

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y
RECURSOS NATURALES



Tesis

**Microorganismos eficaces para el tratamiento de aguas
residuales domésticas de la laguna de oxidación de
Pucullococha, Andahuaylas - Apurímac, 2024**

Asesor:

Ing. Barazorda Carrillo, José Gabriel

Autor:

Lizarme Quintana, Brayan

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Ambiental

Andahuaylas - Apurímac - Perú

2026

Acta de sustentación



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
ESCUELA PROFESIONAL DE ING. AMBIENTAL Y RR. NN

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 012

En la ciudad de Andahuaylas, a los 08 días del mes de enero del 2026, siendo las 10:00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Sub Directoral N° 077-2025-UTEA-FI-EPIARN/SD de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales, Facultad de Ingeniería.

Presidente:	Mg. María Fuentes Allcchahuan
Dictaminante:	Mg. Mariela Rojas Cáceres
Replicante:	Mg. Dora Melendéz Gamboa

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Microorganismos eficaces para el tratamiento de aguas residuales domésticas de la laguna de oxidación de Pucullococha, Andahuaylas – Apurímac, 2024

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br.: Lizarme Quintana Brayan
(Apellidos y Nombres)

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero ambiental
(Denominación del Título)

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

Por: Unanimidad
(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachilleres (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Br. Lizarme Quintana Brayan	Aprobado

Siendo las 12:30 horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mg. María Fuentes Allcchahuan

Dictaminante: Mg. Mariela Rojas Cáceres

Replicante: Mg. Dora Melendéz Gamboa

(*): **Mayoría:** Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; **Unanimidad:** Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban, Art.18 RGGAT.
(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

Reporte de similitud



Página 2 de 117 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::3117:590219377

21% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

- 18% Fuentes de Internet
- 8% Publicaciones
- 17% 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.



Página 2 de 117 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::3117:590219377

Metadatos

Datos del Autor		
Apellidos y nombres	:	Lizarme Quintana, Brayán
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	71945999
URL ORCID	:	
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	Barazorda Carrillo, José Gabriel
Tipo de documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	31174435
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0006-5027-9398
Datos de la Investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales
Línea de Investigación	:	Calidad Ambiental
Rango de años en que se realizó la Investigación	:	2023 - 2024
Fuente de Financiamiento	:	Recursos propios.
Porcentaje de similitud	:	21 % con depósito
URL de OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford# 2.07.01

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mi progenitora, quien, sola, con audacia, esfuerzo y amor, representó mi ejemplo más destacado de fortaleza. Agradezco su inquebrantable resiliencia, su dedicación total hacia mí y su instrucción en la lucha por la consecución de mis aspiraciones.

A mi abuela, que desde el firmamento continúa siendo mi orientación. Les agradezco su dulzura, su saber y su crecimiento, tan amorosamente entregado, estarás vivamente conservada en mi corazón. A mi hermana y a mi hermano, por su compañía de toda la vida, por sus hombros incondicionales y por estar presente siempre, incluso en las circunstancias más adversas.

Este proceso también es de su aportación. Con todo mi afecto, gracias.

Agradecimiento

Deseo manifestar mi gratitud hacia todos los que, desde diferentes especialidades, colaboraron para culminar con éxito esta investigación.

Primero, mi especial agradecimiento a mis familiares, su apoyo incondicional, impulso y confianza a través de este proceso. Su acompañamiento fue fundamental para seguir adelante, especialmente en los momentos de mayor dificultad.

Asimismo, extiendo mi reconocimiento a los docentes y mentores que formaron parte de mi preparación profesional. En especial, agradezco a mi asesor, por el soporte brindado, dedicación y por su guía constante, los cuales fueron de gran importancia en la ejecución de esta investigación.

Agradezco a mis amigos y compañeros, que me dieron su apoyo sincero, colaboración y palabras de aliento cuando más lo necesitaba. Su presencia hizo que este camino fuera más llevadero y significativo.

Finalmente, expreso mi gratitud a mi alma mater, por permitirme acceder a sus programas académicos de calidad y por facilitar los recursos necesarios para la realización de este trabajo.

Resumen

La laguna de oxidación de Pucullococha, se localiza a nivel distrital en Pacucha, provincia de Andahuaylas, región Apurímac, recibe aguas residuales domésticas con una elevada carga orgánica, lo cual se evidenció en una DBO₅ inicial de 402 mg/L, valor que supera aproximadamente cuatro veces el LMP de 100 mg/L. Esta investigación tuvo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, mediante una evaluación experimental a escala de laboratorio. Para ello, se consideró un grupo control sin aplicación de microorganismos eficaces y dos tratamientos con diferentes dosis operacionales, consistente en EM al 25 % y EM al 75 %. La DBO₅ fue determinada mediante el sistema OxiTop y, luego, los valores registrados antes y después a la aplicación del tratamiento fueron evaluados mediante la prueba t de Student para muestras relacionadas, empleando un nivel de significancia equivalente a 0,05.

El tratamiento con EM al 25 % redujo la DBO₅ a 79,6 mg/L, logrando una remoción del 80,2 % y cumpliendo el LMP, aunque sin alcanzar el ECA de 15 mg/L. Con EM 75 %, la DBO₅ disminuyó a una media de 55,2 mg/L, con una remoción del 86,3 %, también suficiente para el LMP pero aún por encima del ECA. La comparación entre dosis evidenció una reducción adicional de 24,4 mg/L a favor de EM 75 %, con una tendencia estadística cercana al umbral, pero no significativa con $\alpha = 0,05$ ($t = -1,84$; $p = 0,0519$). Los resultados muestran que los microorganismos eficaces (EM) mejoran la remoción de materia orgánica, con mayor eficiencia en la dosis alta; sin embargo, para cumplir el ECA se requiere un tratamiento complementario o ajustes operativos validados a escala piloto.

Palabras clave: aguas residuales domésticas, DBO₅, laguna de oxidación, microorganismos eficaces, bioaumentación, OxiTop.

Abstract

The oxidation lagoon of Puculloccochoa, located at the district level in Pacucha, Andahuaylas province, Apurímac region, receives domestic wastewater with a high organic load, which was evidenced by an initial BOD of 402 mg/L, value that exceeds approximately four times the PML of 100 mg/L. This research had a quantitative, applied-type approach by means of an experimental evaluation at laboratory scale. For this, a control group without application of effective microorganisms and two treatments with different operational doses were considered, consisting of ME at 25% and ME at 75%. The BOD was determined using the OxiTop system and, then, the values recorded before and after the application of the treatment were evaluated using the Student t-test for related samples, using a significance level equivalent to 0.05.

Treatment with 25% DM reduced the BOD to 79.6 mg/L, achieving a removal of 80.2% and meeting the LMP, although not reaching the ECA of 15 mg/L. With 75% DM decreased to an average of 55.2 mg/L, with 86.3% removal, also sufficient for the LMP but still above the ECA. The dose comparison showed an additional reduction of 24.4 mg/L in favor of EM 75%, with a statistical trend close to the threshold but not significant with $\alpha = 0.05$ ($t = 1.84$; $p = 0.0519$). The results show that effective microorganisms (EMs) improve removal of organic matter, with greater efficiency at high dose; however, to meet the ACE requires complementary treatment or operational adjustments validated at pilot scale.

Keywords: domestic waste water, BOD, oxidation lagoon, effective micro-organisms, bio augmentation, OxiTop.

Índice

Portada	i
Acta de sustentación	ii
Reporte de similitud	iii
Metadatos	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
Índice	ix
Índice de tablas	xii
Índice de figuras	xiii
I. Introducción	14
II. Planteamiento del problema	16
2.1. Descripción y formulación del problema	16
2.2. Objetivos	19
2.2.1. General	19
2.2.2. Específicos.....	19
2.3. Justificación e importancia.....	19
2.4. Hipótesis	21
2.4.1. Hipótesis general	21
2.4.2. Hipótesis específicas.....	22
2.5. Variables.....	23
III. Marco teórico	24
3.1. Antecedentes.....	24

3.1.1. A nivel internacional	24
3.1.2. A nivel nacional	26
3.1.3. A nivel local	29
3.2. Bases teóricas	31
3.2.1. Microorganismos eficaces (EM).....	31
3.2.2. Aguas residuales domésticas	32
3.3. Definición de términos	36
IV. Metodología.....	38
4.1. Tipo y nivel de investigación	38
4.2. Ámbito temporal y espacial.....	39
4.3. Población y muestra	40
4.4. Instrumentos	42
4.5. Procedimientos	44
4.5.1. Pre prueba (medición de DBO ₅ antes del tratamiento)	44
4.5.2. Activación de los microorganismos eficaces.	44
4.5.3. Simulación e instalación de la laguna de oxidación	45
4.5.4. Aplicación de microorganismos eficaces.....	46
4.5.5. Preparación de las muestras para los ensayos.....	47
4.5.6. Pos prueba (medición de DBO ₅ después del tratamiento).....	51
4.6. Análisis de los datos	53
V. Resultados y discusión	54
5.1. Resultados.....	54
5.1.1. Resultados previos al tratamiento con EM.....	54
5.1.2. Resultados del tratamiento con EM al 25%	55
5.1.3. Resultados del tratamiento con EM al 75%	57

5.1.4. Comparación de tratamientos respecto a LMP y ECA.....	59
5.1.5. Resultados respecto a la hipótesis general	60
5.1.6. Resultados para las hipótesis específicas	64
5.2. Discusión de resultados.....	66
VI. Conclusiones	77
VII. Recomendaciones	79
VIII. Referencias.....	81
XI. Anexos	88

Índice de tablas

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables.....	23
Tabla 2. Proceso de activación de EM.....	45
Tabla 3. Composición porcentual de la mezcla para los tratamientos con EM	47
Tabla 4. Equivalencia en volúmen real (para 45 L por reactor experimental)	47
Tabla 5. Valores de muestra y solución nutritiva para la cuantificación de DBO ₅ .	49
Tabla 6. Registros de DBO ₅ sin aplicación de microorganismos eficaces.....	54
Tabla 7. Concentración de la DBO ₅ en el afluente antes y después del tratamiento de aguas residuales con microorganismos eficaces al 25%	55
Tabla 8. Concentración de la DBO ₅ en el afluente antes y después del tratamiento con microorganismos eficaces al 75%	58
Tabla 9. Comparación de resultados respecto a los Límites Permisibles y Estándares de Calidad Ambiental	60
Tabla 10. Análisis de t de Student para el 75% de microorganismos eficaces (ME)	61
Tabla 11. Análisis de t de Student para el 25% de microorganismos eficaces (ME)	62
Tabla 12. Análisis de t de Student para comparación de eficacia EM 75% vs EM 25%	65
Tabla 13. Matriz de consistencia.....	88

Índice de figuras

Figura 1 Esquema de la laguna de oxidación.....	45
Figura 2 Simulación de la laguna de oxidación	46
Figura 3 Flujograma del procedimiento experimental.....	53
Figura 4 Resultados del parámetro fisicoquímico DBO de la muestra del afluente antes y después del tratamiento de aguas residuales con microorganismos eficaces al 25%	56
Figura 5 Resultados del parámetro fisicoquímico DBO de la muestra del afluente después del tratamiento de aguas residuales con microorganismos eficaces al 75%	58
Figura 6 Simulación de la laguna de oxidación	89
Figura 7 Afluente de la laguna de oxidación.....	89
Figura 8 Simulación de la laguna de oxidación	90
Figura 9 Recojo de agua de manantial para la activación de los microorganismos	90
Figura 10 Microorganismos eficaces.....	91
Figura 11 Melaza para la activación de los microorganismos	91
Figura 12 Activación de microorganismos.....	92
Figura 13 Microorganismos activados.....	92
Figura 14 Selección de las muestras	93
Figura 15 Muestra seleccionada en envases de plástico de un litro	93
Figura 16 Muestra seleccionada lista para el transporte	94
Figura 17 Muestras llevadas al laboratorio para su respectivo análisis.....	94
Figura 18 Aplicación de microorganismos eficaces al 25% (250 ml del producto activado).....	95

Figura 19 Aplicación de microorganismos eficaces al 25% (250 ml del producto activado).....	95
Figura 20 Aplicación de microorganismos eficaces al 75% (750 ml del producto activado).....	96
Figura 21 Aplicación de microorganismos eficaces al 75% (750 ml del producto activado).....	96
Figura 22 Muestras de agua recogidas de la laguna de oxidación simulada llevadas al laboratorio de los 02 tratamiento (dosis 1 EM- dosis baja al 0.25%, dosis 2 EM- dosis Alta al 0.75%).....	97

I. Introducción

La generación cada vez mayor de aguas servidas domésticas constituye uno de los principales retos ambientales y sanitarios a escala mundial. La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022) señala que aproximadamente el 44 % de las aguas residuales urbanas se libera al ambiente sin un tratamiento suficiente, lo que favorece la propagación de enfermedades de origen hídrico y afecta negativamente la calidad de los ecosistemas acuáticos. En respuesta a este desafío, las soluciones biotecnológicas que emplean comunidades microbianas, tales como los microorganismos eficaces (EM), han emergido como opciones innovadoras, sostenibles y de coste reducido. Estos sistemas han demostrado su eficacia en la reducción de la carga orgánica en el agua, incluso bajo condiciones meteorológicas desfavorables (Kim & Kang, 2024; Tomczyk et al., 2024).

En el país, la gestión de las aguas servidas continúa siendo un reto ambiental y sanitario. Aunque la normativa vigente, mediante el D.S. N° 003-2010-MINAM, fija un Límite Máximo Permisible de 100 mg/L para la DBO₅, muchas infraestructuras de tratamiento, especialmente las ubicadas en áreas altoandinas, no logran cumplir dicho parámetro por problemas de diseño, mantenimiento y tecnología. Según SUNASS (2021) y MINAM (2022), el país cuenta con alrededor de 202 PTAR, encontrándose solo 171 en condiciones operativas.

Un ejemplo claro de esta situación es la laguna de oxidación de Pucullococha, ubicada a 3,150 m.s.n.m. a nivel distrital en Pacucha, dentro del ámbito provincial de Andahuaylas, en Apurímac. Aunque la infraestructura fue diseñada para tratar 30 L/s, actualmente soporta caudales mayores a 50 L/s, generando una sobrecarga hidráulica cercana al 66 %. Esta situación, según la EPS Chanka y la UNAJMA (2023), ha limitado la eficiencia del tratamiento, reflejándose en valores de DBO₅ superiores a 260 mg/L en el efluente. Esta situación representa un grave riesgo para el río Manchaybamba, que recibe las descargas, así como para las comunidades agrícolas que dependen de sus aguas.

Frente a esta problemática, el estudio plantea evaluar la adición de microorganismos eficaces (EM) a modo de estrategia biológica para fortalecer el tratamiento de aguas servidas en zonas altoandinas. Esta alternativa resulta pertinente porque requiere menor inversión en infraestructura y energía que los sistemas convencionales, lo que favorece su aplicación en comunidades rurales con recursos limitados.

Para ello, la investigación reprodujo a escala de laboratorio el funcionamiento de la laguna de oxidación de Pucullococha, bajo condiciones controladas. Se trabajó con dos concentraciones de EM al 25 % y EM al 75 %, y se evaluó la variación de la DBO_5 durante 120 horas mediante el sistema OxiTop. Finalmente, los resultados obtenidos se compararon con la prueba t de Student para muestras relacionadas.

Cabe precisar que, esta investigación se encuentra organizada en siete capítulos. El primero desarrolla el planteamiento del problema y su fundamentación; el segundo reúne los antecedentes y el bases teóricas competentes; el tercero explica la metodología aplicada; el cuarto presenta los resultados y su respectivo análisis; el quinto expone las conclusiones; el sexto plantea las recomendaciones; y, como parte final, se incluyen la bibliografía y los anexos técnicos que sustentan el presente estudio.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

El agua es un recurso fundamental en la biosfera, los hábitats naturales y el equilibrio del ciclo hidrológico. Su adecuada gestión contribuye a garantizar el acceso al agua potable, reducir los riesgos sanitarios asociados a contaminantes que se hallan en aguas servidas domésticas y controlar los impactos negativos sobre los cuerpos receptores. Por ello, el manejo responsable del recurso hídrico es clave para proteger la salud poblacional, promover el desarrollo socioeconómico y el equilibrio ambiental.

Sin embargo, la creciente generación de aguas servidas constituye un problema ambiental de alcance mundial, debido a su impacto en la calidad del agua y el equilibrio ecosistémico. Se calcula que aproximadamente más del 80 % de estas aguas se descargan al ambiente sin recibir tratamiento apropiado, lo que incrementa la contaminación hídrica y expone a la población a enfermedades de origen hídrico (United Nations, 2021).

