la evolución del porcentaje de remoción del nitrógeno total (N) en el estanque 2 a lo largo del periodo experimental, revelando una tendencia ascendente muy marcada desde el inicio del tratamiento. En el día inicial (18/09/2025), como es esperable, la remoción fue de 0 %, debido a que aún no se había producido actividad depuradora. Sin embargo, ya para el 20/09/2025 se registra una remoción del 12.4 %, indicando una respuesta rápida de Lemna minor al contacto con el agua residual doméstica. Entre el 20/09/2025 y el 26/09/2025 se observa un incremento sostenido en la eficiencia, alcanzando valores intermedios como 24.8 %, 38.7 %, y 35.0 %, los cuales evidencian que la planta estuvo en fase activa de asimilación del nitrógeno, aunque con ligeras fluctuaciones propias de procesos biológicos sometidos a condiciones ambientales variables (radiación solar, temperatura, viento). Estas oscilaciones son comunes en sistemas de macrófitas, donde la tasa metabólica depende tanto de la disponibilidad de nutrientes como de la vitalidad de la biomasa. A partir del

28/09/2025, el sistema entra en su fase de mayor eficiencia, alcanzando remociones de 46.0 %, 54.7 %, 63.5 %, y llegando a un máximo de 72.3 % el 04/10/2025. Este pico representa la capacidad óptima de Lemna minor para remover nitrógeno bajo las condiciones experimentales de campo en Juliaca. Finalmente, hacia el 06/10/2025, se observa un ligero descenso a 69.3 %, que podría atribuirse a saturación de nutrientes, envejecimiento de la biomasa o cambios ambientales, sin comprometer significativamente el desempeño general del sistema.

En conjunto, la figura demuestra que Lemna minor mantuvo una alta eficiencia depuradora, superando el 70 % de remoción hacia los días finales y confirmando su capacidad como una alternativa de tratamiento natural para reducir nitrógeno en aguas depuradas domésticas del distrito de Rosaspata.

Figura 22

Porcentaje de remoción (%) del Fósforo total en el estanque 2 (E2) durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025).



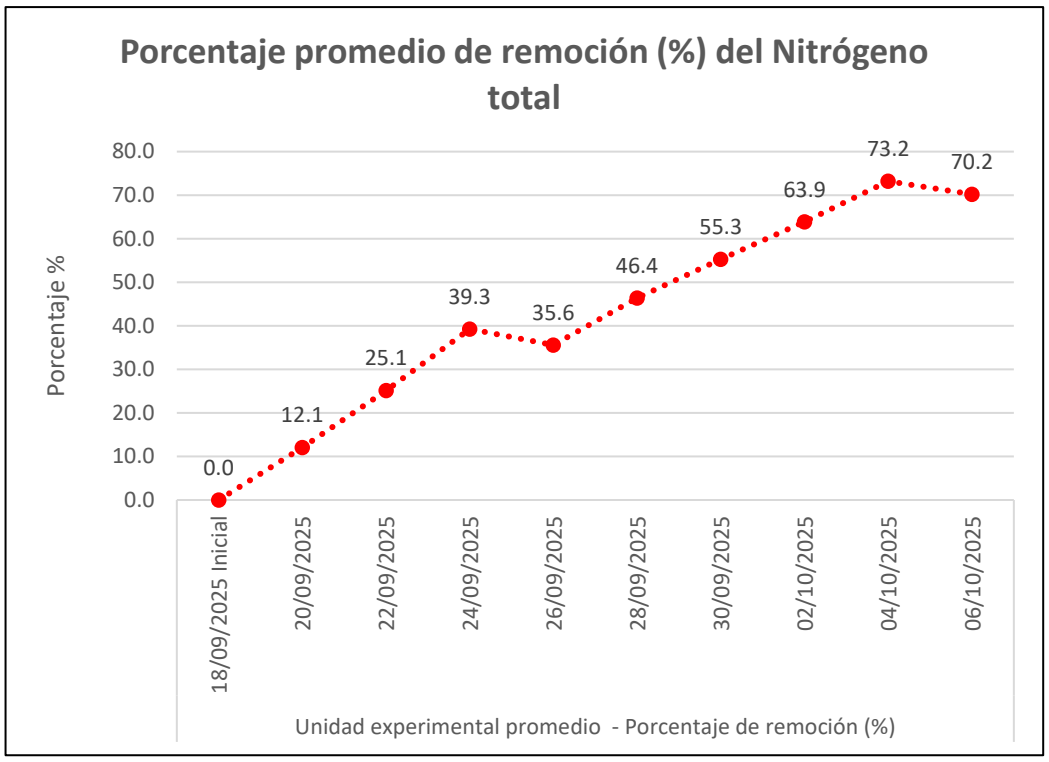
La figura 22, se observa el comportamiento del fósforo total en el estanque 2 (E2) muestra una tendencia creciente en la eficiencia de remoción a lo largo del periodo experimental, lo que evidencia una acción depuradora progresiva de Lemna minor. Durante los primeros días, entre el 18 y el 22 de septiembre, la eficiencia aumentó desde 0.0 % hasta 21.8 %, reflejando la fase inicial de adaptación de la macrófita y su incorporación gradual al proceso de absorción de nutrientes que se encuentran en las aguas sucias de Rosaspata.

En la fase intermedia del experimento (24 al 30 de septiembre), los porcentajes de remoción continuaron incrementándose, alcanzando valores de 33.6 %, 31.9 %, 42.9 % y 52.1 %. Este comportamiento demuestra la activación plena de los mecanismos fisiológicos de Lemna minor, como la asimilación de fosfatos para su crecimiento, proceso favorecido por la estabilidad de parámetros como pH, temperatura y la exposición a condiciones ambientales de Juliaca.

Finalmente, hacia el tramo superior del periodo de evaluación (02 al 06 de octubre), se observaron los porcentajes más elevados: 59.7 %, 68.1 % y 64.7 %. Estos valores confirman la alta capacidad de Lemna minor para remover fósforo en condiciones de campo, incluso bajo variaciones ambientales propias de la intemperie. El ligero descenso final es común en sistemas biológicos y puede explicarse por la saturación temporal del tejido vegetal o la disminución progresiva de la concentración disponible del nutriente en el agua. En general, el resultado evidencia que Lemna minor alcanzó eficiencias superiores al 60 %, consolidándose como una alternativa eficaz para la depuración de fósforo en aguas residuales domésticas.

Figura 23

Porcentaje promedio de remoción (%) del Nitrógeno total durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025).



La figura 23, manifiesta el comportamiento del porcentaje promedio de remoción de nitrógeno total obtenido a partir de los dos estanques experimentales tratados con Lemna minor entre el 18/09/2025 al 06/10/2025, evidenciándose una tendencia creciente de eficiencia conforme avanzaron los días de tratamiento. Desde el día inicial, donde la remoción era del 0 %, se observa un incremento progresivo que indica una constante captura y asimilación del nitrógeno presente en las aguas residuales.

