



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

Evaluación de dos sistemas de tratamiento de aguas grises para el  
reúso en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

Ingeniero Civil

**AUTOR:**

Mejía Isidro, Jhonny Anival (orcid.org/0000-0001-5053-9985)

**ASESOR:**

Mg. Pinto Barrantes, Raúl Antonio (orcid.org/0000-0002-9573-0182)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Diseño de Obras Hidráulicas y Saneamiento

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo económico, empleo y emprendimiento

LIMA – PERÚ

2023

## **Dedicatoria**

Dedico este logro profesional a mi amado hijo y a mi querida esposa, quienes siempre me han brindado un apoyo inquebrantable en el trayecto hacia esta carrera. Su amor y aliento han sido la fuente de inspiración constante.

## **Agradecimiento**

A mi alma mater y toda mi gratitud al Mg. Raúl Pinto por su paciencia y espíritu perseverante en encauzar mi rol investigativo.



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

### **Declaratoria de Autenticidad del Asesor**

Yo, PINTO BARRANTES RAUL ANTONIO, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA CIVIL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA NORTE, asesor de Tesis Completa titulada: "Evaluación de dos sistemas de tratamiento de aguas grises para el reúso en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023", cuyo autor es MEJIA ISIDRO JHONNY ANIVAL, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 11.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis Completa cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

LIMA, 01 de Diciembre del 2023

<b>Apellidos y Nombres del Asesor:</b>	<b>Firma</b>
PINTO BARRANTES RAUL ANTONIO <b>DNI:</b> 07732471 <b>ORCID:</b> 0000-0002-9573-0182	Firmado electrónicamente por: RPINTOBA el 19-12- 2023 03:43:08

Código documento Trilce: TRI - 0676473



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

### **Declaratoria de Originalidad del Autor**

Yo, MEJIA ISIDRO JHONNY ANIVAL estudiante de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA CIVIL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA NORTE, declaro bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis Completa titulada: "Evaluación de dos sistemas de tratamiento de aguas grises para el reúso en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023", es de mi autoría, por lo tanto, declaro que la Tesis Completa:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. He mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

<b>Nombres y Apellidos</b>	<b>Firma</b>
JHONNY ANIVAL MEJIA ISIDRO <b>DNI:</b> 43002686 <b>ORCID:</b> 0000-0001-5053-9985	Firmado electrónicamente por: JMEJIAI85 el 01-12- 2023 12:14:43

Código documento Trilce: TRI - 0676474

## Índice de contenidos

Dedicatoria .....	ii
Agradecimiento .....	iii
Declaratoria de autenticidad del asesor .....	iv
Declaratoria de originalidad del autor .....	v
Índice de contenidos .....	vi
Índice de tablas .....	vii
Índice de figuras .....	viii
Resumen .....	ix
Abstract .....	x
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MARCO TEÓRICO .....	5
III. METODOLOGÍA .....	21
3.1. Tipo y diseño de investigación .....	21
3.2. Variables y operacionalización .....	28
3.3. Población, muestra, muestreo, unidad de análisis .....	30
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	35
3.5. Procedimientos .....	37
3.6. Método de análisis de datos .....	39
3.7. Aspectos éticos .....	43
IV. RESULTADOS .....	44
V. DISCUSIÓN .....	55
VI. CONCLUSIONES .....	64
VII. RECOMENDACIONES .....	66
REFERENCIAS .....	70
ANEXOS .....	78

## Índice de tablas

Tabla 1.	Parámetros referenciales para caracterizar aguas grises .....	11
Tabla 2.	Concentraciones permitidas en el agua tratada en Perú.....	19
Tabla 3.	Justificación en la elección de los medios filtrantes.....	39
Tabla 4.	Dimensionamiento de los sistemas .....	40
Tabla 5.	Contaminantes priorizados en la investigación .....	41
Tabla 6.	Contaminantes físicos presentes en el influente y efluente.....	44
Tabla 7.	Contaminantes químicos presentes en el afluente y efluente .....	46
Tabla 8.	Contaminantes biológicos presentes en el influente y efluente .....	47
Tabla 9.	Eficiencia de los sistemas removiendo contaminantes.....	49
Tabla 10.	Comparación con norma legal para regar áreas verdes.....	50
Tabla 11.	Contrastes de hipótesis por categorías de grupo .....	53
Tabla 12.	Prueba U Mann-Whitney para dos grupos .....	53
Tabla 13.	Tabla de operacionalización de variables.....	78
Tabla 14.	Matriz de consistencia .....	79
Tabla 15.	Concentraciones físicas típicas en aguas grises domésticas.....	105
Tabla 16.	Concentraciones químicas típicas en aguas grises domésticas.....	105
Tabla 17.	Concentraciones biológicas típicas en aguas grises domésticas .....	106
Tabla 18.	Principales sistemas miniaturizados en el mundo .....	106
Tabla 19.	Contaminantes regulados en el riego de vegetales.....	108

## Índice de figuras

Figura 1. Enfoque de eliminación de contaminantes con sistema biofiltro .....	15
Figura 2. Representación del diseño experimental con posprueba .....	25
Figura 3. Diagrama esquemático de los sistemas de tratamiento .....	27
Figura 4. Configuración de la estructura de capas en los sistemas.....	39
Figura 5. Variabilidad total debido a manipulaciones experimentales .....	42
Figura 6. Distribución de parámetros físicos analizados .....	45
Figura 7. Distribución de parámetros químicos analizados .....	46
Figura 8. Distribución de parámetros biológicos analizados.....	48
Figura 9. Variación de remoción por contaminantes .....	50
Figura 10. Perfil de coliformes termotolerantes con la norma legal .....	51
Figura 11. Perfil de <i>escherichia coli</i> con la norma legal.....	51
Figura 12. Perfil de huevos de helmintos con la norma legal .....	52
Figura 13. Concentraciones removidas de parámetros físicos .....	55
Figura 14. Concentraciones removidas de parámetros químicos.....	56
Figura 15. Concentraciones removidas de parámetros biológicos .....	58
Figura 16. Características de las aguas grises domésticas en el mundo .....	109
Figura 17. Esquema clásico de tratamiento de aguas grises domésticos .....	109
Figura 18. Esquema de localización del lugar de estudio.....	110



## Resumen

Este estudio evalúa la eficiencia de dos sistemas miniaturizados de tratamiento de aguas grises para el riego potencial de áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023. El propósito es ampliar las áreas verdes, mitigar el consumo de agua potable, abordar los desafíos de estrés hídrico y los vertimientos domésticos. Se probaron sistemas de filtración tricapa, cada uno con espesor de 25 cm, dispuestos en columnas verticales de 1 m de altura y diámetro de 6". El Sistema 1, configurado en orden descendente, utilizó arena de sílice, bagazo de caña de azúcar y carbón activado. El Sistema 2, conformada por ladrillo de escombros triturado, aserrín de madera y carbón activado.

El diseño experimental incluyó pruebas de laboratorio con aguas grises reales provenientes de lavaderos de la escuela San Judas Tadeo. Se llevaron a cabo análisis físicos (temperatura, sólidos totales y suspendidos), químicos (pH, DBO<sub>5</sub> y DQO) y biológicos (coliformes totales, *escherichia coli* y huevos de helmintos), verificando el cumplimiento normativo del reúso seguro en el riego de áreas verdes escolares. El Sistema 1 demostró una eficiencia de remoción general del 86.35%, impulsando una solución innovadora y disruptiva de baja huella espacial, transformando radicalmente la gestión del agua en entornos educativos.

**Palabras clave:** Tratamiento de aguas grises, biofiltros, reúso de aguas grises

## Abstract

This study evaluates the efficiency of two miniaturized greywater treatment systems for potential irrigation of green areas in public schools, Lima, 2023. The purpose is to expand green areas, reduce potable water consumption, address water stress challenges, and untreated domestic discharges. Two tri-layer filtration systems, each with a thickness of 25 cm, were tested in vertical columns of 1 m height and a diameter of 6 inches. System 1, configured in descending order, used silica sand, sugarcane bagasse, and activated carbon. System 2, with the same configuration, consisted of crushed brick from construction waste, pine wood sawdust, and activated carbon.

The experimental design was conducted in a domestic environment and included laboratory tests with real greywater from the San Judas Tadeo school's laundry. Physical (temperature, total and suspended solids), chemical (pH, BOD<sub>5</sub>, and COD), and biological (total coliforms, *escherichia coli*, and helminth eggs) analyses were performed, verifying compliance with regulatory standards for safe reuse in school green area irrigation. System 1 demonstrated an overall removal efficiency of 86.35%, promoting an innovative and disruptive solution with a low spatial footprint, radically transforming water management in educational environments.

**Keywords:** Greywater treatment, biofilters, greywater reuse

## I. INTRODUCCIÓN

El agua en la Tierra es un recurso esencial para todos los seres vivos, pero es finito y su disponibilidad es limitada. A pesar de la abundancia de hidrógeno y oxígeno, obtener agua artificial en cantidades significativas no es práctica debido a desafíos energéticos y logísticos (Kathryn, 2019). A través del ciclo del agua se distribuye y reabastece constantemente. Solo una fracción del agua dulce es directamente accesible para la mayoría de las actividades humanas. Cuando la población crece y la economía se expande, la sobreexplotación del agua se convierte en un desafío apremiante, afectando el agua dulce disponible, un recurso crítico para la vida y requiere una gestión inteligente (Figueiredo et al. 2021; Ramos et al., 2019). Diversas civilizaciones ancestrales, como la Cultura del Valle del Indo, Mohenjo-Daro, los romanos, los mayas, los anasazi, el Imperio Khmer y la Isla de Pascua, afrontaron desafíos significativos por falta de agua. En California, EE. UU., el mayor estado agrícola, los frecuentes incendios y sequías han tenido un impacto significativo en el valor del agua. En 2018, Nasdaq se asoció con Veles Water y WestWater Research creando el índice bursátil NQH2O, con el fin de monitorear el precio del agua de uso industrial y agrícola en California. A partir del 07.12.2020, este índice comenzó a cotizar en el mercado de futuros (CME Group, 2023). Además, el S&P 500 Global Water Index (SPGTAQD) rastrea el desempeño de las empresas relacionadas con el "oro azul" a nivel global, vinculadas con el suministro, tratamiento y tecnologías del agua. En 1989, se propuso la privatización del agua en Inglaterra (RTVE, 2020). En Chile, poner fin al actual sistema de privatización del agua es una de las demandas del movimiento ambiental en el debate sobre una Nueva Constitución ecológica (Wehr, 2020). Desde 1990, Perú implementó una estrategia de privatización para administrar los recursos hídricos (Tovar et al., 2006); la existencia de acuíferos con significativas reservas de agua atrajo la inversión privada en las últimas décadas, ocasionando la disminución del manto freático, enfrentando situaciones de escasez de agua (Muñoz, 2015).

Medir el estrés hídrico genera discrepancias entre científicos debido a diversas variables. Según el Banco Mundial en 2020, el estrés hídrico global se estimó en un 69%, evidenciando la limitada capacidad para enfrentar desafíos climáticos y demográficos. Cerca de 2-3 mil millones de habitantes (26%) del mundo no cuentan

con acceso a agua potable (UNESCO, 2023). Además, 844 millones de niños no tienen acceso a este recurso vital (UNICEF, 2023). Debido al cambio climático, se estima que para el 2025, al menos dos tercios de la población mundial enfrentarán estrés hídrico (UN, 2015). La población urbana global, de 933 millones en 2016 crecerá a 1.7-2.4 mil millones de habitantes en 2050, sin acceso al agua dulce, aumentando la competencia entre ciudades y agricultura debido a la rápida urbanización. La demanda de agua urbana se espera que crezca en un 80% para 2050 (UN Water, 2023). Además, se estima que cada aumento de 1°C debido al calentamiento global reducirá en un 20% los recursos hídricos renovables (UN, 2022). En Perú, se prevé que para 2030, el 58% de la población estarán en zonas de estrés hídrico, afectando a más de 73 mil personas (CEPLAN, 2023).

El 80% de los efluentes domésticos se vierten sin tratamiento previo, poniendo en riesgo nuestras fuentes de agua (ONU, 2015). Este panorama aumenta la presión sobre el suministro de agua dulce, encareciendo la gestión del recurso, incluso para las áreas verdes, esenciales en la salud pública y la sostenibilidad (Röbbel, 2018; Memon et al., 2007). El 28.07.2010, la ONU declaró el derecho universal al agua. Además, un recurso público que es de dominio común para todos (Conagua, 2013; Aguilar y Monforte, 2018). Sin agua, no hay vida. La reutilización de aguas grises emerge como una solución integral para enfrentar tanto la escasez de agua como la seguridad sanitaria (Godfrey et al., 2010) y resulta en una estrategia inteligente para la gestión del agua (UNICEF, 2019). Las aguas grises, provenientes de los desechos domésticos, comprenden sustancias como jabones y demás artículos de higiene personal, que pueden ser reutilizadas para disminuir la necesidad de agua potable (Ghaitidak y Yadav, 2013; Masi et al., 2018), con tratamientos sencillos, puede sustituir el uso de agua potable en aplicaciones no domésticas, como el riego de áreas verdes (Loux et al., 2012). Las deficiencias y limitaciones del tratamiento clásico contribuyen a los desafíos globales en la gestión del alcantarillado (Pacheco, 2017) que además, requieren instalaciones extensas. En todo el mundo se han implementado diversas estrategias para mejorar las aguas grises con el propósito de reutilización (Arni et al., 2022, p. 1960), poniendo especial énfasis a sistemas no convencionales (Boano et al., 2020). La miniaturización, un fenómeno clave en diversas industrias, ha permitido reducir componentes sin comprometer su

propósito (Sabban, 2022). En el tratamiento de aguas grises, se han propuesto enfoques innovadores mediante la miniaturización, como las columnas verticales (Kokkinos et al., 2022). En su interior, estas columnas cuentan con múltiples capas de filtración para purificación, lo que permite eliminar contaminantes y sustancias no deseadas del agua gris a medida que fluye a través de ellas (Liu et al., 2011). El enfoque aporta la preservación del suministro de agua dulce (Leong, 2017).

En el planeta, se reúsan aguas residuales tratadas para regar alrededor de 20 millones de hectáreas de cultivos. En Latinoamérica y el Caribe, se destinan 110 mil hectáreas para este propósito. En Chile, en 15 escuelas de tres provincias con déficit hídrico se reúsan aguas grises tratadas para regar áreas verdes (Proyecto Innova-Corfo, 2021). No obstante, en el valle de Tula, México, se riegan 90 mil hectáreas con aguas residuales no tratadas (Siebe et al., 2016). Este patrón se repite en muchas ciudades de Latinoamérica (Gorgich et al., 2019). Las ciudades con una mayor área verde por habitante suelen tener una calidad de vida mejor (Gómez y Velázquez, 2018, p. 173 y 179). Además, la Organización Mundial de Salud (2016) sugiere disponer un área verde de entre 10-15 m<sup>2</sup>/persona, con el umbral mínimo de 9 m<sup>2</sup>/persona. Las áreas verdes en las principales ciudades de Latinoamérica son escasas y están por debajo del umbral sugerido (Reyes y Figueroa, 2010), como es el caso de ciudades como Buenos Aires, Argentina (Tella y Potocko, 2009), y Lima, Perú (AquaFondo, 2020). Las ciudades con menos de 1 700 m<sup>3</sup> de agua/hab./año (FAO, 1997) están teniendo estrés hídrico (UNESCO, 2005) y Lima dispone solo de 125 m<sup>3</sup>/hab./año (AquaFondo, 2022). Según la ANA (2018), Lima tiene 2 715 hectáreas de área verde que requieren 2 361 L/s de agua. Esta demanda de agua para el abastecimiento en Lima, combinado con la limitada disponibilidad de agua superficial, aumentó progresivamente la extracción de aguas subterráneas, pasando de 1 m<sup>3</sup>/s en 1955 a 12.4 m<sup>3</sup>/s en 1997 (Quintana y Tovar, 2002). Esta situación se reguló en parte a través de vedas (ANA, 2016). En la actualidad, se extraen en promedio 17.89 m<sup>3</sup>/s de fuentes superficiales y 4.77 m<sup>3</sup>/s de fuentes subterráneas (SUNASS, 2022). En Lima, las áreas verdes se riegan con 2 300 L/s, representado por 1 100 L/s del río Surco, 700 L/s de agua subterránea y potable, 400 L/s de aguas tratadas y 100 L/s del río Rímac (Moscoso, 2011). En 2020 había 153 depuradoras de aguas residuales (SUNASS, 2020, p. 58), del cual

solo 14 destinaron un volumen de 0.2 m<sup>3</sup>/s para irrigar áreas verdes y; más de 267 millones de m<sup>3</sup>/año se vierten sin tratar (SUNASS, 2022). Lima y Callao, juntas, producen el 65% del agua residual de la costa peruana y solo reutilizan 1 937 L/s para el riego de 1 200 hectáreas de áreas verdes (SUNASS, 2016). A nivel educativo, la escuela La Inmaculada-Surco, Lima, reutiliza sus aguas residuales al costo de 0.47 USD/m<sup>3</sup>, resultando barato en comparación con la tarifa del servicio público de agua potable de 1.75 USD/m<sup>3</sup> (MINAM, 2009) y se viene promoviendo activamente la adopción de estas prácticas (SUNASS, 2019). El distrito de Comas no forma parte de los 9 distritos de Lima que cuentan con una mayor área verde. Estos 9 distritos albergan solo el 7% de la población limeña (SINIA, 2023). En 2018, según el INEI (2019), en Comas se extrajeron 22 139 m<sup>3</sup> de agua subterránea, y el consumo de agua potable ascendió a 21 435 m<sup>3</sup>. A pesar de tener 121 hectáreas de áreas verdes (del cual 85 son parques, 20 son bermas, 13 corresponden a jardines y óvalos, 2 a plazas y 1 a alamedas), el distrito alberga a una población de 520 450 habitantes, teniendo una alta densidad poblacional equivalente a 10 675 hab./Km<sup>2</sup> (según Censo de 2017). En este contexto, surge como objeto de estudio una escuela pública de Comas, Lima, como alternativa para la creación y riego potencial del área verde con agua gris tratada (PEIP-EB, 2023).

Dada la naturaleza de la problemática, se postula la siguiente pregunta científica ¿Cómo se comparan en eficiencia los dos sistemas de tratamiento de aguas grises en el cumplimiento de la norma nacional para el reúso en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023? Plantea preguntas específicas, a saber: ¿Cómo varían los parámetros físicos de la calidad del agua tratada para cada uno de los sistemas propuestos para el tratamiento de aguas grises? ¿Cómo varían los parámetros químicos de la calidad del agua tratada para cada uno de los sistemas propuestos para el tratamiento de aguas grises? Y, finalmente, ¿Cómo varían los parámetros biológicos de la calidad del agua tratada para cada uno de los sistemas propuestos?

La elección de la escuela en Lima como punto focal de esta investigación se basa en varios factores críticos que convergen en una necesidad apremiante, tanto a nivel local como global. La densa población de Lima, la poca agua en la región, la creciente preocupación por la salud pública, la limitada extensión de áreas verdes y la imperante necesidad de fomentar la sostenibilidad, ha contribuido a cotizar el

agua en los mercados financieros. Estos elementos enfatizan la urgente necesidad de abordar de manera efectiva nuestros recursos acuíferos. La privatización del agua en algunos contextos y el deterioro ambiental, exacerbada por la sequía y el cada vez más valioso “oro azul”, acentúan aún más la relevancia de la presente investigación. En este escenario, la propuesta de emplear columnas verticales miniaturizadas para depurar y reusar las aguas grises en la escuela pública emerge como una solución completa que enfrenta múltiples desafíos, desde la preservación del agua y dotar de mejor calidad de vida a la comunidad, hasta la promoción de prácticas sostenibles y mitigación de impactos ambientales. Nuestra investigación, en este contexto, tiene el potencial de sentar las bases para una administración efectiva de los recursos hídricos en un entorno crítico y contribuir al bienestar de la ciudad como la comunidad escolar en su conjunto. Además, según Arias y Covinos (2021), cumple varios propósitos (p. 63). A nivel teórico, contribuye al avance en el reúso de aguas grises. En términos de conveniencia, ofrece información vital sobre el valor del agua tratada y reúso en el regado de áreas verdes. Metodológicamente, proporciona procedimientos y resultados que servirán de base para investigaciones futuras. Además, busca mejorar el bienestar de las comunidades escolares, lo que tiene un impacto social positivo. Como perspectiva económica, busca generar ahorros y optimizar el uso de recursos. En base a Boano et al. (2020), la investigación tiene un papel ambiental crucial al ayudar a abordar la escasez del agua y disminuir la presión sobre las fuentes hídricas al depurar las aguas grises en las escuelas públicas. Además, a nivel práctico, se desarrolló dos sistemas técnicamente viables, asequibles y sostenibles.

En mérito a lo expresado anteriormente, el objetivo general fue: Evaluar la eficiencia de los dos sistemas de tratamiento de aguas grises en el cumplimiento de la norma nacional para el reúso en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023. Los objetivos específicos comprenden: Determinar los parámetros físicos, parámetros químicos y parámetros biológicos de la calidad del agua tratada para cada uno de los sistemas propuestos para el tratamiento del agua gris. Teniendo por hipótesis de investigación a: Existe diferencia en la eficiencia de los dos sistemas de tratamiento de aguas grises en el cumplimiento de la norma nacional para el reúso en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023 (ver Tabla 14).

## II. MARCO TEÓRICO

El estado del arte de los artículos de investigación examinados sobre el reciclaje de aguas grises, destaca Quispe et al. (2023) cuyo estudio en Gran Bretaña para optimizar los parámetros de filtración de biochar y mejorar la calidad del agua de lavado, varió tres parámetros: tamaño de partícula (0.5-2 mm), profundidad del filtro (15-30 cm) y flujo (1-2.5 L/h) en 15 configuraciones diferentes. Mediante un modelo cuadrático mostró el mejor ajuste a condiciones óptimas de tamaño de partícula de 1.25 mm, espesor de filtro de 30 cm y velocidad de flujo de 1 L/h y predijo una eficiencia del 73,06% para la reducción de *escherichia coli* (EC). La validación experimental mostró una eficacia real del 76.08% en la eliminación de EC, el cual cumplió estándares internacionales de calidad del agua. En Suecia, el estudio efectuado por Sami et al. (2023), evaluaron diferentes tasas de carga (4,5 L/d, 9 L/d y 18 L/d) en el tratamiento de aguas grises urbanas mediante un muro verde piloto con plantas adaptadas al frío. Usaron cinco materiales filtrantes: biocarbón, piedra pómez, fibra de cáñamo, restos de café y suelo de fibra compostada. El biocarbón demostró una reducción del 99% en la DBO<sub>5</sub> (demanda biológica de oxígeno a 5 días), EC en 2,2 a 4,0 Log<sub>10</sub> (99.99%), manteniendo niveles estables con concentraciones de efluente de 2 mg/L en todas las tasas de carga.

Nazif et al. (2023) desarrollaron un modelo de simulación en Irán, para optimizar el rendimiento de un filtro mediante una red neuronal artificial basada en resultados experimentales, mientras que, usando un algoritmo genético, se determinó el mejor grosor y configuración de capas de arena de sílice y carbón activado, en diferentes granulometrías. Se llevaron a cabo 49 experimentos con diversas combinaciones de espesores de medios filtrantes con aguas grises sintéticas. El filtro de tres capas, con 33 cm de arena fina, 20 cm de carbón activado y 7 cm de arena media, mostró el mejor rendimiento, logrando una reducción del 72% de DQO (demanda química de oxígeno), ideal tratando la DQO de hasta 321 mg/L, cuyas aguas resultan adecuadas para el riego. Abbas & Ali (2023), en su estudio sobre la reutilización de aguas grises en Iraq, evaluaron dos sistemas de biofiltro mediante pruebas químicas. Los sistemas, con capas de arena, grava, algodón y carbón activado, con pH estable en 7.2 y 7.8, lograron eliminar la DQO en 75%, favoreciendo su uso en la agricultura minimizando la dependencia de fertilizantes. El otro filtro, compuesto



por arena, grava, escombros de ladrillo, virutas de madera y cáscara de arroz, con resultados similares al primero, sugirieron pruebas para su eficacia bajo cargas más pesadas. Refieren que la simplicidad y asequibilidad de los materiales empleados, combinadas con la segregación de aguas grises, disminuyen los costos en las plantas de tratamiento. Alsulaili et al. (2017) su investigación en Kuwait, evaluó un sistema piloto económico y fácil de mantener para tratar y reutilizar el agua gris de lavado en el lugar. Probaron cuatro enfoques: tamizado, filtro de arena, cloración y desinfección UV, en 7 escuelas con diferentes poblaciones. Las eficiencias de remoción fueron de 63%, 30% y 20% para sólidos suspendidos totales (SST), DQO y DBO<sub>5</sub>, respectivamente, con reducción de coliformes totales de 6.5 a 2 UFC/100 mL (99.68%) a una tasa de filtración de 14 m<sup>3</sup>/d-m<sup>2</sup>. El sistema con UV fue más fiable para aguas grises de alta y baja carga, incluso aumentando 10 veces el caudal. El agua tratada cumplió los estándares para el reuso en jardines y descarga en inodoros. El costo-beneficio del sistema con 5 m<sup>3</sup>/d para escuelas con 500 estudiantes demostró ser rentable (ahorro 1 600 USD/año).

Shaikh y Ahammed (2021) llevaron a cabo un estudio de más de 6 meses en India sobre el rendimiento de filtros de arena para tratar aguas grises. Evaluaron filtros saturados e insaturados, operados de manera continua o intermitente, utilizando aguas grises reales sedimentadas. También investigaron los efectos del período de pausa y una mayor tasa de carga, considerando el espesor del medio filtrante. Los resultados indicaron que los filtros saturados, ya sea operados de forma continua o intermitente, superaron en rendimiento a los filtros insaturados. El filtro saturado continuo logró una eliminación promedio del 76% de DBO, 88% de DQO, y hasta el 99,68% (2.40 log) de coliformes fecales. A pesar de la estabilidad del filtro saturado, duplicar la carga hidráulica afectó el rendimiento de los filtros continuos. La máxima eliminación de contaminantes tiene lugar en los primeros 10 cm, pero diversos contaminantes se eliminan a 50 cm de profundidad, resultando ser la zona ideal. Ambos sistemas produjeron aguas con estándares adecuados para su reuso. Ganesh et al. (2020) por más de 12 meses en una escuela pública rural en India, evaluaron un sistema descentralizado para el reusar las aguas grises en inodoros, provenientes del lavado de manos y la cocina, pero separados por sus características iniciales. Se colocó trampas para grasa y mallas para garantizar la

eliminación de impurezas y sólidos. El sistema tuvo un biofiltro lento de arena con un biorreactor de lodos anaeróbicos, seguido de la aireación y desinfección con ozono. El sistema logró eficiencias de remoción del 98% de SST, 98% de la DBO<sub>5</sub>, 96% de la DQO y >99.99% de los coliformes fecales.

En el estudio realizado por Tusiime et al. (2022) en una universidad de Etiopía, implementaron dos filtros multicapa para analizar el impacto del biochar en eliminar contaminantes en las aguas grises. Se evaluaron parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, con sedimentación y cribado previos a la filtración para mejorar la eficiencia en diferentes tiempos de retención hidráulica (TRH). El sistema consistió en capas de grava de 20 cm, seguidas de arena gruesa de 30 cm y arena fina de 70 cm, el otro, tuvo carbón activado granular de 20 cm y arena fina de 50 cm. La eficiencia aumentó con TRH a 12 y 24 horas, disminuyendo a las 36 horas. El primer filtro logró eliminar entre el 60.8% y el 100% de los parámetros evaluados (pH, la DBO<sub>5</sub>, la DQO, coliformes totales y coliformes fecales), mientras que el segundo filtro, alcanzó una eliminación del 47.2% al 100%. Las aguas grises tratadas demostraron ser de alta calidad y aptas para el riego incluyendo jardines.

Jung et al. (2019), en Australia, durante 12 meses ensayó la influencia de biofiltros para eliminar patógenos en aguas grises. Se usó 80 columnas de prueba con 16 configuraciones diferentes, cada una con 5 réplicas, de varios componentes: 2 tipos de medios filtrantes, 11 tipos de plantas, 2 tipos de zonas saturadas y donadores de electrones. Las columnas constaban de una capa de arena gruesa de 70 mm, una capa de drenaje de grava de 70 mm y una capa de arena lavada de 300 mm mezclada con un 5% de astillas de madera. El biofiltro logró eliminar *escherichia coli* una media de 3.0 log (99.9%), obteniendo agua con fines de uso no potable.

En América Latina, en los metadatos de artículos científicos destaca Rodríguez et al. En Chile, en 2022, probó en 9 escuelas públicas en la región de Coquimbo la mejora de aguas grises. Usaron diversos filtros, como arena, zeolita, carbón activado por calor, carbón activado por ácido y carbón activado por base. Los filtros con presencia de carbón fueron más eficientes eliminando más del 90% de materia orgánica, cumpliendo normativas de reúso y permitió el riego de jardines. Indicaron que a los 80 minutos de operación el biofiltro se satura por el material suspendido.

Según el tamaño de la escuela, el sistema ahorró agua entre 840 y 26 000 L/mes. En 2020, su investigación en 3 escuelas públicas de Coquimbo, usaron una electrobomba para recircular el agua gris tratada con la inversión inicial de \$5 200, bastante alto. El análisis de costos no justificó el ahorro de agua. Estas escuelas, con aforos variados, incluyeron a Alejandro Chelén, El Guindo y Pedro de Valdivia, reutilizando el agua gris tratada en las áreas verdes, cubriendo superficies de 6.24, 5.68 y 3.56 m<sup>2</sup>/estudiante, respectivamente. En Colombia, Ramírez et al. (2021) analizaron la eficiencia de remoción de aguas grises en una mini granja con flujo de 0.2 L/s. Utilizaron biofiltros artesanales con capas de salvado de arroz, bagazo de caña, arena fina y grava de diferentes grosores. La evaluación se realizó a 6, 14 y 22 días, a una temperatura de trabajo de 28°C. Se removió el 95.32% de SST, 89.82% de DQO y un pH aceptable de 6.57.