En América Latina y el Caribe, el manejo de las aguas residuales continúa siendo un problema crítico. Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2022), cerca del 70 % de las aguas servidas domésticas se descarga sin tratamiento en ríos u otros cuerpos receptores, mientras que el 25 % de la población todavía no dispone de acceso seguro al agua potable. En esa misma línea, el Banco Mundial (2021) advierte que las deficiencias en la gestión integral del agua no solo afectan la salud pública, al elevar la incidencia de enfermedades gastrointestinales e infecciones, sino que también generan pérdidas económicas debido a la degradación de los ecosistemas y la reducción de la producción en la agricultura.

En el ámbito nacional, la gestión de las aguas servidas continúa siendo uno de los desafíos ambientales más importantes. De acuerdo con el Ministerio del Ambiente (2022),

el país produce aproximadamente 2,3 millones de metros cúbicos diarios de aguas servidas, de los cuales solo el 35 % es tratado antes de su descarga final. Esta situación incrementa la contaminación de ríos, lagunas y suelos agrícolas, generando impactos negativos en la salud humana, los ecosistemas y las actividades productivas. Aunque se cuenta con infraestructura de tratamiento en distintas regiones del país, en muchas persisten problemas de operación, sobrecarga hidráulica o tecnologías obsoletas, factores que limitan su capacidad de depuración (SUNASS, 2021).

En el ámbito local, el distrito de Pacucha, que pertenece a la provincia de Andahuaylas, dispone de la laguna de oxidación de Pucullococha como una de las principales infraestructuras para el tratamiento de aguas servidas domésticas. Este sistema fue diseñado para recibir un caudal de 30 L/s; no obstante, el crecimiento poblacional ha incrementado la descarga hasta aproximadamente 50 L/s, superando en cerca del 66 % su capacidad de diseño. Esta sobrecarga ha ocasionado una disminución en la calidad del efluente y del cuerpo receptor, evidenciada en valores de DBO_5 de 128 ± 34 mg/L, cifra que supera considerablemente el límite de 15 mg/L establecido por el ECA para cuerpos de agua de categoría 3 (MINAM, 2017). Asimismo, altas concentraciones de sólidos suspendidos totales y coliformes termotolerantes reflejan deficiencias en el tratamiento actual lo que representa un riesgo sanitario para las comunidades ubicadas aguas abajo.

Esta situación se intensifica por la geografía y condiciones del clima sobre el área de estudio. La laguna de Pucullococha se ubica en una zona altoandina, a más de 3 000 m s. n. m., donde la temperatura promedio bordea los 13 °C. Estas condiciones reducen la actividad metabólica de los microorganismos responsables de la depuración natural de las aguas grises. A ello se suma la falta de mantenimiento periódico, principalmente en la extracción de lodos, lo que ha reducido el volumen útil del sistema y favorecido la aparición de procesos anaeróbicos no deseados, junto con la emisión de gases como el metano. En consecuencia, la descarga del efluente hacia el río Manchaybamba se convierte en una

fuentes de contaminación que compromete tanto al ambiente como a las poblaciones cercanas.

Ante esta realidad, se hace necesario considerar opciones tecnológicas sostenibles, accesibles e innovadoras que contribuyan a optimizar el proceso de tratamiento sin requerir grandes costos de implementación e infraestructura compleja. Una de estas opciones sostenibles es la aplicación de EM, los cuales han mostrado resultados positivos en la disminución de carga orgánica, la mejora en la sedimentación de sólidos y la disminución de coliformes en otros contextos (García et al., 2021; Kim & Kang, 2024). Sin embargo, su eficacia en condiciones de altitud, bajas temperaturas y sobrecarga orgánica, como las de la laguna de Pucullococha, aún no ha sido validada científicamente de manera local.

En ese marco, el estudio se orientó a evaluar la influencia de los EM en el tratamiento de las aguas servidas domésticas provenientes de la laguna de oxidación de Pucullococha, en Andahuaylas, Apurímac.

Problema general

¿Cuál es el efecto de los microorganismos eficaces (EM) en el tratamiento de aguas residuales domésticas de la laguna de oxidación de Pucullococha, Andahuaylas – Apurímac, 2024?

Problemas específicos

- ¿Cuál es el efecto del tratamiento con microorganismos eficaces (EM) al 25 % en la reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) de las aguas residuales domésticas de la laguna de oxidación de Pucullococha?
- ¿Cuál es el efecto del tratamiento con microorganismos eficaces (EM) al 75 % en la reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) de las aguas residuales domésticas de la laguna de oxidación de Pucullococha?

- ¿Existe una diferencia significativa en la eficacia del tratamiento entre las concentraciones del 25 % y 75 % de microorganismos eficaces (EM) para la remoción de la DBO₅ en aguas residuales domésticas?

2.2. Objetivos

2.2.1. General

Evaluar el efecto de los microorganismos eficaces (EM) en el tratamiento de aguas residuales domésticas de la laguna de oxidación de Puculloccochoa, Andahuaylas – Apurímac, 2024.

2.2.2. Específicos

- Determinar la eficiencia del tratamiento con microorganismos eficaces (EM) al 25 % en la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) de las aguas residuales domésticas.
- Determinar la eficiencia del tratamiento con microorganismos eficaces (EM) al 75 % en la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) de las aguas residuales domésticas.
- Comparar el efecto de las concentraciones al 25 % y 75 % de microorganismos eficaces (EM) en la reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) a fin de establecer la dosis más eficaz en el contexto de la laguna de oxidación de Puculloccochoa.

2.3. Justificación e importancia

Justificación teórica

La relevancia de la presente investigación está en evaluar el uso de EM respecto al tratamiento de aguas grises en zonas altoandinas, donde aún existe limitada evidencia científica. Aunque su eficacia ha sido reportada en climas templados, su aplicación en condiciones de altura requiere mayor validación experimental (Kim & Kang, 2024; Li et al., 2023), los datos relativos a su eficacia en

condiciones como las que se manifiestan en la laguna de oxidación de Pucullococha continúan siendo restringidos. Esta laguna se encuentra en una zona altoandina, donde predominan condiciones como bajas temperaturas, cercanas a 13 °C, pH alcalino y una elevada carga orgánica. Los resultados obtenidos permitirán fortalecer el conocimiento sobre el uso de EM en el tratamiento de aguas servidas en regiones de altura. Asimismo, contribuirán al desarrollo de alternativas biológicas más sostenibles, accesibles y adecuadas para para optimizar el uso del recurso hídrico en zonas rurales.

Justificación metodológica

Desde el aspecto metodológico, la investigación plantea una forma innovadora de abordar el tratamiento de aguas servidas, al integrar procedimientos experimentales con la aplicación de un consorcio microbiano natural. La evaluación de un indicador clave, como la DBO₅, permite medir con mayor precisión la eficacia de los microorganismos eficaces bajo condiciones cercanas a la realidad operativa. De esta manera, el enfoque metodológico no solo aporta validez científica a los resultados obtenidos, sino que también sus resultados pueden constituir un referente metodológico para estudios posteriores en contextos rurales de características similares (García et al., 2021).

Justificación practica

El estudio plantea una alternativa tecnológica de bajo costo, fácil de aplicar y con bajo consumo de energía, por lo que puede ser una opción viable para empresas prestadoras de servicios de saneamiento con recursos limitados, como EPS Chanka. El uso de microorganismos eficaces no necesita grandes inversiones en infraestructura ni sistemas mecanizados de aireación, lo que facilita su aplicación en comunidades rurales de los Andes peruanos. Por ello, los resultados a obtenerse pueden aportar al diseño de modelos de tratamiento más simples y sostenibles,

orientados a incrementar la calidad del agua tratada y reducir la contaminación de los cuerpos receptores (SUNASS, 2021).

Justificación social

Desde el enfoque social y sanitario, la investigación resulta importante porque aborda un problema directamente relacionado con la salud pública: la exposición de las poblaciones locales a aguas contaminadas. El río Manchaybamba recibe descargas con altos niveles de DBO_5 , lo que puede representar un riesgo para las comunidades rurales que utilizan estas aguas en actividades agrícolas, ganaderas e incluso, en algunos casos, domésticas. El propósito de esta investigación es generar conocimiento útil y específico sobre el tema abordado. La optimización de la eficacia terapéutica a través de la Esclerosis Múltiple contribuiría a reducir la propagación de enfermedades transmitidas por el agua, consolidaría la seguridad sanitaria y salvaguardaría los ecosistemas locales. Adicionalmente, el estudio guarda relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), respecto al Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento, al fomentar el acceso a soluciones sostenibles y económicas para la administración de aguas residuales en contextos vulnerables (Naciones Unidas, 2021).

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

La aplicación de microorganismos eficaces (EM) tiene un efecto significativo en la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) en las aguas residuales domésticas de la laguna de oxidación de Pucullococha, Andahuaylas – Apurímac, 2024.

2.4.2. Hipótesis específicas

- La aplicación de microorganismos eficaces (EM) al 25 % tiene una menor eficiencia en la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) en las aguas residuales domésticas de la laguna de oxidación de Pucullococha.
- La aplicación de microorganismos eficaces (EM) al 75 % tiene una mayor eficiencia en la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) en las aguas residuales domésticas de la laguna de oxidación de Pucullococha.
- Existen diferencias significativas en la eficiencia de la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) entre las concentraciones de EM al 25 % y al 75 %, siendo la concentración del 75 % más eficaz en la reducción de la carga orgánica en las aguas residuales de la laguna de oxidación de Pucullococha.

2.5. Variables

Tabla 1

Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidad de medida	Método de medición
Variable independiente: Microorganismos eficaces (EM)	Consortio microbiano compuesto por bacterias ácido-lácticas, levaduras, actinomicetos y bacterias fotosintéticas, que actúan de manera sinérgica para descomponer la materia orgánica en ambientes acuáticos, mejorando la calidad del agua (Higa & Parr, 2021; Kim & Kang, 2024).	Aplicación controlada de diferentes concentraciones de EM sobre aguas residuales domésticas simuladas en laboratorio.	Dosis de tratamiento	- Dosis baja: 25 % - Dosis alta: 75 %	% v/v	Preparación de soluciones con EM en diluciones controladas y aplicación directa en muestras de agua residual
Variable dependiente: Aguas residuales domésticas	Agua que utilizan en actividades cotidianas del hogar, como el baño, la cocina y el saneamiento, que contiene materia orgánica, residuos sólidos y microorganismos patógenos (Schaub et al., 2021; WHO, 2022).	Son las aguas servidas de la laguna de oxidación de Pucullococha, caracterizado por su alta carga orgánica medida a través de la DBO ₅ . Las muestras se tomarán del afluente de la laguna para evaluar su calidad según la DBO ₅ tras la inoculación de EM	Parámetro fisicoquímico	- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	Método OxiTop para determinación de DBO ₅ a 20 °C durante 5 días, conforme a la norma American Public Health Association - APHA (2020)

Nota: Elaborado por el autor

III. Marco teórico

3.1. Antecedentes

3.1.1. A nivel internacional

alçin et al. (2023), en su investigación titulada *“Tratamiento de aguas residuales usando microorganismos activos y evaluación de resultados”*, analizaron la adición de EM en aguas grises municipales. Para ello, recolectaron muestras del efluente de una planta de tratamiento y aplicaron una mezcla microbiana bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas. Posteriormente, evaluaron parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST) y presencia de metales pesados, empleando espectroscopía de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). Los resultados evidenciaron que la incorporación de EM favoreció la sedimentación de la materia orgánica y contribuyó a la disminución de la DBO, DQO y SST. Asimismo, se observó una reducción del estroncio hasta niveles cercanos al límite de detección del equipo. En conclusión, los autores señalaron que los microorganismos eficaces constituyen una alternativa accesible y económicamente rentable para mejorar la calidad del agua servida, ya que permiten reducir la carga contaminante sin requerir sistemas de tratamiento complejos.

Kaur et al. (2024), en su estudio titulado *“Método sostenible y eficaz con microorganismos para el tratamiento de aguas residuales”*, evaluaron la aplicación de microorganismos eficaces (EM) como alternativa para depurar aguas grises y mejorar la calidad del agua en condiciones in situ. Para ello, aplicaron EM durante 105 días y realizaron mediciones periódicas de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, como pH, sólidos totales en suspensión (TSS), sólidos totales disueltos (TDS), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), fósforo total, nitrógeno total Kjeldahl y coliformes fecales. Los resultados permitieron evidenciar una mejora significativa sobre la calidad del agua,

destacando la reducción de la DBO de 10,9 mg/L a 3,1 mg/L, equivalente a una remoción del 71,5 %, así como la disminución del fósforo total hasta 4,36 mg/L y reducciones significativas en TSS y TDS. Además, en el aspecto microbiológico, se obtuvo una disminución superior al 99 % de coliformes fecales y ausencia de *Escherichia coli* en el efluente final. En conclusión, los autores sostienen que los EM representan una opción sostenible, ecológica y viable para el tratamiento de aguas grises, debido a su capacidad para reducir tanto la contaminación orgánica como la microbiológica y contribuir a la recuperación de ecosistemas acuáticos

Tomczyk et al. (2024) desarrollaron el estudio titulado "*Método eficaz de tratamiento del agua con microorganismos para la restauración rápida de los depósitos eutróficos*", cuyo objetivo fue evaluar el potencial de los EM para mejorar la calidad del agua en el reservorio eutrofizado de Turawa, ubicado en el río Mała Panew, Polonia. La metodología fue experimental de campo, mediante la separación de un área piloto del reservorio y la aplicación de EM en forma de bolas Bokashi y solución líquida, con monitoreo de parámetros microbiológicos y fisicoquímicos como bacterias heterotróficas, coliformes, enterococos fecales, pH, conductividad, oxígeno disuelto, DBO₅, DQO, nitrógeno y fósforo. Los resultados evidenciaron una reducción promedio de microorganismos indicadores entre 46.44 % y 58.38 %, además de mejoras en nitratos, fosfatos, oxígeno disuelto y estado trófico del agua. En conclusión, los autores sostienen que los EM pueden emplearse como una alternativa biológica complementaria para la recuperación de cuerpos de agua contaminados, aunque recomiendan continuar con estudios de validación según las condiciones ambientales de cada sistema, aspecto que se vincula con la presente investigación al evaluar el uso de EM para mejorar la calidad de aguas servidas domésticas a través de la reducción de carga orgánica.

Mamani et al. (2021), en su investigación titulada "*Depuración de aguas residuales domésticas con microorganismos eficientes en condiciones altiplánicas*

en sistema mixto anaerobio-aerobio", evaluaron el uso de EM como alternativa para mejorar el tratamiento de aguas servidas domésticas en zonas de altura. Dicha investigación empleó un diseño experimental de bloques completamente aleatorizados, considerando tres tratamientos: un grupo control sin inoculación, un tratamiento con 3 L de microorganismos eficientes y otro con 4 L. Estos fueron aplicados en un sistema de flujo continuo conformado por un tanque séptico, bandejas de aireación y un canal de oxidación, con un tiempo de retención hidráulica de 15 días. Se obtuvo que, 4 L presentó el mejor desempeño, alcanzando una remoción de 78 % en DBO_5 , 73 % en sólidos suspendidos totales y 99,97 % en coliformes termotolerantes, con diferencias relevantes frente al grupo testigo. En conclusión, los autores señalaron que la incorporación de EM contribuye a mejorar la depuración de aguas servidas domésticas en condiciones altiplánicas, aspecto que se relaciona con la presente investigación al analizar la reducción de carga orgánica, medida mediante DBO_5 , en sistemas de tratamiento de aguas servidas.

3.1.2. A nivel nacional

Acuña y Huamán (2021) realizaron su estudio titulado "*Evaluación de la remoción de materia orgánica por medio de microorganismos eficientes en la planta de tratamiento Yauli – 2021*", con el objetivo de determinar la cantidad apropiada de EM a emplear y el tiempo de utilización para eliminar la mayor cantidad posible de materiales orgánicos en aguas residuales provenientes de Yauli. Utilizando una metodología cuantitativa, explicativa, aplicada y experimental, se realizaron tres intervenciones en las que se aplicaron EM a distintas concentraciones (10, 20 y 30 ml) y en distintos periodos (11, 22 y 33 días). Los hallazgos indicaron que el último tratamiento aplicado durante un periodo de 33 días contribuye a la eliminación de materiales orgánicos, tales como el DBO_5 en un 65.62%, el DQO en un 66.88% y los STS en una concentración de 110.896mL/L. Se concluyó que el tratamiento permitió reducir los contaminantes con mayor eficacia, mediante EM en una

concentración de 20 mL durante un periodo de 33 días, asegurando así el cumplimiento de las regulaciones peruanas.