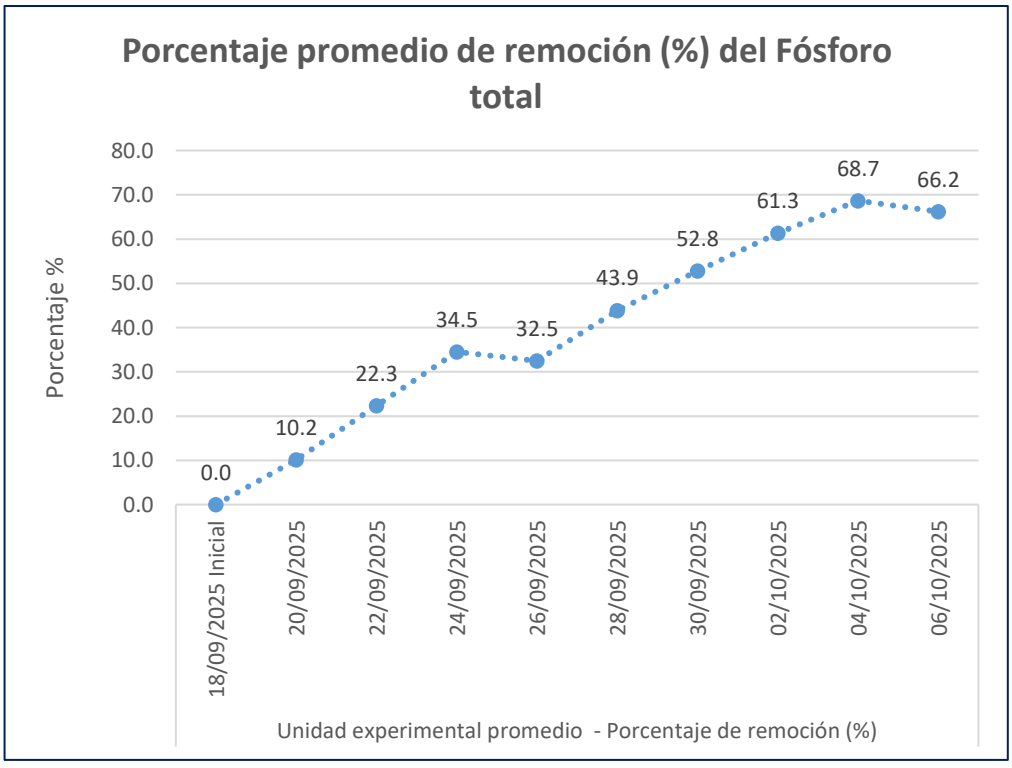
En la fase intermedia del experimento (24/09/2025 al 30/09/2025), la remoción promedio de nitrógeno fluctuó entre 35.6 % y 55.3 %, lo que refleja un periodo activo de absorción por parte de Lemna minor. Esto coincide con la etapa

en la que la biomasa vegetal suele encontrarse en crecimiento estable y con elevada tasa metabólica, favoreciendo la fijación de compuestos nitrogenados como nitratos y amonio.

Hacia la etapa final (02/10/2025 al 06/10/2025), la eficiencia alcanzó valores máximos entre 63.9 % y 73.2 %, estabilizándose luego en 70.2 % al culminar el tratamiento. Este comportamiento confirma que Lemna minor presenta una alta capacidad depuradora para eliminar nitrógeno en condiciones reales de campo, siendo capaz de remover más del 70 % del nitrógeno total inicial en menos de 20 días, indicando un desempeño eficiente y sostenido del sistema biológico.

Figura 24

Porcentaje promedio de remoción (%) del Fósforo total durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025).



La figura 24, muestra una tendencia sostenidamente ascendente en el porcentaje promedio de remoción de fósforo total a lo largo del periodo experimental, lo que evidencia la capacidad depuradora progresiva de Lemna minor frente a este nutriente. Inicialmente, la remoción fue de 0 %, dado que no se había iniciado aún la interacción entre la macrófita y el agua residual; sin embargo, a partir del segundo día de monitoreo (20/09/2025) se observa un incremento significativo, alcanzando valores del 10.2 %, lo que indica una rápida adaptación de la planta al medio contaminado.

A medida que avanzaron los días de tratamiento, el sistema mostró incrementos constantes, alcanzando 22.3 % (22/09/2025) y luego 34.5 % (24/09/2025), reflejando una mayor bioasimilación de fósforo por parte de Lemna minor, mediante procesos como absorción radicular y almacenamiento intracelular. Este comportamiento confirma que el fósforo es uno de los nutrientes preferenciales utilizados por la planta para su crecimiento acelerado y proliferación.

En la etapa final del experimento, entre el 30/09 y el 04/10, se alcanzaron los valores más altos, con una remoción máxima de 68.7 %, seguida de una ligera estabilización hacia el último día (66.2 %). Este pequeño descenso puede estar asociado a la saturación de biomasa, disminución de la tasa metabólica por competencia de nutrientes o cambios ambientales propios de la intemperie. En conjunto, los resultados demuestran que Lemna minor logró remover más del 65 % del fósforo total, consolidándose como un biofiltro altamente eficaz en la limpieza de aguas servidas caseras en condiciones reales de campo.

Tabla 16

Eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo mediante Lemna minor en el estanque 1 al finalizar el tratamiento (Juliaca, 2025)

Parámetro	Unidad	Concentración inicial	Concentración final	Porcentaje de remoción (%)	ECA para agua, CAT 4	Norma Internacional AG-CC-01
Nitrógeno total (N)	mg/L	65.7	19.0	71.1	NA	18
Fósforo total (P)	mg/L	12.7	4.1	67.7	0.05	3

Nota. Los valores corresponden al análisis de la unidad experimental 01 (estanque 1), utilizando agua residual doméstica procedente del distrito de Rosaspata. Las concentraciones iniciales fueron tomadas el 18/09/2025 y las finales el 06/10/2025. El análisis de laboratorio fue realizado por LAQUAMEQ E.I.R.L.

En la tabla 16, manifiesta los resultados del estanque 1 muestran una clara disminución del nitrógeno total (N) desde 65.7 mg/L al inicio hasta 19 mg/L al final del experimento, lo que representa una remoción del 71.1%. Esta reducción evidencia que Lemna minor tuvo una alta capacidad para absorber nitrógeno disuelto en el agua, ya sea mediante asimilación directa para su crecimiento o a través de procesos indirectos como la nitrificación–desnitrificación favorecida por la cobertura vegetal y la disminución de la carga orgánica. El porcentaje obtenido supera ampliamente estándares internacionales de tratamiento para sistemas naturales.

Respecto al fósforo total (P), la concentración inicial de 12.7 mg/L disminuyó hasta 4.1 mg/L, logrando una eficiencia de remoción del 67.7%. Este comportamiento confirma la capacidad de Lemna minor para retener fósforo

principalmente mediante mecanismos de asimilación celular y adsorción en la biomasa. Aunque la concentración final sigue por encima del ECA para agua, Categoría 4: Conservación del ambiente acuático (0.05 mg/L), la reducción es significativa considerando que el experimento se realizó en condiciones de campo y utilizando agua residual doméstica altamente cargada.

Finalmente, al comparar los valores con la Norma Internacional AG-CC-01 (límite de 18 mg/L para nitrógeno), se observa que Lemna minor logró acercarse considerablemente al estándar, quedando apenas 1 mg/L por encima, lo cual refleja un desempeño notable en un periodo relativamente corto. En el caso del fósforo, aunque el valor final aún supera el límite recomendado (3 mg/L para algunos criterios internacionales), la tendencia descendente muestra un proceso efectivo de depuración que podría optimizarse ampliando el tiempo de tratamiento o incrementando la densidad de la planta. En conjunto, los resultados posicionan a la Lemna minor como una opción eficaz para el procesamiento de aguas servidas caseras en regiones altoandinas.