En Perú, las investigaciones en el contexto de nuestro estudio son limitadas. Según la información científica indexada se encuentra a Madueño et al. (2018) que usó en la depuración de aguas grises de 4 etapas en una escuela pública en Lima (I.E. N° 7081, S.J. de Miraflores) proveniente de lavaderos corridos, un biofiltro tipo tanque de 200 L, con 3 capas de arena, de 0.2 mm, 1 mm y la última mezclada con cantos rodados de 5, 10, 20 y 50 mm. El agua tratada se derivó a un tanque de reserva de 200 L, recomendando desinfectar después de 4 días de almacenada. Se logró regar 80 m<sup>2</sup> de biohuerto mediante inundación con 400 L y goteo con 100 L; el área verde de 230 m<sup>2</sup> con 1 200 L por inundación y 800 L por goteo. El estudio de Quispe y Casimiro (2019) utilizó dos biofiltros adaptados con especies vegetales para tratar aguas residuales de un canal urbano en Chosica. Usaron varios materiales (aserrín confitillo, arena fina y gruesa) en dos configuraciones con flujos de 0.75 L/h, TRH de 2.16 y 3.5 días, y espesores de 40 y 25 cm. El primer biofiltro eliminó 95.71% de SST, 91.55% de DBO<sub>5</sub> y coliformes termotolerantes (CT) en  $6.40 \times 10^{+3}$ , mientras que el segundo removió el 90.33% de SST, 91.23% de DBO<sub>5</sub> y  $3.21 \times 10^{+4}$  de CT. La temperatura y pH del afluente fueron 21°C y 7.34, y variaron en los efluentes a 22.1°C y pH 7.62 para el primero, y 22.3°C y pH 7.73 para el segundo. Por su lado, Azabache et al. (2020) en Tarapoto, implementó 3 tanques para tratar aguas grises en serie, siendo el segundo tanque equipado con un biofiltro de cinco capas, empezando 20 cm de piedra de 4", luego 15 cm de grava de 2-3", 15 cm con gravilla,

6 cm de arena (diámetro 0.25-0.35 mm) y el último 21 cm de carbón artesanal, para tratar 15 L provenientes de duchas, lavadoras y lavatorios, con flujo de 0.75 m<sup>3</sup>/día. La eficiencia de remoción fue de 62.50% de DQO y 66.67% de DBO<sub>5</sub>, respaldando el reúso seguro del agua gris para usos no potables y 10% de ahorro.

Para entender los fundamentos teóricos que delinear las variables en estudio, es esencial conocer el contexto de las aguas residuales domésticas (en adelante, ARD). Estas aguas se componen de heces y orinas de personas y animales (Bitton, 2011; p. 271), con cambios en sus propiedades físicas y químicas, convirtiéndolos en una amenaza para las aguas superficiales o subterráneas (Orozco, 2014; p. 3). Los componentes principales del ARD son las aguas negras, aguas grises y las de lluvia. Las aguas negras, tienen su origen en inodoros y urinarios, representan casi el 30% del total de ARD; contienen coliformes fecales y son ricas en nitrógeno (Zelenakova et al., 2020, p. 199; Romero, 2010, p. 17; Orón et al., 2014); además, constan de un 99.9% de agua y un 0.1% de SST, del cual el 70% es orgánico y el 30% inorgánico (Arocutipa, 2013, p. 24). Por otro lado, las aguas grises representan otro componente esencial y son el enfoque de nuestra investigación.

Las aguas grises domésticas (en adelante, AGD), están compuestas en un 49% por aguas de bañeras, lavabos y duchas; un 27% proviene de fregaderos de cocina y lavavajillas; y un 24% de lavaderos, fregaderos y lavadoras. Si bien, el acceso óptimo de agua potable es 100-200 L/hab./día (OMS, 2017); según un modelo con efecto heterogéneo en Lima-Perú, se tienen grupos con consumos por debajo de 150 L/día (3m<sup>3</sup> mensual per cápita) y otros que superan ese nivel (BID, 2022). Usado el agua potable en un hogar promedio, el AGD constituye entre 40-70% del total de ARD (Voigt et al., 2019; Jakub, 2019; WHO, 2015). En países desarrollados, las AGD pueden llegar a constituir entre el 75-80% de las ARD, y aquellos que usan inodoros al vacío representan más del 90% (Boano et al., 2020; Oteng et al., 2018). De modo general, en el uso diario, las AGD representan el 50-80% del ARD. En los países desarrollados, el AGD puede superar los 100 L/día, principalmente en actividades de aseo, en contraste con países subdesarrollados, donde se emplea con mayor frecuencia en la cocina, este volumen suele ser inferior (Gross et al., 2015; Galanakis y Agrafioti, 2019). La generación promedio de aguas grises es de 23 L/día/estudiante en países subdesarrollados (WHO, 2006; Godfrey et al., 2009).

La cantidad y calidad del AGD varían según los usuarios (cantidad, edad, hábitos, actividades, etc.), tipo de zona (urbana, rural, costa, sierra, selva, otros), época del año, composición química del producto de limpieza, formas de recolección de aguas y las instalaciones de la casa. El AGD tras 48 horas de almacenamiento, su calidad mejora. Estos aspectos son cruciales para la caracterización y tratamiento de las AGD (Eriksson et al., 2002; Liu et al., 2010; Ghaitidak y Yadav, 2013).

Tabla 1. Parámetros referenciales para caracterizar aguas grises

<b>Parámetro físico</b>	<b>Unidad</b>	<b>Parámetro químico</b>	<b>Unidad</b>
Temperatura	°C	Potencial de Hidrogeno	pH
Turbiedad	UNT	Demanda biológica del oxígeno DBO	mg/L
Sólidos totales ST	mg/L	Demanda química del oxígeno DQO	mg/L
Sólidos suspendidos totales SST	mg/L	Carbono orgánico total	mg/L
Sólidos disueltos totales SDT	mg/L	Carbono orgánico disuelto	mg/L
<b>Parámetro biológico</b>	<b>Unidad</b>	Nitrato	mg/L
Coliformes totales	NMP/100 mL	Amonio	mg/L
Coliformes fecales	NMP/100 mL	Nitrógeno oxidado	mg/L
<i>Escherichia Coli</i>	NMP/100 mL	Nitrógeno total	mg/L
Bacteriófago tipo ARN-F	NMP/100 mL	Fósforo total	mg/L
<i>Clostridium perfringens</i>	NMP/100 mL	Fosfato	mg/L
<i>Bacteroidales</i>	NMP/100 mL	Metales pesados	mg/L
Huevos de helmintos	Huevo/L	Compuestos orgánicos xenobióticos	mg/L

Fuente: Adoptado de Boano et al. / *Science of the total environment* 711 (2020) – p. 4.

Las AGD se dividen en dos categorías: oscuras y, claras o ligeras. Las AGD oscuras provienen del lavadero de cocinas y contienen residuos de alimentos, aceites y grasas, detergentes usada en lavavajillas, remanentes de lejía y limpiadores de desagüe, tienen un alto contenido de nutrientes y sólidos en suspensión. Algunos autores excluyen las aguas oscuras de la categoría de AGD (Odeh, 2003). Las aguas de lavavajillas pueden llevar sólidos suspendidos, restos de sal y suelen ser alcalinas. Las aguas de lavado de ropa contienen altos valores de productos de detergentes, como sodio, fósforo, nitrógeno y tensioactivos, y de blanqueadores con sólidos suspendidos, trazas de aceites, solventes, pinturas y fibras no biodegradables. En el caso de las aguas de lavandería, pueden contener patógenos cuando se lavan pañales (Galanakis y Agrafioti, 2019, p. 20). Las AGD ligeras provienen de baños y lavabos, y están compuestas por jabones, champús, pasta de dientes, piel, cabello, grasas corporales, pelusas, desechos del afeitado y otros productos de cuidado del cuerpo. Las AGD originadas en la ducha, bañeras y

lavabos pueden contener rastros de orina y heces con microorganismos patógenos. El agua clara, proveniente de lavabos y a veces de lavandería, es de baja turbidez, limpia y contiene bajas concentraciones de contaminantes, lo que la hace adecuada para el tratamiento in situ y el reúso (Fowdar et al., 2017).

La variable independiente, referida a los sistemas que mejoran las aguas grises, centra su esfuerzo en la capacidad de eliminar las cargas contaminantes del agua gris (Barragán, 2016). La mejora de aguas grises en escuelas ofrece la oportunidad de aprovechar eficazmente las aguas residuales, que a menudo se desaprovechan o desechan, lo que aumenta los costos de agua potable y afecta su disponibilidad, así, el sistema promueve un uso más eficiente y ecológico del agua (Zapata, 2018). Los tratamientos clásicos de aguas grises (ver Figura 17) incluyen enfoques físicos, químicos y biológicos o en combinación de estos (Awasthi et al., 2023). Los métodos físicos, como la adsorción en carbón activado, se destacan por su eficiencia y economía, al eliminar contaminantes orgánicos, partículas y nutrientes (ejemplo, fósforo y nitrógeno). Los procesos químicos, aunque efectivos, tienden a ser costosos y se centran en reducir la carga orgánica expresadas como la DBO<sub>5</sub> y la DQO. Los sistemas biológicos, ya sean aeróbicos, anaeróbicos o mixtos, ofrecen una eficaz solución para la depuración de grandes volúmenes de agua (Filali et al., 2022; Wu, 2019; Noutsopoulos et al., 2018; WHO, 2016; Ghaitidak y Yadav, 2013; Lamine et al., 2007). Los sistemas híbridos o no convencionales emergen de enfoques clásicos y proponen mejoras a bajos costos (Galanakis Agrafioti, 2019, p. 20; Boano et al. 2021; Quispe et al. 2022), tienen alta remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos totales (SST), bacterias, protozoos y virus, permitiendo inducir la arborización de terrenos urbanos baldíos para el bienestar social (Boano et al., 2020). El sistema tiene una huella espacial baja, que es de aproximadamente 1 m<sup>2</sup> por persona-equivalente (o su abreviatura "p.e.") en climas fríos-templados y de casi 0,5 m<sup>2</sup>/p.e. en zonas cálidas (Masi et al., 2018). Este requerimiento de espacio mínimo es respaldado por diversos estudios (Castellar et al., 2018; Eregno et al., 2017; Prodanovic et al., 2017). La diversidad de enfoques permite abordar diferentes desafíos de purificación y reúso del agua, mediante la eficiencia de dos sistemas evaluadas versus la norma peruana para irrigar áreas verdes.

El tratamiento con biofiltro es un sistema híbrido, donde el influente atraviesa una

capa filtrante que actúa como soporte, mientras que el aire proporciona el oxígeno necesario para formar una película biológica. Esta biopelícula permite que los microorganismos aeróbicos y anaeróbicos eliminen los contaminantes, purificando así el agua (Figura 1). Puede haber un pretratamiento previo para reducir la carga de partículas y grasas. Los residuos generados durante la purificación se eliminan mediante fluidos gaseosos y líquidos (Filali et al., 2022; Aqua España, 2020; European Comisión, 2001). La biofiltración, es la filtración biológicamente activa, un enfoque sostenible, especialmente para AGD, ya que es económico y efectivo en la eliminación de la DBO<sub>5</sub>, los SST y la turbidez (Dallas et al., 2004; Travis et al., 2010). Cuando se combina con carbón activado, puede lograr tasas de eliminación del 98% de los nutrientes totales, el 97% de la DBO<sub>5</sub> y el 94% de la DQO (Bani et al., 2023; Dalahmeh et al., 2012). Existen dos tipos de biofiltración: la filtración lenta, que opera a velocidades de 0.042-0.3 m/h (simplificado de m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-h), fácil de operar y apta para ciudades hasta 10 mil habitantes y países en desarrollo; y la filtración rápida, que va entre 4.17-19.8 m/h y no requiere pretratamiento ni mantenimiento constante. La filtración rápida utiliza arena con tamaño uniforme y opera en ciclos de filtración y regeneración, utilizando mecanismos como colado, sedimentación, interceptación, adhesión y floculación. Los medios filtrantes de mayor diámetro aumentan la velocidad del flujo y evitan caída en el sistema (Torres, 2017, p. 8-9). La saturación puede ocurrir en 38 días, pero en configuraciones de columna, podría demorar en 10 veces más, prolongando la vida útil de los materiales filtrantes (Wang et al., 2009). El influente no debe contener cloro ni residuos de ozono (Crittenden et al., 2012, p. 727-818). Un alto contenido de sustrato orgánico puede ralentizar la velocidad de nitrificación en los biofiltros (López et al., 2017).

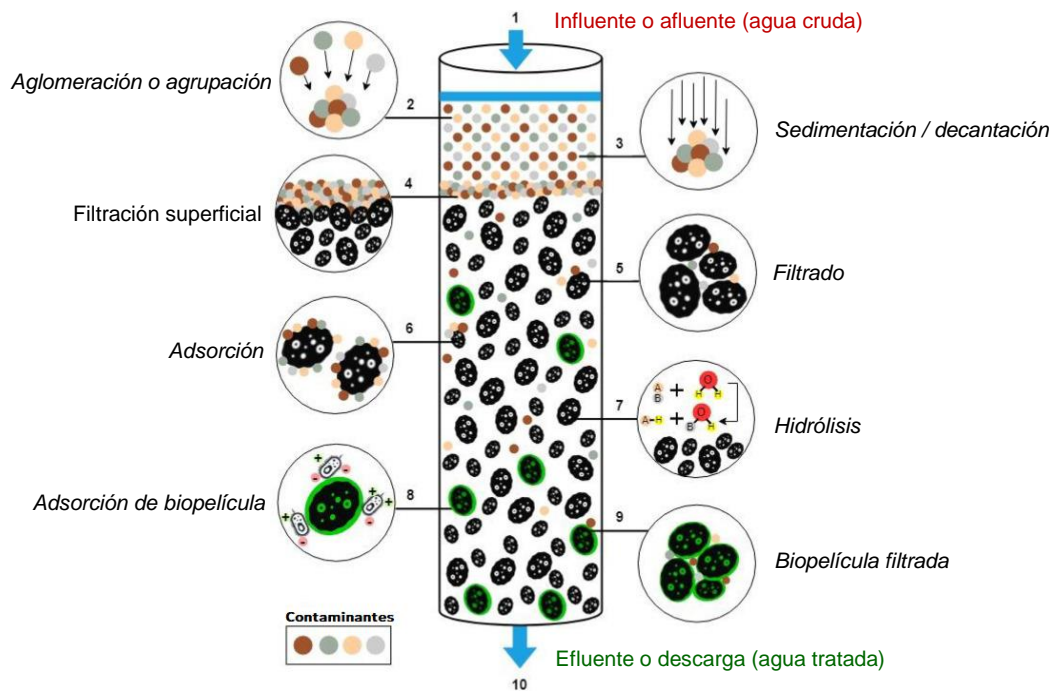
Un medio con partículas finas produce AGD de calidad, requiere limpieza frecuente y mantenimiento sencillo (Beverly, 2005). La permeabilidad del fino es D<sub>15</sub>, mientras que el agua que cubre toda la forma y tamaños de poros es 5D<sub>15</sub>. El medio se configura como 0.11D<sub>15</sub>, para actuar como tamiz y retener los contaminantes (Sherard et al., 1984). El mantenimiento no es complejo, se hacen cada 5 a 10 años con un bajo costo de operación (European Commission, 2003), de rendimiento satisfactorio (Filali et al., 2022; Soler et al., 2018), y debe ser desinfectado antes de su reutilización (Altamirano et al., 2020, p. 9). El filtro con arena es de flujo

descendente y es eficiente eliminando contaminantes a través de la retención física y oxidación. La antracita y el carbón activado tienen funciones similares. El carbón activado es muy eficaz en situaciones que requieren una rápida formación de biopelícula, así como en condiciones de temperaturas frías y condiciones de estrés (Droste, 1997). Este material altamente poroso y rico en carbono posee superficie reactiva que permite la interacción química con una lista grande de contaminantes inorgánicos, orgánicos y patógenos del AGD. El proceso de adsorción en superficie lo convierte en un agente eficaz para eliminar dichos contaminantes, proviene de procesos como la pirólisis de desechos sólidos municipales (Hu y Xu, 2020; Yaashikaa et al., 2020; Enaime et al., 2020; Tareq et al., 2019; Alam y Alessi, 2019). El material obtenido de pirólisis de alta temperatura posee mayor área de superficie y poros con volumen grande, ideal para sorción de contaminantes orgánicos, y los contaminantes inorgánicos se eliminan de forma más eficaz con el producido a baja temperatura. El carbón con medio poroso delgado, crea mayor tensión en los sitios de adsorción, aumentando su capacidad para retener y eliminar patógenos (Berger, 2012). La arena posee un área de 0,152 m<sup>2</sup>/g, el biocarbón 118-200 m<sup>2</sup>/g y el carbón activado 1 000 m<sup>2</sup>/g, la porosidad fluctúa en 42-74%, mayor a las partículas de arena (35%), excelente para retener agua como para el desarrollo de biopelículas (Dalahmeh et al., 2016; Quispe et al., 2022). El aserrín, un material orgánico que proporciona la fuente de carbono necesaria para el desarrollo de microorganismos (Deepa et al., 2019), cruciales para la velocidad de flujo del agua gris y filtración ideal de patógenos. La porosidad de los filtros aumenta de manera lineal con la cantidad de aserrín en la mezcla con arcilla, sin embargo, este aumento es no lineal conforme aumenta el peso y depende del tamaño de las partículas de aserrín (Zheng et al., 2023). Aunque el aserrín demuestra ser adecuado en la remoción de las concentraciones de DBO<sub>5</sub>, SDT, fosfato-fósforo y nitrato-nitrógeno, requiere de más estudios para su consistencia (Adonadaga et al., 2020). Los ladrillos de arcilla triturada, que contienen 2-5% de carbono poseen propiedades absorbentes y demuestran ser altamente efectivos en el tratamiento de AGD, logrando una eliminación del 64% de los SDT y una reducción significativa de la DBO<sub>5</sub> (Kadenge, 2019). El uso de finos de ladrillo conlleva una disminución de la concentración de sales, detergentes y minerales en el AGD tratada, y reduce los impactos negativos en el suelo y las plantas (Parjane y Sane, 2011). El bagazo de caña en la



biofiltración muestra resultados significativos en la eliminación de los SST (Ramírez et al., 2021, p.32). La incorporación de filtros de esponja, grava y la desinfección, reducen el rebrote bacteriano, reduciendo los coliformes totales de 1 log10 (Mandal et al., 2011). Además, se ha observado una mejora al acoplar lombrices rojas al sistema de biofiltros (Loro, 2018).

Figura 1. Enfoque de eliminación de contaminantes con sistema biofiltro



Fuente: Esquema adaptado de Quispe et al. / *Journal of Water Process Engineering* (2022), p. 12.

La miniaturización es esencial en las industrias, permiten elaborar componentes más pequeños sin perder rendimiento (Gilbert, 1961; Drexler, 1987). Esta tendencia está transformando las industrias con notables mejoras en la vida. En la depuración de aguas grises, la miniaturización se ha aplicado en sistemas compactos, como columnas verticales con capas filtrantes que eliminan contaminantes a medida que el AGD desciende verticalmente, siendo ideal para espacios limitados y reduce el consumo de agua potable en usos no potables (Friedler y Galil, 2010; Liu et al. 2011; Kokkinos et al., 2022). La NSF/ANSI 350 (2022) proporciona una certificación basada en requisitos de diseño, construcción, operación así como el rendimiento de los sistemas que tratan aguas grises in situ, compactos, con capacidad nominal de tratamiento de hasta 5 678 L/día (1 500 galones/día) en entornos domésticos, y

sin límites de capacidad para instalaciones comerciales (más de 5 678 L/día). Un ejemplo es la Greyter HOME™ que reduce el 25% de agua potable y trata 197 L/día con reducciones significativas de contaminantes químicos y microbiológicos, lo que lo hace ideal para el reúso de agua no potable (Greyter, 2023).

La base teórica de la variable dependiente relacionada con la reutilización del agua gris, se refiere a la reintegración de esta agua en aplicaciones específicas. Esto implica la transformación del agua utilizada en actividades domésticas para hacerla apta y segura para su uso en actividades que no requieren agua potable (Pupuche y Rivera, 2021) como la descarga de inodoros, generación de energía, recarga subterránea, lavado y riego (Hadad et al. 2022; Oron et al., 2014). La reutilización del AGD, constituye un recurso para el consumo de agua urbana, en reemplazo del agua potable, para fines que no requieren alta calidad, motivadas sustancialmente por i) la creciente escasez del agua y ii) cuidado de fuentes hídricas que reciben los efluentes. Los enfoques mixto o híbrido (por citar, la nanofiltración, ultrafiltración y demás medios filtrantes) logran permear el agua con alta calidad (Pearce, 2007), cumplen con la mayoría de las normativas sobre reúso (Filali et al., 2022) y aptas para riego (Quispe y Casimiro, 2019). El reúso planificado representa un beneficio socioeconómico (Marecos do Monte, 2010). Esto no solo reduce la necesidad de transportar agua potable a largas distancias, sino que también contribuye al ahorro de agua potable, estimado en un rango del 9 al 47% (Lalley et al., 2023; Meléndez y Lemos, 2019), aliviando la presión del suministro limitado de agua dulce en el mundo, del cual solo un 0.4% es bebible (Acciona, 2020). Iniciativas exitosas en el ámbito mundial respaldan esta idea. En 1994, Israel otorgó el primer permiso de reúso de aguas grises para centros deportivos públicos; Australia ofrece incentivos financieros, dando \$500 (Hadad et al., 2022). En Japón (Tokio), las edificaciones mayores a 30 mil m<sup>2</sup> o el consumo de agua de 100 m<sup>3</sup>, su reúso es obligatoria; EE. UU. y otros países, promueven prácticas de reúso residencial (Vuppaladadiyam et al., 2019). España (Barcelona y Cataluña) viene fomentando enmiendas legales para el reúso del AGD tratada en edificios residenciales (Domnech y Saurí, 2010), con énfasis en contaminantes emergentes (European Commission, 2015).

El AGD se reúsa irrigando parques y otras áreas verdes, conllevando el ahorro pues reduce el costo del consumo de agua potable, cuya aplicación no implica riesgo

para la vegetación ni el ambiente (Altamirano et al., 2020; Rodda et al., 2011). El parque Huáscar en Lima-Perú aprovecha esta práctica (FAO, 2017). No obstante, debe vigilarse la presencia de microorganismos patógenos, como bacterias, virus, protozoos y parásitos, que, en cantidades elevadas, pueden representar riesgos para la salud (Hadad et al., 2022). Para el regado en áreas verdes, conviene usar un tratamiento avanzado o híbrido (Boano et al., 2020). El contaminante en el sistema de riego puede perjudicar su funcionamiento al dañar el suelo, bloquear las vías de flujo del agua subterránea, salir a la superficie del suelo o cambiar las propiedades de humedad del suelo (Zhang et al., 2021; Fatta-Kassinos et al., 2011). Se debe realizar la desinfección mediante cloración, radiación ultravioleta (UV), u otros (Hernández-Leal et al., 2011). Una alternativa es la adopción de prácticas de riego por goteo subterráneo, que minimiza el contacto directo con las aguas grises y, en consecuencia, reduce el requerimiento de desinfección. El crecimiento de las plantas se desarrolla de manera normal cuando se les riega con AGD, sin que se detecten efectos negativos en su crecimiento. Además, el agua gris tratada suele contener niveles adecuados de nutrientes, que ayudan al desarrollo de las plantas. A la vez, su pH se reduce a niveles apropiados para las plantas que prefieren suelos ligeramente alcalinos (Parjane y Sane, 2011). En 2005, se concibieron seis (6) esquemas para el Manejo Inteligente del Agua (Wise Water Management - WWM) centrados en el reúso de agua gris en la India, implementados en 6 escuelas y extendidos a 300 para 2009 (Godfrey et al., 2010). En Lima, Perú, escuelas como San Christoferus (Chorrillos), Euroamericano (Pachacámac) y Gutemberg (El Agustino) se benefician de estos atributos (Andina, 2017; Hoffmann et al., 2011).

La doctrina complementaria que definen los indicadores se presenta a continuación. El tiempo de retención hidráulico (TRH) desempeña un papel fundamental en la eficiencia del tratamiento de aguas grises, y su influencia está vinculada al tipo de material filtrante utilizado y la pendiente del sistema (Galeano y Albornoz, 2019). La profundidad y la velocidad del flujo tienen un impacto significativo en la capacidad de sedimentación de partículas más pesadas, que además contribuye a disminuir la carga microbiana (Headley et al., 2013). En sistemas híbridos, las tasas de carga hidráulica (HLR) pueden alcanzar hasta 800 L/m<sup>2</sup>/día. Es importante destacar que el uso de HLR de hasta 500 L/m<sup>2</sup>/día no parece disminuir la eficiencia de

eliminación. Existe una correlación entre la tasa de carga orgánica (OLR) y HLR, y esta relación es inversa a la del TRH y HLR, lo que significa que tiempos de retención más largos se asocian con tasas de carga más bajas. La OLR guarda una relación con el HLR, expresada por la fórmula  $OLR = HLR * [DQO]$  del influente. La correlación entre HLR, TRH y OLR proporciona información valiosa para evaluar la eficiencia del tratamiento y permite considerar otros parámetros con el fin de optimizar el diseño hidráulico (Bonaio et al., 2020; Jokerst et al., 2011).

No existen valores estándar para contrastar los parámetros atribuibles a las aguas grises, ni criterios objetivos o cuantificables que definan sus propiedades para su clasificación (Gross et al., 2015). Los ensayos sintéticos son confiables en términos de reproducibilidad cuando se utilizan productos químicos de calidad técnica, como dosis con cantidades fijas de jabón de ropa, jabón de manos, champú, entre otros (Chrispim y Nolasco, 2017; Rodríguez-Chueca et al., 2014). Boano et al. (2020) analizó investigaciones de 28 países y determinó que no se pueden obtener datos comparativos sobre AGD. Esto se debe, en parte, a la falta de estándares definidos. Los parámetros fisicoquímicos no tienen una correlación exacta con su idoneidad en el reúso para riego. Las aguas provenientes de baños y lavadoras suelen tener bajos niveles de nitrógeno y fósforo, pero las de cocinas presentan concentraciones más altas (Filali et al., 2022). El agua de cocina contribuye significativamente al contenido de material orgánico, grasas, sólidos suspendidos y surfactantes en el total de aguas grises (Gross et al., 2015; Kariuki et al., 2012). El jabón, por su parte, representa casi el 90% de la masa de las AGD y contiene macro y micronutrientes biológicamente esenciales, como fósforo, nitrógeno y potasio (Fowdar et al., 2017). El AGD contiene una concentración significativa de microorganismos, con más de  $10^6$  bacterias/mL, que representan patógenos como no patógenos. Sin embargo, con frecuencia, no se determinan con precisión las cifras reales (Moeller, 2009, p. 28). Los coliformes fecales, que son bacterias termotolerantes capaces de resistir temperaturas elevadas durante el período de incubación, son indicadores comunes de la eficiencia del tratamiento de ARD (Baldeón, 2013), incluso para identificar la presencia de fecales en aguas limpias y alimentos (Paredes, 2014). Un ejemplo de coliforme fecal relevante es la *Escherichia Coli*, una bacteria patógena que puede causar enfermedades infecciosas en humanos. Estas bacterias son componentes

de los intestinos tanto en humanos como animales de sangre caliente; resultan resistentes a condiciones adversas, siendo capaces de sobrevivir a temperaturas entre menos de 7°C y más de 70°C (Diaper et al., 2001; Gutiérrez y Sánchez, 2017). Por otro lado, los helmintos son parásitos pluricelulares de forma alargada y simetría bilateral que pertenecen a cuatro troncos (Griffin et al., 2017; Campos et al.; 2018). Estos microorganismos pueden iniciar su ciclo de vida desde el interior del ser humano, causando graves infecciones y provocando alteraciones cognitivas, disentería y anemia (Menocal y Carballo, 2014).

Tabla 2. Concentraciones permitidas en el agua tratada en Perú

Parámetro	Unidad	D.S. N° 003-2010-MINAM	D.S. N° 004-2017-MINAM
		LMP (*) para efluente de ARD tratadas	Regado de área verde D1 - Categoría 3
Potencial de hidrógeno	pH	6.5-8.5	No exigible
Temperatura	°C	<35	No exigible
Aceites y grasas	mg/L	20	No exigible
DBO a 5 días	mg/L	100	No exigible
DQO	mg/L	200	No exigible
Sólidos suspendidos totales	mg/L	150	No exigible
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	10 000	1 000
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 mL	No exigible	1 000
Huevos de Helmintos	Huevo/L	No exigible	1

Notas:

- LMP (\*): Límite máximo permisible establecido para verter los residuos líquidos domésticos al entorno natural.
- Ambas normas solo comparten el parámetro 'Coliformes termotolerantes' para su vigilancia en el agua, aunque debe tenerse en cuenta que cada normativa tiene un enfoque de aplicación específico. Para ver contaminantes para otros tipos de riego, consulte la Tabla 19.

*Fuente: Adaptado de las normas para calidad del agua tratada del ámbito nacional*

La regulación aplicable al objeto de estudio, que vigila la calidad y límites de reúso de aguas grises, tiene múltiples fuentes (Eriksson et al., 2002), tales como las guías establecidas por Naciones Unidas mediante la OMS (WHO, 2006, Vol. 1, 2 y 4) y la Agencia Ambiental de EE. UU. (EPA, 2012). En Perú, la legislación desempeña un papel fundamental, siendo su norma legal de obligatorio cumplimiento y las normas técnicas pueden ser imperativas o voluntarias (INACAL, 2023). La Ley N° 28611 (art. 120.2) respalda la promoción de la reutilización del agua. El Reglamento de la Ley N° 29338 (arts. 147 y 150) instituye que debe ser previo tratamiento con valores reglamentados. El Decreto Legislativo N° 1280 (art. 26) fomenta la adopción de tecnologías apropiadas para el tratamiento, con valores establecidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM (D1: Regado de área verde de la Categoría 3). El D.S. N° 007-2017-VIVIENDA y la R.M. N° 176-2010-VIVIENDA, también respaldan el regado de áreas verdes con aguas tratadas. El Reglamento de Edificación (D.S. N° 011-2006-

VIVIENDA), a través de su NT OS.090 (2009), define el reúso y establece parámetros de diseño para el riego mediante flujo superficial, infiltración lenta y rápida (sección 5.6.1). La NT IS.010 (2012) establece la dotación de 50 L/hab. para alumnos no residentes, con 2 L/m<sup>2</sup>/d para riego de áreas verdes y los respectivos diseños (secciones 2.2 y 5). La NT A.080 (2006) sugiere una dotación de 5 L/m<sup>2</sup>/d para el riego de jardines (artículo 17). La Norma Técnica A.020 (2021) propone la reutilización voluntaria, entre otros usos (art. 29), en el regado de áreas verdes (Sistema Peruano de Información Jurídica, 2023).

En resumen, Perú tiene un marco legal sólido que respalda la reutilización de aguas grises en contextos educativos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el cumplimiento y la aplicación de estas regulaciones pueden variar, lo que puede influir en el uso sostenible de este recurso. Además, la nueva propuesta normativa del ente rector (R.M. N° 277-2022-VIVIENDA) para regar las áreas verdes urbanas propone su esfuerzo en el monitoreo de tres parámetros: *Escherichia Coli*, huevos de helminto y sólidos suspendidos (Diario oficial El Peruano, 2023).