Flores (2021) realizó una investigación titulada "*Microorganismos Eficaces Para El Tratamiento De Aguas Residuales Domésticas San Francisco De Asís, Pomalca*". Su objetivo fue emplear EM para alcanzar los niveles máximos permitidos de contaminantes en aguas servidas de procedencia doméstica en la Comunidad Población San Francisco de Asís, debido a la ausencia de redes de saneamiento público. A través de un enfoque metodológico cuasi experimental, comparativo y longitudinal, utilizando un total de 36 muestras. Los hallazgos indicaron una disminución en el aminoramiento del pH con 1000 ml de microorganismos, una reducción en los SST de 6.93 a 5.96, una reducción en las grasas de 14.6 mg/l a 11.63 mg/, un descenso en el pH de 279.2 a 182.6, una reducción en los coliformes de 94,006 a 10,533 y un descenso en el pH de DBO5 de 279.2 a 182.6. Finalmente, se concluyó de que los microorganismos efectivos ejercen efectos en diversos parámetros microbiológicos, físicos y químicos, tras un periodo de 15 días.

Vigo (2020) realizó el estudio denominado "*Efecto de Microorganismos Eficaces (ME) en el proceso de depuración de aguas residuales domésticas en condiciones altoandinas*", con el propósito de evaluar el efecto de los EM en la mejora del tratamiento de aguas grises domésticas procedentes de viviendas situadas en contextos altoandinos. A través de una metodología preexperimental y descriptiva, se implementaron cuatro intervenciones terapéuticas. Los hallazgos más favorables se registraron durante el primer tratamiento, en el que se registró una reducción del 81.8% en el pH-total, el SST en 88.9%, el DQO en 79.9% y el DBO5 en 80.7%; así como en el segundo tratamiento, durante el cual se observó una reducción significativa del nitrógeno, con el N-NO3 en 98.1%, N-NH4 en 100% y N-NO2 en 100%. Finalmente, se concluyó de que la aplicación de EM disminuye

de manera significativa la presencia de nitrógeno y materia orgánica, siendo el primer tratamiento el más eficaz.

Romero (2020) en su estudio titulado "*Influence of effective microorganisms in the removal of thermotolerant coliforms and biochemical demand for oxygen from the domestic wastewater treatment plant of the district of Quilcas, 2019*", tuvo como objetivo explorar cómo los EM desempeñan un papel en la eliminación de coliformes termotolerantes y coliformes tolerantes al calor. Mediante una metodología explicativa y experimental, se utilizaron tres dosis distintas de Escleriosis Múltiple (4, 6 y 8%) en un conjunto de testigos durante un periodo de 39 días, divididos en cuatro grupos. Los hallazgos indicaron que los contaminantes se sitúan por encima de los niveles máximos permisibles en términos de DBO y coliformes tolerantes al calor. Los tratamientos también contribuyeron a la reducción de estos contaminantes, tal como se observó en el primer tratamiento, donde el DBO se redujo de 1356 a mg/l a 406.3 mg/l. Se concluyó que la aplicación de EM en concentraciones de 8 y 6% contribuye a la reducción de la DBO, mediante el control del tiempo, el pH y la temperatura.

Condori (2025), en su investigación titulada "*Effect of the application of effective microorganisms in the treatment of organic pollutants from wastewater of the city of Cabanillas, 2024*", evaluó la influencia de los microorganismos eficaces en la disminución de contaminantes orgánicos presentes en aguas servidas domésticas. El estudio tuvo un enfoque experimental y consideró la aplicación de microorganismos activados, principalmente *Rhodopseudomonas palustris* y *Lactobacillus plantarum*, en dosis de 5, 10 y 20 mL, con tiempos de retención hidráulica de 2, 4 y 6 días. Los resultados evidenciaron que la PTAR, sin tratamiento complementario, alcanzaba únicamente 14,22 % de remoción de DBO₅ y 40,11 % de DQO; en cambio, con 20 mL de *Rhodopseudomonas palustris* se logró remover 73 % de DBO₅ y 56 % de DQO. Asimismo, el tratamiento con 20 mL de *Lactobacillus*

plantarum obtuvo los mejores resultados, con una reducción de 90 % en DBO₅ y 85 % en DQO. En conclusión, el autor señaló que los EM contribuyen de manera significativa al mejoramiento del tratamiento de aguas residuales domésticas, destacando *Lactobacillus plantarum* por su mayor capacidad depuradora. Este antecedente está relacionado con el presente estudio, dado que también analiza la reducción de la DBO₅ mediante el uso de EM en aguas residuales domésticas.

3.1.3. A nivel local

Aparco del Pozo (2025), en su investigación titulada “*Effect of anthropic activities on water quality in the lagoon of Pacucha, Andahuaylas, 2023*”, evaluó la influencia de las actividades humanas sobre las condiciones de calidad del agua de la laguna de Pacucha. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, mediante muestreos realizados en diferentes puntos, donde se analizaron parámetros como pH, conductividad eléctrica, turbidez, sólidos suspendidos, DBO₅ y coliformes termotolerantes. Como resultado, se verificó el aumento en la concentración de nutrientes y una tendencia al deterioro de la calidad del agua. Además, el índice de contaminación por materia orgánica presentó un valor promedio de 0,391 mg/L, disminuyendo a 0,266 mg/L durante la época de avenida y alcanzando su mayor valor en la zona de margen, con 0,396 mg/L. La autora concluyó que las actividades agrícolas, ganaderas y urbanas inciden negativamente en la calidad del agua de la laguna, lo que evidencia la necesidad de aplicar medidas de tratamiento y gestión ambiental sostenible en el entorno de Pucullococha.

La Universidad Nacional José María Arguedas (UNAJMA, 2023) desarrolló un informe técnico referente a la operatividad de la laguna de oxidación de Pucullococha, ubicada en Andahuaylas. El estudio tuvo como objetivo diagnosticar su funcionamiento ante la sobrecarga hidráulica que experimenta. Se aplicó un enfoque descriptivo, con medición de caudales y análisis físico-químico de la

calidad del agua. Los resultados evidenciaron una sobrecarga del 66 %, así como concentraciones de DBO_5 y coliformes fecales que superan los ECA-Agua. Consecuentemente se corroboró que es urgente implementar tecnologías alternativas de bajo costo, como los microorganismos eficaces (EM), para mejorar el rendimiento del sistema.

La Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac (UNAMBA, 2021) realizó la investigación denominada "Aplicación de biotecnología microbiana para la mejora del tratamiento de aguas servidas en Talavera, Andahuaylas", con el propósito de examinar el impacto de los microorganismos en los efluentes domésticos. Se implementó un diseño experimental que implicó dos tratamientos y un grupo de control, evaluando indicadores tales como DBO_5 y sólidos suspendidos totalmente (SST). Los hallazgos evidenciaron reducciones estadísticamente significativas en ambos parámetros, lo cual corroboró la eficacia de los Emuladores Magnéticos como estrategia biotecnológica para la optimización de sistemas de tratamiento con funcionamiento insuficiente.

Quispe (2020), en su investigación titulada "*Eficacia de microorganismos eficaces en la reducción de la carga orgánica y bacteriológica de aguas residuales urbanas en la laguna de oxidación de San Jerónimo, Andahuaylas, Apurímac*", evaluó el desempeño de los EM en el tratamiento de aguas residuales urbanas provenientes de la laguna de oxidación del distrito de San Jerónimo. El estudio aplicó un diseño experimental, comparando los valores de DBO_5 , sólidos suspendidos totales (SST) y coliformes fecales antes y después de la incorporación de EM. Los resultados mostraron reducciones importantes en los parámetros analizados, lo que permitió evidenciar la capacidad de estos microorganismos para disminuir tanto la carga orgánica como la contaminación bacteriológica. En ese sentido, el autor recomendó considerar el uso de EM como alternativa complementaria en lagunas de estabilización de la región Apurímac.

3.2. Bases teóricas

3.2.1. Microorganismos eficaces (EM)

3.2.1.1. Definición

Los microorganismos eficaces (EM) son un consorcio microbiano benéfico, típicamente bacterias ácido-lácticas, levaduras, bacterias fototróficas y actinomicetos, formulado para potenciar procesos biológicos de degradación y restauración en suelos y aguas mediante interacciones sinérgicas (Higa & Parr, 2021). En sistemas de tratamiento sobre aguas grises, su uso busca acelerar la remoción de materia orgánica y mejorar el control microbiano del efluente (García et al., 2021; Kim & Kang, 2024).

3.2.1.2. Composición funcional del consorcio EM

Bacterias ácido-lácticas (p. ej., *Lactobacillus* spp.): producen ácidos orgánicos que inhiben patógenos y favorecen la despolimerización de compuestos complejos (García et al., 2021).

Levaduras (p. ej., *Saccharomyces* spp.): generan vitaminas y enzimas que estimulan la actividad bacteriana y la formación de biopelículas útiles en la floculación (Li et al., 2023).

Bacterias fototróficas (p. ej., *Rhodospseudomonas* spp.): contribuyen a ciclar electrones y mejorar la captura de compuestos orgánicos bajo condiciones de luz, apoyando la estabilidad del ecosistema microbiano (Li et al., 2023).

Actinomicetos: coadyuvan en la degradación de polímeros y la estabilidad del lodo (Higa & Parr, 2021).

3.2.1.3. Mecanismos de acción relevantes en aguas residuales

Los microorganismos eficaces (EM) actúan en las aguas servidas mediante diversos mecanismos que, de manera conjunta, favorecen la degradación de la materia orgánica y mejoran el proceso de depuración. Uno de sus principales

efectos es la competencia con microorganismos no deseados, ya que ocupan espacios disponibles y consumen nutrientes, limitando así el crecimiento de bacterias patógenas. Además, estos microorganismos producen sustancias como ácidos orgánicos, enzimas hidrolíticas y biosurfactantes, las cuales ayudan a descomponer compuestos orgánicos complejos y facilitan su transformación en formas más simples. Este proceso también favorece la floculación de partículas suspendidas y contribuye a una mejor remoción de la DBO₅. Asimismo, los EM pueden reducir la presencia de coliformes mediante mecanismos de biocontrol, debido a la generación de condiciones menos favorables para su desarrollo, como cambios en el pH y la producción de sustancias antimicrobianas. En conjunto, estos mecanismos explican el potencial de los EM como una alternativa biotecnológica para el tratamiento sostenible de aguas servidas (García et al., 2021; Kim & Kang, 2024).

3.2.1.4. Dimensiones de la variable (dosis EM)

- Dosis baja: 25 % v/v.
- Dosis alta: 75 % v/v.

Estas dos intensidades se seleccionan para comparar el efecto dosis-respuesta en los tres indicadores (DBO₅), en línea con los objetivos específicos.

3.2.2. Aguas residuales domésticas

Las aguas servidas domésticas provienen de viviendas y servicios (higiene, cocina, lavado) y contienen materia orgánica biodegradable, sólidos en suspensión y microorganismos indicadores de contaminación fecal (MINAM, 2022; WHO, 2022).

3.2.2.1. Indicadores de calidad

- a) Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO₅)

Mide el oxígeno requerido por microorganismos para degradar materia orgánica en cinco días; valores altos reflejan carga orgánica elevada (EPA, 2021). En el Perú, para cuerpos receptores categoría 3, el ECA fija 15 mg/L (MINAM, 2017).

La DBO_5 es uno de los indicadores más utilizados para evaluar la calidad del agua, especialmente en estudios relacionados con el tratamiento de aguas servidas. Este parámetro indica la cantidad de oxígeno disuelto que requieren los microorganismos para descomponer la materia orgánica biodegradable presente en una muestra, durante un periodo de cinco días y bajo una temperatura de 20 °C (APHA, 2020). Por ello, se considera un criterio clave para estimar la carga orgánica del agua, ya que valores elevados de DBO_5 reflejan una mayor presencia de compuestos orgánicos susceptibles de ser descompuestos por microorganismos aeróbicos.

Desde una perspectiva operativa, la DBO_5 permite conocer de forma indirecta el nivel de materia orgánica contaminante presente en el agua, la cual puede deteriorar su calidad y afectar el equilibrio de los ecosistemas acuáticos. En ese sentido, el uso de EM en el tratamiento de aguas grises puede favorecer la disminución de este parámetro, ya que estos consorcios microbianos están integrados por bacterias, levaduras y actinobacterias que actúan de manera conjunta para optimizar la degradación de la materia orgánica biodegradable (Higa & Parr, 2021).

Desde el punto de vista operativo, la DBO_5 permite estimar de manera indirecta la cantidad de materia orgánica contaminante presente en el agua, la cual puede comprometer su calidad y alterar el equilibrio de los ecosistemas acuáticos. En este contexto, la adición de EM en el tratamiento de aguas grises puede contribuir a la disminución de este parámetro, ya que estos consorcios microbianos están integrados por bacterias, levaduras y actinobacterias que actúan de manera

conjunta para acelerar la degradación de la materia orgánica biodegradable (Higa & Parr, 2021).

Un valor elevado de DBO_5 en las aguas residuales indica una mayor necesidad de oxígeno para la degradación de materia orgánica. Esto puede reducir la concentración de oxígeno disuelto en cuerpos receptores y generar efectos negativos en microorganismos acuáticos. En este contexto, la disminución de DBO_5 a través de la implementación de microorganismos eficientes resulta crucial para atenuar el impacto ambiental y restablecer la calidad del agua (Kim & Kang, 2024). La evaluación de la efectividad de los tratamientos biológicos en sistemas de depuración, tales como las lagunas de oxidación y los sistemas de bioaumentación que emplean Electromuestreo (EM).

La DBO_5 y la DQO son parámetros relacionados, pero la DQO abarca una medición más amplia al considerar materia orgánica biodegradable y no biodegradable. Por su parte, la DBO_5 es clave para evaluar tratamientos biológicos, porque refleja la capacidad de los microorganismos para degradar la carga orgánica presente en el agua.

3.2.2.2. Tratamiento biológico en lagunas de estabilización (altoandinas)

Las lagunas facultativas depuran por interacción algas-bacterias y sedimentación; su eficiencia depende de temperatura, tiempos de retención y carga superficial. En altitud y bajas temperaturas (~ 13 °C) se ralentiza la cinética, por lo que bioaceleradores como EM® pueden mejorar la remoción de DBO_5 , favorecer la floculación (\downarrow SST) y disminuir coliformes (von Sperling, 2020; Kim & Kang, 2024).

3.2.2.3. Estándares nacionales aplicables

En el Perú, la regulación de la calidad del agua se sustenta principalmente en dos instrumentos: los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA-Agua),

establecidos mediante el D.S. N° 004-2017-MINAM, y los Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes domésticos, regulados por el D.S. N° 003-2010-MINAM. Ambos cumplen funciones complementarias, ya que los LMP controlan las características del efluente antes de su vertimiento, mientras que los ECA establecen los valores que deben mantenerse en el cuerpo receptor para proteger su calidad ambiental y sanitaria (MINAM, 2022; OEFA, 2023).

En el caso de las lagunas de oxidación en zonas altoandinas, los LMP exigen que el efluente cumpla valores de referencia como una $DBO_5 \leq 100$ mg/L, antes de ser vertido al medio natural. Este control permite evaluar la eficiencia operativa de la infraestructura de tratamiento y asegurar que el sistema cumpla con los parámetros básicos de depuración (MINAM, 2022). En cambio, los ECA-Agua evalúan la calidad del cuerpo receptor donde se descarga el efluente. Para aguas de categoría 3, usadas en riego de vegetales y bebida de animales, el límite establecido para DBO_5 es de 15 mg/L (MINAM, 2017; ANA, 2021).

La aplicación de los LMP y los ECA-Agua es especialmente importantes en sistemas altoandinos como la laguna de oxidación de Pucullococha, donde el caudal tratado supera su capacidad de diseño. En este contexto, los LMP permiten controlar que el efluente descargado desde la laguna no exceda niveles críticos de contaminación, mientras que los ECA-Agua ayudan a verificar si el río receptor conserva condiciones adecuadas para los usos establecidos. En ese sentido, una gestión integral de las aguas grises debe considerar tanto la operatividad de la infraestructura de tratamiento como la calidad del cuerpo de agua que recibe la descarga, con la finalidad de salvaguardar la salud poblacional y los ecosistemas en zonas vulnerables (Cárdenas et al., 2021; Pizarro & Rojas, 2022).