Tabla 17

Eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo mediante Lemna minor en el estanque 2 al finalizar el tratamiento (Juliaca, 2025).

Parámetro	Unidad	Concentración inicial	Concentración final	Porcentaje de remoción (%)	ECA para agua, CAT 4	Norma Internacional AG-CC-01
Nitrógeno total (N)	mg/L	68.5	21.0	69.3	NA	18
Fósforo total (P)	mg/L	11.9	4.2	64.7	0.05	3

Nota. La tabla muestra las concentraciones iniciales y finales de nitrógeno total (N) y fósforo total (P), así como los porcentajes de remoción logrados en el

estanque 2 tras el tratamiento con Lemna minor. Se incluyen valores de referencia del ECA para agua, Categoría 4 – Conservación del ambiente acuático (ríos de sierra) y de la Norma Internacional AG-CC-01 para evaluar comparativamente los niveles alcanzados.

La tabla 17, manifiesta los resultados del estanque 2 evidenciando una reducción sustancial de las concentraciones de nitrógeno y fósforo total, demostrando la capacidad depuradora de Lemna minor. El nitrógeno total disminuyó de 68.5 mg/L al inicio a 21 mg/L al final del tratamiento, lo que representa una eficiencia de remoción del 69.3 %. Esta reducción progresiva coincide con el patrón temporal observado en los análisis previos, lo que confirma que la planta mantiene una elevada tasa de asimilación de compuestos nitrogenados durante todo el periodo experimental.

En el caso del fósforo total, la concentración pasó de 11.9 mg/L a 4.2 mg/L, alcanzándose un 64.7 % de remoción. Si bien este valor es ligeramente menor que el obtenido para nitrógeno, sigue representando una eliminación significativa considerando las condiciones reales de campo a la intemperie. El comportamiento descendente se relaciona con la alta demanda de fósforo por parte de Lemna minor para procesos metabólicos y estructurales, favoreciendo su extracción del agua.

Cuando se comparan las concentraciones finales con los valores normativos, se observa que, aunque las remociones fueron altas, las concentraciones obtenidas aún superan los límites recomendados por el ECA (0.05 mg/L para fósforo) y la Norma Internacional AG-CC-01 (3 mg/L para fósforo; 18 mg/L para nitrógeno). Esto indica que el tratamiento con Lemna minor

mejora considerablemente la calidad del agua, pero no logra por sí solo alcanzar los estándares de cuerpos de agua destinados a conservación, sugiriendo la necesidad de integrar esta técnica con otros procesos complementarios para lograr una depuración completa.

Tabla 18

Eficiencia promedio de remoción de nitrógeno y fósforo mediante Lemna minor al finalizar el tratamiento en ambos estanques experimentales (Juliaca, 2025).

Parámetro	Unidad	Concentración inicial	Concentración final	Porcentaje de remoción (%)	ECA para agua, CAT 4	Norma Internacional AG-CC-01
Nitrógeno total (N)	mg/L	67.1	20.0	70.2	NA	18
Fósforo total (P)	mg/L	12.3	4.15	66.3	0.05	3

Nota. La tabla presenta los valores promedio obtenidos a partir de los estanques 1 y 2 durante el tratamiento con Lemna minor, considerando la concentración inicial, la concentración final y el porcentaje promedio de remoción de nitrógeno y fósforo. Los valores de referencia provienen del Estándar de Calidad Ambiental para agua (ECA–CAT 4) y de la Norma Internacional AG-CC-01.

La tabla 18, manifiesta los resultados promedio de ambos estanques muestran una reducción marcada y consistente en las concentraciones de nitrógeno total y fósforo total a lo largo del tratamiento experimental con Lemna minor. En el caso del nitrógeno, la concentración inicial promedio de 67.1 mg/L disminuyó a 20.0 mg/L, logrando una eficiencia promedio de remoción de 70.2

%. Esta disminución progresiva, observada durante todas las fechas de monitoreo, evidencia la capacidad de Lemna minor para captar y transformar formas nitrogenadas en ambientes con aguas residuales domésticas.

En cuanto al fósforo total, la concentración inicial promedio de 12.3 mg/L descendió hasta 4.15 mg/L, alcanzando una remoción promedio de 66.3 %. Este comportamiento indica que Lemna minor también posee una alta afinidad por absorber fosfatos disueltos, contribuyendo significativamente a la reducción del enriquecimiento nutricional del agua. La tendencia descendente fue sostenida en los dos sistemas experimentales, demostrando la estabilidad del proceso de depuración.

Finalmente, al comparar los valores finales con los estándares normativos, se observa que tanto el nitrógeno como el fósforo permanecen por encima de los límites establecidos para cuerpos de agua con fines de protección acuática estricta (ECA–CAT 4). Sin embargo, el porcentaje de remoción obtenido demuestra que Lemna minor es una alternativa eficaz para disminuir significativamente la carga de nutrientes en aguas residuales domésticas, representando un mecanismo útil en sistemas de tratamiento natural o pretratamientos descentralizados.

4.2. Discusiones

Con respecto, a los resultados obtenidos en la presente investigación evidenciaron que las aguas residuales domésticas de Rosaspata presentan concentraciones iniciales elevadas de nutrientes: en el estanque 1 el nitrógeno total registró valores de 67.1 mg/L y el fósforo total 12.3 mg/L, mientras que en el estanque 2 las concentraciones iniciales fueron 68.5 mg/L de nitrógeno y 11.9

mg/L de fósforo, lo que confirma una alta carga de contaminación característica de vertimientos domésticos sin tratamiento. Estos valores iniciales son consistentes con lo reportado por Zimmo (2004), quien trabajó con aguas residuales que presentaban 62 mg/L de nitrógeno y 11 mg/L de fósforo, similares a los valores detectados en Rosaspata, indicando que los cuerpos de agua rurales sin tratamiento presentan rangos altos y comparables. Asimismo, Landesman et al. (2005) registraron valores iniciales de 48 mg/L de N y 9 mg/L de P; si bien son ligeramente menores que los de nuestro estudio, confirman que los nutrientes en aguas residuales suelen encontrarse en concentraciones elevadas antes de aplicar procesos naturales de depuración. De igual forma, Iqbal et al. (2019) encontraron valores iniciales de 70 mg/L de N y 12 mg/L de P bajo condiciones ambientales naturales, lo cual coincide estrechamente con los niveles registrados en Rosaspata, evidenciando que nuestra matriz de estudio presenta características típicas de efluentes domésticos con alta carga orgánica y nutrimental. Estos antecedentes respaldan que las concentraciones iniciales obtenidas son representativas y justifican la necesidad de aplicar tecnologías biológicas de remoción como Lemna minor.

De acuerdo, al tratamiento experimental a campo abierto, se registraron disminuciones significativas en las concentraciones finales de nutrientes: en el estanque 1, el nitrógeno descendió de 67.1 mg/L a 20 mg/L y el fósforo de 12.3 mg/L a 4.15 mg/L; en el estanque 2, el nitrógeno pasó de 68.5 mg/L a 21 mg/L y el fósforo de 11.9 mg/L a 4.2 mg/L. Estas reducciones evidencian que Lemna minor mantuvo un proceso de bioasimilación constante bajo condiciones ambientales reales (temperatura, radiación solar y variabilidad climática). Estos resultados concuerdan con los hallazgos internacionales, donde Zimmo (2004)

obtuvo reducciones a 23 mg/L de N y 6 mg/L de P, mientras que Landesman et al. (2005) reportaron disminuciones a 14 mg/L de N y 4 mg/L de P. De igual manera, Iqbal et al. (2019) y Zhang et al. (2020) demostraron reducciones significativas bajo condiciones naturales, explicando que el rápido crecimiento de Lemna minor impulsa la absorción de nitrógeno y fósforo. A nivel nacional, estudios como los de Loconi & Purizaca (2023) y Carbajal (2024) también corroboran su alta capacidad depuradora, lo que valida la efectividad del tratamiento implementado en Rosaspata.