La humedad del suelo es crucial para la gestión del riego de áreas verdes, ya que permite comprender en cuánto tiempo se agotará, considerando el factor ambiental como la temperatura, la evapotranspiración y la radiación solar (Gardner, 1986; Porta et al., 2003; Cantón et al., 2004; Fernández et al., 2005; Navarro y Navarro, 2013). Los tensoactivos presentes en el agua gris tratada, pueden aumentar en el suelo la retención de humedad (Murcia et al., 2013). Por último, la sostenibilidad aborda el desarrollo con soluciones multilaterales, sin menoscabar el futuro humano (Brundtland, 1987). La evolución tecnológica es una oportunidad para soluciones innovadoras (Mihelcic y Zimmerman, 2012), implicando perspectivas económicas que fomenten la protección del entorno y el bienestar social (Vesilind et al., 2013), sin exceder su capacidad de carga (Marley y Gaffney, 2020), promoviendo el desarrollo equitativo, aliviando la pobreza y preservando la salud ecológica (Enger y Smith, 2016). El reúso del agua gris escolar se alinea como estrategia para afrontar el cambio climático (Escobar et al., 2016), con responsabilidad financiera (Marecos, 2010). La tecnología es fundamental para tener aguas de mejor calidad y aportar confiabilidad a este proceso (Granados, 2018).

### III. METODOLOGÍA

La metodología de la investigación científica proporciona un plan detallado que describe cómo se llevará a cabo el estudio, incluyendo procedimientos específicos sobre cómo se ejecutará el estudio, qué pasos se seguirán y cómo se obtendrán y analizarán los datos, asegurando la rigurosidad y replicabilidad de la investigación (Roumate, 2023; Vivar et al., 2013). Este plan garantiza la respuesta al problema planteado, la focalización en la interrogante de investigación y lograr los objetivos propuestos (Ñaupas et al., 2018). La clave radica en identificar la solución más adecuada para cada situación (Goh, 2023). En este contexto, nuestro estudio estableció como objetivo determinar cuál de los 2 sistemas era más eficiente para convertir esas aguas grises en recursos potenciales para regar áreas verdes, considerando factores importantes, como el agua cruda y el cumplimiento normativo. Para ello, se diseñaron y pusieron en marcha 2 biofiltros en columnas verticales, alimentado con agua gris cruda de la escuela elegida. Posteriormente, se evaluó la mejora del agua tratada en términos de parámetros físicos, parámetros químicos y parámetros biológicos, y se examinó que las concentraciones finales estén dentro del rango normativo para su reúso en áreas verdes escolares.

La investigación cuantitativa es un método estructurado que se enfoca en medir y cuantificar variables con el propósito de poner a prueba hipótesis y tener resultados objetivos. Su objetivo principal es lograr la máxima objetividad y generalización a través de la medición y cuantificación de variables (Creswell y Creswell, 2022); sigue una secuencia organizada que inicia con la identificación de un problema en un contexto específico, seguido por la formulación del objetivo y pregunta de investigación. Se elabora la base teórica sustentada en la literatura examinada para respaldar el estudio. A partir de las preguntas, se derivan hipótesis y se definen variables, formulándose el diseño que actúa como guía. Los datos se recopilan en forma numérica y analizados estadísticamente para obtener relaciones, patrones y tendencias. La investigación cuantitativa busca un alto grado de control para eliminar explicaciones alternativas y minimizar errores. Finalmente, los resultados se interpretan en relación con las hipótesis y la teoría previa, lo que conduce a una discusión y explicación de cómo los hallazgos contribuyen al conocimiento existente (Thomas, 2021; Muñoz, 2015, p. 24). Este estudio cumplió con el enfoque

cuantitativo según el método de estudio de las variables. Se identificó el problema, se formularon preguntas de investigación y se establecieron hipótesis específicas. Las variables se definieron claramente, y se recopiló datos numéricos mediante ensayos en laboratorio. La investigación se diseñó de modo que se controló la variable alternativa y dependiente -así como las intervinientes-. El estudio contribuye al conocimiento en el contexto específico abordado.

El propósito del estudio explicativo (por la naturaleza de su objetivo) radica en identificar y esclarecer porque ocurre el evento, problema o fenómeno investigado. Su objetivo principal es identificar y comprender los factores subyacentes a un fenómeno o evento particular. Estos estudios desempeñan una función crucial al proporcionar una explicación detallada y fundamentada sobre por qué ocurren ciertos sucesos, problemas o fenómenos en el mundo (Zou y Xu, 2023; Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018, p. 109). En ese contexto, el estudio buscó comprender y explicar la eficiencia de los sistemas removiendo contaminantes del agua gris, cumpliendo la normativa de reúso en áreas verdes en escuelas públicas. Mediante el funcionamiento y análisis de los dos sistemas miniaturizados, se identificaron las causas y factores subyacentes que determinaron el agua gris obtenida con calidad y su potencial uso para el riego, lo que se alineó perfectamente con el alcance explicativo, estableciendo las causas del fenómeno específico (mejora del agua gris cruda para su uso en el riego de jardines escolares).

### **3.1. Tipo y diseño de investigación**

#### **Tipo de investigación**

De acuerdo con el Manual de Frascati (OCDE, 2018), la investigación aplicada se centra en objetivos prácticos específicos, involucrando investigaciones originales que generan nuevo conocimiento. Dicha investigación para el CONCYTEC (2018), aplica fundamentos teóricos para solucionar problemas reales. Deb, Dey y Balas (2019) la definen como la generación de nueva tecnología a partir de conocimientos previos. Por último, Lozada (2014) la describe como un enfoque que transforma el conocimiento básico en productos y soluciones específicas para abordar problemas sociales o productivos a mediano plazo. Esta investigación es claramente aplicada (por su grado de abstracción), ya que se centró en un objetivo práctico: evaluó cuál



de los 2 sistemas para tratar aguas grises en escuelas públicas genera aguas aptas para usar en áreas verdes, comparándolo con la normativa nacional para verificar su eficacia. A través de investigaciones originales, generó nuevo conocimiento en el campo del tratamiento del agua gris y aplicó fundamentos teóricos relacionados para resolver un problema real de calidad del agua. El objetivo final fue transformar el conocimiento básico en productos y soluciones prácticas, en este caso, los dos sistemas miniaturizados con sus medios filtrantes y demostrar si son eficientes y estar dentro de los estándares mínimos de agua tratada exigida en normativa. En resumen, la investigación abordó un problema real, con un claro propósito práctico y contribuyó a la generación de nuevos enfoques que podrán tener un impacto positivo en la gestión del agua y proporcionar soluciones beneficiosas en entornos escolares y más amplios.

### **Diseño de investigación**

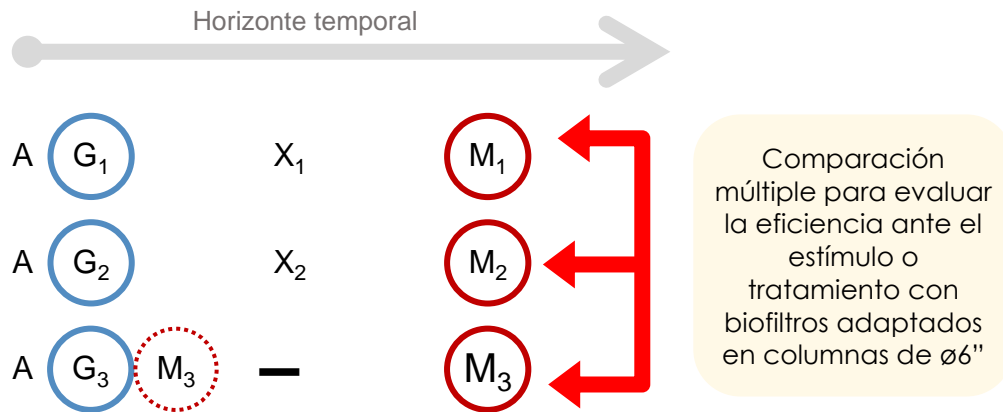
Es la estrategia para adquirir la información esencial con miras a abordar de manera efectiva el problema y proporcionar una respuesta satisfactoria (Mukherjee, 2021; Leavy, 2017). El diseño debe ser flexible para adaptarse a posibles contingencias o cambios (Creswell y Creswell, 2022). Se necesitan argumentos sólidos que respalden la hipótesis subyacente mediante experimentos (Supo, 2015, p.30). Para ser un estudio experimental, deben cumplir 3 condiciones esenciales: trabajar con grupos de control y experimental, igualdad de grupos con características y condiciones iniciales y, la formación de grupos realizada por el propio investigador (Bairagi y Munot, 2019; Privitera, 2017). En el experimento se requiere establecer relaciones de causalidad entre variables y debe cumplirse con 3 requisitos claves. (i) Manipular deliberadamente la variable independiente, en un entorno controlado, que al cambiar o asignarles diferentes valores propician efecto en las variables dependientes, que representan los resultados de interés. (ii) Debe medirse las variables dependientes de manera precisa, asegurando su validez y confiabilidad para reflejar con exactitud el cambio. (iii) La validez interna es fundamental para asegurar que los cambios en las variables dependientes se deben principalmente a la manipulación de las variables independientes y no a factores externos (Bairagi y Munot, 2019, p. 33; Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018, p. 151-161; Monje, 2011, p. 105). El experimento puro (control), trabaja con una o varias variables

independientes y dependientes. Suelen medirse antes del tratamiento experimental (prepruebas) y posteriores al mismo (pospruebas) para verificar el cambio en los grupos antes y después de la intervención, asegurar la interacción entre variables independientes y dependientes, lo que los convierte en estudios explicativos que identifican correlaciones (Ramos, 2021). Son cuantitativos y se basan en hipótesis predefinidas, se adhiere al diseño previamente concebido, que pone énfasis en aspectos como la validez, la precisión y el control del entorno de investigación. El análisis estadístico cumple un rol clave al validar relaciones. Los “diseños con posprueba y grupo de control” se crea un grupo sometido al tratamiento experimental y otro grupo sin tratamiento. La asignación aleatoria de sujetos a estos grupos garantiza la validez interna. La posprueba se administra simultáneamente a ambos grupos, y las diferencias se comparan para indicar si el tratamiento experimental ha tenido un efecto significativo. Cuando se encuentran diferencias significativas, se acepta la hipótesis de que existen diferencias entre los grupos, caso contrario, la hipótesis nula es aceptada. Este diseño puede expandirse para incluir más de dos grupos y evaluar varias formas del tratamiento experimental, son especialmente útil para examinar efectos rápidos. La validez externa, es un atributo deseable en cualquier diseño experimental que implica la capacidad para extender los hallazgos del experimento a contextos no sometidos a la experimentación (Thomas, 2021; Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018).

El estudio tiene un diseño experimental que sigue el método de contrastación de hipótesis de causa y efecto, dado que cumple con la condición esencial de trabajar con al menos dos grupos: los 2 sistemas para mejorar las aguas grises (grupo experimental) y el agua gris cruda (grupo de control). Esto se alinea con la necesidad de comparar diferentes condiciones en un diseño experimental. Además, el estudio buscó mejorar el agua gris en términos de parámetros físicos, parámetros químicos y parámetros biológicos, lo que corresponde a la importancia de medir las variables dependientes en un diseño experimental. La validación de la eficiencia de remoción de contaminantes ocurre comparando con la norma de calidad con fines de riego, constituyéndose como la validez interna. Esto asegura que si se manipula a los sistemas causaría impacto en la calidad del agua gris. En conjunto, el estudio se ajustó al marco de un diseño experimental usando grupos de control y

experimentales, medir variables dependientes relevantes y buscar la validez interna al comparar la eficiencia de los sistemas al eliminar contaminantes del agua gris.

Figura 2. Representación del diseño experimental con posprueba



Donde:

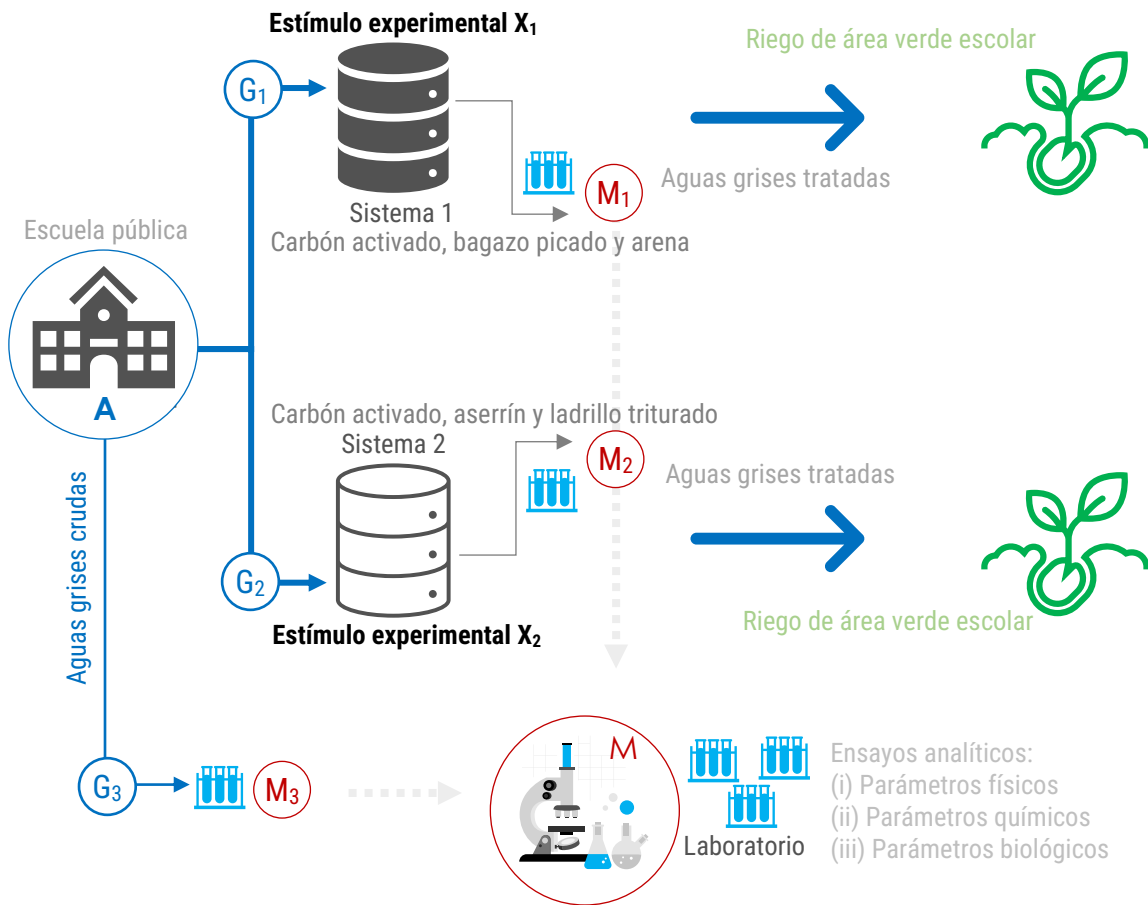
- A: Es la asignación aleatoria de las aguas grises crudas domésticas a cualquier grupo.
- G<sub>1</sub> y G<sub>2</sub>: Son los grupos experimentales sometidos a tratamiento o estímulo experimental.
- G<sub>3</sub>: Grupo de control, testigo, no recibe estímulo experimental (es la propia agua gris cruda).
- X<sub>1</sub> y X<sub>2</sub>: Representan las variables independientes o tratamientos experimentales (prueba del sistema 1 y 2, con biofiltros mediante columnas verticales), que se aplican a los grupos G<sub>1</sub> y G<sub>2</sub>.
- : Sin estímulo ni tratamiento, su valor en la variable independiente es cero.
- M<sub>1</sub> y M<sub>2</sub>: Son las mediciones hechas en los grupos G<sub>1</sub> y G<sub>2</sub> después de recibir el tratamiento experimental. Se usan para evaluar el impacto del tratamiento en la variable de interés.
- ↔ : Las mediciones M<sub>1</sub> y M<sub>2</sub> se toman al mismo tiempo y están alineadas verticalmente, mientras que M<sub>3</sub> corresponde a una secuencia de medición tomada en una secuencia horizontal temporal.

Fuente: Adaptado del diseño propuesto por Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018 (p. 165).

Las figuras 2 y 3 (página 27), ilustran cada etapa del diseño experimental. A continuación, se profundiza la explicación de los símbolos utilizados. Respecto a las aguas grises y asignación aleatoria, representado por "A" denota la asignación aleatoria de aguas grises crudas domésticas recogidas en el local escolar público, el cual garantiza una distribución imparcial de las aguas grises crudas entre los sistemas propuestos, eliminando cualquier sesgo en la asignación. Los símbolos "G<sub>1</sub>" y "G<sub>2</sub>" son usados para denotar los dos grupos experimentales que reciben el estímulo experimental. En el diseño experimental de posprueba única, estos grupos corresponden a los 2 sistemas miniaturizadas para tratar las aguas grises: "G<sub>1</sub>" representa el sistema 1 y "G<sub>2</sub>" el sistema 2. El símbolo "G<sub>3</sub>" es el grupo testigo o de

control el cual está libre del estímulo experimental. En lugar de estar sometido a un sistema de tratamiento, este grupo refleja las aguas grises en su estado crudo, tal como se recogen en el local de la escuela pública. Además, se puede afirmar que el agua cruda actúa como un grupo de control implícito, ya que representa las condiciones iniciales sin tratamiento. El grupo de control es la línea base para comparar los efectos de los sistemas de tratamiento en el diseño de posprueba. Al enviar la misma agua cruda a los 2 sistemas de tratamiento, efectivamente se controla la variable de entrada y elimina cualquier diferencia en la calidad del agua inicial como fuente de sesgo. Los símbolos " $X_1$ " y " $X_2$ " representan los dos sistemas de tratamiento de aguas grises. " $X_1$ " corresponde al sistema 1, que incluye "carbón activado, bagazo de caña picado y arena", mientras que " $X_2$ " corresponde al sistema 2, que utiliza "carbón activado, aserrín de madera y ladrillo triturado de restos de construcción". Estos sistemas son la variable independiente que se manipula en el diseño experimental de posprueba única. El símbolo "—" representa la ausencia de estímulo, es decir, el grupo de control que no está sujeto a ninguno de los sistemas de tratamiento en un diseño de posprueba exclusiva. Su función principal es servir como punto de comparación con los grupos experimentales y evaluar si los sistemas de tratamiento tienen un impacto significativo. Los símbolos " $M_1$ " y " $M_2$ " representan las mediciones realizadas en los grupos después del tratamiento en el diseño experimental de posprueba. " $M_1$ " y " $M_2$ " son mediciones tomadas simultáneamente, mientras que " $M_3$ " es una medición que se realiza en un momento anterior. Estas mediciones son empleadas para evaluar el efecto que genera el sistema de tratamiento sobre el agua gris tratada en el diseño de posprueba exclusiva, así, la variable dependiente está representada por las mediciones " $M_1$ " y " $M_2$ ". En este contexto, el símbolo "M" se refiere a las mediciones hechas en el laboratorio, basada en ensayos de las muestras de agua recolectadas por cada grupo con relación a los parámetros físicos, parámetros químicos y parámetros biológicos, esencial para evaluar si los 2 sistemas de tratamiento son adecuados y cumplen con los estándares necesarios para su posterior implementación en áreas verdes escolares. Estos resultados determinan cuál de los 2 sistemas es más apto para su implementación en un entorno real de reúso de agua grises en áreas verdes.

Figura 3. Diagrama esquemático de los sistemas de tratamiento



Fuente: Preparado por el investigador.

La investigación científica puede llevarse a cabo en diversos ambientes, sea en un laboratorio o en un entorno de campo. Como lo señaló Mejía (2005), existe un debate en la comunidad científica sobre las ventajas y limitaciones de realizar investigaciones en entornos de laboratorio y de campo (p.38). En el laboratorio, se pueden lograr un control riguroso sobre las variables intervinientes, lo que es esencial para probar hipótesis de manera precisa y explorar relaciones causales. Sin embargo, se le ha acusado de ser 'artificial' y estar alejado de la realidad. En contraste, la investigación de campo implica observar fenómenos en su entorno natural, lo que a menudo se considera una aproximación más auténtica a la realidad (Zou y Xu, 2023). En esta investigación, se optó por llevar a cabo un experimento de campo en el cual se recogen porciones de aguas grises crudas de una escuela y llevados al laboratorio doméstico, sin recrearlo ni ensayos sintéticos. Allí, se construyó y operó los dos sistemas miniaturizadas de tratamiento mediante

columnas verticales configurado en tricapa con materiales filtrante para tratar las aguas grises. Este experimento se realizó en un entorno controlado en casa, con aguas grises crudas reales. La elección de este enfoque se basa en la búsqueda de resultados más replicables y generalizables a situaciones cotidianos, como el riego de áreas verdes en varios entornos.

### **3.2. Variables y operacionalización**

Las variables son las propiedades, cualidades o atributos que se estudian y que pueden adquirir distintos valores. Las variables se derivan del objetivo y la hipótesis planteada, por lo que es fundamental definir las con precisión. Además, resulta crucial llevar un registro detallado de su comportamiento a lo largo del estudio (Mukherjee, 2021; Martínez, 2012, p. 112). En este contexto, se plantean dos tipos de variables esenciales: la variable independiente, que se manipula con el propósito de explicar un fenómeno, y la variable dependiente, que experimenta cambios en función de la variable independiente (Valderrama, 2019). En esencia, una variable representa una característica o propiedad que puede variar en relación con el objeto de estudio (Borja, 2016, p. 15). Operacionalizar las variables en un experimento implica desglosar una variable de manera más precisa en una o varias dimensiones, y estos se explican mediante indicadores y, estos a su vez se traducen en ítems o preguntas específicas en el diseño de la investigación (Rivas, 2017, p. 155 y 203). Según lo descrito, las variables del estudio son:

**Variable independiente (X):** Sistemas de tratamiento de aguas grises

Definición conceptual: Son tecnologías o métodos configurados para mejorar las aguas grises, eliminando impurezas, contaminantes y microorganismos, mediante procesos como filtración, purificación, desinfección, entre otros (Visbal y Roza, 2018; Galeano y Albornoz, 2019). La elección del sistema de tratamiento es primordial, incide linealmente sobre el agua gris tratada y, por ende, en su idoneidad para su reutilización en aplicaciones no potables (Boano et al., 2020). Cuando se aumenta el nivel de tratamiento, se mejora la calidad del efluente, pero esto también se traduce en costos más elevados (Díaz et al., 2021).

Definición operacional: Comprende dos sistemas miniaturizadas, tipo columna

vertical: Sistema 1 (carbón activado, bagazo de caña picado y arena) y Sistema 2 (carbón activado, aserrín de madera y ladrillo triturado de restos de construcción).

Dimensiones: Son los medios filtrantes configurados mediante capas, dotados en su base con lecho de confitillo ( $\frac{1}{4} - \frac{3}{4}$ " ) para evitar la saturación (piedra chancada). El Sistema 1 conformada con carbón activado de 0.2-5 mm, fibras de bagazo provenientes de la caña azúcar de 2-5 mm y arena de sílice de 0.1-0.5 mm. El Sistema 2 contiene carbón activado de 0.2-5 mm, aserrín de madera de pino de 1-3 mm y ladrillo triturado (granulado) de restos de construcción de 0.5-1 mm. También, comprende la eficiencia de los sistemas miniaturizadas.

Indicadores: Se evalúa respecto a los medios filtrantes (los sistemas de tratamiento utilizan diferentes tipos de materiales filtrantes, como carbón activado, bagazo de caña, aserrín de madera, arena y gránulos de ladrillo); calidad del agua cruda y tratada (entendida en función del % de remoción); tasa de carga hidráulica (mide que tan rápido fluye el agua a través del sistema de tratamiento); la retención hidráulica (entendida como el tiempo que transcurre para pasar el agua grises por la columna vertical del sistema) y; el grado de cumplimiento de parámetros biológicos, especialmente en relación con la D1-categoría 3, del D.S. N° 004-2017-MINAM referida al reúso en el regado de las áreas verdes.

Escala de medición: De razón.

**Variable dependiente (Y):** Reúso del agua gris tratada

Definición conceptual: El agua gris tratada permite reutilizarlas, entre otros, irrigando las áreas verdes (Anaya et al., 2022), aumentando 3 veces las áreas verdes en la ciudad (Moscoso, 2011), cumpliendo con normativas de reutilización (Filali et al., 2022) según al propósito de aplicación (Díaz et al., 2021), que además varían según la ubicación o jurisdicciones regionales (EPA, 2012; WHO, 2016). El reúso es motivado por la carencia de agua dulce, promueve la sostenibilidad y adaptación con el cambio climático (Leiva et al., 2020).

Definición operacional: Se evalúa su potencial reutilización del agua gris tratada para el regado sostenible de las áreas verdes de las escuelas públicas.

Dimensiones: Comprende parámetros tipo físicos, químicos y biológicos.

Indicadores: Incluyen la temperatura (nivel de calor o frío del agua), sólidos totales (abarca todos los sólidos en el agua, incluyen los disueltos y en suspensión); sólidos suspendidos totales (partículas visibles no disueltas y pueden incluir sedimentos, partículas orgánicas y materia particulada en general); pH (nivel de acidez o alcalinidad del agua), DBO a 5 días (entendida como oxígeno necesario para descomponer los materiales orgánicos), DQO (referida al oxígeno requerida para oxidar los componentes químicos del agua), coliformes termotolerantes (indicador de contaminación fecal), huevos de helmintos (señal de posible contaminación parasitaria) y *Escherichia Coli* (bacteria fecal).

Escala de medición: De razón.

### **3.3. Población, muestra y muestreo**

#### **Población**

Wigodski (2017) define la población como el conjunto completo de individuos, materiales o elementos con características específicas, estudiados en un lugar y momento particulares. Dubey y Kothari (2022), enfocan en el proceso de selección de individuos o elementos específicos para su inclusión en la investigación, lo que implica que la población no solo se define por sus características comunes, sino también por quiénes son elegidos para participar en el estudio. Ñaupas et al. (2018) acota que el investigador debe determinar la población y su tamaño, diferenciando la población objetivo versus la población operativo o la accesible.

En esta investigación, la población objetivo se refiere a todas las escuelas públicas que generan aguas grises y cuentan con áreas verdes susceptibles de beneficiarse del riego con aguas grises, por ende, se compone de escuelas públicas en Lima, 2023, que están interesadas en explorar el potencial de reutilizar irrigando las áreas verdes, y no disponen de sistemas de mejoramiento de aguas grises domésticas; por ende, abarca el conjunto de escuelas de Lima metropolitana. Sin embargo, es fundamental definir con precisión la población operativa a la que se podrá acceder para llevar a cabo el estudio.



Comas - Lima, tiene una población que supera el medio millón de personas, ocupa el cuarto lugar de distrito más poblado con 534 mil habitantes (INEI, 2023), y potencial de seguir expandiéndose horizontal y verticalmente, allí se encuentra el área de interés de este estudio, conocida como "Urbanización La Libertad". En cuanto a la gestión de los servicios educativos, el área estadística del MINEDU (Ministerio de Educación), clasifica en dos categorías: a cargo del sector educación (escuelas públicas) y escuelas particulares. En la "Urbanización La Libertad", en el año 2023, se ubican 41 escuelas, de estas, el 27% son escuelas públicas a cargo del sector educación. Las escuelas públicas con características resaltantes como el tamaño de la institución, la infraestructura disponible, número de alumnos y niveles de estudio, destacan las escuelas Carlos Wiese, Esther Festini, República de Canadá, La Libertad y San Judas Tadeo (ESCALE, 2022).

No obstante, existen criterios que son reglas o condiciones predefinidas que se utilizan para determinar qué individuos o elementos deben incluirse en la muestra de estudio y cuáles deben excluirse. Los criterios de inclusión se basan en características específicas que deben poseer los miembros de la población para ser considerados en la muestra. Por otro lado, los criterios de exclusión se utilizan para eliminar elementos que no son relevantes para la investigación o que pueden introducir sesgo (Campbell y Stanley, 1963; Rosenthal y Ralph, 2008).

Para definir la población accesible en la zona de interés, se han establecido los dos criterios citados. Los criterios de inclusión son: Escuelas públicas que cuenten con áreas verdes implementadas; Escuelas públicas con variaciones en la composición de las aguas grises debido a su origen, limitadas a lavaderos corredizos de servicios higiénicos, fuentes de bebederos, baños y vestuarios deportivos y; Escuelas públicas de enseñanza inicial y primaria. Los criterios de exclusión son: Escuelas públicas y privadas sin áreas verdes; Escuelas que dispongan de áreas de cocina con comedores escolares; Escuelas con residencia estudiantil o internado y; Escuelas que generen aguas residuales industriales, como laboratorios de ciencias o áreas de arte con residuos químicos tóxicos y/o las escuelas con enseñanza de nivel secundario (Madueño et al., 2017, p.82). Además, la gestión de aguas grises en entornos escolares se está volviendo cada vez más relevante debido a la creciente comprensión de la importancia de conservar y reutilizar el

agua (Gleick, 1996; Zetland, 2014; Gleick et al., 2018). Ahora se profundiza.

Para elegir de manera aleatoria la escuela más representativa en la zona de interés, se siguió el siguiente proceso organizativo: evaluación de la existencia de espacios con áreas verdes implementadas, la limpieza de menajes y loncheras, y opcionalmente la presencia de comedores escolares. También se consideraron las variaciones en la composición de las aguas grises según su origen. Es crucial señalar que las aguas provenientes de cocinas suelen tener una elevada carga contaminante, y la literatura las clasifica comúnmente como desagües o aguas negras. Se excluyeron las escuelas con residentado, ya que generan una cantidad significativa de aguas grises debido a la concentración de estudiantes que viven en el lugar y utilizan instalaciones compartidas. En las etapas de educación inicial y primaria, suelen incorporar de manera efectiva experimentos sencillos y actividades prácticas como parte integral del proceso de aprendizaje. Estos experimentos, diseñados para fomentar la curiosidad y la exploración, suelen ser de naturaleza básica. No obstante, en la educación secundaria, especialmente en cursos de ciencias como química, biología y física, es común realizar experimentos más elaborados en laboratorios. Estos experimentos buscan profundizar la comprensión de conceptos científicos y desarrollar habilidades de investigación. Es importante mencionar que las aguas residuales que puedan surgir de estos laboratorios, con remanentes de productos químicos utilizados, se clasifican como aguas residuales industriales (Metcalf y Eddy, 2014; EPA, 2012), quedando fuera del alcance de la presente investigación. Además, se destaca la importancia de la gestión eficiente del espacio y la presencia de la pendiente del terreno para la futura implementación de prácticas de uso del agua. Esto garantizará una mejor configuración espacial para la instalación de sistemas de tratamiento miniaturizadas mediante filtros en columnas verticales, permitiendo la potencial reutilización del agua aprovechando la pendiente del terreno y eliminar o reducir costos energéticos.