3.2.2.4. Laguna de oxidación

Una laguna de oxidación es un sistema somero de tratamiento donde microalgas, bacterias y protozoos depuran el agua mediante procesos naturales como sedimentación, oxidación y acción solar. Su función es reducir la DBO_5 , disminuir los SST, optimizar la calidad microbiológica del efluente y favorecer el cumplimiento de los ECA y LMP (von Sperling, 2020; MINAM, 2017).

3.3. Definición de términos

Agua

Esta sustancia, compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, se manifiesta en formas sólidas, líquidas y gaseosas, y brilla como uno de los componentes que se encuentran en la biósfera (MINAM, 2023).

Agua residual

Son aguas servidas que provienen de diversas actividades humanas, tanto industriales como domésticas, y son el resultado del uso del agua en procesos de consumo, limpieza, higiene y otras actividades cotidianas (Jiang et al., 2021).

Calidad de Agua

Se refiere a su condición en términos de características biológicas, físicas y químicas, tanto en su estado natural como después de haber sido alterada por actividades humanas (World Health Organization [WHO], 2021).

Contaminación

Se refiere a la presencia de sustancias o agentes en el medio ambiente, provenientes de actividades humanas, que modifican de manera perjudicial sus características físicas, químicas o biológicas (Rodríguez et al., 2022).

Demanda biológica del oxígeno (DBO)

Indicador que mide la carga poblacional generada por ciertos desechos industriales y domésticos, en otras palabras, mide el nivel de oxígeno necesario para degradar la materia orgánica (Flores, 2021).

Depuración

Es un proceso destinado a eliminar diversos contaminantes del agua, tales como aceites, materiales flotantes, compuestos amoniacales y microorganismos patógenos, con el fin de mejorar su calidad y hacerla apta para su uso (González et al., 2021).

Estándar de calidad ambiental (ECA)

Instrumento de administración ambiental instaurado para cuantificar el estado de la calidad ambiental a nivel del país (MINAM, 2020).

Laguna de Oxidación

Excavación de baja profundidad, en la cual la población microbiana (protozoos, bacterias y algas) se desarrolla y convive simbióticamente, eliminando de manera natural los patógenos hallados en los materiales orgánicos (Fanegas, 2020).

Microorganismos eficaces

Se trata de una combinación de microorganismos beneficiosos que favorecen la mejora de la calidad del suelo y el agua, contribuyendo a la supresión de patógenos causantes de diversas patologías (González et al., 2022).

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

La investigación se desarrolló bajo el enfoque cuantitativo, dado que formula hipótesis, mide variables mediante indicadores estandarizados (DBO_5) y analiza los datos con procedimientos estadísticos para contrastar el efecto del tratamiento con EM. En el enfoque cuantitativo, el investigador observa variables previamente definidas y utiliza medición numérica para explicar relaciones causales (Hernández-Sampieri, Mendoza & Baptista, 2023).

El estudio corresponde a una investigación de tipo aplicada, ya que busca responder a una problemática específica vinculada al desempeño del tratamiento en la laguna de oxidación de Pucullococha, a través de la implementación experimental de EM y la evaluación de sus resultados en relación con la calidad del efluente. La investigación aplicada se vale del saber científico para intervenir y optimizar una circunstancia particular, generando evidencia valiosa para la formulación de decisiones tecnológicas y de gestión (Hernández-Sampieri et al., 2023).

El nivel es explicativo (causal), dado que se buscó discernir el impacto de la variable independiente (dosis de EM) en la variable dependiente (calidad del agua residual, cuantificada por DBO_5). Las investigaciones explicativas corroboran las relaciones de causalidad entre las variables y establecen en qué grado las modificaciones en la variable independiente inducen cambios en la dependiente (Hernández-Sampieri et al., 2023)

Diseño de la investigación

Es de tipo experimental, utilizando el modelo de pre-prueba y pos-prueba en un solo grupo. En este enfoque, la variable dependiente se mide inicialmente antes

de la intervención (O_1), luego se aplica el tratamiento con EM (X), y finalmente se realiza una segunda medición de la misma variable dependiente (O_2) para evaluar los cambios atribuibles al tratamiento. Este diseño experimental es apropiado cuando el objetivo es obtener evidencia sobre el efecto de una intervención en contextos operativos reales, en los cuales no es posible disponer de un grupo de control, como ocurre en situaciones de tratamiento de aguas residuales en comunidades o áreas con limitaciones de recursos para realizar diseños más complejos. Esta estrategia permite estimar la eficacia del tratamiento de manera clara y cuantificable, proporcionando evidencia preliminar sobre su impacto en condiciones naturales y favoreciendo la validación de la hipótesis de intervención (Hernández-Sampieri et al., 2023).

Esquema del diseño:

GE: O1----- X ----- Q2

Leyenda:

- **GE:** Grupo experimental (efluente de la laguna de Pucullococha).
- **O₁:** Pre prueba (medición de DBO₅).
- **X:** Aplicación de microorganismos eficaces (EM) en dosis definidas (0,25 % y 0,75 % v/v).
- **O₂:** Pos prueba (medición de DBO₅ tras el tratamiento).

Procedimiento resumido:

- Pre prueba (O_1): muestreo y análisis de DBO₅.
- Intervención (X): inoculación de EM según dosis operacionales.
- Pos prueba (O_2): muestreo y análisis con los mismos métodos para comparar variaciones.

4.2. Ámbito temporal y espacial

- **Espacial**

La investigación se desarrolló en la comunidad de Pucullococha del distrito de Pacucha ubicada geográficamente con una:

Altitud: 2948 m s. n. m.

Latitud sur: 13° 34' 53" S (-13.58138448000)

Latitud oeste: 73° 21' 59.1" W (-73.36641697000)

Provincia: Andahuaylas

Departamento: Apurímac

- **Temporal**

La ejecución de la investigación comprendió alrededor de seis meses, comprendidos entre julio y diciembre de 2024, coincidiendo con la temporada seca en la región, lo cual favoreció la ejecución de muestreos y análisis en condiciones ambientales más estables.

4.3. Población y muestra

Población

La población de estudio estuvo conformada por las aguas grises domésticas generadas en la zona urbana de Pacucha y descargadas hacia la laguna de oxidación de Pucullococha. Estas aguas provienen principalmente de actividades cotidianas como el aseo personal, lavado, preparación de alimentos y uso de servicios higiénicos, por lo que presentan características propias de un efluente doméstico con alta carga orgánica biodegradable. Desde el punto de vista fisicoquímico, se caracterizan por valores elevados de DBO_5 , presencia de sólidos suspendidos totales, grasas, aceites y microorganismos indicadores de contaminación fecal, lo que evidencia un nivel importante de contaminación orgánica.

Muestra

Estuvo constituida por un volumen representativo de aguas grisesdomésticas, recolectadas del afluente antes del ingreso a la laguna de oxidación de Pucullococha. El flujo estimado fue de 0,012 L/s, determinado mediante el método volumétrico. Para su selección se aplicó un muestreo no probabilístico intencional, adecuado para estudios experimentales que requieren trabajar con un volumen homogéneo y representativo de la composición del efluente a tratar (Hernández-Sampieri et al., 2023). Este procedimiento permitió elegir un punto de captación con flujo estable y condiciones similares al funcionamiento real del sistema.

El tamaño muestral se determinó en función de los requerimientos del ensayo experimental y de la necesidad de garantizar un volumen suficiente para la aplicación diferenciada de microorganismos eficaces (EM). Por ello, se utilizaron recipientes de 45 litros con un caudal de 0.012 L/s aproximadamente para cada tratamiento, un volumen operativo que permitió mantener proporciones adecuadas entre la carga orgánica presente y las dosis de EM aplicadas (25 % y 75 %). Esta capacidad aseguró condiciones hidráulicas controladas y la homogeneidad del sustrato durante los cinco días de incubación.

Los criterios de selección del agua residual incluían:

1. Representatividad orgánica, seleccionando un punto donde el efluente mantuviera un contenido constante de materia orgánica biodegradable, reflejada por valores elevados y estables de Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO_5 .
2. Ausencia de interferencias externas, evitando zonas con ingreso de agua pluvial, sólidos gruesos o descargas intermitentes que pudieran alterar la composición fisicoquímica de la muestra.

3. Condiciones de homogeneidad del caudal, seleccionando horarios de aforo en los que la carga hidráulica se mantuviera estable para evitar variaciones bruscas en la concentración de contaminantes.

4.4. Instrumentos

Durante la recolección y procesamiento de datos, se emplearon instrumentos y técnicas orientados a asegurar validez y confiabilidad de los resultados generados respecto a parámetros de calidad de las aguas servidas.

Para la medición de la DBO_5 , se utilizó el sistema OxiTop® (WTW), que es un equipo respirométrico ampliamente utilizado para determinar la cantidad de oxígeno necesario para la descomposición biológica de la materia orgánica presente en el agua. Este equipo mide el consumo de oxígeno durante el período de 5 días a 20°C, de acuerdo con el método estándar establecido por la American Public Health Association (APHA, 2020).

Para calcular la concentración de DBO_5 se la metodología del respirométrico OxiTop®, el cual permite estimar la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos durante la degradación de la materia orgánica biodegradable presente en la muestra de agua. Este procedimiento, aplicado conforme a los lineamientos de la APHA (2020), ofrece resultados confiables y precisos para evaluar la carga orgánica biodegradable y, por tanto, la calidad del agua servida.

Además de las mediciones en campo, se emplearon muestras de agua recolectadas en puntos estratégicos antes y después de la aplicación del tratamiento. Las muestras fueron tomadas siguiendo los procedimientos estándar de la American Public Health Association (APHA, 2020) para garantizar la consistencia y la fiabilidad de los resultados. La técnica empleada para la medición de DBO_5 se basó en el método respirométrico, conforme a los procedimientos de la APHA (2020).

Para el procesamiento de los datos obtenidos, se emplearon técnicas de estadística descriptivas y analíticas. La comparación entre los valores registrados antes y después del tratamiento se realizó mediante la prueba t de Student para muestras relacionadas, con el propósito de determinar si los cambios observados en los parámetros de calidad del agua fueron atribuibles a la aplicación de EM.

Estos instrumentos y técnicas aseguraron que la recolección de datos fuera precisa y coherente, permitiendo obtener información confiable sobre la eficacia del tratamiento con EM en la mejora de la calidad de las aguas servidas.

Materiales y equipos

Materiales.

- Embaces de 1 L.
- Recipiente de 45 L.
- Jarra milimétrica de 50 ml.
- Manguera de ½.
- Cinco (05) Fiolas de 50 ml.
- Espátula con cuchara.
- Probeta de 50ml.
- Probeta de 100 ml.
- Pipeteador.
- Micropipeta.
- Frascos ámbar de 500 ml.
- Magnetos.
- Depósito de goma y sensores oxitop.

Material biológico

- Microorganismos eficaces.

Insumos

- Agua de manantial.

- Melaza.

Reactivos

- Agua destilada.
- Fosfato monobásico de potasio (KH_2PO_4).
- Fosfato dibásico de potasio (K_2HPO_4).
- Fosfato dibásico de sodio heptahidratado ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).
- Cloruro de amonio (NH_4Cl).
- Sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).
- Cloruro de calcio (CaCl_2).
- Cloruro Férrico Hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).
- Hidróxido de Potasio (KOH).

Equipos

- Incubadora de DBO_5 y agitadores.
- Balanza analítica.

4.5. Procedimientos

4.5.1. Pre prueba (medición de DBO_5 antes del tratamiento)

Consiste en el análisis de las aguas residuales de la laguna de oxidación (afluente, pozos de oxidación, efluente) sin ningún tratamiento alguno.

4.5.2. Activación de los microorganismos eficaces.

La activación de un litro de EM se llevó a cabo mediante la combinación de un 5% del producto comercial (50 ml), un 5% de melaza (50 ml), y la completación del 90% restante con agua de manantial (900 ml). La mezcla fue conservada durante un periodo de siete días con el objetivo de facilitar la activación óptima de los microorganismos, tal como se especifica a continuación:

Tabla 2*Proceso de activación de EM*

Componente	Descripción / función principal	Porcentaje (% v/v)	Volumen para 1 L (mL)
Producto comercial de EM	Fuente de consorcio microbiano eficaz (microorganismos benéficos)	5%	50 mL
Melaza	Fuente de carbono y energía para la multiplicación de los EM	5%	50 mL
Agua de manantial	Medio de dilución y soporte para la activación de los microorganismos	90%	900 mL
Total de la mezcla activada	Solución de EM activado lista para su uso en tratamientos	100%	1000 mL

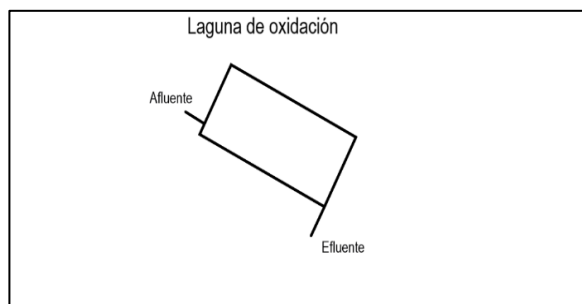
Nota. Elaboración propia, 2025.

4.5.3. Simulación e instalación de la laguna de oxidación

La simulación se desarrolló mediante un prototipo experimental a escala reducida que permitió reproducir el funcionamiento básico de una laguna de oxidación facultativa. Este procedimiento siguió las recomendaciones metodológicas para representar modelos experimentales a través de esquemas y diagramas, los cuales deben elaborarse de forma clara y precisa para facilitar la comprensión de los procesos (APA, 2020; Hernández-Sampieri et al., 2023).

Figura 1

Esquema de la laguna de oxidación



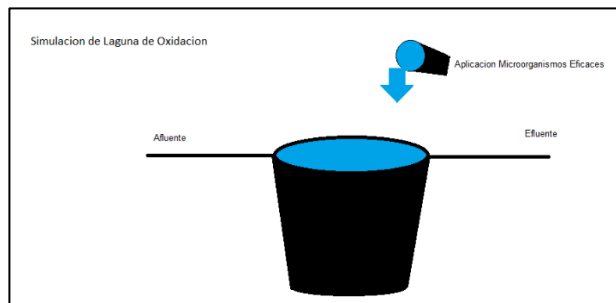
Nota. Elaboración propia, 2025.

Para la instalación del sistema experimental, se empleó agua servida doméstica tomada directamente del afluyente de la laguna de Pucullococha. Posteriormente, esta fue trasladada mediante tuberías hacia un recipiente de 45 litros de capacidad, manteniendo un caudal aproximado de 0,012 L/s, que funcionó como unidad experimental simulada. Dicho recipiente permitió reproducir las condiciones de una laguna facultativa a pequeña escala, manteniendo el caudal y parámetros de entrada propios de la infraestructura real.

Este procedimiento aseguró que los análisis posteriores de DBO_5 , representaran fielmente las condiciones de operación de la laguna, con la diferencia de trabajar en un entorno controlado de laboratorio, lo cual garantizó precisión en la evaluación del efecto de los EM.

Figura 2

Simulación de la laguna de oxidación



Nota. Elaboración propia, 2025.

4.5.4. Aplicación de microorganismos eficaces

La aplicación del tratamiento con los EM en la simulación de la laguna de oxidación se realizó con dos dosis:

- a) Dosis baja al 25% con EM.
- b) Dosis Alta al 75% con EM.

El tiempo de oxidación de los EM fue de 05 días por cada dosis.

- Aplicación de Microorganismos Eficaces con dosis baja al 0.25% con EM.
- Aplicación de Microorganismos Eficaces con dosis alta al 0.75% con EM.

Tabla 3

Composición porcentual de la mezcla para los tratamientos con EM

EM activado	Total (%)
1L	100 %

Nota. Elaboración propia, 2025.

Tabla 4

Equivalencia en volúmen real (para 45 L por reactor experimental)

Tratamiento	EM activado (L)	Total (ml)
25 % EM	1	250
75 % EM	1	750

Nota. Elaboración propia, 2025.