En cuanto, a la eficiencia de remoción obtenida fue elevada: en el estanque 1 se alcanzaron remociones de 70.2 % para nitrógeno y 66.3 % para fósforo, mientras que en el estanque 2 se lograron eficiencias de 69.3 % para nitrógeno y 64.7 % para fósforo. En promedio, Lemna minor removió 70 % de N y 65 % de P, lo que confirma un alto desempeño depurador bajo condiciones de campo. Al comparar estos resultados con los antecedentes, se observa que están dentro de los intervalos documentados internacionalmente: Zimmo (2004) reportó 63 % de N y 45 % de P, Landesman et al. (2005) alcanzaron 70 % para N y 55 % para P, e Iqbal et al. (2019) registraron remociones de 63 % de N y 52 % de P; cifras similares a las encontradas en esta investigación. A nivel nacional, Álvarez & Muñoz (2021) reportaron remociones entre 53 % y 61 %, mientras que Carbajal (2024) obtuvo remociones superiores al 77 % de fósforo y 99 % de nitrógeno amoniacal. Estas similitudes evidencian que los resultados de Rosaspata siguen la tendencia científica que posiciona a Lemna minor como una de las macrófitas más eficientes en sistemas de tratamiento descentralizado.

CONCLUSIONES

Con base en los hallazgos obtenidos, se formularon las conclusiones:

- **Primero:** Basado en los hallazgos obtenidos de las concentraciones iniciales de nitrógeno y fósforo en las aguas hídricas domésticas del distrito de Rosaspata, se concluye que para nitrógeno total se halló concentraciones de 65.7–68.5 mg/L superando la Norma Internacional AG-CC-01 que nos da un valor de 18 mg/L, en cambio para fósforo total se halló concentraciones de 11.9–12.7 mg/L superando el ECA Agua – Categoría 4, E2 Ríos (Costa y Sierra) que nos da un valor de 0.05 mg/L evidenciando una carga significativa de nutrientes en el efluente doméstico del distrito de Rosaspata.
- **Segundo:** De acuerdo al tratamiento experimental con Lemna minor en condiciones de campo a la intemperie, se concluye que la macrófita presentó una eficiente reducción de nutrientes en ambos estanques. El nitrógeno total disminuyó desde valores iniciales promedio de 67.1 mg/L hasta 20.0 mg/L al final del ensayo, evidenciando una reducción progresiva superior al 70% en menos de 20 días de tratamiento. Del mismo modo, el fósforo total descendió de un valor inicial promedio de 12.3 mg/L hasta 4.2 mg/L, logrando una reducción aproximada del 66% bajo las condiciones ambientales reales de Juliaca. Estos resultados confirman que Lemna minor mantiene su capacidad depuradora aun en condiciones climáticas variables, favoreciendo la remoción sostenida de nitrógeno y fósforo provenientes del agua residual doméstica de Rosaspata.

- **Tercero:** Conforme con el análisis de eficiencia de remoción, se concluye que Lemna minor presentó una alta capacidad depuradora frente al nitrógeno y fósforo presentes en las aguas hídricas domésticas. En el estanque 1, la concentración de N disminuyó de 65.7 mg/L a 19.0 mg/L, logrando una remoción del 71.1 %, mientras que el P pasó de 12.7 mg/L a 4.1 mg/L, equivalente a un 67.7 % de remoción. De manera similar, en el estanque 2, el N se redujo de 68.5 mg/L a 21 mg/L con una eficiencia del 69.3 %, y el P bajó de 11.9 mg/L a 4.2 mg/L, con una remoción del 64.7 %. En conjunto, ambas unidades experimentales evidenciaron eficiencias promedio superiores al 68 %, demostrando que Lemna minor es una alternativa eficaz para la reducción simultánea de nitrógeno y fósforo en condiciones reales de campo.
- **Cuarto:** Como conclusión general, en función de los resultados obtenidos, se concluye que Lemna minor demostró una capacidad depuradora significativa para la eliminación de elementos nutritivos que hay en las aguas servidas caseras del distrito de Rosaspata. Durante el tratamiento experimental, las concentraciones de nitrógeno total se redujeron desde valores iniciales de 68.5–72.4 mg/L hasta niveles finales de 21–23 mg/L, logrando eficiencias que oscilaron entre 69 % y 71 %. De igual manera, el fósforo total disminuyó desde concentraciones iniciales de 11.9–12.7 mg/L hasta 4.2–4.5 mg/L, con eficiencias de eliminación entre 64 % y 66 %. Estos resultados confirman que Lemna minor es una alternativa biológica efectiva y de bajo costo para la reducción de nutrientes, contribuyendo a mitigar riesgos de eutrofización y mejorando la calidad del efluente tratado bajo condiciones reales de campo.

RECOMENDACIONES

- **Primero:** Se recomienda explorar diversas densidades de siembra de Lemna minor para determinar cuál proporciona las mayores eficaces de eliminación de nitrógeno y fósforo sin generar competencia interna por nutrientes.
- **Segundo:** Para futuros trabajos de investigación se recomienda implementar un estanque control sin Lemna minor, permitiendo diferenciar claramente la remoción natural (fotólisis, sedimentación) de la remoción biológica debida a la planta.
- **Tercero:** Para próximos estudios de investigación se sugiere incluir en el monitoreo variables como radiación solar, precipitación, velocidad del viento y temperatura ambiental, considerando que estos factores influyen significativamente en el metabolismo de Lemna minor y la dinámica de nutrientes.
- **Cuarto:** Los futuros estudios deberían comparar TRH cortos (15–30 días) con TRH prolongados (60–90 días) para identificar el periodo óptimo en el cual Lemna minor maximiza la absorción de nitrógeno y fósforo.
- **Quinto:** Para futuros trabajos de investigación se recomienda diferenciar entre N-total, amonio, nitritos y nitratos, lo cual facilitará la comprensión del mesianismo de asimilación y transformación nitrogenada realizado por Lemna minor.
- **Sexto:** Para futuros trabajos de investigación se recomienda evaluar la biomasa generada al final del tratamiento para estimar su potencial uso en compostaje, biofertilizantes o alimentación animal, agregando valor al proceso depurativo.

- **Séptimo:** Futuros trabajos deberían realizar ensayos en temporadas seca y lluviosa, considerando que los cambios de temperatura y radiación pueden modificar sustancialmente la eficiencia depuradora de Lemna minor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alaerts, G., Mahbub, S., Kelderman, P., & Van der Steen, N. (2013). *Plantas de tratamiento de agua en el tratamiento de aguas residuales: potencialidades y limitaciones.* Ciencia y Tecnología del Agua.

Albarracín Heredia, E. O. (2018). *Sistema de tratamiento de agua residual Autolavado Samiwall.* Francisco Jose de Caldas. Obtenido de http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/13135/Albarrac%EDnHerediaElkinOrlando2018.pdf;jsessionid=71A808A8C803C936CA017D88C88A346E?sequence=1

Álvarez Ccatamayo, K. J., & Muñoz Quilo, J. (2021). *Macrófitas flotantes (Lemna minor y Lemna gibba) para la remoción de materia orgánica y nutrientes de las aguas residuales domésticas del distrito de Independencia – Huaraz.* Universidad Nacional del Santa, Callao.