Es importante destacar que los productos utilizados en actividades artísticas pueden variar ampliamente en términos de su composición química. Algunos productos utilizados en arte, como las pinturas al óleo y acrílicas, pueden contener sustancias químicas que son potencialmente contaminantes y que requieren una gestión adecuada para minimizar su impacto ambiental. Es esencial considerar que

algunas escuelas de nivel inicial y primaria pueden estar realizando actividades artísticas que involucran el uso de lavaderos y la disposición de residuos de pintura, lo que podría potencialmente impactar el agua gris con sustancias tóxicas de naturaleza similar a las aguas residuales industriales. Por lo tanto, será fundamental tener en cuenta, apuntar este aspecto al tomar las muestras y al recopilar los datos. Esto es crucial para una discusión precisa en el contexto de la investigación.

En consecuencia, para esta investigación, la población para el estudio claramente se demarcó a la Escuela San Judas Tadeo (Institución Educativa N° 3068) cuya coordenada geográfica es 11°57'27"S 77°03'00"W y altitud 114 m.s.n.m.; la escuela cumple con los criterios de inclusión al contar con áreas verdes y ofrecer niveles de enseñanza inicial y primaria. Además, en su espacio físico reducido y límites externos, cuentan con áreas verdes. En ese extremo, la "población" será la totalidad del agua gris procedentes de las áreas de los lavaderos corredizos de los servicios higiénicos, fuentes de bebederos, baños y vestuarios deportivos de dicha escuela. Esta delimitación es esencial para asegurar la certeza y confiabilidad de nuestros resultados y ofrece una oportunidad valiosa para el análisis detallado y profundo, al mismo tiempo, todos los elementos de interés están contenidos en esta población.

## **Muestra**

Según López (2016), una muestra se define como un conjunto seleccionado de elementos de un conjunto más amplio, donde se realizará la investigación. La selección de la muestra es un proceso crucial que debe realizarse con objetividad y precisión, como recomiendan Hernández-Sampieri y Mendoza (2018). En el contexto de un experimento, la muestra se refiere simplemente a un conjunto de unidades de análisis. A menudo, se trabaja con varias muestras, pero también existen diseños experimentales en los que se realiza el estudio sobre la misma muestra. Incluso es posible llevar a cabo investigaciones en las que se analiza un único caso o unidad de análisis, como menciona Ynoub (2011, p. 94-95).

Anteriormente, se estableció como población a todas las aguas grises procedentes de lavaderos corredizos de los servicios higiénicos, fuentes de bebederos, baños y vestuarios deportivos de la escuela San Judas Tadeo. En este estudio, la "muestra" es una cantidad específica de agua que se recoge y se analiza en cada uno de los

grupos analizados (grupo experimental: Sistema 1 y Sistema 2 y, grupo de control: agua cruda), asegurando su representatividad. Cada muestra de agua corresponde a un punto específico, el punto de entrada de agua cruda, la salida del Sistema 1 y la salida del Sistema 2. En consecuencia, las muestras son porciones de agua que representan las condiciones y características del agua en diferentes etapas del proceso de tratamiento. Estas muestras se recopilan y analizan para cuantificar en parámetros físicos, parámetros químicos y parámetros biológicos, con la finalidad de conocer la eficiencia de eliminación de sustancias contaminantes en el agua gris. A pesar de estar estudiando una sola escuela, se sostiene que tanto el resultado como la conclusión, arribados de este estudio pueden ser aplicables a otras escuelas públicas que cumplan condiciones similares.

La toma de muestras se refiere a la estrategia para seleccionar las muestras individuales, mientras que el tamaño de la muestra determina el número de muestra a recopilar. En el estudio, la 'toma de muestras' implica la recolección deliberada de especímenes de aguas grises crudas en distintos lugares, especialmente en un entorno crítico que simula diversos momentos de la escuela, representando la variabilidad de dichas aguas. El 'tamaño de la muestra' es el número de muestras de aguas grises crudas que se toman en un solo momento para medir 9 parámetros de calidad del agua. Este proceso se repite para los dos sistemas evaluados. En resumen, las muestras de agua cruda de la escuela pública conforman el grupo de control, mientras que las muestras a la salida del sistema 1 y 2 del laboratorio de campo constituyen los grupos experimentales que representan el agua gris tratada.

## **Muestreo**

En el muestreo no probabilístico por conveniencia, como menciona Ñaupas et al. (2018), el investigador selecciona deliberadamente unidades muestrales en función de características específicas en lugar de utilizar un muestreo aleatorio (p.342). Esta elección se justifica cuando la falta de aleatoriedad no afecta la calidad de los hallazgos, como menciona Rivas (2017, p.183). En estos casos, el muestreo no probabilístico adquiere un valor significativo, ya que permite la selección controlada de casos con características específicas. Dubey y Kothari (2022), junto con Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), destacan que esto posibilita un estudio

detallado de las variables de interés en esas unidades de análisis (p.215).

La elección de la escuela San Judas Tadeo como institución de estudio se basa en una cuidadosa consideración de los criterios de inclusión. Estos criterios se han establecido teniendo en cuenta 'limitaciones prácticas y logísticas'. Se optó por utilizar un muestreo no probabilístico por conveniencia, basándose en la selección de participantes según criterios predefinidos considerados pertinentes para la investigación. Las porciones de aguas grises se recolectan de todos los puntos de muestreo asegurando su representatividad y según protocolos de recojo de agua. Este enfoque es relevante en situaciones donde el investigador posee un conocimiento detallado de la población y necesita garantizar que la muestra se ajuste a criterios específicos.

### **Unidad de análisis**

Se refiere a las propiedades o características de personas, objetos, fenómenos o hechos que se estudian a través de instrumentos de medición. El investigador delimita esta unidad para su estudio. Mientras que las unidades de análisis tienen un enfoque abstracto, la unidad de observación es observable (Ñaupas et al., 2018, p.326). Es la unidad principal en la investigación (Bernal, 2016).

La unidad de análisis son los sistemas miniaturizadas de aguas grises (Sistema 1 y Sistema 2) en función de las muestras de agua gris cruda recogidas en distintos puntos de la escuela (grupo de control) y las características del agua gris tratada (grupo experimental). En otras palabras, la unidad de análisis es el agua gris medida en función de la eliminación de sustancias contaminantes a fin de hacerlas aptas para regar las áreas verdes escolares, provenientes de cada uno de los sistemas miniaturizadas y comparada con la normativa para dicho propósito.

### **3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

La técnica de recolección de datos es la noción general que ayudan a abordar nuestras preguntas de investigación y a interactuar con los sujetos de estudio de una manera efectiva. Pueden incluir la elección de instrumentos específicos, experimentos controlados, observaciones sistemáticas, análisis de contenido, revisión de documentos y otros métodos que nos permiten recopilar datos

numéricos. El objetivo de la técnica seleccionada es minimizar sesgos, estandarizar protocolos y maximizar la validez y confiabilidad de los datos. Esto permite una evaluación precisa de las relaciones causa-efecto y la generalización de resultados en investigaciones cuantitativas (Creswell y Creswell, 2022; Martínez, 2019).

El instrumento de recolección de datos, es la herramienta o medio específico para llevar a cabo experimentos de campo en entornos similares a un "laboratorio doméstico", empleados para implementar las técnicas y recopilar información. Los instrumentos varían ampliamente, abarcan desde cuestionarios estructurados y escalas de medición para cuantificar respuestas, hasta registros de observación sistemáticos, así como equipos de laboratorio, sensores o dispositivos de medición destinados a recopilar datos precisos. La recopilación sistemática de datos en el experimento de campo es esencial para validar hipótesis y obtener resultados cuantitativos confiables (Creswell y Creswell, 2022; Gerber y Green, 2012; Campbell y Stanley, 1963). El objetivo principal del instrumento de recolección de datos es obtener un número que pueda medir cada variable estudiada. Este número debe lograrse de manera consistente, tener validez y confiabilidad (Rivas, 2017; Useche y Artigas, 2021), al mismo tiempo cumplir la objetividad. En la investigación cuantitativa, la recolección de datos reviste una importancia crítica para el estudio, ya que su ejecución incide en la garantía tanto de la validez interna como la validez externa (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018). Por ejemplo, en proyectos de ingeniería, es crucial presentar un formato específico que describa cómo se llevará a cabo la recopilación de datos en el campo de manera que sea confiable y garantice la calidad del resultado obtenido (Deb, Dey y Balas, 2019).

Técnica 1: Muestreo de agua gris cruda y agua gris tratada; Comprende recopilar especímenes de agua cruda (influyente) y agua tratada (efluente) de modo representativo. Para llevar a cabo la técnica, empleamos recipientes para capturar el agua y proceder con el muestreo, uso de frascos, cooler, preservante y otros recursos necesarios, siguiendo procedimientos de etiquetado y registro de cadena de custodia, según el estándar de monitoreo de efluentes en aguas residuales domésticas (R.M. N° 273-2013-VIVIENDA), ajustado a las directrices del Protocolo de monitoreo para aguas generales (R.J. N° 010-2016-ANA) y requisitos adicionales de laboratorio, según la "Ficha de registro de información" validado.

Técnica 2: Ensayos de parámetros químicos, físicos y biológicos; Esta técnica se utiliza para medir las variaciones en los parámetros del agua gris. Se emplean equipos tipo balanza analítica, estufa, espectrofotómetros y microscopios, estando calibrados, además se usan kits de análisis microbiológico y pH. Los parámetros fisicoquímicos se analizan siguiendo la referencia internacional del APHA (Método estándar para análisis de aguas, 24.<sup>a</sup> ed., 2023). Los parámetros biológicos siguen las directrices del Manual parasitológico y bacteriológico de laboratorio (Método de Bailenger modificado; OMS, Ayres y Mara; 1997) y del servicio de acreditación IAS (validación de International Accreditation Service, MVAL-LAB-24). Las referencias citadas se condicen con la R.M. N° 235-2019-MINAM, establecida por la autoridad para analizar las propiedades y características del agua tratada.

Técnica 3: Documentación de resultados de los ensayos analíticos; Esta técnica implica que los ensayos en laboratorio y sus resultados estén debidamente registrados, tengan certificados de calibración o verificación, incluya la sensibilidad del equipo utilizado. Los certificados deben cumplir con los requisitos establecidos por el INACAL, según lo establece la NTP-ISO/IEC 17025:2017, o bien, los ensayos deben realizarse siguiendo métodos validados que cumplan con las directrices de INACAL. El objetivo es garantizar la trazabilidad, confiabilidad y calidad de los resultados obtenidos en el laboratorio.

Técnica 4: Observación experimental; Se realiza en el lugar de ensayo registrando cambios evidentes en el estado de los biofiltros a través de una bitácora de campo validada y determinar relaciones causa-efecto en los dos sistemas de tratamiento.

### **3.5. Procedimientos**

Son los pasos específicos, acciones concretas y detallados que se siguen durante la ejecución de un estudio o experimento y garantizar la precisión de las mediciones (Deb, Dey y Balas, 2019; Creswell y Creswell, 2022; Zou y Xu, 2023). En el estudio se siguió un enfoque metodológico, respetando los pasos de manipulación de las variables, recolección de datos y la coordinación institucional necesaria.

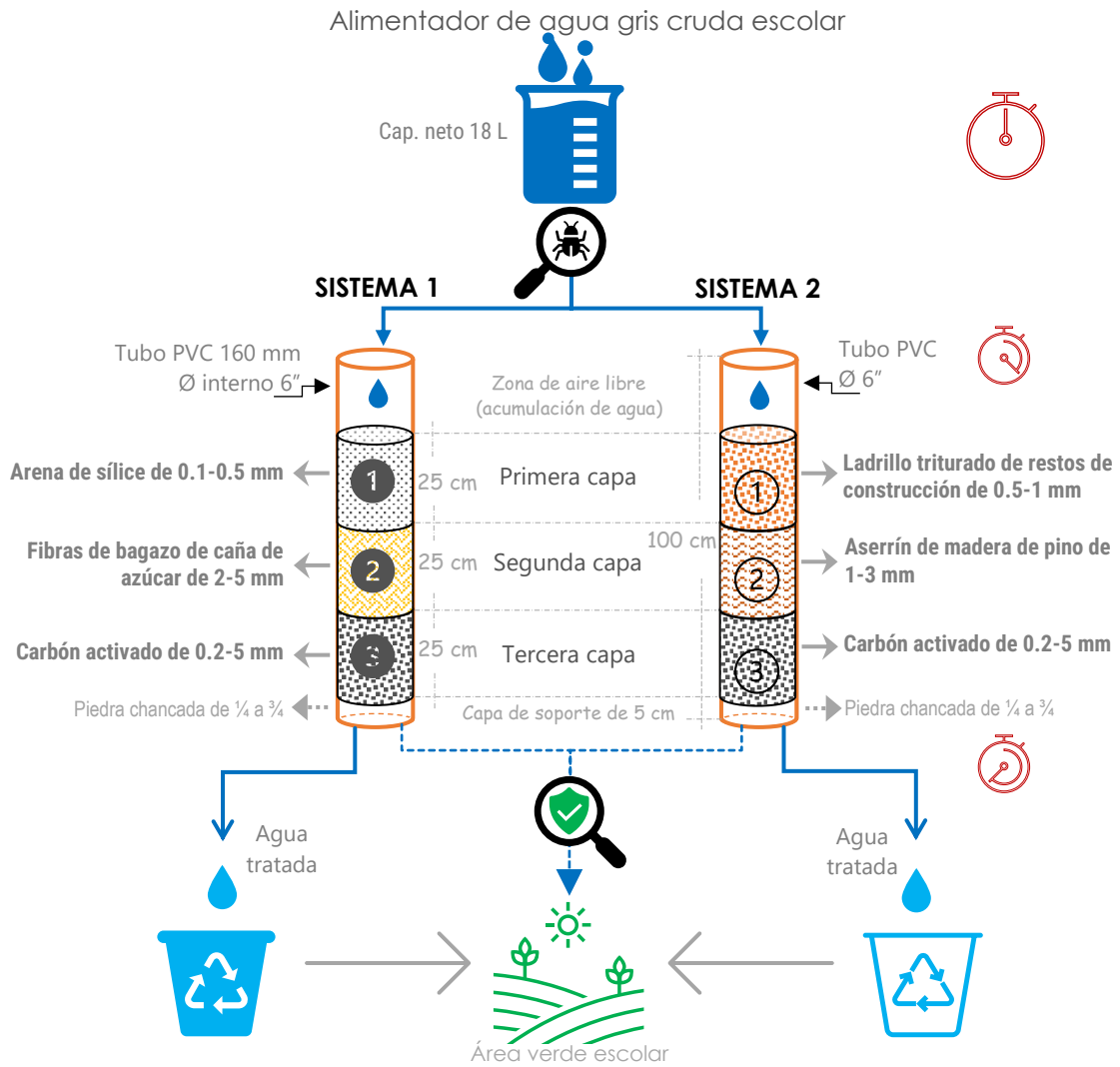
En la recolección de datos, se tomó muestras de agua gris cruda en la escuela San Judas Tadeo, principalmente en los lavaderos corridos internos y externos. El agua

gris tratada se muestreó en la descarga de cada sistema miniaturizada. Las muestras recolectadas fueron representativas y trasladados al laboratorio para sus ensayos correspondientes. La variable independiente manipulada (los sistemas de tratamiento o grupo experimental basada en columna vertical tricapa) implica el impacto que tiene sobre la variable dependiente (características del agua gris) posterior a su paso por los medios filtrantes del agua gris cruda proveniente de la escuela (grupo de control). Se registraron datos en los instrumentos validados por expertos. Para el éxito de la investigación, fue necesario coordinar de manera esencial con la directora de la Escuela San Judas Tadeo. Se estableció un acuerdo formal que permitió la toma de muestras y simular la máxima carga contaminante presente en el agua gris generada por los alumnos (uso deliberado o condición de estrés). La colaboración institucional fue esencial para garantizar el acceso a las instalaciones y la recopilación de datos. Son anexos del informe.

Para poner en marcha los dos sistemas de tratamiento, se enfatizó la importancia de la miniaturización en la ingeniería de mejora de aguas grises, reducir el espacio y mejorar la eficiencia (Feynman, 1992; Xia y Whitesides, 1998). Existe una relación directa entre el grosor del medio filtrante y su eliminación del contaminante. La profundidad de la filtración de aguas grises puede variar. A medida que el material filtrante se vuelve más irregular, su porosidad aumenta. Materiales muy porosos retienen más partículas, pero requieren limpieza frecuente para mantener el flujo. La densidad de un material influye en la velocidad del flujo. Materiales más densos permitirán un flujo más lento, mientras que los menos densos permitirán un flujo más rápido. Los más densos suelen ser más duraderos en comparación con los más porosos. El uso de medios filtrantes de diámetro mayor, como la arena con 0.4 a 1.2 mm, mejora la biofiltración, logrando cargas hidráulicas hasta 100 veces más altas que una filtración lenta (Noutsopoulos et al., 2018). La combinación de arena y carbón activado en la filtración rápida resulta eficaz para la eliminación eficiente de contaminantes (Torres, 2017). El enfoque para reusar las aguas grises implica caracterizarlos, cuánta agua gris generada se tiene, determinar el tipo de agua gris deseada y seleccionar los componentes para el sistema de tratamiento (Díaz et al., 2021). La figura 4, muestra los componentes, la configuración y medios filtrantes utilizados en cada sistema miniaturizada, según cada punto antes explicado.



Figura 4. Configuración de la estructura de capas en los sistemas



Fuente: Formulado por el investigador.

Tabla 3. Justificación en la elección de los medios filtrantes

Material filtrante (*)	Función de las propiedades y características particulares
Carbón activado	Tiene 1 000 m <sup>2</sup> /g, efectivo en la adsorción de contaminantes, incluye eliminar compuestos tanto orgánicos como inorgánicos, así como sabores y olores desagradables.
Bagazo provenientes de caña de azúcar	Es un material natural que retiene partículas y sedimentos, ayudando a mejorar la claridad del agua, además, puede proporcionar un entorno propicio que permita crecer las bacterias beneficiosas involucradas en la remoción de la materia orgánica.
Arena de sílice	Efectivo para eliminar partículas sólidas y sedimentos suspendidos.
Aserrín de madera de pino	Es útil para la captura de partículas y sedimentos, al tiempo que proporciona el sustrato adecuado y permita crecer los microorganismos que descomponen la materia orgánica, contribuyendo en la purificación biológica del agua.
Ladrillo triturado de restos de construcción	Ofrece una superficie porosa reteniendo partículas sólidas y sedimentos, además, facilita el crecimiento de bacterias beneficiosas involucradas en la biodegradación de compuestos orgánicos.

(\*) Para obtener información detallada sobre los espesores y justificaciones técnicas de estos materiales, revise la Tabla 18.

Fuente: Elaborado por el investigador.

La tabla 4, muestra los cálculos referidos a la retención hidráulica y la carga hidráulicas teóricos, asociadas con la capacidad de filtración de los sistemas.

Tabla 4. Dimensionamiento de los sistemas

Datos conocidos	Fórmula	Procesamiento	Valor	Und.
Altura			100	cm
Diámetro interno - $\phi$ 6"			15.24	cm
Espesor por capas			0.25	cm
Población nivel inicial			204	alumnos
Población nivel primaria			332	alumnos
Dotación (NTP IS.010)			50	L/hab.
Volumen general	$V_G = \text{Población} * \text{dotación}$	$(204 + 332)\text{hab} * 50\text{L/hab}$ ( $1\text{m}^3/1000\text{L}$ )	26.8	$\text{m}^3$
Flujo de alimentación	$Q_A = \text{máximo } 1.0\% \text{ de } V_G$	$1.0\% * 26.8 \text{ m}^3$	0.268	$\text{m}^3/\text{día}$
<b>Tiempo de retención hidráulica - TRH</b>				
Volumen del sistema	$V_S = \pi r^2 h$	$\pi \left(\frac{15.24}{2} \text{ cm}\right)^2 (100\text{cm}) \left(\frac{1\text{m}}{100\text{cm}}\right)^3$	0.018	$\text{m}^3$
TRH del sistema	$\text{TRH} = \frac{\text{Volumen del sistema (m}^3\text{)}}{\text{Flujo de alimentación de agua gris gruda (m}^3/\text{día)}}$	$\frac{0.018 \text{ m}^3}{0.268 \text{ m}^3/\text{día}}$	0.068	día
			$\approx 2$	horas
<b>Tasa de carga hidráulica - HLR</b>				
Área superficial del medio filtrante	$A_s = 2\pi(r^2 + rh)$	$2\pi \left(\left(\frac{15.24}{2} \text{ cm}\right)^2 + \left(\frac{15.24}{2} \text{ cm}\right) 75\text{cm}\right) \left(\frac{1\text{m}}{100\text{cm}}\right)^2$	0.396	$\text{m}^2$
HLR del sistema	$\text{HLR} = \frac{\text{Flujo de alimentación (L/día)}}{\text{Área superficial de los medios filtrantes (m}^2\text{)}}$	$\frac{0.268 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \left(\frac{1000\text{L}}{1\text{m}^3}\right)}{0.396 \text{ m}^2}$	677	$\text{L/m}^2\text{-día}$
			$\approx 28$	$\text{L/m}^2\text{-hora}$
<b>Velocidad de filtración en el Sistema 1</b>				
Flujo volumétrico obtenido de medición en experimento - Q1	Ponderado de 5 lecturas	$Q_1 = \frac{1\text{L}}{485 \text{ segundos}}$	0.002	L/s
			$\approx 7.41$	L/h
Filtración - $v_1$	$v_1 = \frac{Q_1}{A - \text{Área de la sección transversal del tubo}}$	$v_1 = \frac{0.002 \frac{\text{L}}{\text{s}} \left(\frac{100\text{cm}}{1000\text{L}}\right)}{\pi \left(\frac{15.24}{2} \text{ cm}\right)^2}$	0.011	cm/s
			$\approx 0.41$	m/h
<b>Velocidad de filtración en el Sistema 2</b>				
Flujo volumétrico obtenido de medición en experimento - Q2	Ponderado de 5 lecturas	$Q_2 = \frac{1\text{L}}{237 \text{ segundos}}$	0.004	L/s
			$\approx 15.18$	L/h
Filtración - $v_2$	$v_2 = \frac{Q_2}{A}$	$v_2 = \frac{0.004 \frac{\text{L}}{\text{s}} \left(\frac{100\text{cm}}{1000\text{L}}\right)}{\pi \left(\frac{15.24}{2} \text{ cm}\right)^2}$	0.023	cm/s
			$\approx 0.83$	m/h

Fuente: Información desarrollada por el investigador.

El bagazo de caña fue obtenido mediante donación de un comerciante ambulatorio local. El ladrillo provino de restos de construcción local donado por su propietario. Ambos insumos se trituraron al tamaño especificado en la figura 4. El aserrín se obtuvo como donación de una maderera local. Los demás insumos, incluyendo los accesorios, fueron adquiridos. Se sugiere revisar la porosidad y densidad en las fichas técnicas de cada medio filtrante para calcular la TRH de cada capa. Como secuencia procedimental, antes de añadir los medios filtrantes a las columnas verticales, se verificó la calidad y limpieza de los materiales. Se estabilizó y aclaró el flujo de agua gris durante cinco días antes de poner en funcionamiento cada sistema. El sexto día comenzó la evaluación de la eficiencia mediante registro de

observación de campo. En dicho día se tomaron muestras de aguas grises crudas y se enviaron al laboratorio de ensayo. A su vez, se comenzó a suministrar 18 litros de aguas grises crudas de forma proporcional a cada sistema. El suministro no fue continuo, sino diario con el mismo volumen, en un total de 5 días, simulando situaciones de carga intermitente. En el último día, se tomó muestras de agua gris tratada de cada sistema. El período total comprendió dos semanas de jornada escolar. Para maximizar la variabilidad y carga contaminante durante la recolección de aguas grises crudas para un día crítico, se programó el uso simultáneo de los lavaderos internos y externos en coordinación con la escuela, representando las condiciones extremas que podrían ocurrir en diferentes momentos del día. Ambos sistemas de tratamiento recibieron las mismas aguas grises crudas para garantizar condiciones uniformes y evitar sesgos en la calidad inicial del agua. Para futuras evaluaciones, es recomendable repetir el proceso en varias jornadas escolares para mejorar la robustez del estudio y abordar la variabilidad temporal. En el laboratorio doméstico se registró mediante 'bitácora de campo', la tasa de filtración, coloración del efluente, asentamiento o compactación de los medios filtrantes, relación de variación de flujo, huellas de erosión en la primera capa debido a la alimentación de aguas grises crudas, así como la presencia de olores, burbujas y turbulencias. Finalmente, la eficiencia de remoción (ER) para cada contaminante, se efectuó mediante la fórmula  $ER (\%) = \frac{C_{inicial} - C_{final}}{C_{inicial}} * 100$ , donde 'C' representa un contaminante (Mehdi et al., 2020), del parámetro listado en la Tabla 5.

Tabla 5. Contaminantes priorizados en la investigación

Parámetros	Unidad	Implicancia
Temperatura	°C	Influye en reacciones químicas y procesos biológicos.
Sólidos totales	mg/L	Indicativo de eliminación de material suspendido y materia orgánica, el cual afecta la turbidez y características del agua.
Sólidos suspendidos totales	mg/L	Mide la eficacia en la remoción de partículas sólidas del agua.
Potencial de Hidrogeno	pH	Influye en solubilidad de compuestos y disponibilidad de nutrientes.
Demanda biológica de oxígeno a 5 días	mg/L	Evalúa cuanta materia orgánica se elimina y la cantidad de oxígeno que el microorganismo requiere para descomponerla. Una DBO <sub>5</sub> alta indica una carga significativa de carga orgánica biodegradable, lo que agota el oxígeno disponible y afecta la vida acuática.
Demanda química de oxígeno	mg/L	Mide el oxígeno total necesario para oxidar sustancias químicas orgánicas e inorgánicas en el agua. Una DQO alta indica que hay de una amplia gama de sustancias contaminantes químicos que requieren oxígeno para su eliminación.
Coliformes termotolerantes*	NMP/100mL	Indicativos de contaminación fecal y presencia de patógenos.
<i>Escherichia coli</i> *	NMP/100mL	Detector específico de contaminación fecal y seguridad biológica, causa enfermedades transmitidas por el agua.
Huevos de Helmintos*	Huevo/L	Mide la presencia de parásitos intestinales y es un riesgo humano.

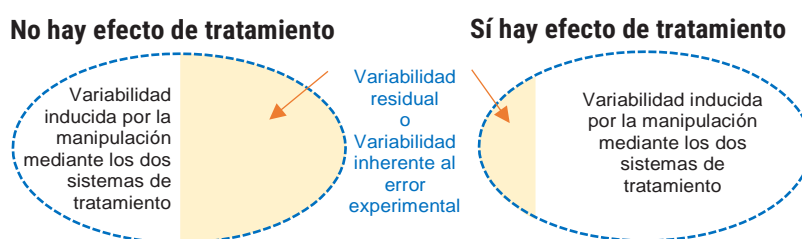
Nota: \*, exigencia obligatoria establecida para aguas tratadas y destinadas a la irrigación de áreas verdes. Ver Tabla 2.

Fuente: Resumen propio con información de Metcalf y Eddy (2014) y Modini et al. (2023).

### 3.6. Método de análisis de datos

En el marco de esta investigación de carácter cuantitativo, se ha llevado a cabo la manipulación de variables y la comparación de grupos utilizando el SPSS v.29 de IBM (2023). Este enfoque garantiza la confiabilidad y precisión del análisis, siguiendo las pautas propuestas por Thomas (2021, p. 60, 131 y 163), así como las mejores prácticas estadísticas recomendadas por Zou y Xu (2023).

Figura 5. Variabilidad total debido a manipulaciones experimentales



Fuente: Adaptado de Gutiérrez & Vara / Análisis y diseño de experimentos. 2012, p .55

Previo al análisis estadístico, se procesaron los datos continuos, generando una data en el SPSS, a cada fila se designa a una observación específica, mientras que cada columna almacena información relativa a una variable de interés. Con fines estadísticos, la variable 'Grupo' se clasificó como categórica ya que representa categorías, reflejando las categorías del grupo experimental y de control, siendo una variable discreta sin orden intrínseco. Las variables numéricas continuas abarcan los parámetros físicos y químicos, mientras que las variables numéricas discretas se relacionan con los parámetros biológicos.

En este estudio, no efectuamos el análisis descriptivo que estime tanto medidas de tendencia central como de dispersión en cada grupo por separado debido a que contamos con una sola muestra en cada uno de los tres grupos. Adoptamos un enfoque no paramétrico, según la metodología seguida por Morales et al., 2020. Se comenzó con la distribución de los datos mediante diagramas de caja (boxplots), identificando posibles valores atípicos o patrones significativos. Posteriormente, aplicamos la prueba de Kruskal-Wallis comparando los tres grupos, los cuales son menos sensibles a la presencia de valores atípicos o censurados por el límite de cuantificación del método (L.C.M.), en virtud del informe del análisis de laboratorio para algunos parámetros. Se interpretó los valores obtenidos por la prueba Kruskal-

Wallis evaluando si 'p' valor resulta menor que la significancia (alfa) de 0.05. La identificación de diferencias significativas nos llevó a realizar análisis post hoc, utilizando la Prueba de Mann-Whitney U, para discernir qué grupos difieren entre sí. Es preciso señalar que, cuando se presenta casos de censura en la variable dependiente y la sensibilidad limitada de Kruskal-Wallis, reconocemos la necesidad de considerar en futuras investigaciones modelos más avanzados, como la regresión censurada o regresión de Tobit. Estos modelos pueden proporcionar una comprensión más detallada de las relaciones entre las variables, especialmente cuando la presencia de datos censurados podría afectar la interpretación de los resultados. Además, se ha llevado a cabo una verificación gráfica para asegurar que los resultados cumplan con los valores exigidos por la norma legal. Los resultados del análisis se presentan de manera clara en tablas y gráficos, respaldando la prueba de las hipótesis de investigación y facilitando una interpretación detallada de los hallazgos.

### **3.7. Aspectos éticos**

Este estudio se adhiere a múltiples pautas y normas reconocidas en la investigación científica, lo que garantiza la integridad y calidad de esta investigación. Entre estas normas, se incluyen la norma ISO 690:2021 (4ta. edición), la guía de estilo ISO 690 y 690-2 de la UCV (Fondo Editorial UCV, s.f.), así como el Código de Ética en Investigación (UCV, 2020). A lo largo de todo el desarrollo del estudio, se prestó especial atención a cumplir con estas normativas. Se han utilizado citas y referencias adecuadas para respaldar las afirmaciones hechas en la investigación, lo que garantiza la utilización de información secundaria de fuentes confiables. Además, se ha puesto un fuerte énfasis en la prevención del plagio como un aspecto crítico. La investigación cuenta con el respaldo de la licencia Turnitin proporcionada por la UCV, lo que contribuye a mantener los más altos estándares de integridad académica.