4.5.5. Preparación de las muestras para los ensayos

Paso 1: Selección de las muestras para el análisis de laboratorio

Para la determinación del DBO5, primero se preparó la solución Tampón de fosfato, la solución de sulfato de magnesio, la solución cloruro de calcio, la solución de cloruro férrico, cloruro de amonio y finalmente la solución de nutrientes.

a. Solución tampón de fosfato

En 30 ml de agua destilada disolver:

- 0.425 g fosfato monobásico de potasio (KH_2PO_4)
- 1.0875 g fosfato dibásico de potasio (K_2HPO_4)
- 1.670 g fosfato dibásico de sodio heptahidratado ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
- 0.085 g cloruro de amonio (NH_4Cl)

En una fiola de 50ml aforar con agua destilada a 50ml.

b. Solución de sulfato de magnesio

Disolver en 40 ml de agua destilada:

- 1.125g de sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

Transferir a una fiola de 50 ml y aforar con agua destilada.

c. Solución de cloruro de calcio

Disolver en 40 ml de agua destilada:

- 1.375g de cloruro de calcio (CaCl_2)

Transferir a una fiola de 50 ml y aforar con agua destilada.

d. Solución de cloruro férrico

Disolver en 40 ml de agua destilada:

- 0.0125g de Cloruro Férrico Hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

Transferir a una fiola de 50 ml y aforar con agua destilada.

e. Solución cloruro de amonio

Disolver en 40 ml de agua destilada:

- 1.910g de Cloruro Amonio (NH_4Cl)

Neutralice el pH a 7.0 con Hidróxido de Potasio (KOH) y transferir a una fiola de 50 ml y aforar con agua destilada.

f. Solución mix de nutrientes

Preparar el volumen necesario de acuerdo a la cantidad a ser utilizada. La proporción del mix de nutrientes debes ser de acuerdo a la siguiente composición:

- 3 ml Solución Tampón de Fosfato
- 1 ml Solución de Sulfato de Magnesio
- 1 ml Solución de Cloruro de Calcio
- 1 ml Solución de Cloruro Férrico
- 1 ml Solución Cloruro de Amonio.

Paso 2: etiquetado de las muestras para el análisis de laboratorio.

Procedimiento analítico oxitop

Primero, se debe conocer el rango esperado de DBO y de acuerdo a estos valores se selecciona en la Tabla 5, el volumen de la muestra y de la solución nutritiva.

Tabla 5

Valores de muestra y solución nutritiva para la cuantificación de DBO₅

Factor de multiplicación	DBO ₅ esperado (mg/L)	Volumen de la muestra	Volumen de la solución de Nutrientes (mL)
1	0-40	432	1.7
2	0-80	365	1.5
5	0-200	250	1.0
10	0-400	184	0.6
20	0-800	97	0.4
50	0-2000	43.5	0.2

Nota: La tabla indica los volúmenes de muestra y solución nutritiva requeridos para determinar la DBO₅ en distintas concentraciones esperadas de materia orgánica. Cada factor de multiplicación corresponde al rango de DBO₅ esperado, ajustando la cantidad de muestra y solución nutritiva para que la medición se mantenga dentro de los límites de precisión del método

Posteriormente, se realizan los siguientes pasos:

- Transferir el volumen de la muestra a la botella de DBO₅ oxitop.
- Pipetear el volumen de la solución nutritiva, según el factor de dilución.
- Colocar la barra magnética dentro de la botella de DBO oxitop.
- Agregar de 2 a 4 pastillas de NaOH en el depósito goma.
- Coloque con cuidado el depositito de goma en la boca de la botella.
- Cierre la botella con el sensor oxitop y coloque en el sistema de agitación.
- Incube a 20°C por 5 días para determinar el DBO₅.

Verificación

La verificación se realiza mediante una muestra de agua destilada que será el “CONTROL”:

Utilice un blanco de agua de destilada como control aproximativo de la calidad del agua y de la limpieza de las botellas de incubación. Además, para cada grupo de muestra, solamente incube una botella con agua de destilada para el control.

Al cabo de 5 días el DBO₅ final del agua destilada no debe ser mayor de 0,5 mg./L. y preferiblemente no mayor de 0,1 mg./L.

Interferencias

Durante la determinación de la DBO₅ pueden presentarse interferencias que afecten la precisión y exactitud del resultado. A continuación, se detallan algunas de las principales interferencias y cómo minimizarlas:

- **Sustancias tóxicas:** Metales pesados, cloro, detergentes y pesticidas pueden inhibir la actividad microbiana.

Solución: Neutralizar el cloro con tiosulfato de sodio y pretratar si hay metales.

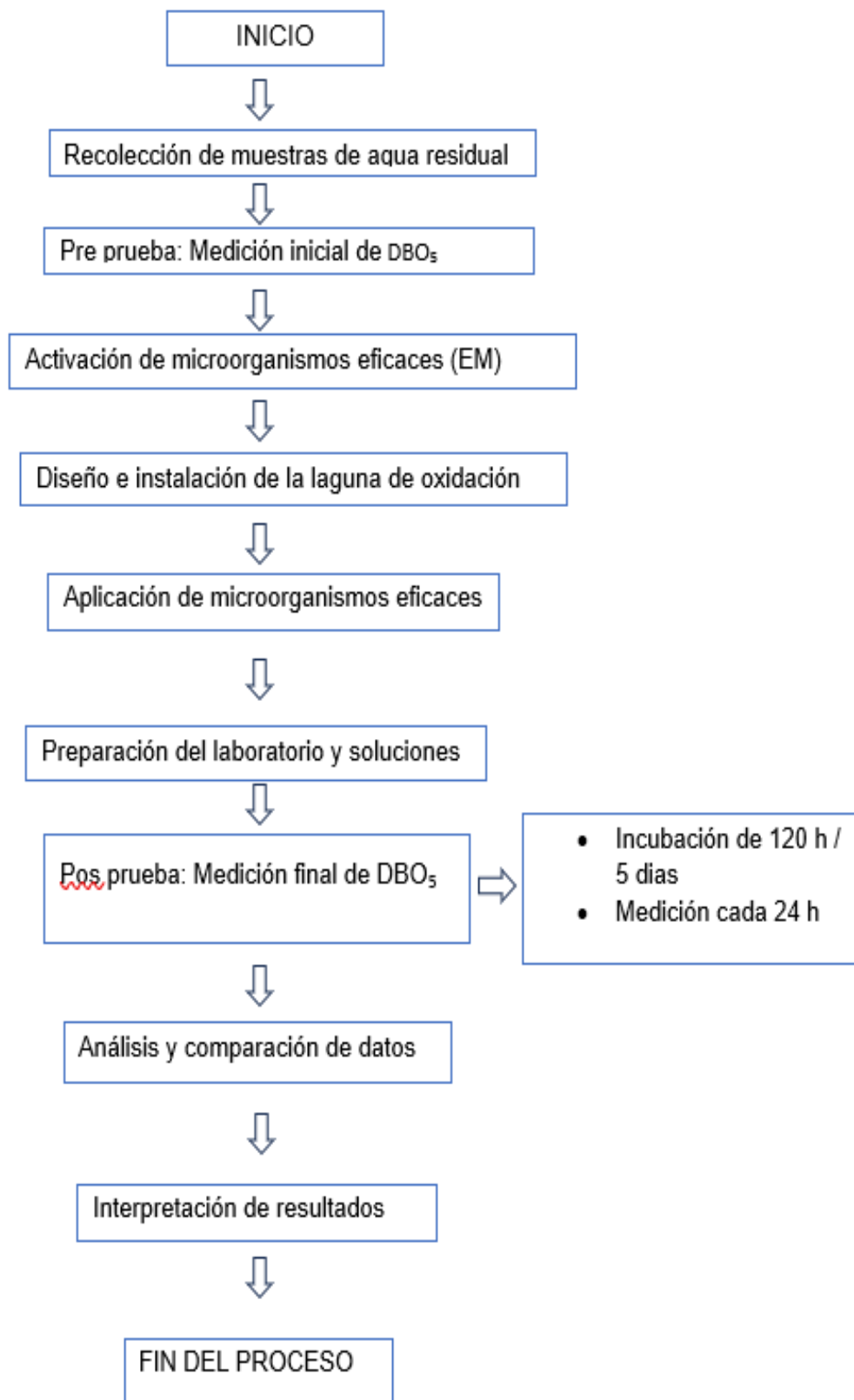
- **Baja concentración de microorganismos:** Puede afectar la degradación de la materia orgánica.

Solución: Agregar inóculo microbiológico si es necesario.

- **Exceso de materia orgánica:** Puede agotar el oxígeno antes de los 5 días.
Solución: Realizar diluciones previas.
- **Formación de burbujas o espuma:** Puede interferir en la medición.
Solución: Evitar agitación excesiva y asegurar buen sellado del Oxitop.
- **Cambios de temperatura:** La incubación fuera de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ altera la actividad microbiana.
Solución: Usar incubadora calibrada.

4.5.6. Pos prueba (medición de DBO_5 después del tratamiento)

Esta fase comprendió la evaluación de las muestras tratadas en laboratorio, mediante la medición de la DBO_5 . El análisis se efectuó en muestras de agua servida doméstica, considerando el periodo de tratamiento establecido, y fue desarrollado en el laboratorio de la Universidad Nacional José María Arguedas (UNAJMA).

Figura 3*Flujograma del procedimiento experimental*

Nota. Elaboración propia, 2025.

4.6. Análisis de los datos

El análisis estadístico se inició con la organización de los datos en Excel, para luego procesarlos en SPSS versión 24, programa utilizado para generar las tablas y gráficos del estudio. Debido a que la investigación consideró mediciones antes y después del tratamiento, se empleó la prueba t de Student para muestras relacionadas, ya que permite comparar datos pareados obtenidos en una misma unidad experimental. En este caso, los registros previos y posteriores a la aplicación de EM al 25 % y EM al 75 % fueron tomados en el mismo punto de la laguna de oxidación.

4.7. Consideraciones éticas

La investigación se realizó conforme a los principios éticos establecidos por la institución universitaria, garantizando la confidencialidad de la información y el cumplimiento riguroso de los procedimientos metodológicos. Además, el estudio se orientó a generar aportes que contribuyan a la protección del ambiente y al uso responsable de los recursos naturales.

Todas las muestras de agua utilizadas en el estudio fueron recolectadas con autorización expresa de la municipalidad distrital de Pacucha y en coordinación con las autoridades ambientales competentes, asegurando que su manipulación cumpla con las disposiciones sanitarias vigentes. Asimismo, los reactores y tratamientos a escala experimental fueron gestionados de forma segura, respetando los protocolos técnicos para el manejo de microorganismos no patógenos.

Los datos recopilados fueron utilizados únicamente con fines científicos y académicos, respetando los principios de veracidad y transparencia durante su procesamiento, análisis y presentación. Asimismo, se garantizó la confidencialidad de la información técnica y operativa proporcionada por las entidades involucradas, evitando su uso inadecuado o cualquier alteración de los resultados.

V. Resultados y discusión

5.1. Resultados

5.1.1. Resultados previos al tratamiento con EM

La DBO_5 es un parámetro fundamental para valorar la carga orgánica presente en las aguas residuales, ya que refleja el consumo de oxígeno necesario para que los microorganismos descompongan la materia orgánica biodegradable. Según los resultados mostrados en la Tabla 6, se registraron valores de 402,0 mg/L en el afluente, 370,0 mg/L en el ingreso a la laguna de oxidación y 260,0 mg/L en el efluente. Estos datos indican que el sistema lagunar reduce parcialmente la carga orgánica; sin embargo, dicha reducción no es suficiente para cumplir con el LMP, establecido en 100 mg/L. Adicionalmente, este valor sobrepasa el ECA para cuerpos receptores de categoría 3, cuyo límite establecido es de 15 mg/L (MINAM, 2017).

Tabla 6

Registros de DBO_5 sin aplicación de microorganismos eficaces

Dimensiones	Indicador	Agua residual sin tratamiento		
		Afluente (mg/L)	Laguna de oxidación (mg/L)	Efluente (mg/L)
Parámetros fisicoquímicos	DBO_5	402.0	370.0	260.0

Nota. Elaboración propia, 2025

EL sistema sin tratamiento alcanzó una eficiencia de remoción de DBO_5 equivalente al 35.3 %. Este nivel alto de carga orgánica confirma la condición crítica del sistema y justifica la necesidad de implementar técnicas de bioaumentación para mejorar la eficiencia de remoción.

5.1.2. Resultados del tratamiento con EM al 25%

En cuanto a la aplicación de microorganismos eficaces al 25%, los resultados evidenciaron una reducción sostenida en cuanto a la concentración de la DBO₅ desde 118.0 mg/L en las primeras 24 horas hasta 46.0 mg/L tras las 120 horas del tratamiento, lo que representa una eficiencia de remoción de 88.5 %. Este descenso muestra la alta actividad metabólica de los EM, quienes descomponen eficientemente la carga orgánica, especialmente en las primeras 72 horas

Tabla 7

Concentración de la DBO₅ en el afluente antes y después del tratamiento de aguas residuales con EM al 25%

Parámetro evaluado	Afluente sin tratamiento (mg/L)	Ensayo con Microorganismos Eficaces al 25%				
		(45 litros de Agua Residual por cada Tratamiento)				
DBO ₅ (mg/L)	402.0	Tratamiento 1				
		24 hrs	48 hrs	72 hrs	96 hrs	120 hrs
Resultados		118.0	86.0	80.0	68.0	46.0

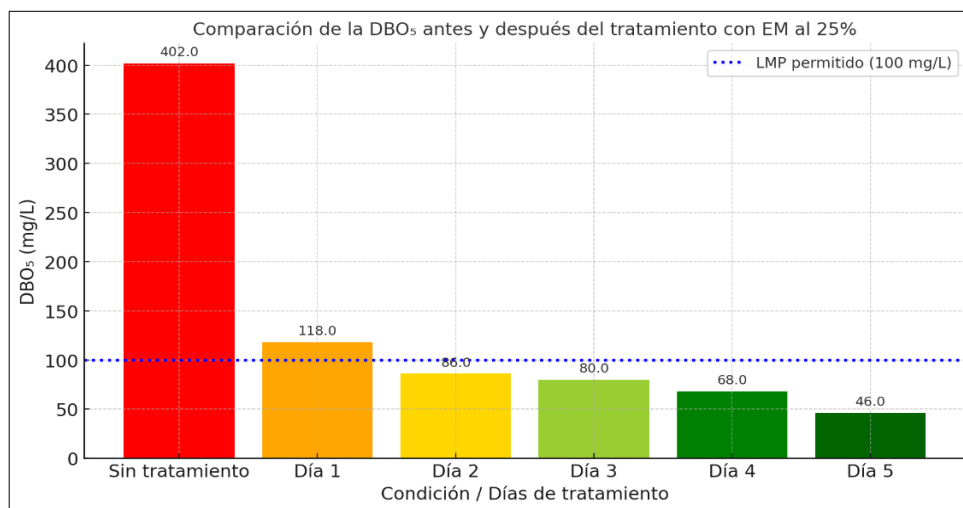
Nota. Elaboración propia, 2025.

Tras la aplicación de EM al 25%, se observa una disminución progresiva de la DBO₅ a lo largo de los días de tratamiento. A las 24 horas, la DBO₅ baja a 118 mg/L, lo que indica una reducción inicial significativa, pero aún no cumple con el LMP de 100 mg/L. En las 48 y 72 horas, los valores de DBO₅ continúan disminuyendo, alcanzando 86 mg/L y 80 mg/L, respectivamente, lo que muestra una mejora en la descomposición de la materia orgánica, pero aún se mantiene por encima del límite de calidad establecido el LMP de 100 mg/L. A las 96 horas, la DBO₅ llega a 68 mg/L, lo que refleja una reducción notable en la carga orgánica. Finalmente, a las

120 horas, la DBO_5 desciende a 46 mg/L, mostrando una clara efectividad del tratamiento con EM al 25%.

Figura 4

Concentración de la DBO_5 en el afluente después del tratamiento con microorganismos eficaces al 25%



Nota. Elaboración propia, 2025.

La figura 4 muestra la comparación de la DBO_5 antes y después del tratamiento con microorganismos eficaces (EM) al 25%, durante un periodo de 120 horas. La medición inicial, antes de la aplicación del tratamiento, registra un valor equivalente a 402 mg/L, que supera el LMP de 100 mg/L. Este valor refleja la alta carga orgánica presente en el agua antes de cualquier intervención. Por otro lado, tras la aplicación del tratamiento, a partir de las 48 horas se observan concentraciones de DBO_5 por debajo del LMP pero no cumplen el ECA, no obstante, incluso después de las 120 horas se registró un valor de 46 mg/L que efectivamente no cumple con el ECA.

Velásquez (2017) señala que para hallar la eficiencia del tratamiento de aguas grises tratadas se utiliza la siguiente formula.

$$Ef (\%) = \frac{Ci - Cf}{Ci} * 100$$

Donde:

Ef = eficiencia en %.

Ci = concentración inicial de los indicadores.