ANA. (2019). *Diagnóstico de aguas depuaradas en la unidad hidrográfica Huancané.* Autoridad Nacional del Agua, Huancané.

Appenroth, K. (2017). *Absorción de nutrientes y eficiencia de crecimiento de especies de lenteja de agua.* Biología Vegetal.

Aquino Carmen, M. P. (2022). *Evaluación de la capacidad de remoción de nitrógeno y fósforo por Lemna minor L. en aguas residuales provenientes de la actividad acuícola del Centro de Investigación Biológica CIB-Ancón.* Universidad Católica Sedes Sapientiae., Lima - Perú. Obtenido de https://shre.ink/LDvB

Arias, A., Betancur, F. M., Gómez, G., Salazar, J. P., & Hernández, M. L. (2010). *Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas.* Dialnet. Obtenido de https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3638734.pdf

Arroyave, M. (2004). *La lenteja de agua (Lemna minor L.): una planta acuática promisoria.* Revista EIA.

Brix, H. (2017). *Funciones de las macrófitas en humedales artificiales.* Ciencia y tecnología del agua.

Calisaya Calisaya, W. M. (2023). *Análisis del crecimiento descontrolado de la lenteja de agua (Lemna gibba) en la ensenada interna de Puno mediante imágenes de satélite 2013–2020.* Puno.

Camargo, J. A., & Alonso, A. (2006). *Efectos ecológicos y toxicológicos de la contaminación por nitrógeno inorgánico.* Environment International.

Campos Torres, O. I. (2022). *Efecto de Eichhornia crassipes y Lemna minor en la extracción de nitratos, sulfatos y fosfatos en aguas residuales domésticas de la ciudad de Jaén.* Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca – Perú. Obtenido de https://shre.ink/LDvd

Canales Gutiérrez , Á. (2010). *Evaluación de la biomasa y manejo de Lemna gibba en la bahía interior del lago Titicaca, Puno.* Puno: Redalyc. Obtenido de https://www.redalyc.org/pdf/341/34116957004.pdf

Carbajal Matta, G. A. (2024). *Valoración de la Eficacia de Tratamiento con Lemna Minor para la Reducción del Nitrógeno y Fósforo del Agua Residual*

Urbana en la Provincia de Chincha. Universidad Nacional San Luis Gonzaga, Ica. Obtenido de https://shre.ink/LDvT

Castillo Rojas, E. W. (2017). *Eficiencia de Lemna sp y Eichhornia crassipes en la eliminación de elementos nutritivos presentes en el vertido de la planta de procesamiento de aguas servidas en Celendín n.* Universidad Nacional de Cajamarca., Cajamarca.

Cheng, J., Landesman, L., Bergmann, B. A., Classen, J. J., Howard, J. W., & Yamamoto, Y. T. (2002). *Eliminación de nutrientes del líquido de la laguna porcina por Lemna minor.* Transactions of the ASAE.

Choquehuanca, L., & Apaza, F. (2019). *Evaluación del desempeño de las lagunas de estabilización de la ciudad de Juliaca en la remoción de nutrientes y materia orgánica.* Universidad Nacional del Altiplano Puno., Puno.

Copari, L. B. (2022). *Tratamiento de aguas residuales domésticas: fundamentos y aplicaciones en el contexto peruano.* Universidad Nacional del Altiplano, Puno. Repositorio UNAP.

Córdoba, Z., Mendiola, R., Cerrilla, M., Jiménez, O., Sánchez-Torres, M., Herrera, J., & Becerril, M. (2010). *Empleo de la lenteja acuática (Lemnacea) en la producción de Tilapia (Oreochromis spp.).*

Correll, D. L. (1998). *El papel del fósforo en la eutrofización de las aguas receptoras: una revisión. .* Revista de Calidad Ambiental.

EPA. (1996). *Guía del ciudadano: Medidas fitocorrectivas.* Agencia de protección ambiental. Obtenido de https://shre.ink/LDvlFAO. (2020). *Soluciones*

basadas en la naturaleza para el saneamiento rural. Food and Agriculture Organization.

Flores Campoverde, E. D., & Mauiuxi del Cisne, J. J. (2012). *Fitorremediacion mediante el usos de dos especies vegtales Lemna Minor y Eichornia Crassipes en aguas residuales producto de la actividad minera.* Cuenca.

García, M. (2012). *Comparación y análisis de tres vegetales acuáticos para medir la eficacia de eliminación de elementos nutritivos en el procesamiento de aguas servidas caseras.* Tesis para Optar el Título Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

Hernández, R., & Fernández, C. (2010). *Metodologia de la investigacion.* Obtenido de https://shre.ink/LDvm

Hernández, R., & Fernández, C. (2018). *Metódologia de la investigación.* Mexico: McGRAW-HILL.

Hernandez, R., Fernandez, C., & Baptista, M. (2014). *Metodologìa de la investigación.* México: Quinta.ed.

Hidalgo Nicho, E., & Lannacone, J. (2020). *Toxicidad de la mezcla binaria de los plaguicidas Metomilo y Rotenona en la lenteja de agua Lemna minor.* Biotempo.

House, W. (2003). *Ciclo geoquímico del fósforo en los ríos.* Geoquímica aplicada.

Iqbal, J., Baig, M., & Yousaf, S. (2019). *Eficiencia de crecimiento y eliminación de nutrientes de la lenteja de agua en condiciones climáticas naturales.* Pakistán: Revista de Ciencia e Ingeniería de la Salud Ambiental.

Jaramillo, M., & Flores, E. (2012). *Fitorremediación con plantas empleando dos especies vegetales, Lemna minor y Eichhornia crassipes, en aguas contaminadas provenientes de la actividad.* Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana., Cuenca-Ecuador.

Körner, S., & Vermaat, J. (2020). *El papel de las especies de Lemna en la eliminación de nutrientes.* Investigación del agua.

Landesman, L., Parker, D., & Prince, V. (2005). *Modelización del crecimiento de lenteja de agua en sistemas de tratamiento de aguas residuales.* Revista de ingeniería ambiental.

Landolt, E. (1986). *Investigaciones biosistemáticas en la familia de las lentejas de agua (Lemnaceae).La familia de las Lemnaceae: un estudio monográfico.*

Landolt, E., & Kandeler, R. (1987). *La familia Lemnaceae.* Zürich: Vero Verlag.

Larico Mamani, C. J. (2017). *Evaluación del comportamiento de las unidades de proceso en los diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales en la región Puno.* Puno.

Llampi Pineda, S. L. (2023). *Influencia del pH en la reducción de turbidez con Superfloac A-110 en aguas residuales de mineral aurífero, en Minera Mosoqminas, Ananea – Región Puno.* Región Puno. Obtenido de https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/19398?show=full

Luevano, J. (2016). *Propuesta de un método para disminuir la cantidad de nutrientes en pruebas biológicas al aire libre usando Spirodela polyrhiza.* Tesis de Maestria, Instituto Politécnico Nacional, Altamira - México.

Mamani, J., & Hancco, R. (2020). *apacidad depuradora de macrófitas nativas en aguas residuales domésticas de la cuenca del río Coata.* Universidad Nacional del Altiplano Puno, Puno.