#### IV. RESULTADOS

Los valores derivados a partir de las pruebas de los parámetros físicos, parámetros químicos y parámetros biológicos se fundamentan en los ensayos llevados a cabo por el laboratorio de análisis, Analytical Laboratory (ALAB). En consecuencia, estos resultados desempeñan un rol decisivo en el logro de los objetivos preestablecidos en el marco de la presente investigación:

Objetivo específico 1: Determinar los parámetros físicos de la calidad del agua tratada para cada uno de los sistemas propuestos para el tratamiento de aguas grises.

Tabla 6. Contaminantes físicos presentes en el influente y efluente

Contaminantes	Temperatura T [°C]	Sólidos totales ST [mg/L]	Sólidos suspendidos totales SST [mg/L]
Agua gris cruda	22.9	506.0	20.6
Sistema 1	22.7	414.5	<5.0 (*)
Sistema 2	22.6	425.0	<5.0 (*)

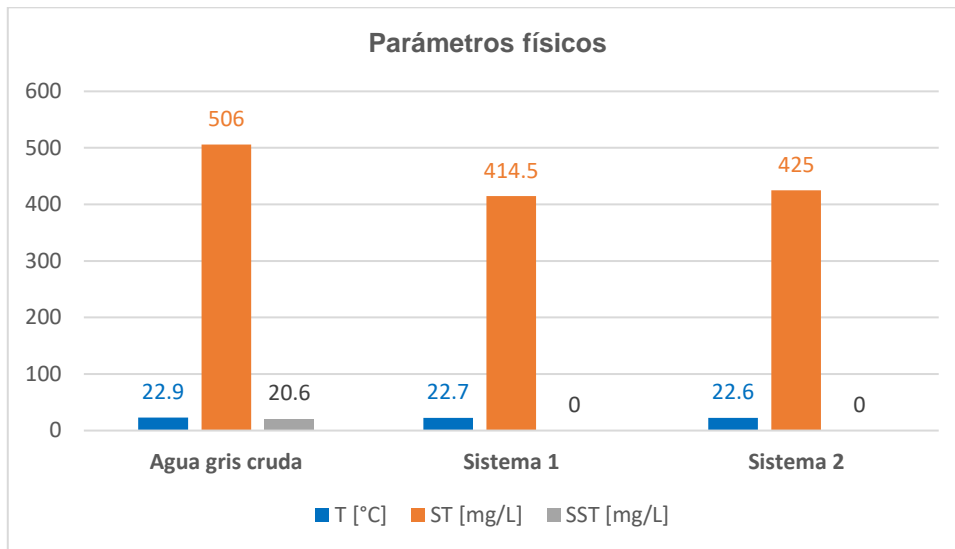
Nota:

(\*) Son valores reportados por el laboratorio de ensayo, en virtud del LCM (límite de cuantificación del método de ensayo). En ese extremo se recomienda tomar el LDM (límite de detección mínimo), en su defecto el valor "0".

Fuente: Datos obtenidos por el investigador.

La tabla presenta información sobre los parámetros físicos en tres contextos diferentes: agua gris cruda, Sistema 1 y Sistema 2. La temperatura se mantiene relativamente constante en los tres casos, indicando consistencia en las condiciones ambientales o en el manejo de la temperatura del agua en los sistemas y el agua gris cruda. Esta estabilidad es crucial para procesos biológicos y químicos. La reducción de sustancias en los sólidos totales en los sistemas 1 y 2 sugiere un tratamiento exitoso para la eliminación de sustancias contaminantes en comparación con el influente. La disminución en los sólidos totales puede atribuirse al proceso de filtración con los medios filtrantes utilizados, mejorando las características del agua. La significativa disminución en la cantidad de sólidos suspendidos totales en los sistemas 1 y 2 indica una eficacia notable en la eliminación de partículas suspendidas. Los valores "<5.0 mg/L" sugieren una clarificación eficiente del agua, esencial para prevenir obstrucciones en sistemas de distribución y garantizar la aceptación y reutilización del agua tratada.

Figura 6. Distribución de parámetros físicos analizados



Fuente: Gráfica de análisis propio.

La figura respalda la consistencia en temperatura y la efectiva reducción de sólidos en los dos sistemas miniaturizados para el tratamiento de aguas grises.

En resumen, los datos revelan consistencia en la temperatura y reducciones significativas en los valores tanto de sólidos totales como de sólidos suspendidos totales en los sistemas 1 y 2. Estos resultados respaldan de manera concluyente la hipótesis de investigación, demostrando mejoras sustanciales en el agua gris tratado. La consistencia en la temperatura sugiere estabilidad en los procesos internos, mientras que las reducciones en los sólidos totales así como de sólidos suspendidos, indican la eficacia interna en los tratamientos implementados.

Los resultados contrastan la hipótesis de investigación de que existe una diferencia en la eficiencia de los dos sistemas que mejoran las aguas grises en contraste con el agua gris cruda. Específicamente, las reducciones en sólidos suspendidos totales y sólidos totales, demuestran que ambos sistemas son eficaces en mejorar las aguas grises escolares, satisfaciendo así con el objetivo preestablecido.

Objetivo específico 2: Determinar los parámetros químicos de la calidad del agua tratada para cada uno de los sistemas propuestos para el tratamiento de aguas grises.

Tabla 7. Contaminantes químicos presentes en el afluente y efluente

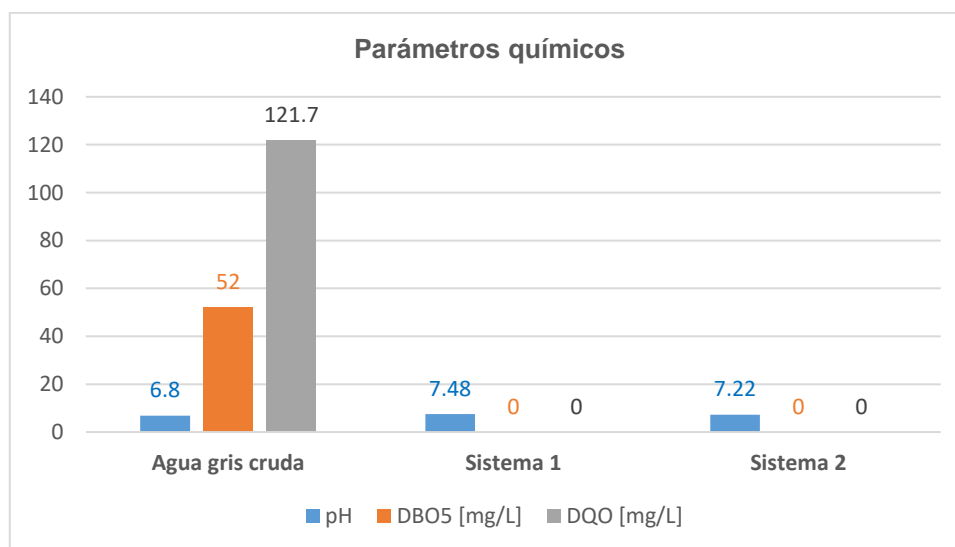
Contaminantes	Potencial de hidrogeno pH	Demanda biológica de oxígeno a 5 días DBO <sub>5</sub> [mg/L]	Demanda química de oxígeno DQO [mg/L]
Agua gris cruda	6.8	52.0	121.7
Sistema 1	7.48	<2.0 (*)	<5.0 (*)
Sistema 2	7.22	<2.0 (*)	<5.0 (*)

Nota:  
(\*) Valores reportados por el laboratorio en base al LCM. Los valores informados, al estar por debajo de este límite, son tan bajos que deben interpretarse con precaución.

Fuente: Datos obtenidos por el investigador.

La tabla presenta datos sobre parámetros químicos de calidad del agua en tres contextos diferentes: agua gris cruda, Sistema 1 y Sistema 2. El pH aumenta en los sistemas 1 y 2 en comparación con el agua gris cruda, indicando un posible proceso de neutralización. La reducción significativa en la DBO<sub>5</sub> y DQO sugiere una eficiente eliminación de carga orgánica y contaminantes químicos en ambos sistemas.

Figura 7. Distribución de parámetros químicos analizados



Fuente: Gráfica de análisis propio.

La figura muestra la mejora del pH y la reducción significativa de la DBO<sub>5</sub> y DQO en los sistemas 1 y 2 en comparación con el agua gris cruda.

De acuerdo con los resultados, el aumento en el pH en los sistemas 1 y 2 puede ser indicativo de un proceso de neutralización eficaz. Mantener un pH ligeramente alcalino es beneficioso para los procesos biológicos y químicos. La reducción



significativa en la DBO<sub>5</sub> y DQO en los sistemas 1 y 2 sugiere una eficiente descomposición de materia orgánica y eliminación de contaminantes químicos. La presencia de múltiples capas de medios filtrantes pudo haber favorecido la actividad microbiana responsable de la descomposición biológica, ayudando a la reducción de la DBO<sub>5</sub>. Además, los medios filtrantes pueden haber facilitado procesos químicos de adsorción y precipitación, contribuyendo a la reducción de la DQO. Ello respalda la eficacia de los procesos de tratamiento implementados.

Los resultados respaldan la hipótesis de que existen diferencias en la concentración química del agua gris tratada para cada uno de nuestros sistemas propuestos. La mejora en el pH y la reducción en DBO<sub>5</sub> y DQO demuestran la eficacia de los sistemas, respaldando la viabilidad de los métodos de tratamiento propuestos.

Objetivo específico 3: Determinar los parámetros biológicos de la calidad del agua tratada para cada uno de los sistemas propuestos para el tratamiento de aguas grises.

Tabla 8. Contaminantes biológicos presentes en el influente y efluente

<b>Contaminantes</b>	Coliformes termotolerantes CT [NMP/100mL]	<i>Escherichia coli</i> EC [NMP/100mL]	Huevos de helmintos HH [Huevo/L]
<b>Agua cruda</b>	3500	2400	<1.0
<b>Sistema 1</b>	<1.8	<1.8	<1.0
<b>Sistema 2</b>	4.5	2	<1.0

Nota:

(\*) Son valores informados por el laboratorio de ensayo que están basados en el LCM (límites de cuantificación del método). Dado que estos valores son tan bajos que están por debajo de este límite, se recomienda tomar en consideración el LDM (límite de detección mínimo). En su defecto, se utilizará el valor "0". Se debe interpretar con precaución los valores extremadamente bajos.

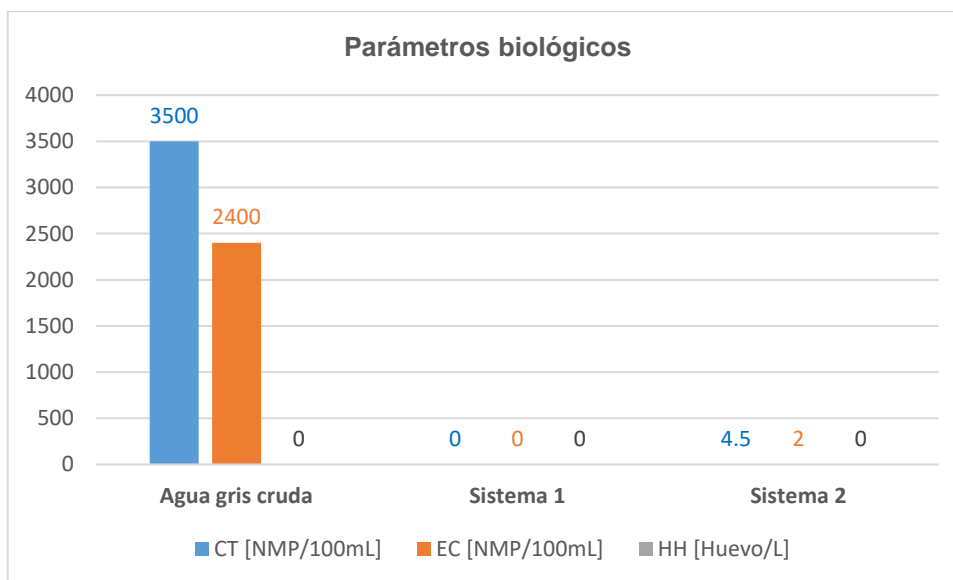
*Fuente: Datos obtenidos por el investigador.*

Se observa una reducción significativa en la tabla de coliformes termotolerantes y *Escherichia coli*, así como la ausencia o baja concentración de huevos de helmintos en las diferentes etapas de la investigación.

Los resultados demuestran la alta remoción en el número de coliformes termotolerantes en los sistemas 1 y 2, indicando una efectiva eliminación de contaminantes bacterianos. La presencia casi indetectable de *Escherichia coli*, con valores por debajo de 2 NMP/100mL en ambos sistemas, sugiere una eficaz eliminación de esta bacteria patógena. La no presencia de huevos de helmintos en

los sistemas tratados puede indicar una eficiente eliminación de contaminantes parasitarios. No obstante, la ausencia de huevos de helmintos en el agua cruda destaca la importancia de un tratamiento adecuado para prevenir la exposición o problemas de salud, asociados con estos organismos.

Figura 8. Distribución de parámetros biológicos analizados



Fuente: Gráfica de análisis propio.

La figura proporciona una representación visual de la reducción en los niveles de coliformes termotolerantes significativamente (de 3.54 a 0.65 Log<sub>10</sub>), además la *Escherichia coli*, decae de 3.38 a 0.30 Log<sub>10</sub>, mientras que los huevos de helmintos no fueron detectados, en ninguna etapa de la investigación.

Los resultados respaldan la hipótesis de que existen diferencias en las concentraciones biológicas en el agua tratada para cada uno de los sistemas propuestos. La ausencia de huevos de helmintos, la reducción en los niveles de los coliformes termotolerantes incluyendo la *Escherichia coli*, demuestran la eficacia de los sistemas en la eliminación de contaminantes microbiológicos, cumpliendo la exigencia legal para dichos parámetros y respaldan la hipótesis de investigación.

Objetivo general: Evaluar la eficiencia de los dos sistemas de tratamiento de aguas grises en el cumplimiento de la norma nacional para el reúso en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023.

Tabla 9. Eficiencia de los sistemas removiendo contaminantes

Evaluación de sistemas		Control	Grupo experimental		Eficiencia de remoción	
Parámetros evaluados	Unidad	Agua gris cruda	Sistema 1 S1	Sistema 2 S2	ER de S1 %	ER de S2 %
<b>Físicos</b>						
Temperatura	°C	22.9	22.7	22.6	-	-
Sólidos totales	mg/L	506.0	414.5	425.0	18.10%	16.00%
Sólidos suspendidos totales	mg/L	20.6	<5.0	<5.0	100.00%	100.00%
<b>Químicos</b>						
Potencial de Hidrogeno	pH	6.8	7.48	7.22	-	-
Demanda biológica de oxígeno a 5 días	mg/L	52.0	<2.0	<2.0	100.00%	100.00%
Demanda química de oxígeno	mg/L	121.7	<5.0	<5.0	100.00%	100.00%
<b>Biológicos</b>						
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	3500	<1.8	4.5	100.00%	99.90%
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100mL	2400	<1.8	2.0	100.00%	99.90%
Huevos de helmintos	Huevo/L	<1.0	<1.0	<1.0	-	-
<b>ER (%) PROMEDIO</b>	-	-	-	-	<b>86.35 %</b>	<b>85.97 %</b>

Comentario: Los valores "<" se refieren a los LCM (Límites de Cuantificación Mínima).

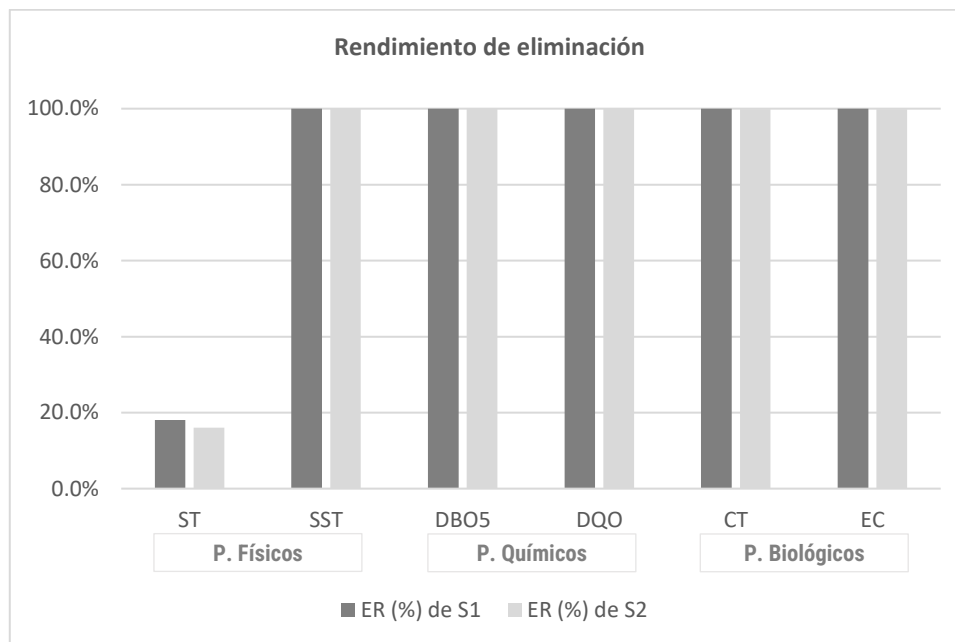
Fuente: Datos generados internamente.

La tabla anterior exhibe la eficiencia general de remoción comparada con el agua gris cruda, para los parámetros evaluados en los sistemas 1 y 2, registrando un 86.35% y 85.97%, respectivamente. La eficiencia de remoción indica que ambos sistemas de tratamiento son altamente eficaces en la eliminación de contaminantes, mostrando un rendimiento muy similar. La eficiencia del 100% en la reducción de sólidos suspendidos totales, coliformes termotolerantes, *Escherichia coli*, DBO<sub>5</sub> y DQO destaca su efectividad de eliminación de contaminantes críticos en las aguas grises tratada en el Sistema 1. La eficiencia ligeramente inferior en la remoción de sólidos totales sugiere que, aunque se logra una reducción significativa, algunos de estos sólidos persisten en el agua tratada debido a su composición variada (sedimentables, fijos, volátiles, entre otros).

En la tabla, no se calcularon las eficiencias de remoción para temperatura y pH, considerándolos atributos naturales del agua. Se entregan resultados iniciales y finales, siguiendo la práctica común en la literatura científica. La efectividad del tratamiento se basa en mantener estos parámetros dentro de rangos aceptables,

dado que son determinantes en los procesos. La remoción de huevos de helmintos no fue calculada al no contar con valores reales, solo valores LCM <1.

Figura 9. Variación de remoción por contaminantes



Fuente: Gráfica de análisis propio.

La figura refleja la capacidad y eficiencia de remoción exitosa de los sistemas 1 y 2 que mejoran el agua gris escolar al reducir de manera sustancial la concentración de contaminantes de los tres tipos de parámetros evaluados.

Tabla 10. Comparación con norma legal para regar áreas verdes

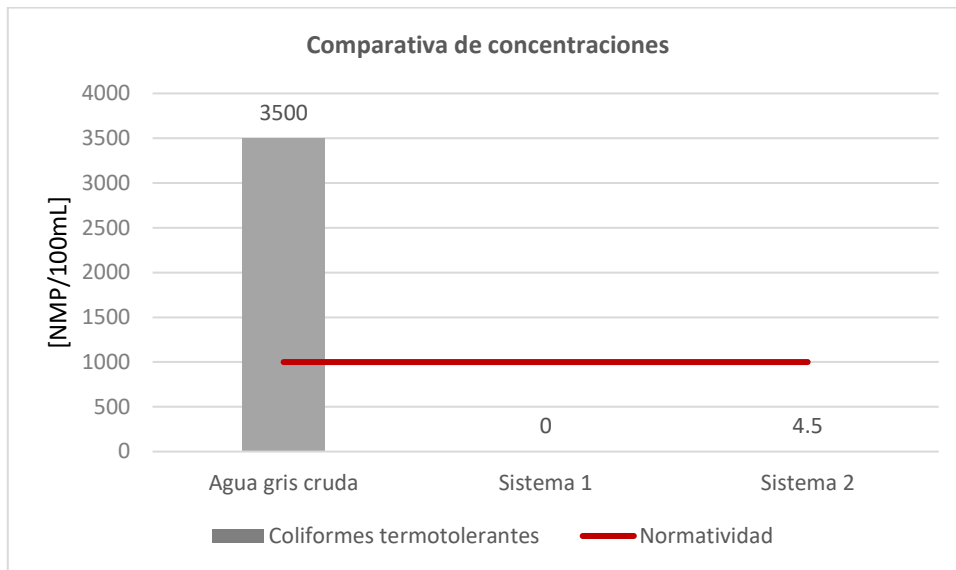
Contaminantes	Unidad	Normatividad D.S. 004-2017-MINAM	Agua gris cruda	Sistema 1	Sistema 2
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	1000	3500	<1.8	4.5
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100mL	1000	2400	<1.8	2
Huevos de helmintos	Huevo/L	1	<1.0	<1.0	<1.0

Fuente: Proceso de recopilación Interna.

La tabla compara resultados obtenidos en cada sistema de tratamiento con los valores instituidos por el dispositivo legal (D.S. 004-2017-MINAM), que asegura el uso seguro en las áreas verdes. Los resultados exhiben niveles inferiores a los límites establecidos para calidad de aguas aptas para el riego, respaldando así su

idoneidad para aplicaciones específicas.

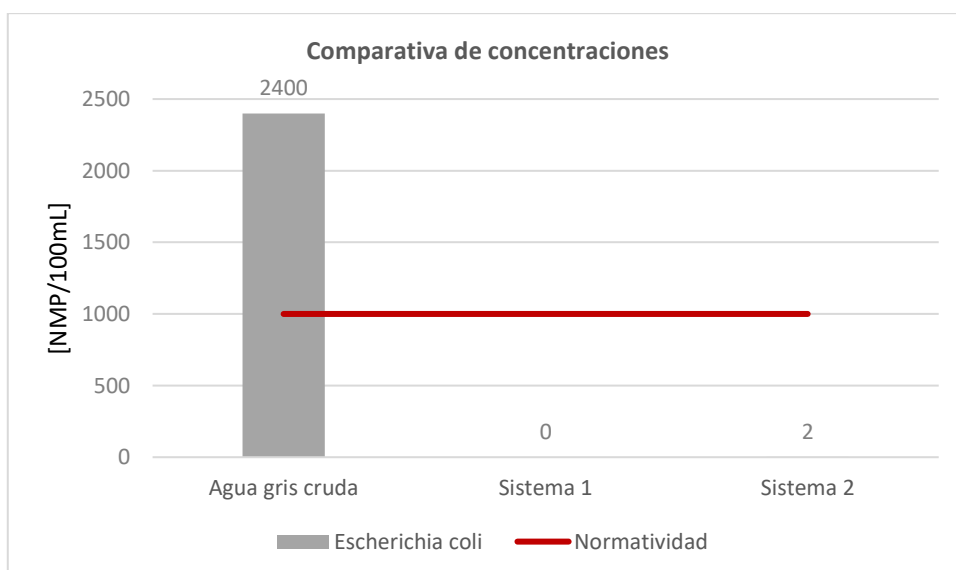
Figura 10. Perfil de coliformes termotolerantes con la norma legal



Fuente: Gráfica de análisis propio.

Los resultados indican que los niveles de coliformes termotolerantes en el agua gris cruda exceden el límite normativo. Sin embargo, el sistema 1 y el sistema 2 logran reducciones significativas, manteniéndose por debajo del límite permitido. Este hallazgo es crucial, asegura la carga microbiológica en el agua gris tratada.

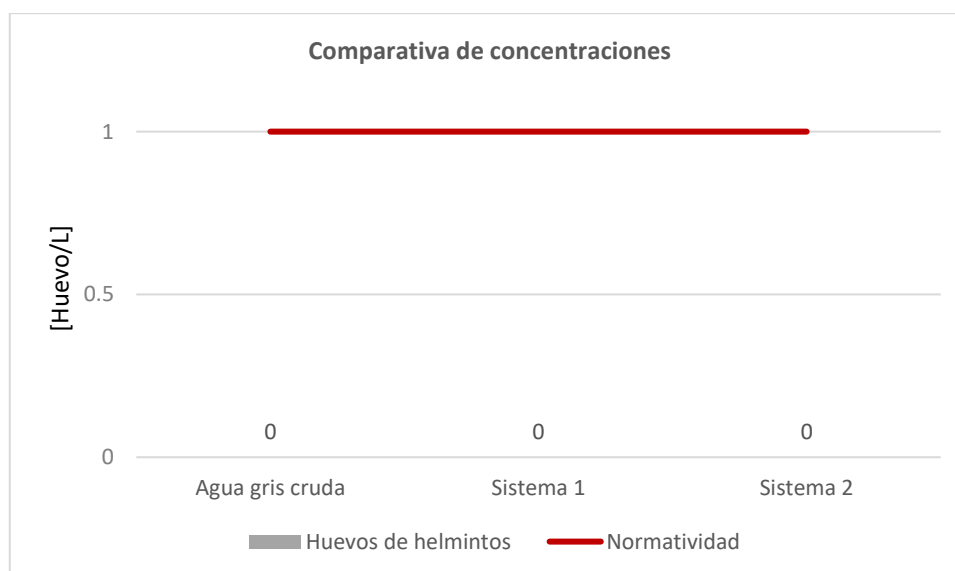
Figura 11. Perfil de *Escherichia coli* con la norma legal



Fuente: Gráfica de análisis propio.

El valor de *Escherichia coli* exceden el límite normativo en el agua cruda, pero los sistemas 1 y 2 logran reducir significativamente, estando ambos por debajo de los límites permitidos. Esta reducción indica el cumplimiento efectivo con el requisito de calidad del agua tratada, primordial para aplicar en el regado de áreas verdes.

Figura 12. Perfil de huevos de helmintos con la norma legal



Fuente: Gráfica de análisis propio.

El resultado del análisis de laboratorio no advierte o sugieren la ausencia de huevos de helmintos en el agua gris cruda escolar. Además, la concentración de estos contaminantes en los sistemas 1 y 2 es indetectable o extremadamente baja, con un límite de cuantificación  $<1.0$ , lo que se traduce en valores atribuidos de "0". En este sentido, la eficiencia de los sistemas se puede colegir como el cumplimiento de la normativa establecida, ya que la concentración es insignificante.

Los resultados de los sistemas 1 y 2 cumplen con el rango establecido en la normatividad (D.S. N° 004-2017-MINAM; Categoría 3, Ítem D1, reúso seguro de agua tratada en áreas verdes) para coliformes termotolerantes, huevos de helminto y la *escherichia coli* (puede consultar más detalles en la Tabla 19). Estos resultados son indicativos que ambos sistemas de tratamiento están operando de manera efectiva para proporcionar agua gris tratada según los estándares microbiológicos y parasitológicos, apta para reusarse en las áreas verdes de entornos escolares, pudiéndose elegir indistintamente cualquiera de los sistemas.

Sobre el contraste de la hipótesis formulada en la investigación, que establece: 'Existe diferencia en la eficiencia de los dos sistemas de tratamiento de aguas grises en el cumplimiento de la norma nacional para el reúso en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023' (denominada hipótesis 1 o alternativa), se presenta la prueba inicial como el análisis post hoc aplicado a muestras independientes entre las categorías de Grupo. A continuación, se detallan los contrastes de hipótesis.

Tabla 11. Contrastes de hipótesis por categorías de grupo

N°	Hipótesis nula	Sig. <sup>a,b</sup>	Veredicto
<b>Muestras independientes evaluadas con Prueba de Kruskal-Wallis</b>			
1	La Temperatura es uniforme entre Grupos	<.001	Descarte la hipótesis Ho.
2	Los Sólidos totales son uniforme entre Grupos	<.001	Descarte la hipótesis Ho.
3	Los Sólidos suspendidos son uniforme entre Grupos	<.001	Descarte la hipótesis Ho.
4	El pH es uniforme entre Grupos	<.001	Descarte la hipótesis Ho.
5	La DBO <sub>5</sub> es uniforme entre Grupos	<.001	Descarte la hipótesis Ho.
6	La DQO es uniforme entre Grupos	<.001	Descarte la hipótesis Ho.
7	Los Coliformes termotolerantes son uniforme entre Grupos	<.001	Descarte la hipótesis Ho.
8	La Escherichia Coli es uniforme entre Grupos	<.001	Descarte la hipótesis Ho.
9	Los Huevos de Helmintos son uniforme entre Grupos	1.000	Conserve la hipótesis Ho.
<b>Muestras independientes analizadas con Prueba U de Mann-Whitney – prueba post doc</b>			
1	Los Huevos de Helmintos son uniforme entre Grupos	1.000 <sup>c</sup>	Conserve la hipótesis Ho.

a. El umbral de significación se establece en 0.050. / b. Se presenta la significancia asintótica. / c. Se expone la significación precisa correspondiente a esta prueba.

Fuente: Prueba estadística generado en SPSS con datos propios.

La prueba de Kruskal-Wallis (no paramétrica) a los nueve parámetros evaluados en los tres grupos, con el nivel de significancia (alfa) establecido en 0.05, reveló diferencias significativas en ocho de ellos entre los grupos ( $p < 0.001$ ), siendo la excepción los huevos de helmintos ( $p = 1.000$ ). Estos resultados fueron respaldados mediante la prueba post hoc de Mann-Whitney U. La falta de evidencia suficiente para decidir si hay diferencias significativas en la variable de huevos de helmintos entre los grupos considerados y no poder rechazar la hipótesis nula. Luego, en virtud del análisis estadístico entre los dos sistemas de tratamiento evaluados, se procedió con la prueba no paramétrica para verificar el cumplimiento normativo.

Tabla 12. Prueba U Mann-Whitney para dos grupos

N°	Hipótesis nula	Sig. <sup>a,b</sup>	Veredicto
1	Los Coliformes termotolerantes son uniforme entre Grupos	<.001 <sup>c</sup>	Descarte la hipótesis Ho.
2	La Escherichia Coli es uniforme entre Grupos	<.001 <sup>c</sup>	Descarte la hipótesis Ho.
3	Los Huevos de Helmintos son uniforme entre Grupos	1.000 <sup>c</sup>	Conserve la hipótesis Ho.

a. El umbral de significación se establece en 0.050. / b. Se presenta la significancia asintótica. / c. Se expone la significación precisa correspondiente a esta prueba.

Fuente: Prueba estadística generado en SPSS con datos propios.

La distribución de huevos de helmintos se mantuvo constante entre grupos, sin diferencias significativas ( $p = 1.000$ ,  $\alpha = 0.050$ ).

Dado que la hipótesis versa sobre la eficiencia de dos sistemas que depuran las aguas grises, debe tomarse en cuenta que la eficiencia directa de los sistemas no se puede determinar solo a partir de estos resultados de análisis estadísticos, ya que se requieren datos específicos sobre la eficiencia de remoción de los sistemas en sí mismos, los cuales se abordaron en la tabla 9 precedente.