Cf = concentración final de los indicadores.

Al respecto, la eficiencia de remoción de DBO₅ al aplicar EM al 25 % es de 88.46 %.

5.1.3. Resultados del tratamiento con EM al 75%

Tal como se observa en la tabla 8 tras la aplicación de EM al 75%, se observa una disminución progresiva y sostenida de la DBO₅ a lo largo del estudio, lo que indica una activación microbiológica efectiva por parte de los microorganismos eficaces (EM) aplicados. Desde las primeras 24 horas hasta las 120 horas, se redujo el valor de la DBO₅ de 74.0 mg/L a 40.0 mg/L, lo que representa una remoción de 34.0 mg/L y una eficiencia en cuanto a la remoción de DBO₅ de 45.9 %.

La reducción más significativa se produce entre a las 24 horas y 72 horas de aplicados los microorganismos eficientes (de 74.0 mg/L a 52.0 mg/L), lo que sugiere que la actividad metabólica del consorcio microbiano es más intensa en las primeras 72 horas, probablemente debido a la disponibilidad inicial de sustrato fácilmente biodegradable. A partir de las 72 horas del tratamiento, la pendiente de remoción se suaviza (de 52.0 46.0 mg/L a 40.0 mg/L), lo que puede asociarse a la reducción de materia orgánica fácilmente degradable y a la estabilización del ecosistema microbiano.

Tabla 8

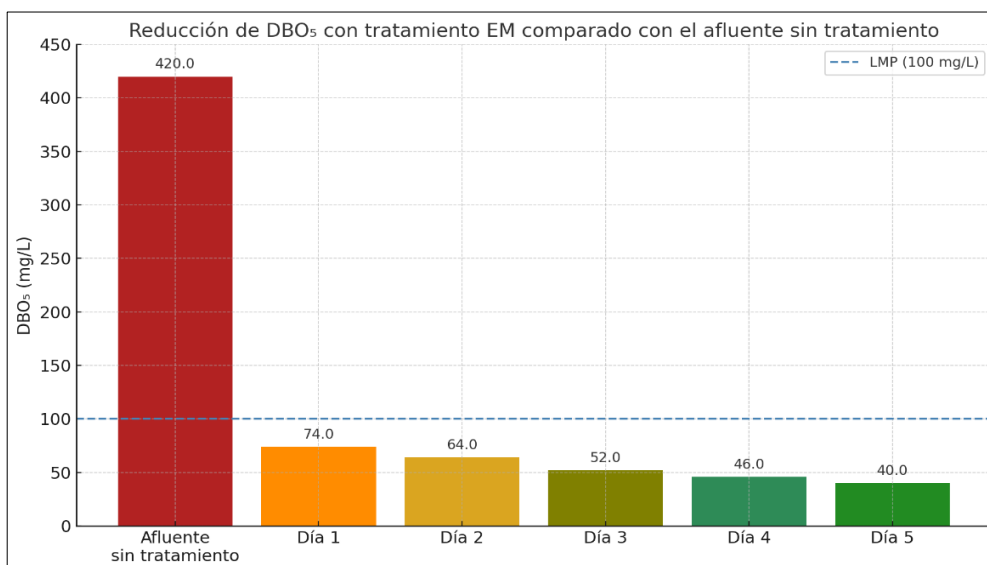
Concentración de la DBO_5 en el afluente antes y después del tratamiento con EM al 75%

Parámetro evaluado	Afluente sin tratamiento (mg/L)	Ensayo con Microorganismos Eficaces al 75% (45 litros de Agua Residual por cada Tratamiento)				
		Tratamiento 1				
DBO_5 (mg/L)	402.0	24 hrs	48 hrs	72 hrs	96 hrs	120 hrs
Resultados		74.0	64.0	52.0	46.0	40.0

Nota. Elaboración propia, 2025.

Figura 5

Variación de la concentración de la DBO_5 del afluente antes y después del tratamiento con microorganismos eficaces al 75%



Nota. Elaboración propia, 2025.

Tras las 120 horas del tratamiento que registra una concentración de DBO_5 de hasta 40.0 mg/L, se puede observar que, en referencia al afluente la eficiencia de remoción alcanza un porcentaje del 90.05%, tal como se observa en la figura 5.

En condiciones iniciales, la DBO₅ del afluente doméstico alcanzó una concentración de 402.0 mg/L, un valor que representa un alto nivel de contaminación orgánica. A pesar de que la laguna de oxidación, en su estado actual, redujo la DBO₅ a 260.0 mg/L, este nivel supera ampliamente los límites máximo permisibles y evidencia una eficiencia de remoción insuficiente (equivalente al 35.3 %), como ya fue analizado previamente.

Tras la aplicación del tratamiento con EM al 75 %, se logró reducir la DBO₅ hasta 40.0 mg/L en 120 horas, lo que representa una eficiencia de remoción de 90.05 % respecto a la concentración inicial de 402.0 mg/L. Esta mejora no solo es significativa desde el punto de vista operativo, sino que también marca una diferencia radical frente al rendimiento del sistema lagunar sin intervención, cuya capacidad está claramente comprometida por la sobrecarga y el tiempo de operación sin mantenimiento. En este caso, el efluente tratado:

- Cumple el LMP, equivalente a 100 mg/L.
- No cumple el ECA categoría 3 (15 mg/L) en la mayoría de las mediciones.
- Presenta una relación dosis-respuesta evidente, donde una mayor concentración de EM mejora la degradación biológica del sustrato orgánico.

5.1.4. Comparación de tratamientos respecto a LMP y ECA

Los resultados obtenidos tras el tratamiento confirman que:

- El uso de microorganismos eficaces EM al 25 % reduce significativamente la carga orgánica, logrando que los valores de

DBO₅ se acerquen a los LMP. Sin embargo, no cumple con los ECA para cuerpos receptores.

- El uso de microorganismos eficaces EM al 75 % reduce significativamente la carga orgánica, logrando que los valores de DBO₅ se acerquen a los LMP. Sin embargo, no cumple con los ECA para cuerpos receptores, esta concentración demostró ser la dosificación más eficaz.

Tabla 9

Comparación de resultados respecto a los LMP y ECA

Tratamiento	DBO ₅ Inicial (mg/L)	DBO ₅ Final (mg/L)	Remoción (%)	Cumple LMP (≤100 mg/L)	Cumple ECA (15 mg/L)
Sin EM	402	—	—	X	X
EM 25 %	402	46	88.46	✓	X
EM 75 %	402	40	90.05	✓	X

Nota. Elaboración propia, 2025

5.1.5. Resultados respecto a la hipótesis general

La presente investigación tuvo como objetivo general analizar el efecto de los EM en el tratamiento de las aguas grises domésticas de la laguna de oxidación de Pucullococha, en Andahuaylas, Apurímac, durante el año 2024. En función de dicho objetivo, se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: Los microorganismos eficaces (EM) no tienen efecto significativo en el tratamiento de aguas residuales domésticas de la laguna de oxidación de Pucullococha, Andahuaylas – Apurímac, 2024.

Ha: Los microorganismos eficaces (EM) tienen efecto significativo en el tratamiento de aguas residuales domesticas de la laguna de oxidación de Pucullococha, Andahuaylas – Apurímac, 2024.

Tabla 10

Análisis de t de Student para el 75% de microorganismos eficaces (ME)

Tratamiento	Media después del tratamiento (mg/L)	Valor inicial (mg/L)	Estadístico t	Valor p
EM al 75%	55.2	402.0	-56.3772029	2.96E-07

Nota. Elaboración propia, 2025.

Para evaluar la variación de la DBO₅ antes y después del tratamiento con EM al 75 %, se aplicó la prueba t de Student para muestras relacionadas. Previamente, se comprobó el supuesto de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk, obteniéndose un valor no significativo ($p > 0,05$), lo que evidenció una distribución aproximadamente normal de los datos y permitió justificar el uso de una prueba paramétrica.

Según los resultados presentados en la Tabla 10, la aplicación del tratamiento permitió reducir notablemente la media de DBO₅, de 402,0 mg/L antes del proceso a 55,2 mg/L después de este. La prueba t de Student arrojó un valor de $t = -56,38$, evidenciando una diferencia considerable entre ambas mediciones. Asimismo, el valor de $p = 2,96 \times 10^{-7}$, al encontrarse por debajo del nivel de significancia de 0,05, demuestra que la disminución observada fue estadísticamente significativa

En ese sentido, se rechaza la hipótesis nula (H_0), referida a la inexistencia de diferencias significativas en los valores de DBO₅, y se acepta la hipótesis alternativa (H_a), evidenciándose que el tratamiento con

microorganismos eficaces contribuye significativamente a la reducción de la carga orgánica.

Además de su significancia estadística, el tratamiento con EM al 75 % mostró una importancia operativa relevante, ya que logró una reducción del 90,05 %, disminuyendo la DBO₅ de 402,0 mg/L a 40,0 mg/L. Este valor se encuentra por debajo del LMP de 100 mg/L, establecido en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM; sin embargo, aún no cumple con el valor exigido para la categoría 3 de los ECA-Agua. Estos resultados demuestran que los microorganismos eficaces representan una alternativa viable para optimizar la calidad del efluente en zonas rurales y altoandinas, donde los sistemas convencionales suelen presentar limitaciones operativas.

En consecuencia, la prueba t de Student aplicada al tratamiento con microorganismos eficaces al 75 % demostró una reducción estadísticamente significativa de la DBO₅ entre la medición inicial y final ($p < 0,001$). Estos resultados respaldan la hipótesis de que los EM son eficaces para mejorar las condiciones del agua residual tratada.

Tabla 11

Análisis de t de Student para el 25% de microorganismos eficaces (ME)

Tratamiento	Media después del tratamiento (mg/L)	Valor inicial (mg/L)	Estadístico t	Valor p
EM al 25%	79.6	402.0	-27.3495466	5.31E-06

Nota. Elaboración propia, 2025

De manera similar, se implementó la prueba t de Student para muestras relacionadas con el objetivo de contrastar los valores de la DBO₅ previos y posteriores al tratamiento con EM al 25 %. Previamente, se

corroboró la suposición de normalidad de los datos a través de la prueba de Shapiro-Wilk, resultando en un resultado no significativo ($p > 0.05$), lo que facilitó la implementación de un análisis paramétrico.

Tras la aplicación del tratamiento con EM al 25 %, la DBO_5 pasó de 402,0 mg/L a una media de 79,6 mg/L, alcanzando una remoción cercana al 80,20 %. Este resultado refleja una disminución importante de la carga orgánica presente en el agua residual. Además, la prueba t de Student reportó un valor de $t = -27,35$, lo que evidencia una diferencia notable entre las mediciones antes y después del tratamiento. Por su parte, el valor de $p = 5,31 \times 10^{-6}$, menor al nivel de significancia de 0,05, confirma que la reducción obtenida fue estadísticamente significativa.

Si bien el tratamiento con EM al 25 % permitió cumplir con el Límite Máximo Permisible de 100 mg/L establecido en el D.S. N° 003-2010-MINAM, su eficiencia fue menor que la obtenida con EM al 75 %, tratamiento que alcanzó una remoción del 90,05 %. Esto muestra que la concentración de EM influye directamente en la reducción de la DBO_5 y en la velocidad del proceso de depuración.

Desde una perspectiva aplicada, el tratamiento con EM al 25 % se presenta como una opción viable, eficiente y económicamente accesible para EPS rurales con recursos limitados, debido a que permite obtener valores compatibles con la normativa vigente. No obstante, en situaciones donde se requiere una depuración más rápida o se presentan cargas orgánicas más altas, la aplicación de EM al 75 % resulta más conveniente.

En ese sentido, el tratamiento con EM al 25 % logra una reducción significativa y aceptable de la DBO_5 , aunque con menor eficiencia que la dosis de EM al 75 %. Estos resultados evidencian que los microorganismos

eficaces pueden ser una alternativa biotecnológica útil para mejorar la calidad de las aguas servidas domésticas, adaptándose a las condiciones económicas y técnicas de cada contexto.

5.1.6. Resultados para las hipótesis específicas

El presente estudio tuvo como objetivos específicos: Determinar la eficiencia del tratamiento con EM al 25 % en la remoción de la DBO_5 de las aguas residuales domésticas; determinar la eficiencia del tratamiento con EM al 75 % en la remoción de la DBO_5 de las aguas servidas domésticas; y, Comparar el efecto de las concentraciones al 25 % y 75 % de EM en la reducción de la DBO_5 , a fin de establecer la dosis más eficaz en el contexto de la laguna de oxidación de Pucullococha; al respecto, se plantearon las siguientes hipótesis específicas:

- La aplicación de microorganismos eficaces (EM) al 25 % tiene una mayor eficiencia en la remoción de la DBO_5 en las aguas servidas domésticas de la laguna de oxidación de Pucullococha.
- La aplicación de microorganismos eficaces (EM) al 75 % tiene superior eficiencia en la remoción de la DBO_5 en las aguas servidas domésticas de la laguna de oxidación de Pucullococha.
- Existen diferencias significativas en la eficiencia de la remoción de la DBO_5 entre las concentraciones de EM al 25 % y al 75 %, siendo la concentración del 75 % más eficaz en la reducción de la carga orgánica en las aguas servidas de la laguna de oxidación de Pucullococha.

Al respecto, la tabla 12 muestra los resultados de la prueba comparativa entre ambos tratamientos, que son los siguientes: media de la DBO_5 para el tratamiento con EM al 75 % = 55,2 mg/L; media para el tratamiento con EM al 25 % = 79,6 mg/L; estadístico $t = -1,84$; valor $p =$

0,0519. Este valor p se sitúa apenas por encima del umbral de significancia convencional ($\alpha = 0,05$); por tanto, la diferencia entre las medias no alcanza significancia estadística, aunque su cercanía al límite sugiere una tendencia que podría confirmarse con un tamaño muestral mayor o un análisis de potencia más detallado. Esto indica que existe una diferencia marginalmente significativa entre los tratamientos con microorganismos eficaces al 75% y al 25%, sugiriendo que el tratamiento con EM al 75% es más efectivo en reducir el valor de la DBO_5 , pero la evidencia estadística no es lo suficientemente fuerte para confirmar esta diferencia con un nivel de significancia del 5%.

Tabla 12

Análisis de t de Student para comparación de eficacia EM 75% vs EM 25%

Comparación entre tratamientos	Media EM 75% (mg/L)	Media EM 25% (mg/L)	Estadístico t	Valor p
EM 75% vs EM 25%	55.2	79.6	-1.83505335	0.05191493

Nota. Elaboración propia, 2025

Ambos tratamientos sobre la aplicación de microorganismos eficaces (al 25% y 75%) han demostrado tener efectos estadísticamente significativos frente al valor inicial de DBO_5 (402 mg/L). Sin embargo, el tratamiento con una concentración del 75% mostró una reducción más pronunciada, aunque la diferencia respecto al tratamiento al 25% no es lo suficientemente contundente estadísticamente (al 5%) para asegurar categóricamente su superioridad. En consecuencia, se puede afirmar que, aunque ambas concentraciones son efectivas, una mayor concentración de microorganismos eficaces al 75% garantiza una reducción más rápida y eficiente en la remoción de la DBO_5 en aguas servidas domésticas.

5.2. Discusión de resultados

La eficiencia de remoción de DBO_5 (sin aplicación de EM) en el sistema de tratamiento de la laguna de oxidación de Pucullococha es de 35.3 %, lo cual es insuficiente, especialmente si se considera que una laguna de oxidación en condiciones óptimas puede lograr reducciones de entre 60 % y 85 %, según lo reportado por Ramírez y Vargas (2021) en sistemas similares del altiplano peruano.

Los resultados de remoción de DBO_5 (sin aplicación complementaria con EM) coincide con lo encontrado por Méndez y Orejuela (2021), quienes observaron que en ausencia de tratamiento biológico complementario, los sistemas anaerobios convencionales apenas logran remociones inferiores al 40 % de DBO y SST, debido a la baja actividad microbiana y a condiciones ambientales limitantes como temperaturas reducidas y ausencia de oxigenación. En el caso de la laguna de oxidación de Pucullococha, localizada a más de 3 000 m.s.n.m., las temperaturas medias anuales de 13 ± 2 °C afectan negativamente la cinética microbiológica, reduciendo la tasa de degradación aerobia (UNAJMA, 2023).