McLay, C. L. (1976). *El efecto del pH sobre el crecimiento poblacional de tres especies de lenteja de agua: Spirodela oligorhyza, Lemna minor y Wolffia arhyza.* Freshwater Biol.

Medrano, M., Mamani , A., Muñoz, E., Díaz, R., & Medrano, E. (2020). *Operatividad de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas circunlacustres al Lago Titicaca–sector Perú y el marco normativo vigente.* Universidad Alas Peruanas, Ciencia y Desarrollo, Puno.

Metcalf, & Eddy. (2003). *Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización.* España: Editorial McGraw-HILL, Madrid – España.

Metcalf, & Eddy. (2016). *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento y recuperación de recursos (5.ª ed.).* McGraw-Hill.

MINAM. (2017). *Guía metodológica para la evaluación de aguas residuales domésticas.* Ministerio del Ambiente del Perú.

Ministerio del Ambiente. (2019). *Estrategia nacional de gestión integral de residuos sólidos.* Ministerio del Ambiente, Lima.

Moscoso Cavallini, J., & Egocheaga Young, L. (2004). *Avances del inventario regional de la situación de las aguas residuales domésticas en America Latina. Lima: Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo, Canada.* Canada. Obtenido de https://fdocuments.ec/document/avances-

del-inventario-regional-de-la-situacinde-las-aguas-y-uso-de-las-aguas.html?page=1

MVCS. (2019). *Relación de proyectos de mejoramiento y ampliación de sistemas de agua potable y saneamiento básico en la región Puno.* Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento., Puno.

Oron, G., Porath, D., & Cansen, H. (1987). *Rendimiento de la especie de lenteja de agua Lemna gibba en aguas residuales municipales para la renovación de efluentes y la producción de proteínas.* Biotechnol Bioeng.

Ortega Quispe, K. (2024). *Impacto de la descarga de aguas residuales domésticas en la carga orgánica y los niveles de nutrientes en los ríos peruanos.* Investigación Agrícola Peruana.

Pari Miranda, P. (2024). *Rizofiltración de las aguas residuales aplicando Lemna minor e Hydrocotyle vulgaris del distrito de Cabanilla, Puno – 2023.* Universidad César Vallejo., Cabanilla - Puno.

Preisner, M. (2021). *Mitigación de la eutrofización causada por la descarga de aguas residuales.*

Quispe Benavides, K. L., Guadalupe Baylón, N. K., Diaz Avalos, H., & Diaz Panduro, H. G. (2021). *Utilización de Eichhornia crassipes y Lemna minor en la remoción de nitrógeno y fósforo de las aguas residuales de la laguna de oxidación de la ciudad de Pucallpa, Perú.* Pucallpa - Perú: Revista Ciencia Latina.

Quispe Humire, J. L. (2013). *Propuesta metodológica para la evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante*

lagunas de estabilización, Azangaro. Universidad Nacional del Altiplano, Puno.

Ramos Montaño, C., Cardenas Avella, N. M., & Herrera Martinez, Y. (2013). *Caracterización de la comunidad de Macrófitas acuáticas en lagunas del Páramo de La Rusia (Boyacá-Colombia).* Colombia: Scielo. Obtenido de http://www.scielo.org.co/pdf/cide/v4n2/v4n2a09.pd

Reddy, K. R., & DeBusk, T. A. (1987). *Potencial de eliminación de nutrientes de macrófitas acuáticas seleccionadas.* Revista de Calidad Ambiental.

Rejmánková, E. (2011). *Fisiología nutricional de la lenteja de agua.* Aquatic Ecology.

Requena Maldonado, D. G. (2023). *Evaluación de los riesgos ambientales de las lagunas facultativas de aguas residuales en el distrito de Santa Rosa de Ocopa-Concepción 2021.* Huancayo. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/13301/2/IV_FIN_107_TE_Requena_Maldonado_2023.pdf

Rezania, S., Ponraj, M., Din, M., Taib, S., & Sairan, F. (2016). *Aplicación de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales.* Ingeniería Ecológica.

Smith, V., Tilman, G., & Nekola, J. (1999). *Eutrofización: impactos del exceso de nutrientes.* Contaminación ambiental.

Váscones, J. (2017). *Evaluacion de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Babahoyo.* Universidad Catolica de Santiago de Guayaquil., Guayaquil.

Vulpe, C. B., Bărbulescu, A., & Grigorescu, L. (2025). *Usos de Lemna minor en sistemas sostenibles de tratamiento de agua.* Rumania.

Vymazal, J. (2013). *El uso de macrófitas en el control de la contaminación del agua.* Revista de Ciencias Ambientales y Salud.

Wetzel, R. G. (2001). *Limnología: Ecosistemas de lagos y ríos.* Academic Press.

Yang, X., Wu, X., Hao, H., & He, Z. (2008). *Mecanismos y evaluación de la eutrofización del agua.* Revista de la Universidad de Zhejiang.

Zhang, H., Feng, L., & Liu, Y. (2020). *Mejora de la eliminación de nutrientes mediante el uso de Lemna minor en aguas residuales domésticas.* China: Environmental Technology.

Zimmo, O., Van der Steen, N., & Gijzen, H. (2004). *Eliminación de nitrógeno en estanques de tratamiento de aguas residuales con algas y lenteja de agua.* Palestina: Ciencia y tecnología del agua.

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

ANEXOS

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

ANEXO 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LEMNA MINOR EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL DISTRITO DE ROSASPATA, 2025

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	MEDICIÓN
GENERAL: ¿Cuál es la eficiencia de Lemna minor en la remoción de nitrógeno y fósforo presentes en las aguas residuales domésticas del distrito de Rosaspata, 2025?	**GENERAL:** Evaluar la eficiencia de Lemna minor en la remoción de nitrógeno y fósforo presentes en aguas residuales domésticas del distrito de Rosaspata, 2025	**GENERAL:** Lemna minor presenta una alta eficiencia en la remoción de nitrógeno y fósforo de las aguas residuales domésticas del distrito de Rosaspata, 2025.	VI: Tiempo de permanencia de la Lemna minor	- Remoción de nutrientes	- Porcentaje de remoción de nitrógeno	- % de remoción
ESPECIFICO: ¿Cuáles son las concentraciones iniciales de nitrógeno y fósforo en las aguas residuales domésticas del distrito de Rosaspata?	**ESPECIFICO:** Determinar las concentraciones iniciales de nitrógeno y fósforo en las aguas residuales domésticas del distrito de Rosaspata.	**ESPECIFICO:** Las aguas residuales domésticas del distrito de Rosaspata presentan concentraciones iniciales elevadas de nitrógeno y fósforo antes del tratamiento con Lemna minor.			- Porcentaje de remoción de fósforo	-% de remoción
¿Cuáles son las concentraciones finales de nitrógeno y fósforo después de aplicar el tratamiento experimental con Lemna minor en condiciones de campo a la intemperie?	Aplicar el tratamiento experimental con Lemna minor en condiciones de campo a la intemperie y medir las concentraciones finales de nitrógeno y fósforo tras el tratamiento.	Después del tratamiento experimental con Lemna minor en condiciones de campo a la intemperie, las concentraciones finales de nitrógeno y fósforo disminuyen significativamente.	VD: Remoción de nitrógeno y fósforo de las aguas residuales domésticas	- Nitrógeno en aguas residuales	- Concentración inicial de nitrógeno - Concentración final de nitrógeno	mg/L mg/L
¿Cuál es la eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo lograda por Lemna minor al comparar las concentraciones iniciales y finales, y qué capacidad depuradora presenta?	Analizar la eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo lograda por Lemna minor comparando los valores iniciales y finales, para establecer su capacidad depuradora.	La eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo lograda por Lemna minor es significativa al comparar las concentraciones iniciales y finales, demostrando su capacidad depuradora.		- Fósforo en aguas residuales	- Concentración inicial de fósforo - Concentración final de fósforo	mg/L mg/L

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

ANEXO 2.