Finalmente, basado en lo explicado, cabe indicar que los resultados estadísticos son una herramienta para respaldar conclusiones, pero la interpretación final debe basarse en la combinación de la evidencia estadística y el conocimiento del sistema y del proceso de muestreo, en donde si todos los indicadores apuntan a la ausencia de huevos de helmintos y la eficiencia es consistente entre los dos sistemas de tratamiento, anular o no rechazar la hipótesis nula podría ser una conclusión válida. En ese extremo, la hipótesis de investigación queda aceptada.

Es crucial señalar que la variabilidad total, un concepto estadístico esencial en este análisis, se distingue por la variabilidad inducida por la manipulación y se minimiza gracias a la variabilidad inherente al error experimental (consultar Figura 5). Este análisis estadístico se apoya en métodos de ensayo acreditados por el ente regulador INACAL, asegurando la validez interna del estudio. Además, la sensibilidad de lectura, documentada en los certificados de calibración, contribuye significativamente en las interpretaciones de resultados. Estos certificados, respaldados por el ente regulador, ofrecen una base sólida para la confiabilidad y la calidad de datos analizados, sin embargo, es importante destacar las limitaciones temporales debido a una sola muestra de agua de cada etapa del proceso.

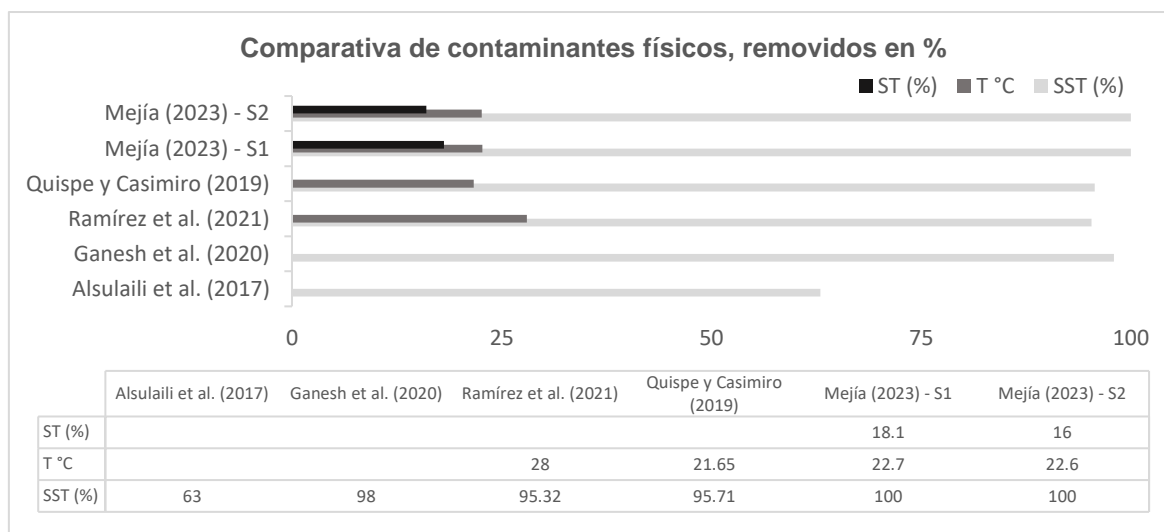


## V. DISCUSIÓN

En esta sección, analizamos el resultado derivado de evaluar los dos sistemas de tratamiento de agua gris en relación con los objetivos planteados y el marco teórico. Se presenta un análisis crítico alineado con investigaciones científicas, discutiendo el potencial impacto en los ámbitos científico y social.

En relación con la determinación de los parámetros físicos de la calidad del agua gris tratada, se destacan dos parámetros cruciales según la Figura 13, que presenta los niveles de concentraciones removidas.

Figura 13. Concentraciones removidas de parámetros físicos



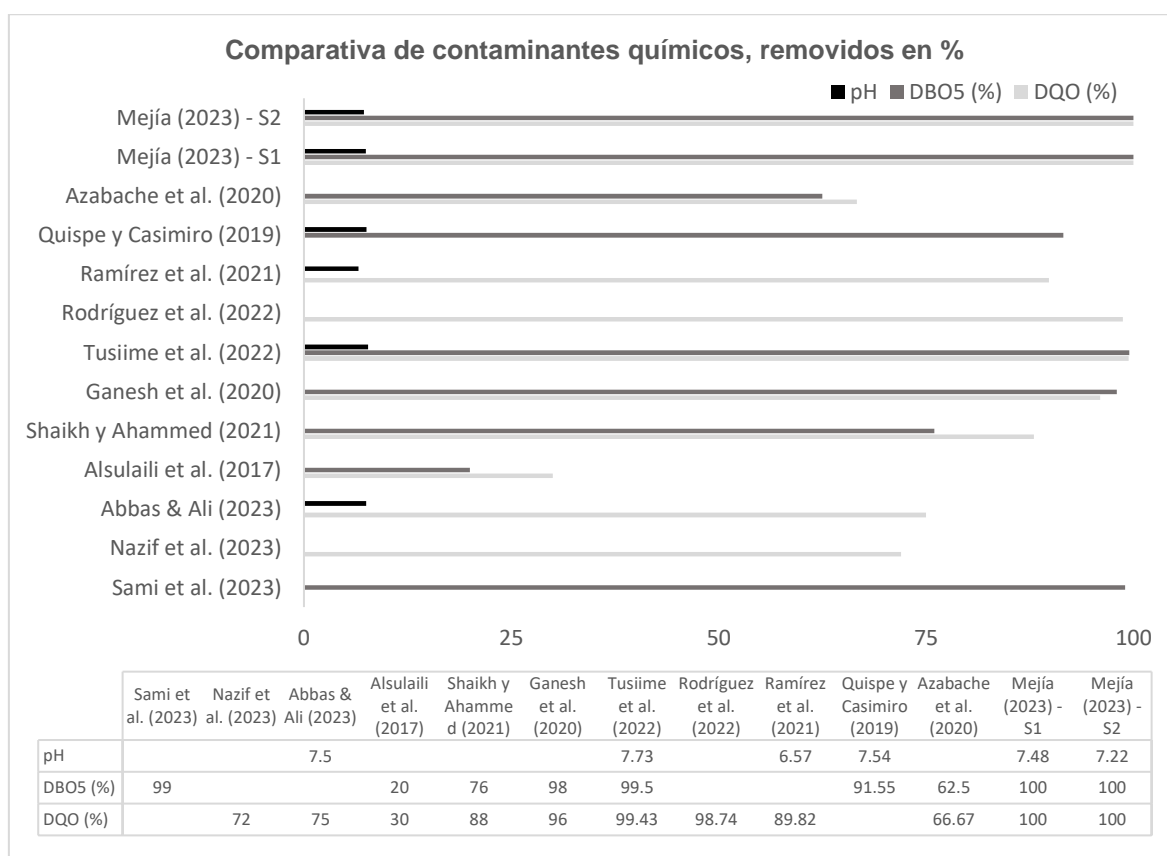
*Fuente: Procesamiento propio.*

Observamos que, aunque los sólidos totales (ST) son esenciales, no se abordan comúnmente en estudios, como señala Boano et al. (2020, p.4). Quispe et al. (2022, p.10-13) sugiere considerar su evaluación junto a otros sólidos, ya que constituyen la totalidad de los sólidos presentes en el agua, incluyendo los sólidos de naturaleza disuelta y suspendida, y ser indicativos de remoción del material suspendido y la materia orgánica, afectando la calidad del agua en general (ver tablas 1, 5 y 15). En nuestros Sistemas 1 y 2, logramos reducir las concentraciones de sólidos totales entre el 18.1% (414.5 mg/L) y el 16% (425.0 mg/L). La temperatura del agua en nuestro estudio fue de 22.7°C y 22.6°C en los sistemas 1 y 2, respectivamente. Sin embargo, las condiciones operativas observadas por Ramírez et al. (2021) fueron de 28°C, mientras que Quispe y Casimiro (2019) registraron una temperatura en el

rango de 21°C y 22.3°C, lo cual concuerda con nuestro estudio. Es esencial reconocer que pequeñas variaciones pueden influir en los resultados del efluente tratado. Respecto a la SST (sólidos suspendidos totales), el filtro de arena de Alsulaili et al. (2017) logró remover el 63% de SST, mientras que Ramírez et al. (2021) alcanzó el 95.32% utilizando restos de arroz, bagazo de caña, arena fina y grava con diferentes grosores. Estas configuraciones pueden haber mejorado la ratio de remoción. Además, Ganesh et al. (2020) logró una eliminación del 98% mediante un biofiltro lento de arena adaptado con otros componentes, respaldando nuestros resultados en los Sistemas 1 y 2 que eliminaron el 100% de dichos sólidos comparado con los 20.6 mg/L en agua gris cruda. También es menester citar que los biofiltros usados para mejorar las aguas residuales domésticas logran remover el 95.71% de SST, según el estudio de Quispe y Casimiro (2019).

Sobre la determinación de los parámetros químicos de la calidad del agua gris tratada en los sistemas de tratamiento, la Figura 14 muestra el panorama general.

Figura 14. Concentraciones removidas de parámetros químicos



Fuente: Procesamiento propio.

El pH del agua es un indicador clave que, aunque no constituye un contaminante por sí mismo, cuya variabilidad, influenciada por sustancias contaminantes, desempeña un rol fundamental en el agua gris, por consiguiente, en la salud de los ecosistemas asociados (Modini et al., 2023). Resultados de investigaciones anteriores respaldan la importancia de la elección de materiales filtrantes. Abbas & Ali (2023), utilizando carbón activado, restos de ladrillo, arena y virutas de madera (aserrín), lograron una reducción del 75% en DQO con un rango de pH de 7.2 a 7.8. Tusiime et al. (2022), usando arena y carbón activado, alcanzaron remociones destacadas del 99.5% en DBO<sub>5</sub> y 99.43% en DQO, manteniendo un pH aceptable de 7.35 a 8.1. Ramírez et al. (2021), utilizando arena y bagazo de caña, con un pH de 6.57, logró remover el 89.82% de la DQO. Quispe y Casimiro (2019), al usar arena y aserrín, con un pH de entre 7.34 y 7.73, removieron el 91.55% de la DBO<sub>5</sub>.

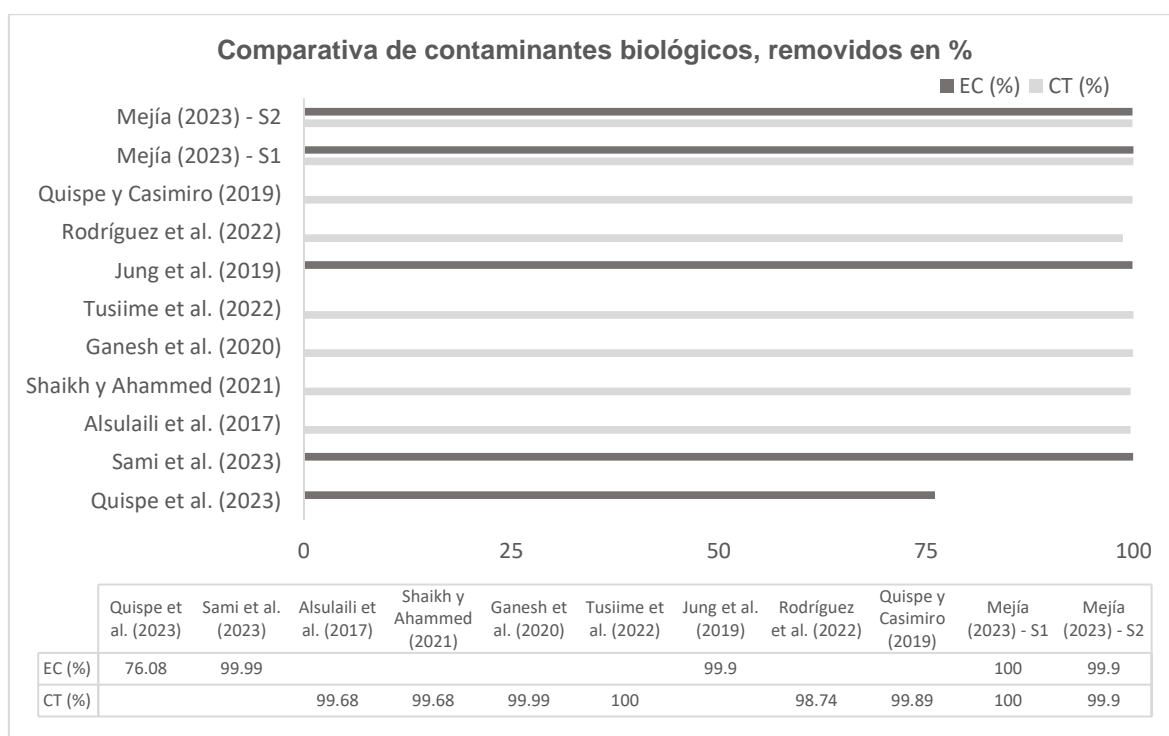
En contraste, estudios como el de Shaikh y Ahammed (2021), que no registraron el pH, demostraron eficiencias de remoción del 88% de DQO y 76% de DBO<sub>5</sub> mediante filtros de arena saturados. Ganesh et al. (2020), mediante un biofiltro lento de arena, eliminó el 96% de DQO y 98% de DBO<sub>5</sub>. Azabache et al. (2020), utilizando arena y carbón artesanal, eliminó el 66.67% de DQO y 62.5% de DBO<sub>5</sub>. Alsulaili et al. (2017), utilizando 4 sistemas, entre ellos la arena, cuyo mejor resultado fue la remoción del 30% de DQO y 20% de DBO<sub>5</sub>. Sami et al. (2023), empleando carbón activado, eliminó el 99% de DBO<sub>5</sub>. Nazif et al. (2023), usando arena y carbón activo, removió el 72% de DQO. Rodríguez et al. (2022), utilizando filtrantes a base de carbono analizadas en tres grupos, lograron la remoción del 98.74% de DQO.

En nuestro estudio, al emplear carbón activado, fibras de bagazo provenientes de la caña de azúcar, arena de sílice, aserrín de madera de pino y ladrillo triturado de restos de construcción, en los sistemas 1 y 2, se observaron mejoras sustanciales en el agua gris tratada con respecto al agua gris cruda. El pH estuvo estable en un rango entre 7.22 y 7.48, indicando un proceso de neutralización eficaz. La remoción de DBO<sub>5</sub> y DQO fue efectiva obteniendo niveles inferiores al límite de cuantificación del método (<2.0 mg/L y <5.0 mg/L, respectivamente), siendo un 100% de eliminación. Estos resultados evidencian una eficiente eliminación de carga orgánica y contaminantes químicos. La cuidadosa elección de materiales filtrantes, en concordancia con la literatura científica, demostró tener una influencia positiva

reduciendo los contaminantes del agua gris escolar.

Respecto a la determinación de los parámetros biológicos de la calidad del agua gris tratada en los sistemas, se discuten el detalle de concentraciones removidas, durante el proceso de tratamiento.

Figura 15. Concentraciones removidas de parámetros biológicos



Fuente: Procesamiento propio.

Es esencial señalar que la mayoría de los estudios revisados no abordan de manera específica la evaluación cuantitativa de los huevos de helmintos, se exploran la presencia de diversos patógenos y cargas virales en la caracterización y tratamiento del agua gris (ver Tabla 17). Nuestra investigación, a pesar de realizar ensayos específicos para la identificación de huevos de helmintos, no logró detectar su presencia en ninguna etapa de eliminación de contaminantes y patógenos del agua gris, asumiendo un valor de "0". Este vacío de información dificulta la comparación con la normativa aplicada al riego en áreas verdes.

En relación con los coliformes termotolerantes, Quispe y Casimiro (2019) lograron una reducción promedio de  $6.4E+3$ , aunque para fines de reúso superaron el límite máximo normativo de 1000 NMP/100mL. Ramírez et al. (2021) no proporciona

información detallada sobre la presencia específica de coliformes termotolerantes. Sin embargo, la temperatura registrada durante el estudio fue de 28°C, lo cual podría indicar la existencia de coliformes termotolerantes, según lo señalado por Baldeón (2013). Es importante tener en cuenta que las condiciones climatológicas particulares pueden representar un caso aislado de análisis. Además, estos coliformes son considerados para evaluar la contaminación fecal (Paredes, 2014), integrada por coliformes fecales. En el caso de Tusiime et al. (2022), se observó una concentración de coliformes fecales de  $42.0 \pm 2.0$  UFC/100 ml a 24 horas (la UFC se registra mediante la observación directa de colonias en el medio de cultivo), con una reducción del 100% en comparación con el valor inicial. Rodríguez et al. (2022) reportó una reducción del 98.74%, medida en NMP/100mL y comparada con UFC/100mL (la NMP es obtenida mediante una técnica estadística basada en la presencia o ausencia de crecimiento en una serie de diluciones), resultando inapropiada dicha analogía, pues son métodos diferentes para la enumeración de microorganismos y no son directamente equivalentes. Shaikh y Ahammed (2021) redujeron en un 99.68% (2.40 log), mientras que Ganesh et al. (2020) lograron una eliminación del 99.99%. En cambio, el estudio de Alsulaili et al. (2017) abordó el total de coliformes, logrando reducir de 6.5 a 2 UFC/100 mL. Nuestro estudio analizó puntualmente "coliformes termotolerantes". El agua gris cruda tuvo una concentración de 3 500 NMP/100mL, mientras que en el Sistema 1 fue menor a 1.8 NMP/100mL y en el Sistema 2 alcanzó los 4.5 NMP/100mL, siendo concordante la medición y comparación con la normativa, en su uso de unidades, lo cual logró la remoción del 100%. En cuanto a *Escherichia coli*, Quispe et al. (2023) logró reducir el 76.1%, Sami et al. (2023) de 2.2 a 4.0 Log<sub>10</sub> y Jung et al. (2019) reportaron una eliminación media del 3.0 log, equivalentes al 100% y 99.9%, respectivamente. En nuestro estudio, el agua gris cruda tenía una concentración de 2 400 NMP/100mL. En el Sistema 2 se redujo a 2 NMP/100mL, mientras que en el Sistema 1 se reportó <1.8 NMP/100mL, es decir una remoción del 99.9 y 100% respectivamente.

La normalización de unidades de medida es esencial al examinar la eficacia de sistemas de tratamiento del agua gris. La diversidad de representaciones, como UFC/100 mL, NMP/100 mL, Log<sub>10</sub>, dificulta la comparación. Adoptar una única unidad estandarizada o expresar la remoción porcentual simplifica la interpretación

y permite una evaluación directa de la eficacia de tratamiento. Esta estandarización es crucial para mitigar la ambigüedad en la forma de medir y facilita tomar decisiones informadas en la depuración de aguas grises. Sin embargo, es crucial destacar que el porcentaje no garantiza la uniformidad en la eliminación de contaminantes entre diferentes sistemas y regiones del mundo. Basándonos en estos estudios realizados en diversas partes del mundo, afirmamos que estos resultados se sitúan dentro de los promedios de eliminación, demostrando una alta confiabilidad al aplicar sistemas miniaturizados que utilizan medios filtrantes y configuraciones probadas para mejorar aguas grises de entornos escolares.

La eficiencia de los dos sistemas de tratamiento de aguas grises y su cumplimiento del requisito legal para el reúso en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023, viene engranada por diversas consideraciones. La efectividad depende con certeza del diseño de los sistemas, la miniaturización, la selección y disponibilidad sostenida de materiales, la recolección y alimentación adecuada y oportuna de las aguas grises escolares. A continuación se detallan estos aspectos críticos.

Respecto al flujo de agua gris, se calculó un valor de 7.41 L/h para el sistema 1 (S1) y 15.18 L/h para el sistema 2 (S2), ambos aplicados a columnas verticales miniaturizadas con una superficie neta de  $\pi(16/2)^2 \approx 201 \text{ cm}^2$  cada una. Las tasas de filtración calculadas resultan en 0.41 m/h para S1 y 0.83 m/h para S2, con la capacidad de soportar una carga bruta de aguas grises de 0.268 m<sup>3</sup>/día, con un TRH (tiempo de retención hidráulica) de 2 horas (0.068 días) y una HLR (carga hidráulica) de 28 L/m<sup>2</sup>-hora (0.677 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-día o 677 L/m<sup>2</sup>/día). La HLR es compatible con los valores entre 500 y 800 L/m<sup>2</sup>/día, según lo citado por Bonaio et al (2020) y Jokerst et al (2011) para sistemas híbridos, eficientes eliminando contaminantes. Wang et al (2009) y Crittenden et al (2012) indicaron que las tasas de biofiltración eficientes están en el rango de 0.042-0.3 m/h (lenta) y 4.17-19.8 m/h (rápida), mientras que nuestros resultados para S1 fueron de 0.41 m/h y para S2 fueron de 0.83 m/h, situándose en un rango intermedio. Las capas filtrantes, con un grosor de 25 cm cada una, superan las recomendaciones para sistemas biofiltros eficientes y están en línea con la influencia de la profundidad y velocidad del flujo en la sedimentación de partículas, como predijo Headley et al. (2013).

Comparando con investigaciones anteriores, nuestros resultados son consistentes o superiores en eficiencia. Por ejemplo, Quispe et al (2023) lograron una eliminación del 76.08 % de *Escherichia coli* con un caudal de 1 L/h, ligeramente inferior a nuestros resultados. Alsulaili et al (2017) contemplaron diseños hidráulicos de capacidad de 5 m<sup>3</sup>/día y HLR de 14 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-día en siete escuelas, siendo mayor a nuestros sistemas S1 y S2, pero con eficiencias inferiores. Tusiime et al. (2022) en un grupo, alcanzaron una alta tasa de remoción (99.5% DBO, 99.43% DQO, coliformes fecales 42.0 ± 2.0 UFC/100 ml) con un TRH de 12 y 24 horas. Las pruebas de Sami et al. (2023) en muros verdes, con flujos similares a los nuestros, redujeron el 99% en DBO<sub>5</sub> y *Escherichia coli*, aunque uno de sus cinco sistemas tuvo restos de café que aumentó la carga orgánica, además, descubrió que HLR altos no le afectan al carbón activo. Quispe y Casimiro (2019) lograron remociones significativas (95.71% SST, 91.55% DBO<sub>5</sub>) con flujos de 0.75 L/h y TRH de 2.16 (filtro 1) y 3.5 días (filtro 2), sin embargo, los coliformes termotolerantes no alcanzaron los niveles requeridos en la normativa, a pesar de tener una TRH alto. La influencia de la TRH está vinculada al tipo de material filtrante y la pendiente del sistema (Galeano y Albornoz, 2019), cuyo tiempo de retención más largo se asocian a tasas de carga más bajas (Bonaio et al., 2020; Jokerst et al., 2011). El estudio previo tuvo un diseño horizontal, junto con los filtrantes usados pudo haber afectado la remoción de coliformes termotolerantes. Azabache et al. (2020) al tratar 15 L/día de aguas grises domésticas en su tanque biofiltro, obtuvieron una reducción del 62.50% en DQO y del 66.67% en DBO<sub>5</sub> usando el carbón natural.

Ramírez et al. (2021) llevó a cabo pruebas periódicas a lo largo de 6, 14 y 22 días, obteniendo eficiencias del 95.32% para SST y del 89.82% para DQO, demostrando una respuesta adecuada. Aunque nuestro estudio se centró en pruebas al inicio y al final, con una duración total de dos semanas escolares, con resultados exitosos según los estándares para el reúso en el riego. El estudio anterior sirve como referencia para proyecciones futuras, pudiendo ser compatibles con la normativa NTP OS.090, que recomienda realizar cinco campañas de monitoreo de aguas residuales domésticas para una caracterización efectiva, cada una con una duración de 24 horas en diferentes días de la semana, abarcando la completa variabilidad de contaminantes, incluyendo sólidos totales y suspendidos, DBO<sub>5</sub>,

DQO, coliformes así como huevos de helmintos, esencial para evaluar la factibilidad técnica de los proyectos, aspecto que debe tenerse en cuenta.

Aunque Madueño et al. (2018) no evaluó parámetros según la normativa para riego en áreas verdes, su enfoque en filtros tricapa de arena permitió el riego exitoso en un biohuerto y área verde de una escuela pública en entornos reales. Basándonos en esto, al aplicar los parámetros normativos para el riego y el incremento de áreas verdes, podemos realizar un ejercicio de cálculo del área potencial que puede ser irrigada. A pesar de las discrepancias entre las normativas para el riego (NT A.080 en 5 L/m<sup>2</sup>/d y NT IS.010 en 2 L/m<sup>2</sup>/d), hemos adoptado una ratio conservadora: Sistema 1:  $7.41 \frac{L}{h} * \frac{(7 h/d)}{5 L/m^2/d} \approx 10 m^2$  y el Sistema 2:  $15.18 \frac{L}{h} * \frac{(7 h/dia)}{5 L/m^2/dia} \approx 21 m^2$ . La jornada escolar en Perú (MINEDU) tiene un promedio de 35 horas semanales, de ahí la asunción de 7 h/diarias. Con métodos eficientes de riego, se podría ampliar el área a ser irrigada o extender el sistema, considerando la baja huella espacial (201 cm<sup>2</sup>), coherente con lo postulado por Masi et al (2018) en 0,5 m<sup>2</sup>/ p.e.

Según el informe de la ANA de 2018, los sistemas de riego tecnificado demuestran su eficacia cuando los valores de SST se mantienen inferiores a 50 mg/L. En contraste, los sistemas convencionales enfrentan mayores riesgos debido al aumento de SST causado por algas, respaldando la necesidad de implementar un sistema de filtración previa al riego. El informe también destaca la transición hacia sistemas tecnificados para el riego de áreas verdes al año 2035, considerando la aptitud microbiológica. Hace hincapié en evaluar y mitigar los microorganismos patógenos mediante indicadores como coliformes fecales y huevos de helmintos. Paralelamente, indica evaluar la aptitud física y química, centrándose en la carga orgánica expresada en SST y DBO. Estos parámetros son esenciales para diseñar estrategias efectivas de tratamiento y gestión del agua residual. Los resultados de nuestra investigación superan ampliamente las recomendaciones del informe, lo que podría contribuir de manera significativa en dicho propósito.

Por otra parte, la variabilidad en las condiciones de los sitios de estudio, enfocados en aguas grises provenientes de entornos educativos, es evidente tanto en cantidad como en calidad, tal como se destacó en párrafos anteriores. Factores como las características geográficas, climáticas, demográficas y las prácticas de higiene



influyen directamente en la composición de estas aguas grises escolares. La adaptación de los sistemas propuestos a estas condiciones específicas se vuelve esencial para garantizar la eficacia y sostenibilidad, valorando así los beneficios ambientales y sanitarios en el ámbito educativo y entornos más amplios.

La evolución tecnológica que mejoran las aguas, como la desalinización; que es quitar la sal del agua, se presenta como una opción comúnmente asociada con la gestión del agua en regiones con escasez hídrica, plantea desafíos ambientales asociados, como el consumo energético y la gestión de la salmuera (Waller et al., 2009). Avances recientes, como las desalinizadoras de Boreal Light, muestran una dirección más sostenible al emplear energía solar y eólica, con costos y emisiones de carbono bajos (Braun, 2023). A nivel global se operan más de 20 mil plantas desalinizadoras, cuyos costos han reducidos, pasando de 5 USD/m<sup>3</sup> en la década de 2000 a 0.5 USD/m<sup>3</sup> en la actualidad (Qadir & Kuepper, 2023). Aunque en Perú solo hay 1 planta funcionando (Vivienda, 2020), la reciente promulgación de la Ley N° 31863 en 2023, resalta la importancia de cerrar la brecha de infraestructura del agua y garantizar el acceso futuro mediante la desalinización en la costa peruana (El Peruano, 2023). A pesar de estos avances, el reúso de aguas grises emerge como una opción aún más sostenible y económicamente viable, especialmente en entornos educativos. Tratada de forma descentralizada y respaldado por una normativa en evolución en Perú, el costo del reúso de aguas grises en el ámbito educativo resulta barata (0.47 USD/m<sup>3</sup> en la década anterior, según el MINAM en 2009), en contraste con el costo del agua desalinizada (0.5 USD/m<sup>3</sup>).

Finalmente, es crucial tener en cuenta que la elección de una única escuela y los sistemas miniaturizados probados, limitan la extrapolación a proyectos más amplios o políticas nacionales. La variabilidad entre regiones y duración limitada del estudio enfatizan la necesidad de validación en diversos contextos. Estas limitaciones subrayan la importancia de futuras investigaciones para obtener una comprensión más completa y aplicable a la reducción de contaminantes en aguas grises. En resumen, nuestros hallazgos respaldan la eficacia en el mejoramiento del agua gris, cumpliendo con la norma nacional (ECA agua) para el reúso en áreas verdes de escuelas públicas, destacando su potencial para contribuir al riego sostenible y al aumento de áreas verdes en entornos educativos y comunidades.

## VI. CONCLUSIONES

De acuerdo con los objetivos establecidos, se concluye que esta investigación ha arrojado luz sobre la eficiencia del tratamiento de aguas grises escolares al ser medida en términos de contaminantes de naturaleza física, química y biológica. Los resultados obtenidos brindan la base sólida para comprender el efecto de los medios filtrantes y sus configuraciones, revelando resultados notables. Después de un análisis exhaustivo y crítico, en comparación con otros estudios, se derivan las siguientes conclusiones:

Para el sistema 1, miniaturizado en columna vertical de 1 metro, con configuración ascendente, compuesto por carbón activado de 0.2-5 mm, fibras de bagazo de caña de azúcar de 2-5 mm y arena de sílice de 0.1-0.5 mm, se lograron las siguientes reducciones: sólidos totales en 414.6 mg/L (18.10%), sólidos suspendidos totales <5.0 mg/L (100%), demanda biológica de oxígeno a 5 días en <2.0 mg/L (100%), demanda química de oxígeno en <5 mg/L (100%), coliformes termotolerantes en <1.8 NMP/100mL (100%) y *escherichia coli* en <1.8 NMP/100mL (100%). No se detectaron huevos de helmintos en ninguna etapa de la investigación. La temperatura del agua gris osciló en 22.7°C y el Potencial de Hidrógeno se mantuvo estable en 7.48. La remoción de contaminantes tuvo una eficiencia del 86.35%.

Para el sistema 2, miniaturizado en columna vertical de 1 metro, con configuración ascendente, compuesto por carbón activado de 0.2-5 mm, aserrín de madera de pino de 1-3 mm y ladrillo triturado (granulado) de restos de construcción de 0.5-1 mm, se lograron las siguientes reducciones: sólidos totales en 425.0 mg/L (16.0%), sólidos suspendidos totales <5.0 mg/L (100%), demanda biológica de oxígeno a 5 días en <2.0 mg/L (100%), demanda química de oxígeno en <5 mg/L (100%), coliformes termotolerantes en 4.5 NMP/100mL (99.9%) y *escherichia coli* en 2 NMP/100mL (99.9%). Nuevamente, no se encontraron huevos de helmintos en ninguna etapa de la investigación. La temperatura del agua gris osciló en 22.6°C, y el Potencial de Hidrógeno se mantuvo estable en 7.22. La eficiencia en la reducción de contaminantes fue del 85.97%.