Además, la acumulación de lodos en el fondo de la laguna y la falta de mantenimiento periódico dificultan la adecuada sedimentación de los sólidos orgánicos. Esta situación puede provocar procesos de resuspensión y, como consecuencia, incrementar la carga orgánica presente en el efluente. Al respecto, Kim y Kang (2024) señalan que, en sistemas saturados, el tiempo de retención hidráulica suele ser insuficiente para lograr una oxidación completa, sobre todo cuando no se incorporan etapas anaerobias previas o bioaceleradores microbiológicos.

La concentración de DBO_5 registrada en el efluente indica que la laguna estaría funcionando bajo condiciones críticas de sobrecarga hidráulica y orgánica. Esta situación justifica la necesidad de buscar alternativas complementarias, accesibles y de bajo costo, como el uso de microorganismos eficaces (EM). En otros estudios, estos consorcios microbianos han demostrado mejorar la eficiencia de sistemas lagunares en condiciones similares, alcanzando remociones superiores al 85 % en periodos cortos de exposición (Li, Zhao & Chen, 2023). En ese sentido, los resultados obtenidos sin tratamiento con EM evidencian que la infraestructura actual no cumple adecuadamente su función depuradora, por lo que resulta necesario incorporar tecnologías que permitan aumentar la remoción de materia orgánica, asegurar el cumplimiento normativo y proteger el cuerpo receptor.

En la fase de aplicación de microorganismos eficaces a una concentración del 75 %, se obtuvo una eficiencia de remoción de DBO_5 del 90,05 %. Este resultado coincide con investigaciones previas realizadas en sistemas facultativos tratados con EM, donde se reportaron remociones entre 70 % y 90 % en periodos similares (Li, Zhao & Chen, 2023; Kim & Kang, 2024).

Los datos obtenidos muestran que la dosis de EM al 75 % genera una mejora importante en la reducción de la carga orgánica de las aguas residuales. Esto se evidenció en la disminución progresiva de la DBO_5 durante las 120 horas posteriores al tratamiento. Al finalizar el periodo de evaluación, la concentración de DBO_5 alcanzó 40,0 mg/L, valor que cumple con los Límites Máximos Permisibles y representa una mejora significativa frente a las condiciones iniciales de la laguna de oxidación de Pucullococha.

En conjunto, estos resultados permiten considerar a los EM como una alternativa viable, accesible y técnicamente efectiva para el tratamiento de aguas residuales domésticas en lagunas de oxidación ubicadas en zonas rurales o altoandinas. Como señalan Li et al. (2023), estos consorcios microbianos pueden alcanzar altos niveles de remoción orgánica incluso en contextos climáticos desfavorables y en sistemas con baja inversión tecnológica, lo que respalda su uso como estrategia de mejora operativa sin necesidad de reconstruir la infraestructura existente.

Los resultados del presente estudio tras la aplicación de microorganismos eficientes (EM) al 75% indican una remoción de hasta 90,05 % respecto a la DBO₅ inicial de 402 mg/L tal como se indicó anteriormente. Esto indica que se superó la meta mínima de 75 % calculada para cumplir los LMP. Además, esto refleja una reducción altamente significativa, dado que el valor p es ($p < 0.0001$), por lo que se rechaza con contundencia la hipótesis nula de ausencia de efecto. Estos resultados evidenciaron que la aplicación diaria de EM genera una reducción rápida y constante del valor de las aguas residuales, logrando alcanzar niveles inferiores al Límite Máximo Permisible establecido por las normativas ambientales (100 mg/L). Estos resultados son comparables con el estudio de Acuña y Huamán (2021), quienes evaluaron la remoción de materia orgánica de aguas servidas con el uso de EM, concluyendo que los microorganismos eficaces tienen efecto significativo para reducir la materia orgánica en aguas servidas.

Asimismo, este resultado guarda relación con estudios recientes. Kim y Kang (2024), por ejemplo, reportaron reducciones superiores al 80 % de DBO₅ en lagunas de estabilización ubicadas en zonas de clima frío, con diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,001$). De igual manera, Li

et al. (2023), mediante un metaanálisis, evidenciaron que en más del 90 % de los ensayos revisados los microorganismos eficaces lograron disminuciones significativas en los parámetros asociados a la carga orgánica, con valores estadísticos de magnitud comparable. En el contexto nacional, Méndez y Orejuela (2021) también encontraron reducciones superiores al 50 % en sistemas anaerobios tratados con EM, confirmando su efecto significativo en la depuración de aguas servidas.

Respecto a la aplicación de microorganismos eficaces al 25 %, se obtuvo una remoción de DBO_5 del 88,5 %. Este comportamiento coincide con lo señalado por Li et al. (2023), quienes reportaron remociones promedio entre 70 % y 90 % en sistemas facultativos tratados con consorcios microbianos, incluso bajo condiciones ambientales poco favorables. Asimismo, Kim y Kang (2024) indican que la actividad fermentativa y enzimática de los EM favorece la descomposición de la materia orgánica soluble, lo cual se refleja en la reducción progresiva de la DBO_5 . Además, el tratamiento permitió cumplir ampliamente con el Límite Máximo Permisible, manteniendo valores aceptables desde las 48 horas, cuando la DBO_5 alcanzó 86,0 mg/L. Esto demuestra la estabilidad del sistema biológico tratado y su potencial aplicación en contextos rurales con limitaciones operativas.

La aplicación de EM-25 no solo mejora la remoción de carga orgánica, sino que reduce el tiempo requerido para acercarse a los ECA Agua III, lo cual es clave en zonas rurales como Andahuaylas, donde las lagunas de oxidación operan en condiciones de sobrecarga hidráulica y escasa inversión tecnológica

La incorporación de EM al 25 % demuestra una menor capacidad de depuración biológica en un contexto de agua servida doméstica cruda, sin embargo, logra remover más del 88 % de la DBO_5 inicial en un periodo de 120 horas. Estos resultados posicionan a los EM como una herramienta viable, económica y ambientalmente responsable para mejorar la eficiencia de sistemas de tratamiento descentralizados como las lagunas de oxidación.

En concordancia con el objetivo general, la investigación de Flores (2021), que evaluó la aplicación de microorganismos eficaces para alcanzar los niveles máximos permitidos de contaminantes en aguas servidas de procedencia doméstica, determinó que los EM ejercen efectos en diversos parámetros microbiológicos, físicos y químicos tras 15 días de tratamiento. Además, se cuenta con la investigación de Flores (2021), que evaluó la aplicación de EM para alcanzar los niveles máximos permitidos de contaminantes en aguas servidas de procedencia doméstica, concluyendo que la utilización de microorganismos eficaces disminuye de manera significativa la presencia de nitrógeno y materia orgánica en las aguas servidas en el hogar. En última instancia, se presenta la investigación de Romero (2020), con hallazgos concordantes con el objetivo general. Este estudio se llevó a cabo con el objetivo de establecer la influencia de EM en el tratamiento de aguas servidas. La conclusión de la investigación indica que la aplicación de EM s en concentraciones de 8% y 6% contribuye a la reducción de la depuración de las aguas servidas.

Al respecto, estas similitudes encontradas con la comparación de la literatura del presente estudio demuestran la robustez y confiabilidad del uso de los EM para el tratamiento de reducción de la contaminación de las aguas servidas domésticas.

La eficacia depuradora mostró una relación positiva con la concentración del consorcio microbiano:

- La aplicación de EM al 75 % superó al tratamiento con EM al 25 % en 6 puntos porcentuales de remoción y, no alcanzó el ECA (15 mg/L).
- El comportamiento cinético fue más rápido en el tratamiento con EM al 75 %, donde la pendiente de reducción entre las 24 horas y 72 horas. Estos patrones coinciden con el estudio de Kim y Kang (2024), quienes reportaron remociones mayores al 85 %, tras incrementar la inoculación de EM en lagunas frías, mientras que Li et al (2023) demostraron, mediante metaanálisis, que cada 25 % de aumento en dosis de EM se traduce en 5 % adicional de remoción de DBO₅ en las aguas residuales.

Respecto a las implicancias ambientales y normativas de los resultados obtenidos, se observa que la aplicación de EM al 75 % permitió reducir la DBO₅ de 402,0 mg/L a 40,0 mg/L, lo que representa una disminución importante de la carga orgánica vertida al ambiente. Esta reducción contribuye a disminuir el riesgo de anoxia en el río Manchaybamba y mejora las condiciones del efluente antes de su descarga. Asimismo, el valor final obtenido se encuentra por debajo del LMP de 100 mg/L, lo que evidencia el cumplimiento de la normativa nacional para vertimientos; sin embargo, aún no alcanza el ECA para agua de categoría 3, establecido en 15 mg/L. Desde el punto de vista operativo, esta alternativa resulta viable, ya que no requiere aireación mecánica ni ampliación inmediata de infraestructura, por lo que puede adaptarse a EPS rurales con limitaciones presupuestales.

La concordancia entre los resultados y los antecedentes revisados refuerza la validez del estudio. Además, demuestra que las condiciones altoandinas, caracterizadas por temperaturas cercanas a 13 ± 2 °C y pH

alcalino de 8,2, no necesariamente limitan el desempeño de los microorganismos eficaces cuando se aplica una dosis adecuada. Esto resulta relevante para sistemas de tratamiento ubicados en zonas rurales de alta montaña, donde las bajas temperaturas suelen reducir la actividad microbiana y afectar la eficiencia de depuración.

No obstante, el estudio presentó algunas limitaciones que deben ser priorizadas. En primer lugar, la investigación se desarrolló a escala de laboratorio, lo que permitió controlar mejor las condiciones experimentales y evaluar la respuesta de los EM en volúmenes reducidos. Sin embargo, la aplicación a caudales reales superiores a 50 L/s, como los que recibe la laguna de oxidación de Pucullococha, requiere estudios piloto o semiindustriales que permitan reproducir con mayor precisión las dinámicas hidráulicas, la sedimentación y la interacción microbiana propias de un sistema a gran escala (Cárdenas et al., 2021).

Si bien el ensayo se realizó en un recipiente de 45 L, y este no reproduce completamente las condiciones hidráulicas, climáticas y microbiológicas de la laguna real, se aplicaron criterios metodológicos para mejorar la confiabilidad de los resultados. El diseño experimental buscó mantener proporciones representativas de carga orgánica y tiempo de retención, lo que permitió observar procesos de biodegradación comparables con los que ocurren en sistemas de mayor tamaño. Además, la aplicación de EM en dosis diferenciadas, al 25 % y 75 %, se realizó bajo condiciones controladas de temperatura y agitación mínima, simulando de manera aproximada los procesos de degradación presentes en lagunas altoandinas. También se emplearon métodos estandarizados para medir la DBO_5 , lo que permite comparar los resultados con los LMP y ECA vigentes.

En segundo lugar, los experimentos se desarrollaron durante la época seca, periodo en el que la temperatura del agua suele mantenerse más estable. Esta condición favoreció el control experimental, pero también representa una limitación, ya que durante la temporada de lluvias pueden presentarse descensos de temperatura de 2 a 3 °C, incremento del caudal y mayor arrastre de sólidos. Estos factores podrían modificar la actividad metabólica de los EM y la eficiencia de remoción de la DBO₅. Por ello, se recomienda que futuras investigaciones incluyan evaluaciones estacionales, especialmente en época húmeda, para verificar la estabilidad del tratamiento bajo condiciones más variables (Pizarro & Rojas, 2022).

Asimismo, la investigación se centró principalmente en la reducción de la DBO₅, dejando pendiente el análisis de otros parámetros de importancia sanitaria, como los coliformes termotolerantes, así como aspectos emergentes relacionados con la presencia de genes de resistencia antimicrobiana en aguas residuales. Esta limitación abre una línea de investigación futura orientada a complementar la evaluación fisicoquímica con un enfoque microbiológico y de salud pública más integral (Martínez et al., 2023).

En términos generales, los resultados obtenidos son promisorios, aunque deben considerarse como una evidencia inicial. Para garantizar la aplicabilidad real de los EM en lagunas altoandinas, se recomienda implementar proyectos piloto en campo con un seguimiento mínimo de 30 a 60 días. Esto permitiría evaluar la sostenibilidad del proceso, su comportamiento frente a variaciones climáticas y su posible incorporación en los planes de gestión de aguas residuales de comunidades rurales.

Los hallazgos confirman que la bioaumentación con microorganismos eficaces mejora de manera significativa el desempeño del tratamiento de aguas servidas en la laguna de oxidación de Pucullococha. En particular, la dosis de EM al 75 % logró reducir la DBO₅ hasta 40,0 mg/L, cumpliendo con el Límite Máximo Permisible y posicionando a esta alternativa como una opción biotecnológica eficaz, sostenible y de bajo costo para contextos rurales altoandinos. Sin embargo, al no alcanzar el ECA de 15 mg/L, se evidencia que esta tecnología debe considerarse como una estrategia complementaria dentro de un sistema de tratamiento más integral.

Respecto a los objetivos específicos, ambos tratamientos con EM, al 25 % y 75 %, mostraron efectos positivos frente al valor inicial de DBO₅ de 402,0 mg/L. No obstante, la dosis al 75 % presentó una mayor eficiencia, con una remoción de 90,05 %, mientras que la dosis al 25 % alcanzó una remoción aproximada de 80,20 %. Esta diferencia muestra una relación dosis-respuesta, donde una mayor concentración de microorganismos eficaces permite una biodegradación más rápida y una reducción más marcada de la carga orgánica.

Este comportamiento puede explicarse por varios mecanismos. En primer lugar, los EM aportan actividad enzimática y fermentativa, debido a la presencia de microorganismos como *Lactobacillus* spp. y levaduras, capaces de secretar enzimas hidrolíticas que facilitan la descomposición de carbohidratos, proteínas y grasas (Bol & Lomelí, 2023). En segundo lugar, una mayor concentración de EM favorece la competencia y desplazamiento de microorganismos menos eficientes, optimizando así la cadena de degradación de la materia orgánica. Finalmente, algunas bacterias fotosintéticas presentes en el consorcio, como *Rhodospseudomonas* spp., pueden contribuir a la formación de microflóculos, mejorando la

sedimentación de partículas y reduciendo la DBO_5 en el efluente (Kim & Kang, 2024).

Un aspecto importante de los resultados fue que el tratamiento con EM al 25 %, pese a reducir significativamente la DBO_5 y cumplir con el LMP, no logró alcanzar el ECA-Agua categoría 3. Esta limitación podría estar relacionada con la menor densidad microbiana disponible, lo que reduce la producción de enzimas extracelulares y limita la colonización efectiva del consorcio en el agua residual. En condiciones altoandinas, donde las bajas temperaturas y la sobrecarga hidráulica pueden disminuir la velocidad metabólica de los microorganismos, una dosis baja puede generar un tratamiento parcial, pero no suficiente para cumplir estándares ambientales más exigentes (Cárdenas et al., 2021).

En cambio, la aplicación de EM al 75 % proporcionó una mayor biomasa activa, capaz de establecer una competencia más efectiva frente a la microflora nativa, aumentar la liberación de metabolitos y favorecer la floculación de partículas suspendidas. Esta combinación de procesos permitió una reducción más acelerada de la DBO_5 y un mejor desempeño del sistema. Resultados similares han sido reportados en ensayos semi-piloto con tratamientos naturales, donde dosis más altas de consorcios microbianos lograron mejores niveles de remoción bajo condiciones climáticas desfavorables (Martínez et al., 2023; Pizarro & Rojas, 2022).

También es importante destacar el posible rol de *Rhodopseudomonas* spp., bacteria fotosintética presente en los EM. Diversos estudios señalan que este tipo de microorganismo produce polisacáridos extracelulares y compuestos bioactivos que favorecen la agregación de partículas y la formación de flóculos en sistemas de

tratamiento biológico (Zhang et al., 2021; Wu et al., 2022). En el caso de esta investigación, su presencia pudo haber contribuido tanto a la degradación de compuestos orgánicos como a la sedimentación de sólidos finos. Esto ayuda a explicar por qué la dosis al 75 % mostró mayor eficiencia: al existir una biomasa más abundante, también aumenta la producción de sustancias que favorecen la remoción de DBO_5 y la clarificación del efluente.

En síntesis, la diferencia observada entre los tratamientos con EM al 25 % y EM al 75 % demuestra que la eficacia del proceso depende directamente de la concentración aplicada. En un contexto de alta carga orgánica como el de Pucullococha, las dosis mayores permiten una respuesta más rápida y eficiente, aunque todavía se requiere complementar el tratamiento para alcanzar estándares ambientales más estrictos. En ese sentido, la bioaugmentación con microorganismos eficaces representa una alternativa biotecnológica con alto potencial para mejorar sistemas de tratamiento descentralizados, especialmente en comunidades rurales y altoandinas donde las soluciones convencionales suelen presentar limitaciones técnicas y económicas.