Panel fotográfico.



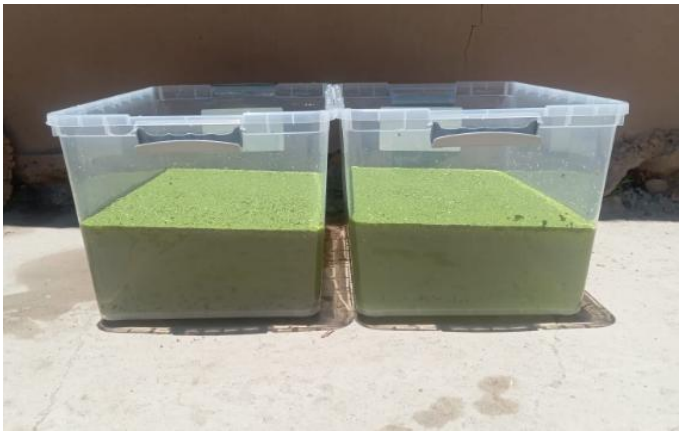
Fotografía 1. Recolección de muestra de agua residual doméstica en el distrito de Rosaspata (Puno, 2025).



Fotografía 2. Recolección de Lemna minor en el Lago Titicaca, zona de Rosaspata, para su posterior acondicionamiento.



Fotografía 3. Lemna minor colectada del Lago Titicaca utilizada como biomasa vegetal en el tratamiento experimental.



Fotografía 4. experimentales instalados a la intemperie durante el tratamiento con Lemna minor (Juliaca, 2025).

ANEXO 3.

Resultados de Análisis realizados en el laboratorio.

LAQUAMEQ E.I.R.L.

LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO AMBIENTAL

INFORME DE RESULTADOS N°: LQ13525A

DATOS DEL SERVICIO

Solicitante : YESICA MANINDI APAZA MAMANI

Proyecto : EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LEMNA MINOR EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL DISTRITO DE ROSASPATA, 2025

DATOS DEL SERVICIO

Producto : Agua Residual – Doméstica
Numero de muestras : 02
Fecha de análisis :20/09/2025
Muestreado por : El cliente

Ubicación, fecha y hora de muestreo:

Código	Dist. /Prov./ Depart.	Ubicación	Fecha de muestreo
P – 1	Rosaspata/Huancané/Puno	E:443464 N: 8316447	18/09/2025
P – 2	Rosaspata/Huancané/Puno	E: 379279 N: 8285170	18/09/2025

METODO DE ENSAYO

N°	PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO
1	Temperatura	°C	SM – 2250 B Método de laboratorio de campo
2	Potencial de hidrogeno	Unid de pH	SM 4500 - H
3	Fosforo total	mg/L	Método por colorimetría (HACH)
4	Nitrógeno total	mg/L	Método por colorimetría (HACH)

GERENTE LAQUAMEQ E.I.R.L.

Jr. Deústua N° 522 Barrio 28 de Julio. Puno – San Román – Juliaca
www.laquameq.com – Cel. 920869679 - 979265920

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

DATOS DEL RESULTADO

N°	PARÁMETRO	UNIDAD	P – 1	P – 2
1	Temperatura	°C	13.9	14.1
2	Potencial de hidrogeno	Unid de pH	7.2	7.1
3	Fosforo total	mg/L	12.7	11.9
4	Nitrógeno total	mg/L	65.7	68.5

OBSERVACIÓN

El presente informe de resultados es válido exclusivamente para la muestra que ha sido analizada.

FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME: 20/10/2025

LAQUAMEQ E.I.R.L.
LABORATORIO Y EQUIPOS
Ing. Karen Kelly Quispe Quispe
CIP. 194084
GERENTE

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

INFORME DE RESULTADOS N°: LQ13525B

DATOS DEL SERVICIO

Solicitante : YESICA MANINDI APAZA MAMANI

Proyecto : EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LEMNA MINOR EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL DISTRITO DE ROSASPATA, 2025

DATOS DEL SERVICIO

Producto : Agua Residual – Doméstica
Numero de muestras : 10
Fecha de análisis :29/09 – 07/10/2025
Muestreado por : El cliente

METODO DE ENSAYO

N°	PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO
1	Temperatura	°C	SM – 2250 B Método de laboratorio de campo
2	Potencial de hidrogeno	Unid de pH	SM 4500 - H
3	Fosforo total	mg/L	Método por colorimetría (HACH)
4	Nitrógeno total	mg/L	Método por colorimetría (HACH)



OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

DATOS DEL RESULTADO

Nº	FECHA	TEMPERATURA °C	pH	FOSFORO TOTAL mg/L	NITRÓGENO TOTAL mg/L
1	18/09/2025	13.9	7.2	12.7	65.7
2	20/09/2025	14.0	7.3	11.4	58.0
3	22/09/2025	14.2	7.3	9.8	49.0
4	24/09/2025	13.8	7.4	8.2	39.5
5	26/09/2025	13.7	7.4	8.5	42.0
6	28/09/2025	14.1	7.5	7.0	35.0
7	30/09/2025	14.3	7.5	5.9	29.0
8	02/10/2025	14.0	7.5	4.7	23.5
9	04/10/2025	13.9	7.6	3.9	17.0
10	06/10/2025	14.0	7.6	4.1	19.0

OBSERVACIÓN

El presente informe de resultados es válido exclusivamente para la muestra que ha sido analizada.

FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME: 20/10/2025

LAQUAMEQ E.I.R.L.
LABORATORIO Y EQUIPOS
Ing. Karen Kelly Quispe Quispe
CIP. 194084
GERENTE

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

INFORME DE RESULTADOS N°: LQ13525C

DATOS DEL SERVICIO

Solicitante : YESICA MANINDI APAZA MAMANI

Proyecto : EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LEMNA MINOR EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL DISTRITO DE ROSASPATA, 2025

DATOS DEL SERVICIO

Producto : Agua Residual – Doméstica
Numero de muestras : 10
Fecha de análisis :29/09 – 07/10/2025
Muestreado por : El cliente

METODO DE ENSAYO

N°	PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO
1	Temperatura	°C	SM – 2250 B Método de laboratorio de campo
2	Potencial de hidrogeno	Unid de pH	SM 4500 - H
3	Fosforo total	mg/L	Método por colorimetría (HACH)
4	Nitrógeno total	mg/L	Método por colorimetría (HACH)

V° B°
GERENTE
LAQUAMEQ E.I.R.L.