El uso repetido de carbón activado en ambos sistemas, configurado en la base de las capas, junto con los otros cuatro materiales (bagazo de caña de azúcar, arena

de sílice, aserrín de madera y restos de ladrillo de demolición), cada uno con un espesor de 25 cm, formando una tricapa en cada sistema, logró una consistencia notable en los resultados. Esta consistencia es crucial, ya que demuestra que, en conjunto, estos cinco materiales exhibieron eficacias de tratamiento prometedoras, y, en general, dichos materiales son accesibles a precios asequibles. Además, los sistemas miniaturizadas, permiten una fácil manipulación y desplazamiento.

El tratamiento miniaturizado, operada con aguas grises reales escolares, mediante columnas verticales, tiene la capacidad de soportar una carga bruta de agua gris de 0.268 m<sup>3</sup>/día. Estos sistemas, clasificados como híbridos, presentan una tasa de carga hidráulica (HLR) de 28 L/m<sup>2</sup>-hora y tiempo de retención hidráulica (TRH) de 2 horas. En detalle, el flujo de agua gris asciende a 7.41 L/h para el Sistema 1 y 15.18 L/h para el Sistema 2. Las tasas de filtración obtenidas indican un flujo moderado de 0.41 m/h para el Sistema 1 y 0.83 m/h para el Sistema 2.

El efluente de cada sistema miniaturizado **cumple** con la norma legal (D.S. N° 004-2017-MINAM, Categoría 3, Ítem D1) para el reúso seguro de agua tratada en áreas verdes escolares, según los parámetros biológicos. Al proyectar el riego potencial teórico, se observa que el Sistema 1 podría irrigar aproximadamente 10 m<sup>2</sup>/día, mientras que el Sistema 2 tendría un alcance de alrededor de 21 m<sup>2</sup>/día. Estos cálculos se basan en una jornada laboral promedio de 7 horas diarias en Perú. Además, cabe la opción de ampliar el área de riego mediante métodos eficientes. Los cálculos sugieren el ahorro potencial mensual en términos de agua potable, de 1m<sup>3</sup> para el Sistema 1 y 2m<sup>3</sup> para el Sistema 2. La baja huella espacial neta registrada (201 cm<sup>2</sup>) permiten que hay espacio para expandir los sistemas de tratamiento tipo columnas verticales. Todas estas mejoras pueden contribuir a cumplir con los estándares de áreas verdes recomendados por la OMS, mejorando así el entorno urbano. Esto es crucial dada la escasez de distritos que cumplen con el mínimo de 9 m<sup>2</sup>/habitantes de áreas verdes, en Lima-Perú.

Nótese que al reducir los contaminantes de los parámetros físicos (tanto los sólidos totales como los sólidos suspendidos totales), parámetros químicos (demanda biológica de oxígeno a 5 días y demanda química de oxígeno), y parámetros biológicos (coliformes termotolerantes y *escherichia coli*), logra disminuir las

concentraciones en los vertidos domésticos escolares sobre posibles fuentes naturales. Además, el tratamiento in situ podría disminuir el volumen de aguas residuales que se aportan a los sistemas de tratamiento centralizados, evitando así los desbordamientos frecuentes de alcantarillado en la ciudad y que superan la capacidad de tratamiento, incluyendo el saneamiento en general.

En contraste con los costos, es imperativo resaltar la marcada disparidad económica entre dos enfoques fundamentales: el transporte de agua para el reabastecimiento tanto de la dotación al usuario como la conducción al tratamiento del agua usada, y la implementación in situ de sistemas altamente eficientes, como los miniaturizados. Mientras que el primero implica una carga económica considerable, la adopción de sistemas miniaturizados para el tratamiento in situ y el reúso de aguas grises emerge como una estrategia no solo técnicamente eficaz, sino también económicamente viable para afrontar los desafíos asociados con los recursos hídricos en diversas ubicaciones de Lima y/o del país.

Este estudio no solo ofrece un valioso insight en el ámbito de la Ingeniería Civil, sino que también aporta valor significativamente en la gestión hídrica ante la creciente escasez de agua. Al proponer soluciones eficientes y económicamente factibles en el tratamiento disruptivo de aguas grises, especialmente a nivel local, los sistemas miniaturizados emergen como una estrategia fundamental. La implementación práctica de estos sistemas no solo aborda los desafíos asociados con la gestión del agua, sino que también contribuye proactivamente a preservar de modo sostenido este vital recurso, allanando el camino hacia un futuro más resiliente y equitativo en términos de acceso y distribución de agua de manera innovadora y disruptiva.

Si bien los resultados son prometedores y aportan una base sólida para entender la eficiencia en el mejoramiento de la calidad de las aguas grises, es crucial ejercer cautela al interpretarlos. La limitación de haber realizado la investigación en un único colegio destaca la necesidad de no generalizar los hallazgos a escala más amplia. Se reconoce la importancia de realizar evaluaciones a lo largo del tiempo y la toma de muestras más extensas para validar y fortalecer los resultados antes de su aplicación en contextos más amplios.

## VII. RECOMENDACIONES

A partir del desarrollo de la investigación y los resultados experimentales arribados, se formulan las siguientes recomendaciones:

Se propone la inoculación intencionada de huevos de helmintos, como parte de un experimento con el propósito de evaluar sistemáticamente la eficiencia de remoción en los sistemas miniaturizados probados. Esta estrategia medirá de forma directa la eficiencia de los sistemas para tratar y eliminar específicamente los huevos de helmintos, ofreciendo una perspectiva técnica detallada sobre su eficacia en condiciones controladas. La obtención de estos datos precisos, facilitará la evaluación de la capacidad de los sistemas para abordar contaminantes específicos y proporcionar una base sólida a futuras optimizaciones y ajustes del diseño.

Considerando las particularidades de este estudio, que incluyó la toma de muestras a lo largo de un período extendido (con un horizonte temporal de 5 días entre la muestra cruda y tratada) según el diseño metodológico; se sugiere que en futuros estudios, la toma de muestras de aguas esté en función del flujo de filtración, con el fin de verificar el impacto de manera inmediata de los sistemas miniaturizados.

No se evidencia una caracterización reciente de las aguas grises provenientes de escuelas incluso de entornos domésticos, lo que resulta en un desconocimiento de su composición actual. Este vacío de información se agrava con la aparición de nuevos contaminantes emergentes, que se incorporan a los productos de cuidado personal. La falta de caracterización limita la capacidad de diseñar investigaciones y desarrollar medios filtrantes adaptados a variados contaminantes, incluyendo solventes y productos farmacéuticos, como sugieren Arden y Ma (2018). Es esencial abordar esta brecha de conocimiento para avanzar de manera efectiva en la gestión de aguas grises en entornos educativos, ello incluso permitiría explorar la posibilidad de optimizar el diseño y los medios filtrantes usados para mejorar aún más la eficiencia, mediante una reconfiguración del sistema miniaturizado a fin reducir posibles variabilidades.

Coincidiendo con las evidencias citadas por Morales et al. (2020), que destacan la eficacia de los sistemas híbridos en la eliminación de contaminantes y patógenos

en la depuración de aguas grises, se sugiere la revisión proactiva por parte de las entidades públicas. La reticencia histórica a adoptar estos mecanismos, a pesar de sus beneficios comprobados, puede superarse mediante la consideración temprana de soluciones híbridas en políticas, planes y proyectos mejorando la calidad de vida de los estudiantes al haber más áreas verdes y agua potable dejado de usar. Cabe destacar que estos enfoques son soluciones basadas en la naturaleza, protegen y restauran ecosistemas naturales y conllevan beneficios ambientales, económicos y sociales, aceptadas tanto por la IUCN (2016) como por la Comisión Europea (2015), resultando adecuadas para entornos urbanos, requiriendo bajos insumos y consumos energéticos. La posibilidad de acoplar a los tratamiento de aguas grises, como el uso de celdas electroquímicas para generar electricidad mediante bacterias electroactivas para su auto funcionamiento, destaca aún más su versatilidad y potencial innovador, un tema que merece investigaciones más profundas.

En el contexto académico, resulta decisivo abordar la priorización del reúso inteligente de las aguas grises, tanto en entornos escolares como en ámbitos más amplios, integrándolos a nivel de investigación y en programas de especialización. Esta iniciativa no solo nos capacita para enfrentar desafíos contemporáneos, como la aparición de nuevos contaminantes, sino que también fomenta la implementación de sistemas de tratamiento avanzados, especialmente adaptados a espacios reducidos y compactos. La incorporación de estos temas en la educación superior no solo enriquece el conocimiento local, sino que también forma expertos con un enfoque actualizado, alineándose con las recomendaciones de la FAO (2017, p. 64), acompañando programas de divulgación y capacitación.

Para reforzar la validez interna del estudio, la asignación aleatoria debe considerarse en futuras investigaciones, especialmente en el caso de la única escuela seleccionada, y mejorar la limitación temporal, ya que podría introducir sesgos en los resultados. La inclusión de múltiples fuentes o ubicaciones de aguas grises abordaría la variabilidad geográfica y contextual, proporcionando una visión más completa de cómo los sistemas de tratamiento funcionan en diversos entornos. Aunque la elección de una sola escuela como muestra puede limitar la generalización, es esencial tener en cuenta las particularidades de cada entorno escolar al interpretar los resultados, así como tener un programa de monitoreo

continuo para evaluar a largo plazo la eficiencia del tratamiento y asegurar que se encuentren dentro de los estándares establecidos. Para lo cual se sugiere explorar diversas metodologías, como la de Superficie de Respuesta (RSM) utilizada por Quispe et al. (2023), a fin de abordar la complejidad de las variables y condiciones específicas del estudio.

La separación de aguas grises y aguas residuales domésticas y tratarlas de manera descentralizada resulta en una estrategia eficaz para reducir los costos operativos en las infraestructuras de tratamiento de aguas residuales. Abbas & Ali (2023) respaldan esta idea al destacar que el costo de operar plantas depuradoras de aguas residuales domésticas disminuye significativamente cuando las aguas grises se mantienen separadas. Este enfoque no solo ofrece viabilidad económica, sino que también demuestra ser más eficiente en comparación con sistemas que tratan ambas aguas conjuntamente y se presenta como una opción recomendable para seguir desarrollando en esta dirección los sistemas miniaturizados.

Finalmente, el tratamiento y reúso seguro de aguas grises, con la integración cuidadosa de inteligencia artificial y algoritmos, puede transformar las tecnologías de gestión hídrica de modo inteligente. Además, la adaptación de redes neuronales mediante algoritmos genéticos podría ser una estrategia prometedora, como lo han venido explorando Nazif et al. (2023) en la configuración de medios filtrantes y predecir la reducción de diversos contaminantes. Modelos matemáticos, como el enfoque fractal, permiten prever agotamientos de recursos hídricos con precisión, crucial en lugares de estrés hídrico; dado que las sociedades prosperan al disponer de fuentes de agua, como lo respaldan Batarseh & Kulkarni (2023), también, la mayoría de las lluvias y escorrentías fluviales ocurren en periodos cortos, no siguiendo una disponibilidad lineal ni proporcional a la población (Merino, 2023). La gestión inteligente puede proponer sistemas descentralizados, con cuidadosa selección de medios filtrantes y control de contaminantes emergentes. Estas innovaciones tienen el potencial de transformar positivamente la gestión sostenible del agua, aunque se recomienda un enfoque cauteloso y adaptativo para maximizar sus beneficios. En conjunto, estos avances estarán transformando la gestión sostenible del agua, con potencial para replicar éxitos a escala masiva, el cual debe ser tomado en cuenta en el futuro cercano.

## REFERENCIAS

- ABBAS, E.K., ALI, S.A.K. "Assessment of Biological Trickling System with Different Layers of Material for Grey Water Treatment." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1232 (2023). Iraq. doi:10.1088/1755-1315/1232/1/012018
- ADONADAGA, M. G., ALIMOH, S. C., & AMPADU, B. Effectiveness of some selected natural filter media for on-site small-scale treatment of medium strength greywater. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, Vol. 24 No. 5 (2020), 887-893. Disponible en: 10.4314/jasem.v24i5.25. [Consultado el 10.10.2023]
- ALAM, M. & ALESSI, D. Chapter 4 - Modeling the surface chemistry of biochars. *Biochar from Biomass and Waste*. Elsevier, 2019. Pages 59-72. ISBN 9780128117293. Disponible en: doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00004-2. [Consultado el 13.05.2022].
- ALSULAILI, A., HAMODA, M., RAWA, R. & ALRUKAIBI, D. Treatment and potential reuse of greywater from schools: A pilot study. *Water Sci Technol*, 2017; 75 (9): 2119–2129. Disponible en: doi.org/10.2166/wst.2017.088. [Consultado el 11.06.2022].
- ALTAMIRANO, F., PEÑAHERRERA, C. & ALMESTAR, C. Reuse of gray water, a review of alternatives as an environmental mitigation. *Universidad Peruana Unión*. 2020. Disponible en: http://hdl.handle.net/20.500.12840/4055. [Consultado el 02.07.2022].
- ANA - Autoridad Nacional del Agua. Guía técnica de sistemas municipales de tratamiento de aguas residuales con fines de reúso en riego de áreas verdes de Lima Metropolitana. Ediciones ANA, 2018. Lima, Perú. <https://www.ana.gob.pe/publicaciones/guia-tecnica-para-reuso-municipal-de-aguas-residuales-tratadas-en-el-riego-de-areas>
- ARDEN, S. & MA, X. Constructed wetlands for greywater recycle and reuse: A review. *Sci. Total Environ.*, 630 (2018), pp. 587-599. Disponible en: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.218
- ARNI, Salni; et al. Greywater reuse: An assessment of the Jordanian experience in rural communities. *Water Science & Technology* Vol 85 No 6, 1952. 2022. Disponible en: doi.org/10.2166/wst.2022.080. [Consultado el 25.06.2022].
- AROCUTIPA, Juan. Evaluación y propuesta técnica de una planta de tratamiento de aguas residuales en Massiapo del distrito de Alto Inambari - Sandia. [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional del Altiplano-Puno. 2013. 81 p. [Consultado el 02.07.2022]. Disponible en: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4516>
- AWASTHI, A., GANDHI, K., & RAYALU, S.S. Greywater treatment technologies: A comprehensive review. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2023. pp. 1-30, doi.org/10.1007/s13762-023-04940-7.
- AZABACHE, Y., ROJAS, K., IRIGOÍN, S., RODRIGUEZ, R. y QUISPE, B. Propuesta de un sistema hidráulico de reutilización de las aguas grises que disminuiría el consumo de agua potable en viviendas familiares. *Manglar* 17(2): 169-176, 2020. Disponible en: dx.doi.org/10.17268/manglar.2020.026. [Consultado el 13.05.2022].
- BANI-Melhem, K., BSOUL, A. A., AL-QODAH, Z., AI-ANANZEH, N., AI-KILANI, M. R., AI-SHANNAG, M., & BANI-Salameh, W. (2023). Impact of a Sand Filtration Pretreatment Step on High-Loaded Greywater Treatment by an Electrocoagulation Technique. *Water*, 15(5), 990. Jordan. doi.org/10.3390/w15050990
- BATARSEH, F. & KULKARNI, A. "AI for Water" in *Computer*, vol. 56, no. 3, pp. 109-113, 2023.



doi.org/10.1109/MC.2022.3231142.

BERGER, C. Biochar and activated carbon filters for greywater treatment. Master thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala (2012). Available: <https://stud.epsilon.slu.se/5183/>

BID - Banco Interamericano de Desarrollo. Acceso al agua y COVID-19: un estudio de regresión discontinua para áreas periurbanas de Lima Metropolitana, Perú. [dx.doi.org/10.18235/0004369](https://doi.org/10.18235/0004369)

BOANO, F., CARUSO, A. COSTAMAGNA, E., RIDOLFI, L., FIORE, S., DEMICHELIS, F., GALVÃO, A., PISOEIRO, J., RIZZO, A. & MASI, F. A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. *Science of The Total Environment*, vol. 711, 2020. pp. 134731. ISSN 0048-9697. Disponible en: [doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134731](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134731).

CAMPBELL, D. T., & STANLEY, J. *Experimental and Quasi-Experimental Designs for Research* (1st ed.). Cengage Learning. 1963. Boston: Houghton Mifflin Company.

CANTÓN, Y., SOLÉ-BENET, A. & DOMINGO, F. Temporal and spatial patterns of soil moisture in semiarid badlands of SE Spain. *Journal of Hydrology* 285 (1): 199-214. 2004. Disponible en: [doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.08.018](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.08.018). [Consultado el 13.05.2022].

CHRISPIM, M. & NOLASCO, M. Greywater treatment using a moving bed biofilm reactor at a university campus in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, vol. 142, pp. 290–296. ISSN 0959-6526. 2017. Disponible en: [doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.162](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.162). [Consultado el 13.05.2022].

CRESWELL, John, & CRESWELL, David. *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (6th ed.). Los Angeles: SAGE Publications. 2022. p.320. ISBN 1071817949.

CRITTENDEN, J., TRUSSELL, R., HAND, H., HOWE, K., TCHOBANOGLOUS, J. *MWH's water treatment. Principles and design*. Chap. 11 - Granular filtration. Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons, Inc. MWH Global, Inc. Third edition, 2012. 1906 p.

DALAHMEH, S., LALANDER, P., VINNERÅS, B. & JÖNSSON, H. Quality of greywater treated in biochar filter and risk assessment of gastroenteritis due to household exposure during maintenance and irrigation. *J. Appl. Microbiol.*, 121 (2016), pp. 1427-1443. Available: [doi.org/10.1111/jam.13273](https://doi.org/10.1111/jam.13273).

DEB, D., DEY, R., & BALAS, V. E. *Engineering Research Methodology: A Practical Insight for Researchers* (1st ed.). Springer Singapore. 2019. p. 105-113. ISBN 978-981-13-2946-3

DEEPA, K., VARIER, M., JOHN, A. V., JAYAKEERTI, M., & BALAJI, R. Multi layered soil column analysis for wastewater. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. e-ISSN: 2395-0056. Volume: 06 Issue: 01, 6 (2019), pp. 4867-4871. [www.irjet.net/archives/V6/i3/IRJET-V6i31236.pdf](http://www.irjet.net/archives/V6/i3/IRJET-V6i31236.pdf). [Consultado el 10.10.2023]

DÍAZ, M., DECINTI, A., BLANCO, D., & VASQUEZ, K. Methodology for the reuse of grey water in dwelling located in areas of water stress and extreme hydric stress - Characterization, quality and treatment options for reuse in Chile. *Informes de la construcción*, 73(563), e408. 2021. Disponible en: [doi.org/10.3989/ic.80823](https://doi.org/10.3989/ic.80823). [Consultado el 13.05.2022].

DREXLER, Eric. *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*. Anchor books. NY, 1987. p.320

ENAIME G., BAÇAQUI, A., YAACOUBI A. & LÜBKEN, M. Biochar for wastewater treatment— Conversion technologies and applications. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, no. 10, p. 3492. Disponible en: [doi.org/10.3390/app10103492](https://doi.org/10.3390/app10103492). [Consultado el 13.05.2022].

ENGER, Eldon D. & SMITH, Bradley. *Environmental science: a study of interrelationships*. Chapter

- Environmental Ethics. McGraw-Hill Education, 14 editions. 2016. ISBN 978-0-07-353255-4. 483 p.
- EPA - Environmental Protection Agency. Guidelines for Water Reuse. U.S. Agency for International Development. Washington, DC. 2012. EPA/600/R-12/618. 643 p. Disponible en: [www.epa.gov/waterreuse/guidelines-water-reuse](http://www.epa.gov/waterreuse/guidelines-water-reuse). [Consultado el 13.05.2022].
- EREGNO, F., MOGES M. & HEISTAD, A. Treated greywater reuse for hydroponic lettuce production in a green wall system: quantitative health risk assessment. *Water* 2017, 9(7). 454. Disponible en: [doi.org/10.3390/w9070454](https://doi.org/10.3390/w9070454). [Consultado el 13.05.2022].
- ERIKSSON, E., AUFFARTH, K., HENZE, M. & LEDIN, A. Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, vol. 4, no. 1, 2002. pp. 85–104. ISSN 1462-0758. Disponible en: [doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00064-4). [Consultado el 13.05.2022].
- ESCOBAR, M., TOVAR, L., & ROMERO, J. Design of an expert system for reusing treated wastewater. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26(2), 21-34. 2016. ISSN 0124-8170. Disponible en: [doi.org/10.18359/rcin.1827](https://doi.org/10.18359/rcin.1827). [Consultado el 02.07.2022].
- EUROPEAN COMMISSION. Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities, Brussels. 2015. [Consultado el 13.05.2022]. Disponible en: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/fb117980-d5aa-46df-8edc-af367cddc202>.
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Reutilización de aguas para agricultura en América Latina y el Caribe, Estado, principios y necesidades, Capítulo 1; Contexto de la Reutilización de Aguas Residuales Municipales en América Latina y el Caribe. 2017. ISBN: 978-92-5-309906-1. Disponible en: [www.fao.org/3/a-i7748s.pdf](http://www.fao.org/3/a-i7748s.pdf).
- FERNÁNDEZ, J., SIMMONDS, L. & BARAHONA, E. Interpretation of soil moisture profiles on gravel rich soils derived from soil dielectric measurements. *Sustainable Use and Management of Soils -Arid and Semiarid Regions-*, *Advances in GeoEcology* 36, 241-250. 2005.
- FEYNMAN, R. P. There's plenty of room at the bottom; presented as a talk in 1959, published in *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 1, N° 1, pp. 60-66, January 1992. [doi.org/10.1109/84.128057](https://doi.org/10.1109/84.128057).
- FILALI, H., BARSAN, N., SOUGUIR, D., NEDEFF, V., TOMOZEI, C. & HACHICHA, M. Greywater as an Alternative Solution for a Sustainable Management of Water Resources—A Review. *Sustainability* [online]. 2022. Vol. 14, no. 2, p. 665. DOI 10.3390/su14020665. Disponible en: [dx.doi.org/10.3390/su14020665](https://dx.doi.org/10.3390/su14020665). [Consultado el 25.06.2022].
- FOWDAR, H., et al. Designing living walls for greywater treatment. *Water Res.* (2017), pp. 218-232. ISSN 00431354. Disponible en: [doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.018](https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.018). [Consultado el 13.05.2022].
- GAFFNEY, Jeffrey & MARLEY, Nancy. *Chemistry of environmental systems: Fundamental principles and analytical methods*. Chapter Future Energy Sources and Sustainability. Wiley, First edition. 2020. ISBN 9781119313403. 452 p.
- GALANAKIS, C. & AGRAFIOTI, E. *Sustainable water and wastewater processing*. Chapter 2: Graywater treatment and reuse. 1st Edition - May 8, 2019, Elsevier Inc. Amsterdam, Netherlands. eBook ISBN: 9780128161715
- GALEANO, K. y ALBORNOZ, D. Eficiencia de los humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFS) en la remoción de contaminantes microbiológicos de aguas residuales domésticas: una revisión. [Investigación de pregrado]. Universidad El Bosque. Bogotá, 2019. 66 p. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12495/2134>. [Consultado el 02.07.2022].

GANESH, S., et al. Decentralized treatment and recycling of greywater from a school in rural India. *Journal of Water Process Engineering*, Volume 38, 2020, 101695. ISSN 2214-7144. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101695>. [Consultado el 13.05.2022].

GARDNER, W. Water content: Methods of soil analysis Part 1. Physical and mineralogical methods. Madison, Wisconsin (USA). American Society of Agronomy, Second edition. *Agronomy* 9 (1), 493-541. 1986. Ed. A. Klute.

GHAITIDAK, D. & YADAV, K. Characteristics and treatment of greywater—a review. *Environ Sci Pollut Res* 20, 2795–2809 (2013). Disponible en: [doi.org/10.1007/s11356-013-1533-0](https://doi.org/10.1007/s11356-013-1533-0)

GILBERT, H. D. Miniaturization. New York: Reinhold; First Edition. 1961. p.306. ISBN: 027891912X

GLEICK, P. H., COHEN, M., COOLEY, H., DONNELLY, K., FULTON, J., HA, M. L., MORRISON, J., PHURISAMBAN, R., RIPPMAN, H., & WOODWARD, S. *The World's Water*. CreateSpace Independent Publishing Platform. 2018. ISBN-13: 978-1983865886. p.260.

GÓMEZ, N. y VELÁZQUEZ, G. Asociación entre los espacios verdes públicos y la calidad de vida en el municipio de Santa Fe, Argentina. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 27 (1): 164-179. 2018. Disponible en: DOI 10.15446/rcdg.v27n1.58740.

GORGICH, M., MATA T., MARTINS, A., CAETANO N. & FORMIGO N. Application of domestic greywater for irrigating agricultural products: A brief study. *Energy Reports*, Vol. 6, S-1, 2020, pp 811-817. ISSN 2352-4847. Available: [doi.org/10.1016/j.egyr.2019.11.007](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.11.007). [Accessed 02.07.2022].

GROSS, A., MAIMON, A., ALFIYA, Y., & FRIEDLER, E. *Greywater Reuse*. Boca Raton, FL. CRC Press. First edition. 2015. 301 p. ISBN 9781482255041.

HADAD, E., FERSHTMAN, E., GAL, Z., SILBERMAN, I. & ORON, G. Simulation of dual systems of greywater reuse in high-rise buildings for energy recovery and potential use in irrigation. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 180, pp. 106134, 2022. ISSN 0921-3449. Disponible en: [doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106134](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106134). [Consultado el 11.06.2022].

HERNÁNDEZ-SAMPIERI, R., y MENDOZA Torres, C.P. *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (pp. 37-310). McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C. V. Primera edición, 2018. México. ISBN: 978-1-4562-6096-5.

JUNG, J., FOWDAR, H., HENRY, R., DELETIĆ, A., MCCARTHY, D. Biofilters as effective pathogen barriers for greywater reuse. *Ecological Engineering*. Volume 138, 2019, Pages 79-87, ISSN 0925-8574. Disponible en: [doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.020](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.020). [Consultado el 13.05.2022].

KADENGE, Nyasha. Design and Application of Meso-scale Greywater Treatment System. Botswana International University of Science and Technology, Palapye. 2019. [Consultado el 10.10.2023]. [doi.org/10.13140/RG.2.2.20186.36802](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20186.36802).

KOKKINOS, Petros, et al. Wastewater and sludge reuse: selected case studies across the globe. *Desalination and Water Treatment*, vol. 250, 2022, pp. 65–79. doi: 10.5004/dwt.2022.28183

LALLEY, J., ZETTERHOLM, S. G., WAISNER, S., MARTINEZ-Guerra, E., WAMSLEY, M., GURTOWSKI, L., WADE, R., PRANGER, S., & GRIGGS, C. Source separated graywater: Chemistry, unit operations, and criteria towards re-use. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103736 (2023). ISSN: 22147144. USA. [doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103736](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103736)

LEONG, J., OH, K., POH, P. & CHONG, M. Prospects of hybrid rainwater-greywater decentralised system for water recycling and reuse: A review. *J. Clean. Prod.* 2017, 142, 3014–3027. Disponible

en: doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.167. [Consultado el 13.05.2022].

LIU, S., KONSTANTOPOULOU, F., GIKAS, P. & PAPAGEORGIOU, L.G. A mixed integer optimisation approach for integrated water resources management. *Computers and Chemical Engineering*, 35 (5) 2011. pp.858-875. doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.01.032

LÓPEZ, C., BUITRÓN, G., GARCÍA, H. & CERVANTES, F. *Biological wastewater treatment: Principles, modeling and design*. Reino Unido. IWA publishing, Vol.16. 2017. 574 pp. eBook ISBN: 9781780409146. Disponible en: doi.org/10.2166/9781780409146.

LOUX, J., WINER-SKONOVD, R. & GELLERMAN, E. Evaluation of combined rainwater and greywater systems for multiple development types in Mediterranean climates. *J. Water Sustain.* 2012, 2, 55–77. [Google Scholar]

MADUEÑO, L., MEZA, M. y RASHTA, C. Tratamiento y reúso de aguas grises mediante un filtro lento de arena. *TECNIA*, 28(1). 2018. Disponible en: doi.org/10.21754/tecnia.v28i1.190.

MARECOS do Monte, H. y ALBUQUERQUE, A. *Reutilização de Águas Residuais*. Lisboa, Portugal. ERSAR, Guía Técnico Nº 14. 2010. 339 p. ISBN: 978-989-8360-01-4. [Consultado el 13.05.2022].

MASI, F., RIZZO, A. & REGELSBERGER, M. The role of constructed wetlands in a new circular economy, resource oriented, and ecosystem services paradigm. *Journal of Environmental Management*, vol. 216, pp. 275–284, 2018. ISSN 0301-4797. Disponible en: /doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.086. [Consultado el 13.05.2022].

MELÉNDEZ, J. y LEMOS, M. Reutilización de aguas grises domésticas para el uso eficiente del recurso hídrico: Aceptación social y análisis financiero. Un caso en Portugal. *Rev. UIS Ingenierías*, 2019, vol. 18, no. 1, pp. 223–236, 2019. Disponible en: doi.org/10.18273/revuin.v18n1-2019020.

MIHELICIC, James y ZIMMERMAN, Julie. *Ingeniería ambiental: fundamentos, sustentabilidad y diseño*. México. 1ra. edición. Alfaomega, S.A. de C.V., 2012. ISBN: 978-607-707-317-8. 261 p.

MODINI, L., PIZARRO, A., ZERBATTO, M. Sustainable treatment of urban wastewater using a constructed wetland coupled with a microbial fuel cell. *Ingeniería del agua*, 27(4), 283-293. 2023. doi.org/10.4995/la.2023.20318.

MOELLER, Gabriela. *Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de lodos activados*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Séptima edición, 2009. 362 p. ISBN 968-5536-71-6.

Morales Rojas, E., Rascón, J., Quiñones Huatangari, L., Chavez Quintana, S., Oliva, M., & Milla Pino, M. E. Mixed greywater treatment for irrigation uses. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 2020. ISSN 1980-993X. DOI:10.4136/ambi-agua.2599

MOSCOSO, Julio. *Estudio de opciones de tratamiento y reúso de aguas residuales en Lima metropolitana*. Universidad de Stuttgart. Lima, 2011. 90 pp. Disponible en: www.lima-water.de/documents/jmoscoso\_informe.pdf. [Consultado el 13.05.2022].

MUÑOZ, Carlos. *Metodología de investigación*. Benito Juárez, México. Primera edición, Editorial Oxford University Press. México. ISBN 978-607-426-525-5. 2015. 464 pp.

ÑAUPAS, H., VALDIVIA, M., PALACIOS, J., & ROMERO, H. *Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis (5a ed.)*. Ediciones de la U. Bogotá, Colombia. 2018. ISBN 978-958-762-876-0. 560 p

NAVARRO, Gines y NAVARRO, Simón. *Química agrícola: Química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas*. Mundiprensa, Edición 2013. ISBN 13: 9788484766568. 508 p.