VI. Conclusiones

1. Utilizar EM para el tratamiento de las aguas servidas domésticas de la laguna de oxidación de Pucullococha demostró ser una alternativa biotecnológica viable y compatible con las condiciones ambientales de la región altoandina. Los tratamientos con EM al 25 % y 75 % generaron reducciones significativas de la DBO₅, con eficiencias de 88.46 % y 90.05 %, respectivamente. Estos resultados confirman que la bioaumentación con EM alternativa eficaz para mejorar la calidad del efluente en sistemas rurales con limitaciones de infraestructura y sobrecarga hidráulica.
2. La aplicación de Microorganismos Eficaces (EM) al 25 % produjo una disminución significativa de la DBO₅, reduciendo el valor inicial de 402.0 mg/L a 46.0 mg/L después de 120 horas de incubación. Esta eficiencia de remoción del 88.46 % evidencia que incluso una dosificación moderada es suficiente para acelerar la degradación de la materia orgánica biodegradable. Además, el efluente tratado alcanzó concentraciones inferiores al LMP (≤ 100 mg/L) del D.S. N° 003-2010-MINAM, lo cual valida su utilidad para comunidades rurales que requieren soluciones de bajo costo y fácil implementación.
3. El tratamiento con EM al 75 % presentó la mayor eficacia en la remoción de materia orgánica, al reducir la DBO₅ de 402,0 mg/L a 40,0 mg/L, alcanzando una eficiencia de remoción del 90,05 %. Este resultado permitió cumplir con el LMP de 100 mg/L; sin embargo, no alcanzó el ECA agua para cuerpos receptores de categoría 3, establecido en 15 mg/L. Aun así, se evidencia que una mayor concentración de EM favorece la actividad microbiana en condiciones altoandinas de baja temperatura, logrando una depuración más rápida y constante.

4. El análisis comparativo entre los tratamientos con EM al 25 % y 75 % evidenció reducciones importantes de la DBO_5 en ambos casos. No obstante, la diferencia entre ambos tratamientos fue marginal desde el punto de vista estadístico, con un valor de $t = -1,84$ y $p = 0,0519$. Desde una perspectiva técnico-operativa, la dosis al 75 % mostró un mejor desempeño, ya que alcanzó valores más bajos de DBO_5 y se aproximó más al ECA de 15 mg/L, aunque sin llegar a cumplirlo. Por ello, se considera que la concentración al 75 % constituye la alternativa más eficaz para lograr una depuración orgánica más rápida, estable y adecuada en sistemas rurales expuestos a variaciones en la carga contaminante.

5. Los microorganismos eficaces (EM) actúan como un apoyo al proceso natural de tratamiento en la laguna de oxidación, ya que favorecen la biodegradación de la materia orgánica y fortalecen la actividad microbiológica del sistema. Su aplicación permite mejorar los procesos biológicos de degradación y estabilización de los compuestos orgánicos, sin reemplazar las etapas convencionales del tratamiento, sino complementándolas y optimizando el desempeño general del sistema.

VII. Recomendaciones

- ❖ Se recomienda implementar la aplicación EM a una dosis del 75 %, debido a que este tratamiento mostró la mayor eficiencia en la reducción de la DBO_5 y permitió cumplir con el Límite Máximo Permisible nacional. Su aplicación podría iniciarse con una frecuencia mensual, la cual deberá ajustarse de acuerdo con los resultados obtenidos en campo. Para ello, es necesario realizar un monitoreo continuo de la DBO_5 , sólidos sedimentables y parámetros microbiológicos. Asimismo, se sugiere desarrollar campañas de evaluación tanto en época seca como en época lluviosa, con el fin de comprobar la estabilidad y sostenibilidad del tratamiento bajo distintas condiciones climáticas e hidrológicas.

- ❖ También se recomienda fortalecer la coordinación entre instituciones como la Autoridad Nacional del Agua (ANA), el Gobierno Regional de Apurímac, la municipalidad correspondiente y la EPS encargada del servicio, a fin de establecer protocolos técnicos para el uso de microorganismos eficaces en lagunas de oxidación. De manera complementaria, debe priorizarse el mantenimiento periódico de la laguna de Pucullococha, especialmente mediante la remoción de lodos acumulados, la protección de taludes y la reparación de las estructuras de ingreso y salida. Para asegurar la continuidad del proceso, resulta importante gestionar financiamiento a través de programas estatales de saneamiento, fondos ambientales o cooperación internacional, que permitan cubrir la adquisición de EM, la capacitación del personal técnico y las actividades de seguimiento.

- ❖ Asimismo, se recomienda promover la participación de la población asentada en el entorno de la laguna de oxidación de Pucullococha mediante programas de educación ambiental y sensibilización. Estos espacios deben abordar temas como el manejo responsable de las aguas residuales domésticas, la disposición

adecuada de residuos sólidos, los riesgos sanitarios asociados a la contaminación del agua y los beneficios ambientales de mejorar la calidad del efluente. La incorporación de saberes locales y un enfoque intercultural permitirá que la población comprenda mejor la importancia de esta tecnología, se involucre en el cuidado de la laguna y contribuya a reducir las presiones antrópicas sobre el cuerpo de agua.

- ❖ Finalmente, se sugiere que futuras investigaciones continúen analizando el desempeño de los EM en el tratamiento de aguas grises domésticas, especialmente en zonas rurales y altoandinas con condiciones ambientales similares.. Para ello, sería conveniente desarrollar estudios de mayor duración, con ensayos piloto en campo y diseños comparativos entre diferentes dosis, formulaciones microbianas y condiciones operativas. Además, se recomienda incluir otros parámetros de calidad del agua, como nutrientes, coliformes termotolerantes, metales traza, indicadores de resistencia antimicrobiana y biodiversidad microbiana del sistema. Estos estudios permitirán fortalecer la evidencia científica sobre el uso de EM, establecer protocolos más claros para su aplicación en lagunas de oxidación y aportar criterios técnicos para su incorporación en futuras normativas o lineamientos de saneamiento a nivel regional y nacional.

VIII. Referencias

- ACQUATECNOLOGIA. (2016). Sulfatos. *Acqua Tecnologia*.
<http://acquatecnologiaperu.com/sulfatos.html>
- Acuña, N., & Huamán, N. M. (2021). *Evaluación de la remoción de materia orgánica por medio de microorganismos eficientes en la planta de tratamiento Yauli— 2021* [Universidad Nacional de Huancavelica].
<https://repositorio.unh.edu.pe/items/0724b6ab-f3aa-4b0c-b2d0-07540f25c94f>
- Aguilar, O., & Navarro, B. (2018). *Evaluación de la calidad de agua para consumo humano de la Comunidad de Llañucancho del distrito de Abancay, provincia de Abancay 2017*. Universidad Tecnológica De Los Andes.
- Arriols, E. (2018). Qué son las aguas residuales y cómo se clasifican. *Ecología verde*.
- Calsin, M. (2020). *Evaluación de la concentración de cromo, cadmio y plomo en sedimentos superficiales en el río Apurímac de la provincia de Caylloma— Arequipa*. Universidad del Altiplano Puno.
- Canales, H. O., & Sevilla, A. A. (2017). *Evaluación del uso de microorganismos eficaces en el tratamiento de efluentes domésticos residuales del distrito de Pátapo* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo].
<http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/1092>
- Carbotecnia. (2023). Fenoles en el agua como contaminante. *Carbotecnia*.
<https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/fenoles-en-el-agua-como-contaminante/>
- Chauca, C. (2022). *Calidad del agua y su relación con macro invertebrados bentónicos en la cuenca del río Mariño Distrito de Abancay – Apurímac, 2018*. Universidad Tecnológica De Los Andes.

- Condori Paricahua, L. A. (2025). *Efecto de la aplicación de microorganismos eficaces en el tratamiento de contaminantes orgánicos de las aguas residuales de la ciudad de Cabanillas, 2024* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional UNAP. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/25735>
- Cuba, M. (2020). *Tratamiento de agua residual procedente de lavadoras por el método de electrocoagulación para la reutilización en riego de vegetales – Ate Vitarte*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Delgado, J. E. (2019). *Influencia de los microorganismos eficaces (EM agua) en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del afluente del bioreactor en la planta de tratamiento de aguas residuales Concepción-2018* [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/7027>
- Duran, E. A. (2020). Microorganismos Eficaces (EM) en el rendimiento del cultivo de habas (*Vicia faba*) variedad señorita en condiciones edafoclimaticos de Pano, Pachitea. *Revista Investigación Agraria: ReInA*, 2(2), 49-55.
- Empresa Prestadora de Sservicios de Saneamiento - EPS Chanka. (2022). *Informe técnico de operación y mantenimiento de la laguna de oxidación de Pucullococha, distrito de Pacucha*. Andahuaylas, Perú.
- Fanegas, M. (2020). Lagunas de oxidación. *Fundecooperación*, 20-21.
- Ferrer Polo, J., Seco Torrecillas, A., & Robles Martínez, Á. (2018). Tratamientos biológicos de aguas residuales. *Colección Académica*. Editorial UPV.
- Flores Córdova, R. (2021). *Microorganismos eficaces para el tratamiento de aguas residuales domésticas San Francisco de Asís, Pomalca* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/75936>

- GEDAR. (s. f.). *Clasificación de los Sólidos del Agua Residual*. Gestión de Agua y Residuos. Recuperado 19 de febrero de 2024, de <https://www.gedar.es/clasificacion-de-los-solidos-del-agua-residual/>
- HANNA instruments. (2020). ¿Sabías qué existen diferentes tipos de cloro? *HANNA instruments*. <https://www.hannainst.es/blog/1572/Sabias-que-existen-diferentes-tipos-de-cloro>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mc Graw Hill Education. <https://virtual.cuautitlan.unam.mx/rudics/?p=2612>
- Kaur, B., Choudhary, R., Sharma, G., & Brar, L. K. (2024). Sustainable and effective microorganisms' method for wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, 319, 100419. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100419>
- Kim, K., & Kang, S. (2024). *Enhanced removal of organic load in cold-climate lagoons using effective microorganisms*. *Journal of Water Process Engineering*, 57, 104015.
- Li, Y., Zhao, H., & Chen, Q. (2023). *Performance of EM-based bio-augmentation in facultative ponds: A meta-analysis*. *Ecological Engineering*, 189, 106881.
- Mamani Ccama, N. T., Chavez Molina, R. D., Vigo Rivera, J. E., & Callata Chura, R. A. (2021). Depuración de aguas residuales domésticas con microorganismos eficientes en condiciones altiplánicas en sistema mixto anaerobio-aerobio. *UNACIENCIA. Revista de Estudios e Investigaciones*, 14(26), 60–67. <https://doi.org/10.35997/unaciencia.v14i26.615>
- Maestu, J. (2015). Agua y desarrollo sostenible. En *El agua, fuente de vida 2005—2015*. Ramiro Aurín Lopera. https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/pdf/WM_IIIESP.pdf
- Mena, J. (s. f.). *Grupo Minerales Sulfuros: Propiedades, usos, tipos y toda la información*. Recuperado 19 de febrero de 2024, de <https://mineralesyrocas.com/los-sulfuros/>

- Méndez, J. E., & Orejuela, D. E. (2021). *Evaluación de microorganismos eficientes mediante un filtro anaerobio de flujo ascendente en agua residual sintética, determinado por la eficiencia de remoción de DQO y SST* [Tesis de grado, Corporación Universitaria Autónoma del Cauca].
<https://repositorio.uniautonoma.edu.co/handle/123456789/595>
- Metcalf, & Eddy. (1996). *Ingeniería de Aguas Residuales Tratamiento, Vertido y Reutilización* (3ra ed., Vol. 1). McGraw-Hill.
- MINAM. (2019). *Estándar de Calidad Ambiental*. Plataforma digital única del Estado Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/308391-estandar-de-calidad-ambiental>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2010). *Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM que aprueba los Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de aguas residuales domésticas*. Diario Oficial El Peruano.
- Ministerio del medio ambiente. (2000). La situación actual y los problemas existentes y previsibles. En *Libro Blanco del Agua en España*. JACARYAN, S.A.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2012). *Guía para la evaluación del cumplimiento de los LMP en proyectos de saneamiento*. Lima: MINAM.
- Moriarty, F. (1985). *Ecotoxicología. El estudio de contaminantes en ecosistemas*. Academia, D.L.
- Murillo, D. C. (2018). *Eficiencia del uso de microorganismos eficientes en el tratamiento de aguas residuales de las queserías artesanales de Quimiag* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/10156/1/236T0363.pdf>
- Nishikawa, T. (2010). *Guía de la Tecnología de EM*. EMPROTEC.
<https://www.infoagro.go.cr/Inforegiones/RegionCentralOriental/Documents/Boletin%20Tecnologia%20%20EM.pdf>

- OEFA. (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*.
https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827
- OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable. Recomendaciones* (3ra ed., Vol. 1). Organización Mundial de la Salud.
https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/OMS%202006.%20Gu%C3%ADa%20para%20la%20calidad%20dl%20agua%20potable.pdf
- OPS. (2022). *Saneamiento básico. Agua segura, disposición de excreta y manejo de basura*. (Cuadernillo para capacitaciones con enfoque intercultural en áreas rurales). Organización Panamericana de la Salud.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/deed.es>)
- Oscoco, R. A. (2022). *Estado de contaminación y actividades productivas sostenibles en la laguna Pacucha. Andahuaylas—Apurímac* [Universidad Nacional Hermilio Valdizán].
<https://repositorio.unheval.edu.pe/handle/20.500.13080/8391>
- Paltán, H., Basani, M., Minaya, V., & Rezzano, N. (2020). Servicios de agua potable y saneamiento resilientes en América Latina y el Caribe. *Banco Interamericano de Desarrollo*, 57.
- Ramírez, J., & Vargas, E. (2021). *Desempeño de lagunas de estabilización en zonas altoandinas: un análisis multianual*. *Revista Peruana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 26(1), 22-30.
- Rodríguez, J. P., Ubaque, C. A., & Pardo, J. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Tecnura*, 19(46), 149-164.
<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a03>
- Romero, J. (2004). *Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño* (3a. Ed). : Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Romero, P. C. (2020). *Influencia de microorganismos eficaces en la remoción de coliformes termotolerantes y demanda bioquímica de oxígeno en la planta*

de tratamiento de aguas residuales domésticas del distrito de Quilcas, 2019
 [Tesis de licenciatura, Universidad Continental].
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8247>

- SUNASS. (2008). *SUNASS. Diagnóstico situacional de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en las EPS*. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4615>
- Tamargo, A. (2021). Medición de cloro en agua potable. *AGQ Labs Chile*.
<https://agqlabs.cl/2021/11/10/medicion-de-cloro-en-agua-potable/>
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Texas Health and Human Services. (s. f.). *¿Qué es el cianuro?* (p. 2). Texas Department of State. dshs.texas.gov
- Tomczyk, P., Wierzchowski, P. S., Dobrzyński, J., Kulkova, I., Wróbel, B., Wiatkowski, M., Kuriqi, A., Skorulski, W., Kabat, T., Prycik, M., Gruss, Ł., & Drobnik, J. (2024). Effective microorganism water treatment method for rapid eutrophic reservoir restoration. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 2377–2393. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31354-2>
- UNESCO. (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. *UNESCO*. <https://es.unesco.org/water-security/wwap/wwdr>
- UNAJMA (Universidad Nacional José María Arguedas). (2023). *Informe de monitoreo de la calidad de efluente en la laguna de oxidación de Pucullococha y su impacto en la laguna de Pacucha*. Facultad de Ingeniería Ambiental, Andahuaylas.
- Velásquez Flores, D. J. (2017). *Aplicación del método de electrocoagulación al efluente de la Planta Piloto de Leche "La Molina"*.
<http://45.231.83.156/handle/20.500.12996/3106>
- Vigo, J. (2020). *Efecto de microorganismos eficaces (EM) en el proceso de depuración de aguas residuales domésticas en condiciones altoandinas*

[Tesis de licenciatura, Universidad Peruana Unión].

<https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/4162>

World Bank. (2013). *Un 70% de las aguas residuales de Latinoamérica vuelven a los ríos sin ser tratadas* [Text/HTML]. World Bank.

<https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/01/02/rios-de-latinoamerica-contaminados>

Yalçın, Z. G., Dağ, M., & Aydoğmuş, E. (2023). Wastewater treatment using active microorganisms and evaluation of results. *International Journal of Advances in Natural and Applied Sciences and Engineering Research*, 550. <https://doi.org/10.59287/ijanser.550>

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