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

DATOS DEL RESULTADO

Nº	FECHA	TEMPERATURA °C	pH	FOSFORO TOTAL mg/L	NITRÓGENO TOTAL mg/L
1	18/09/2025	14.1	7.1	11.9	68.5
2	20/09/2025	14.3	7.2	10.7	60.0
3	22/09/2025	14.5	7.3	9.3	51.5
4	24/09/2025	14.2	7.3	7.9	42.0
5	26/09/2025	14.0	7.4	8.1	44.5
6	28/09/2025	14.4	7.4	6.8	37.0
7	30/09/2025	14.6	7.5	5.7	31.0
8	02/10/2025	14.3	7.4	4.8	25.0
9	04/10/2025	14.1	7.5	3.8	19.0
10	06/10/2025	14.2	7.6	4.2	21.0

OBSERVACIÓN

El presente informe de resultados es válido exclusivamente para la muestra que ha sido analizada.

FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME: 20/10/2025

LAQUAMEQ E.I.R.L.
LABORATORIO Y EQUIPOS
Ing. Karen Kelly Quispe Quispe
CIP. 194084
GERENTE

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

ANEXO 3.

Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias, DECRETO SUPREMO N° 004-2017-MINAM.

Categoría 4: Conservación del ambiente acuático

Parámetros	Unidad de medida	E1: Lagunas y lagos	E2: Ríos		E3: Ecosistemas costeros y marinos	
			Costa y sierra	Selva	Estuarios	Marinos
FÍSICOS- QUÍMICOS						
Aceites y Grasas (MEH)	mg/L	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Cianuro Libre	mg/L	0,0052	0,0052	0,0052	0,001	0,001
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	20 (a)	20 (a)	20 (a)	**	**
Clorofila A	mg/L	0,008	**	**	**	**
Conductividad	(µS/cm)	1 000	1 000	1 000	**	**
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)	mg/L	5	10	10	15	10
Fenoles	mg/L	2,56	2,56	2,56	5,8	5,8
Fósforo total	mg/L	0,035	0,05	0,05	0,124	0,062
Nitratos (NO_3^-) (c)	mg/L	13	13	13	200	200
Amoniaco Total (NH_3)	mg/L	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)
Nitrógeno Total	mg/L	0,315	**	**	**	**
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 5	≥ 5	≥ 5	≥ 4	≥ 4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 a 9,0	6,5 a 9,0	6,5 a 9,0	6,8 – 8,5	6,8 – 8,5
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	≤ 25	≤ 100	≤ 400	≤ 100	≤ 30
Sulfuros	mg/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3	Δ 3	Δ 2	Δ 2
INORGÁNICOS						
Antimonio	mg/L	0,64	0,64	0,64	**	**
Arsénico	mg/L	0,15	0,15	0,15	0,036	0,036
Bario	mg/L	0,7	0,7	1	1	**
Cadmio Disuelto	mg/L	0,00025	0,00025	0,00025	0,0088	0,0088
Cobre	mg/L	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05
Cromo VI	mg/L	0,011	0,011	0,011	0,05	0,05
Mercurio	mg/L	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Níquel	mg/L	0,052	0,052	0,052	0,0082	0,0082
Plomo	mg/L	0,0025	0,0025	0,0025	0,0081	0,0081
Selenio	mg/L	0,005	0,005	0,005	0,071	0,071
Talio	mg/L	0,0008	0,0008	0,0008	**	**
Zinc	mg/L	0,12	0,12	0,12	0,081	0,081
ORGÁNICOS						
Compuestos Orgánicos Volátiles						
Hidrocarburos Totales de Petróleo	mg/L	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Hexaclorobutadieno	mg/L	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

ANEXO 1
FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN

AUTORIZACIÓN PARA LA INCORPORACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UANCV

Formato digital [X] Fecha de entrega: 08-06-2026

1. Datos del autor (es):

Nombres y Apellidos: YESICA MANINDI APAZA MAMANI
Dirección: AV. NORMAL 359 - JULIACA - SAN ROMAN -PUNO
DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: 70922537
Teléfono: 942271133 email: manindi.96@GMAIL.COM

Nombres y Apellidos:
Dirección:
DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°:
Teléfono: email:

Facultad y/o Escuela de Posgrado: INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
Escuela Profesional o Mención: INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
Título o Grado Académico a optar: INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL
Asesor: Mgtr. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS
Esta obra se encuentra dentro de las siguientes denominaciones:

Trabajo de Investigación [ ] Tesis [X] Trabajo de Suficiencia Profesional [ ] Trabajo Académico [ ]

Título: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LEMNA MINOR EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL DISTRITO DE ROSASPATA, 2025

Palabras claves, (3 a 5 términos): LEMNA MINOR, NITRÓGENO, FÓSFORO, EFICIENCIA DE REMOCIÓN, AGUAS RESIDUALES

¿Esta obra se desarrolló en la UANCV [1, 2]?

2

[1] Indicar si su producción intelectual ha empleado recursos tales como, instalaciones, laboratorios, insumos, equipos, bases de datos, asesoría técnica por parte del personal de la UANCV, financiamiento, entré otros relacionados.
[2] Si su producción intelectual se desarrolló en la UANCV totalmente o parcialmente, deberá autorizar el depósito en el Repositorio de manera obligatoria.

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

2. Referencia de tesis:

[ ] Bachiller [X] Titulo [ ] 2da Especialidad [ ] Maestría [ ] Doctorado

3. Licencias:

a) Licencia estándar:

Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi tesis en el Repositorio Digital de la UANCV.

Con la autorización de depósito de mi producción Intelectual, otorgo a la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" una licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi producción intelectual (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Digital de tesis UANCV, colección de producción intelectual, entre otros, en el Perú y en el extranjero por el tiempo y veces que considere necesarias, y libres de remuneraciones.

En virtud de dicha licencia, la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" podrá reproducir mi producción intelectual en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que la producción intelectual es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicha producción intelectual no infringe derechos de autor de terceras personas.

La Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" consignará el nombre del y/o los autor(es) de la producción intelectual, y no le hará ninguna modificación más que la permitida en la licencia.

Autorizo su publicación (marque con una X)

[X] Sí, autorizo que se deposite inmediatamente.

[ ] Sí, autorizo que se deposite a partir de la fecha (d/m/a): _____

[ ] No autorizo.

b) Licencia CREATIVE COMMONS 4.0 INTERNACIONAL:

Si usted concede una licencia CREATIVE COMMONS sobre su producción intelectual, mantiene la titularidad de los derechos de autor de esta y, a la vez, permite que otras personas puedan reproducirla, comunicarla al público y distribuir ejemplares de esta, bajo las condiciones siguientes:

¿Quiere permitir usos comérciales de su producción intelectual?

Sí: significa que usted permite la reproducción, distribución y comunicación pública de la producción intelectual incluso con fines comerciales.

No: significa que usted permite la reproducción, y comunicación pública de la producción intelectual, pero sin fines comerciales.

[X] Sí autorizo

[ ] No autorizo

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

Jurisdicción de su Licencia

Todas las licencias CREATIVE COMMONS son de ámbito mundial, sin embargo, usted puede elegir entre la opción "internacional" o una adaptada a su jurisdicción, como para el caso peruano.

La opción "internacional" emplea el lenguaje y la terminología de los tratados internacionales; en cambio, la adaptada a su jurisdicción, recoge las particularidades de la legislación peruana.

En consecuencia, **la opción "internacional" goza de una mayor eficacia a nivel mundial, gracias a que tiene jurisdicción neutral**. Mientras que la opción adaptada a la jurisdicción del Perú goza de una mayor eficacia ante los tribunales peruanos.

☐ Internacional

☒ Nacional

Línea de investigación: SANEAMIENTO AMBIENTAL - P22



Firma de Autor | huella digital | 08 de Junio del 2026 Fecha

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/