NAZIF, S., NAEENI, S.T.O., AKBARI, Z., Fateri, S., & MOALLEMI, M.A. Development of data-driven models for the optimal design of multilayer sand filters for on-site treatment of greywater. *Journal of Environmental Management*, 348, 119241 (2023). Iran. doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119241

NOUTSOPOULOS, C., ANDREADAKIS, A., KOURIS, N., CHARCHOUSI, D., MENDRINO, P., GALANI, A., MANTZIARAS, I. & KOUMAKI, E. Greywater characterization and loadings – Physicochemical treatment to promote onsite reuse. *Journal of Environmental Management*, vol. 216, 2018. pp. 337–346. ISSN 0301-4797. Disponible en: doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.094.

ODEH, Al-Jayyousi. Greywater reuse: Towards sustainable water management. *Desalination*, Volume 156, Issues 1–3, 2003. pp. 181-192. ISSN 0011-9164. Disponible en: doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00340-0. [Consultado el 11.06.2022].

ONU. Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. 42° período de sesiones - Asamblea General de Naciones Unidas. Presidente de comisión: Gro Harlem Brundtland. 1987. 416 p. Disponible en: www.un.org/es/ga/president/65/issues/sustdev.shtml.

ONU. Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos [en línea]. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Organización de las Naciones Unidas, 2015. Disponible en: www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/.

OTENG, M., ACHEAMPONG, M., DEVRIES, N. Greywater characteristics, treatment systems, reuse strategies and user perception—A review. (2018) *Water, Air, and Soil Pollution*, 229 (8), art. no. 255. Disponible en: DOI 10.1007/s11270-018-3909-8. [Consultado el 13.05.2022].

PACHECO, Igma. Sistemas de saneamiento básico sustentable. Tipos, técnicas y ejemplos [en línea]. Urbanismo, OVACEN. Disponible en: https://ovacen.com/saneamiento-sustentable-concepto-experiencia-implementada/. [Consultado el 13.05.2022].

PARJANE, S. B., & SANE, M. G. Performance of grey water treatment plant by economical way for Indian rural development. *International Journal of ChemTech Research*, 3(4), 1808-1815. (2011). https://sphinxsai.com/Vol.3No.4/chem/pdf/CT=13(1808-1815)OD11.pdf. [Consultado el 10.10.2023]

PEARCE, Graeme. Introduction to membranes: Fouling control. *Filtr. Sep.* 2007, 44, 30–32. Disponible en: doi.org/10.1016/S0015-1882(07)70183-0. [Consultado el 13.05.2022].

PORTA, Jaume; LÓPEZ-ACEVEDO Marta y ROQUERO, Carlos. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Tercera edición, Madrid: Mundi-Prensa, 2003.

PRODANOVIC, V., HATT, B., MCCARTHY, D., ZHANG, K. & DELETIC, A. Green walls for greywater reuse: Understanding the role of media on pollutant removal. *Ecological Engineering*, vol. 102, 2017. pp. 625–635. ISSN 0925-8574. Disponible en: doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.045.

QUISPE, Andrea y CASIMIRO, Williams. Evaluación de la eficiencia entre dos sistemas de biofiltros para el tratamiento de las aguas residuales domesticas de la localidad de Carapongo, Lurigancho-Chosica [en línea]. Vol. 7 Núm. 1 (2019): Cátedra Villarreal. Disponible en: doi.org/10.24039/cv201971325. [Consultado el 09.10.2023].

QUISPE, J. I. BAUTISTA, L. C. CAMPOS, O. Masek, & Bogush, A. "Optimisation of biochar filter for handwashing wastewater treatment and potential treated water reuse for handwashing" *Journal of Water Process Engineering*, vol. 54, p. 104001. 2023. UK. doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104001

QUISPE, J., CAMPOS, L., MAŠEK, O. & BOGUSH, A. Use of biochar-based column filtration systems for greywater treatment: A systematic literature review. *Journal of Water Process Engineering* [en línea], vol. 48, 2022. pp. 102908. ISSN 2214-7144. Disponible en:

[doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102908](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102908). [Consultado el 11.06.2022].

RAMÍREZ, V., GARRIDO, A., CAVIEDES, L. y MUNARES, A. Evaluación de la eficiencia de biofiltros artesanales para la remoción de la carga contaminante en aguas grises. Editorial Instituto Antioqueño de Investigación. Desarrollo e Innovación en Ingeniería. Vol. II, Ed.6, 2021. Colombia. ISBN: 978-958-53278-6-3. [doi.org/10.5281/zenodo.5513920](https://doi.org/10.5281/zenodo.5513920). [Consultado el 09.10.2023]

RÖBBEL, Nathalie. Green spaces: An invaluable resource for delivering sustainable urban health. un chronicle - united nations. Disponible en: [www.un.org/en/chronicle/article/green-spaces-invaluable-resource-delivering-sustainable-urban-health](http://www.un.org/en/chronicle/article/green-spaces-invaluable-resource-delivering-sustainable-urban-health). [Consultado el 13.05.2022].

RODRÍGUEZ, C., CARRASCO, F., SÁNCHEZ, R., SERRANO, J. & LEIVA, E. Performance and treatment assessment of a pilot-scale decentralized greywater reuse system in rural schools of north-central Chile. *Ecological Engineering*, 2022. 174,106460. ISSN: 09258574. Disponible en: [doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106460](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106460). [Consultado el 11.06.2022].

RODRÍGUEZ, C., SÁNCHEZ, R., LOZANO-PARRA, J., REBOLLEDO, N., SCHNEIDER, N., SERRANO, J., LEIVA, E. Water balance assessment in schools and households of rural areas of coquimbo region, north-central Chile: Potential for greywater reuse. Volume 12, Issue 10, Pages 1 – 19. 2020. Article number 2915. ISSN: 20734441. Disponible en: [doi.org/10.3390/w12102915](https://doi.org/10.3390/w12102915).

ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño. Colombia. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Tercera reimpresión. 2010. ISBN 958-8060-13-3. 1233 p.

ROSENTHAL, Robert, & RALPH L. Rosnow. *Essentials of Behavioral Research: Methods and Data Analysis*. Third Edition. 2008. New York: McGraw-Hill.

SABBAN, Albert. *Wearable Communication Systems and Antennas: Design, efficiency, and miniaturization techniques*. IOP Publishing. 2022. ISBN: 978-0-7503-5220-8.

SAMI M., HEDSTRÖM A., KVARNSTRÖM E., MCCARTHY D.T. & HERRMANN I. "Greywater treatment in a green wall using different filter materials and hydraulic loading rates." *Journal of Environmental Management*, Volume 340 (2023). Suecia. DOI: [10.1016/j.jenvman.2023.117998](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117998)

SHAIKH, I. y AHAMMED, M. Effect of operating mode on the performance of sand filters treating greywater. *Environ Sci Pollut Res* 28, 38209–38223 (2021). India. [doi.org/10.1007/s11356-021-13413-8](https://doi.org/10.1007/s11356-021-13413-8)

SIEBE, C., CHAPELA-LARA, M., CAYETANO, M., PRADO, B. & SIEMENS J. Effects of 100 Years of Soil-Aquifer-Treatment of Mexico City's Wastewater in the Mezquital Valley. In *Safe Use of Wastewater for Agriculture*. Institute for Integrated Management of Material Flows and of Resources (FLORES), United Nations University. Dresden, Germany. 2016

SOLER, C., CRESPI, R., SOLER, E., & PUGLIESE, M. Performance of free water surface flow constructed wetland with floating aquatic macrophytes. *Ingeniería del Agua*, 22(2), 69–78. 2018. Disponible en: [doi.org/10.4995/ia.2018.8596](https://doi.org/10.4995/ia.2018.8596). [Consultado el 02.07.2022].

STANDARD methods for the examination of water and wastewater. 24th ed. Washington DC: APHA Press; 2023. American Water Works Association, Water Environment Federation. Lipps WC, Braun-Howland EB, Baxter TE, eds. Disponible en: [www.standardmethods.org/](http://www.standardmethods.org/).

TAREQ, R., AKTER, N., AZAM, S. Chapter 10 - Biochars and Biochar Composites: Low-cost Adsorbents for Environmental Remediation *Biochar from Biomass and Waste* (2019), pp. 169-209, Disponible en: [doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00010-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00010-8). [Consultado el 13.05.2022].

- TELLA, G. y POTOCKO, A. Espacios verdes públicos: Una delicada articulación entre demanda y posibilidades efectivas. *Revista Mercado y Empresas para Servicios Públicos* 55:40-55. 2009.
- TORRES, Felipe. Evaluación de parámetros en la filtración rápida como tratamiento de agua gris doméstica. [Tesis de grado]. Universidad de Los Andes. Bogotá, 2017. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/13975>. [Consultado el 09.07.2022].
- TUSIIME, A., SOLIHU, H., SEKASI, J., MUTANDA, H.E. Performance of lab-scale filtration system for grey water treatment and reuse. *Environ. Challenges*, 9, 100641-100653. 2022. Ethiopia. [doi.org/10.1016/j.envc.2022.100641](https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100641).
- UN Water. The United Nations World Water Development Report 2023: partnerships and cooperation for water. ISBN 9789231005763. <https://digitallibrary.un.org/record/4007797?ln=en>.
- VALDERRAMA, Santiago. Pasos para elaborar proyectos de investigación científica: cuantitativa, cualitativa y mixta. 2da. edición. Editorial San Marcos, 2019. ISBN 978-612-302-878-7. 495 pp.
- VESILIND, A., MORGAN, S. y HEINE, L. Introducción a la ingeniería ambiental. México, D.F. Cengage Learning Editores, S.A. de C.V. Tercera edición. 2013. ISBN 13: 9786074819175. 547 p.
- VISBAL, L., & ROZO, A. Diseño de un sistema de filtración continua arena -carbón activado como herramienta didáctica en el laboratorio de operaciones unitarias. Universidad de San Buenaventura. 2018. Disponible en: [bibliotecadigital.usb.edu.co:8080/](http://bibliotecadigital.usb.edu.co:8080/). [Consultado el 13.05.2022].
- WHO. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 2 - Wastewater use in agriculture. Volume 4 - Excreta and greywater use in agriculture. World Health Organization. Switzerland 2006. 3rd ed. ISBN 92-4-154683-2. [www.who.int/publications/i/item/9241546859](http://www.who.int/publications/i/item/9241546859).
- WHO. Quantitative microbial risk assessment: Application for water safety management. World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2016; ISBN 978-92-4-156537-0.
- WHO. Sanitation safety planning: Manual for safe use and disposal of wastewater, greywater and excreta. World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2015; ISBN 978-92-4-154924-0.
- WU, Bing. Membrane-based technology in greywater reclamation: A review. *Science of The Total Environment*, vol. 2019. 656, pp. 184–200. ISSN 0048-9697. Disponible en: [doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.347](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.347). [Consultado el 13.05.2022].
- XIA, Y., & WHITESIDES, G. M. (1998). Soft Lithography. *Annual Review of Materials Science*, 28 (1), 153–184. [doi:10.1146/annurev.matsci.28.1.153](https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.28.1.153).
- YAASHIKAA, P., KUMAR P., VARJANI S., SARAVANAN A. A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnol. Rep.*, 28 (2020), Article e00570. Disponible en: [doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570](https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570).
- ZHANG, K., BARRON, N., ZINGER, Y., HATT, B., PRODANOVIC, V. & DELETIC, A. Pollutant removal performance of field scale dual-mode biofilters for stormwater, greywater, and groundwater treatment. *Ecological Engineering*, vol. 163, 2021. pp. 106-192. ISSN 0925-8574. Disponible en: [doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106192](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106192). [Consultado el 13.05.2022].
- ZHENG, C., PETROSKY, M., FISHER, E., HUDSON, M., Huang, Q., & NETTLESHIP, I. The effect of sawdust on the pore structure and properties of low-cost ceramic water filter materials. *Ceramics International*. Elsevier, 2023. Disponible en: [doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.09.160](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.09.160).
- ZOU, Patrick & XU, Xiaoxiao. *Research Methodology and Strategy: Theory and Practice* (1st ed.). Wiley-Blackwell. 2023. ISBN 9781394190225.

## ANEXOS

### Anexo 1: Tabla de operacionalización de variables y matriz de consistencias

Tabla 13. Tabla de operacionalización de variables

Título: Evaluación de dos sistemas de tratamiento de aguas grises para el reúso en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Variable independiente (X): Sistemas de tratamiento de aguas grises	Los sistemas de tratamiento de aguas grises son tecnologías diseñadas para purificar estas aguas, eliminando impurezas, contaminantes y microorganismos mediante procesos como filtración, purificación y desinfección (Visbal & Rozo, 2018; Galeano & Albornoz, 2019). La elección del sistema de tratamiento es fundamental y afecta la calidad del agua tratada y los costos (Boano et al., 2020)	Sistema de tratamiento de aguas grises que utiliza carbón activado, bagazo de caña y aserrín de madera como medios filtrantes.  Sistema de tratamiento de aguas grises que utiliza carbón activado, arena y ladrillo triturado de restos de construcción como medios filtrantes.	Carbón activado, bagazo de caña y arena	Tipo de material filtrante	Ordinal
			Carbón activado, aserrín de madera y ladrillo triturado de restos de construcción	Tasa de carga hidráulica	Cuantitativa de razón
			Eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas grises	Tiempo de retención hidráulica	Nominal
				Grado de cumplimiento de la normatividad de parámetros de calidad del agua (categoría de riego)	
Variable dependiente (Y): Reúso del agua gris tratada	El agua gris tratada permite reutilizarlas en el riego de áreas verdes (Anaya et al., 2022), aumentando 3 veces las áreas verdes en la ciudad promoviendo la sostenibilidad (Moscoso, 2011). Las aguas tratadas deben cumplir con normativas de reutilización (Filali et al., 2022) y tienen diversas aplicaciones (Díaz et al., 2021). El reúso es motivado por la escasez de agua potable (Leiva et al., 2020). Las regulaciones varían según la ubicación (EPA, 2012; WHO, 2016).	Se evalúa el uso del agua gris tratada, cumpliendo parámetros específicos de la norma de calidad del agua, destinado en el riego de áreas verdes dentro de escuelas públicas.	Parámetros físicos	Temperatura Sólidos totales – ST Sólidos suspendidos totales – SST	Cuantitativa de razón (continuas)
			Parámetros químicos	pH Demanda biológica de oxígeno a 5 días – DBO <sub>5</sub> Demanda química de oxígeno - DQO	Cuantitativa de razón (continuas)
			Parámetros biológicos	Coliformes termotolerantes Huevos de helmintos <i>Escherichia coli</i>	Cuantitativa de razón (discretas)

Fuente: Preparado por el investigador.



Tabla 14. Matriz de consistencia

Título: Evaluación de dos sistemas de tratamiento de aguas grises para el reúso en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Independiente	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos
¿Cómo se comparan en eficiencia los dos sistemas de tratamiento de aguas grises en el cumplimiento de la norma nacional para el reúso en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023?	Evaluar la eficiencia de los dos sistemas de tratamiento de aguas grises en el cumplimiento de la norma nacional para el reúso en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023.	Existe diferencia en la eficiencia de los dos sistemas de tratamiento de aguas grises en el cumplimiento de la norma nacional para el reúso en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023.	Variable independiente (X): Sistemas de tratamiento de aguas grises	Arena de sílice de 0.1-0.5 mm Fibras de bagazo de caña de azúcar, picado de 2-5 mm Carbón activado de 0.2-5 mm	Tipo de material filtrante Tasa de carga hidráulica	Formulario de observación sistemática o Bitácora de campo
				Ladrillo triturado de restos de construcción de 0.5-1 mm Aserrín de madera de pino de 1-3 mm Carbón activado de 0.2-5 mm	Tiempo de retención hidráulica	
				Eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas grises	Grado de cumplimiento normativo (riego de áreas verdes)	Norma legal
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Dependiente	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos
¿Cómo varían los parámetros físicos de la calidad del agua tratada para cada uno de los sistemas propuestos para el tratamiento de aguas grises?	Determinar los parámetros físicos de la calidad del agua tratada para cada uno de los sistemas propuestos para el tratamiento de aguas grises.	Existen diferencias en los parámetros físicos de la calidad del agua tratada para cada uno de los sistemas propuestos para el tratamiento de aguas grises.	Variable dependiente (Y): Reúso del agua gris tratada	Parámetros físicos	Temperatura Sólidos totales Sólidos suspendidos totales	Ficha de registro de información  Informe de ensayo analítico
¿Cómo varían los parámetros químicos de la calidad del agua tratada para cada uno de los sistemas propuestos para el tratamiento de aguas grises?	Determinar los parámetros químicos de la calidad del agua tratada para cada uno de los sistemas propuestos para el tratamiento de aguas grises.	Existen diferencias en los parámetros químicos de la calidad del agua tratada para cada uno de los sistemas propuestos para el tratamiento de aguas grises.		Parámetros químicos	pH Demanda biológica de oxígeno a 5 días Demanda química de oxígeno	
¿Cómo varían los parámetros biológicos de la calidad del agua tratada para cada uno de los sistemas propuestos para el tratamiento de aguas grises?	Determinar los parámetros biológicos de la calidad del agua tratada para cada uno de los sistemas propuestos para el tratamiento de aguas grises.	Existen diferencias en los parámetros biológicos de la calidad del agua tratada para cada uno de los sistemas propuestos para el tratamiento de aguas grises.		Parámetros biológicos	Coliformes termotolerantes Huevos de helmintos <i>Escherichia coli</i>	

Fuente: Preparado por el investigador.

## Anexo 2: Instrumentos de recolección de datos utilizados

*Ficha de registro de información:*  
**MUESTREO Y ANÁLISIS DE AGUAS GRISES**

### CARACTERIZACIÓN DEL PUNTO DE MUESTREO EN LA INVESTIGACIÓN

Tesis:			
Investigador:			
Universidad:			
Carrera profesional:			
Entidad educativa	Distrito	Provincia	Departamento
<b>Identificación de puntos para recojo de porciones (especímenes) de agua</b>			
<b>Ubicación de aguas grises crudas escolares</b>			
Punto de influente / afluyente			
Código			
Coordenadas U.T.M. (WGS84)			
Zona	Norte	Este	Altitud
<b>Ubicación de aguas grises tratadas del sistema evaluado</b>			
Punto de efluente / descarga			
Código			
Coordenadas U.T.M. (WGS84)			
Zona	Norte	Este	Altitud

### REQUISITOS PARA LA TOMA DE ESPECÍMENES DE AGUAS GRISES

Parámetro	Tipo de envase	Tamaño de muestra	Preservación y condiciones de almacenamiento (*)	Color de etiqueta (**)	Tiempo máximo de perecibilidad	Requiere acreditación
<b>FISICOS</b>						
Temperatura	Plástico ó Vidrio	250 mL	Analizar inmediatamente	Celeste	15 minutos	NA
Sólidos totales	Plástico ó Vidrio	500 mL	Refrigerar < 6°C	Celeste	7 días	INACAL
Sólidos suspendidos totales	Plástico ó Vidrio	1 L <sup>(a)</sup>	Refrigerar < 6°C	Celeste	7 días	INACAL
<b>QUÍMICOS</b>						
Potencial de Hidrógeno	Plástico ó Vidrio	100 mL	Analizar inmediatamente	Celeste	15 minutos	NA
Demanda biológica oxígeno a 5 días	Plástico ó Vidrio	1 L	Llenar el frasco completamente, sin dejar burbujas de aire. Refrigerar ≤ 6°C	Celeste	48 horas	INACAL
Demanda química de oxígeno	Plástico ó Vidrio	100 mL	Adicione 10 gotas de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1:1, pH < 2, Refrigerar ≤ 6°C	Naranja	28 días	INACAL
<b>BIOLÓGICOS</b>						
Huevos de helmintos	Plástico	1 L <sup>(a)</sup>	Refrigerar de 2 a < 8°C, sin congelar.	Celeste	48 horas	IAS
Coliformes termotolerantes	Plástico ó Vidrio esterilizado	250 mL Para agrupar <sup>(b)</sup>	Refrigerar de 2 a < 8°C, sin congelar. Dejar al menos 2.5 cm de en el espacio libre o de cabeza.	Celeste	24h	INACAL
<i>Escherichia coli</i>	Plástico ó Vidrio esterilizado	múltiples ensayos usar 500 mL			24h	INACAL

**Acotaciones:**

(\*) Si el análisis se inicia en un plazo de 2 horas a partir de la recolección de la muestra, no es necesario refrigerarla. En caso de que el análisis no pueda comenzar dentro de las 2 horas posteriores a la recolección de la muestra, se requiere la refrigeración adecuada. Si se añade un preservante ácido o base a la muestra, se debe verificar el pH en el campo.

(\*\*) Basada en la referencia 'Procedimiento de Preparación de Materiales', se ha establecido de esta manera para una mejor identificación en virtud de los materiales proporcionados por ALAB (laboratorio de ensayo), según los preservantes adicionados a las porciones de agua capturadas en el muestreo.

(a) Cuando el número de muestras sea igual o inferior a 20, se procederá a duplicar una de las muestras. Este procedimiento será aplicado en casos en los que el servicio de muestreo incluye una subsiguiente realización de ensayos en el laboratorio.

(b) Es importante destacar que estos parámetros de ensayo son combinables si es necesario. Cuando los ensayos se requieren agrupar, el tiempo de perecibilidad será del parámetro con menor tiempo establecido.

Fuente: Preparado por el investigador en base a requisitos de ensayos y protocolos de recojo de agua residuales domésticas.

### DATOS PARA ETIQUETADO DE MUESTRAS

Código para registro de Laboratorio:
Punto de muestreo (Afluente o descarga):
Código del punto de muestreo:
Fecha y hora:
Parámetro:
Preservación con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :
Tipo de agua (matriz):
Muestreado por:

Código para registro de Laboratorio:
Punto de muestreo (Afluente o descarga):
Código del punto de muestreo:
Fecha y hora:
Parámetro:
Preservación con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :
Tipo de agua (matriz):
Muestreado por:

### PROTOCOLO DE CUSTODIA DE MUESTRAS DE AGUA GRISES

Tesis:
Medio de transporte:

Punto de muestreo	Código de Lab.	Fecha	Hora	Matriz	Coordenada	Frascos	Parámetros en evaluación								Preservación
							T°C	ST	SST	pH	DBQ5	DQO	E.C	C.T	

**Acotaciones:**  
 Parámetros físicos: T°C: Temperatura. ST: Sólidos totales [mg/L]. SST: Sólidos suspendidos totales [mg/L].  
 Parámetros químicos: pH: Potencial de Hidrógeno. DBO5: Demanda biológica de oxígeno [mg/L]. DQO: Demanda química de oxígeno [mg/L].  
 Parámetros biológicos: C.T.: Coliformes Termotolerantes [NMP/100 mL]. E.C.: Escherichia coli [NMP/100 mL]. H.E.: Huevos de Helminths [Huevo/L].

Investigador responsable		Operador del muestreo			Recepción en laboratorio		
Nombre y apellidos	Firma	Nombre y apellidos	Firma	Nombre y apellidos	Firma	Fecha y hora	

### REPORTE DE RESULTADOS ANALÍTICOS

Tesis:
Investigador:
Laboratorio acreditado:

Parámetro ensayado	Norma de referencia	Tipo de muestra	Código	Coordenada	Unidad	LDM	LCM	Resultado

**Nota:**  
 L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.  
 L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

Jefe de laboratorio:	Firma:	
Supervisor de laboratorio:	Firma:	
Fecha:		



## VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO

### 1) Información general del experto

Apellido y Nombres:

Registro del Colegio de Ingenieros – CIP:


Nombre del Instrumento para evaluar:

Ficha de registro de información y bitácora de campo


Autor del Instrumento: Jhonny Mejía Isidro

### 2) Aspectos de validación

Categoría	Indicador	Indicador	Juez 1	Juez 2	Juez 3
CLARIDAD (Conexión lógica con la dimensión o indicador que se está evaluando)	1	No claro			
	2	Requiere modificaciones significativas			
	3	Requiere modificaciones específicas			
	4	Claro y adecuado en semántica y sintaxis	X	X	X
COHERENCIA (De fácil comprensión, su estructura y significado son apropiados)	1	Sin relación lógica			
	2	Relación tangencial/lejana			
	3	Relación moderada			
	4	Relación directa	X	X	X
RELEVANCIA (El ítem es crucial o significativo, debe ser incorporado)	1	Puede eliminarse sin afectar la medición			
	2	Alguna relevancia, pero posiblemente redundante			
	3	Relativamente importante			
	4	Muy relevante y necesario	X	X	X
<b>Escalas</b>			<b>Puntuación:</b>		
			12	12	12
De 3-5: No válido, reformular.			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De 6-9: Validar, mejorar.			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
De 10-12: Válido, aplicar.			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

  
 -----  
**JOSE ANTONIO BADA CÁSTILLO**  
 INGENIERO CIVIL  
 Reg. CIP N° 76873  
 Juez 1  
 Octubre-2023

  
 -----  
**FRANKLIN CIRILO**  
 CUBA HUAMANI  
 INGENIERO CIVIL  
 Reg. CIP N° 168764  
 Juez 2  
 Octubre-2023

  
 -----  
**PERCY RAUL BECERRA CUBAS**  
 Ingeniero Civil  
 Reg. CIP N° 175010  
 Juez 3  
 Octubre-2023

**Formulario de donación/recepción de material filtrante para  
Investigación Científica**

**Donante:**

Nombre de la entidad : \_\_\_\_\_  
o persona natural : \_\_\_\_\_  
RUC o DNI : \_\_\_\_\_

**Receptor:**

Nombre del investigador: Jhonny Anival Mejía Isidro

Tesis: "Evaluación de dos sistemas de tratamiento de aguas grises para el reuso en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023"

**Descripción de la donación:** Por medio de este documento, el donante entrega medios filtrantes que son materiales de descarte, mermas, excedentes, u otros subproductos, que se utilizarán en el desarrollo de la investigación llevada a cabo por el Investigador, consistiendo en los siguientes:

<b>Descripción del material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Comentario</b>
Arena	_____	_____
Aserrín de madera de pino	_____	_____
Bagazo de caña de azúcar	_____	_____
Restos de ladrillo de construcción	_____	_____

**Propósito de la donación:** Los medios filtrantes donados se utilizarán exclusivamente para llevar a cabo investigaciones científicas en el ámbito de la tesis a cargo del Investigador. Estos medios filtrantes son esenciales para el progreso y éxito de la investigación mencionada.

**Aceptación de la donación:** El Investigador, acepta la donación de los medios filtrantes mencionados y se compromete a utilizarlos exclusivamente para los fines de su investigación científica.

**Responsabilidad del receptor:** El receptor se compromete a utilizar los medios filtrantes de manera adecuada y responsable, siguiendo los procedimientos de investigación científica establecidos. El receptor se encargará de mantener y resguardar los medios filtrantes donados en condiciones adecuadas y de acuerdo con las mejores prácticas. En virtud de las disposiciones emanadas en materia de residuos sólidos, el donante se exime de responsabilidad alguna.

**Fecha y firma:** El presente acuerdo se firma voluntariamente por ambas partes y tiene efecto a partir de la fecha de firma.

Fecha:     /     /

\_\_\_\_\_  
Donante

\_\_\_\_\_  
Receptor – Investigador

### Anexo 3: Evidencias fotográficas

#### Etapa de implementación de los dos sistemas de tratamiento



**Foto 1.** Habilitación de dos tubos PVC de 160 mm de diámetro (Ø6" efectivas). Para esta tarea, se adquirieron todos los accesorios necesarios en una ferretería local.



**Foto 2.** Columnas verticales puestas en el área de ensayo. Cada sistema de tratamiento miniaturizado fue estabilizada luego operadas para evaluar su eficiencia.



**Foto 3.** Los insumos utilizados en el proceso fueron previamente sometidos a una limpieza, lavado y secado rigurosos. Se empleó un listado de cinco medios filtrantes, distribuidos según la configuración de capas en cada una de las columnas verticales. El diseño procedimental detalla la secuencia y relevancia de cada uno de estos medios. La arena y el carbón activado se adquirieron a través de proveedores locales, mientras que los demás insumos fueron obtenidos a través de donaciones (personas y comercios artesanales locales), destacando tanto el abastecimiento asequible continuo de los insumos como la sostenibilidad en el funcionamiento de cualquiera de los sistemas de tratamiento evaluados.

**Etapa de operación y recojo de muestras representativas**



**Foto 4.** Uso de lavadero interno y acopio de aguas grises



**Foto 5.** Muestreo interno



**Foto 6.** Uso de lavadero externo y acopio de aguas grises



**Foto 7.** Muestreo externo



**Foto 8.** Muestreo en el sistema 1



**Foto 9.** Muestreo en el sistema 2



## Etapa de ensayos analíticos y complementarios



Foto 10-11. Entrega de muestras de aguas grises en laboratorio



Foto 12. Verificación de muestras



Foto 13. Ensayos químicos



Foto 14. Ensayos físicos



Foto 15. Materiales usadas para recojo de muestras



Foto 16. Exterior de la escuela involucrada

#### Anexo 4: Acreditación del servicio de ensayos con laboratorio



ANALYTICAL LABORATORY E.I.R.L.

Prolongación Zarumilla Mz D2 Lt3, Daniel Alcides Carrión, Colina Cdra. 7  
Bellavista - Callao  
Oficina: +511 713-0836 / +511 453-1389 Cel.: 940 598 588  
E-mail: ventas1@alab.com.pe / administracion@alab.com.pe  
www.alab.com.pe

RUC N° 20600651901

FACTURA ELECTRONICA

F001N°00027764

**Nombre o Razon Social:** MEJIA ISIDRO, JHONNY ANIVAL

**Dirección :** Escuela San Judas Tadeo (Av. Ricardo Palma 550) LIMA-LIMA-COMAS

**R.U.C. :** [REDACTED]

**Moneda :** SOLES

**Vendedor :** CELINDA ABANTO

**Proforma :** P-2023-009312-0000

**O.S. :** OS-2023-005661-0000

**U.Negocio :** MEDIO AMBIENTE

**Fecha de Emisión :** 20/10/2023

**Fecha de Vencimiento :** 20/10/2023

**Condición de Pago :** CONTADO

**O/Compra N° :** :

**Contrato N° :** :

**HES :** :

Banco	Moneda	N° Cuenta Corriente	Codigo Cuenta Interbancaria	N° Cuenta Detraccion
Banco de Crédito del Perú	Soles	192-2350174-0-30	"00219200235017403034"	00-001-136380
Banco de Crédito del Perú	Dolares	192-2354413-1-58	"00219200235441315836"	
Banco BBVA Continental	Soles	0011-0467-0100005093-88	011-467-000100005093-88	
Banco BBVA Continental	Dolares	0011-0467-0200182278-88	011-467-000200182278-88	

CANT.	UNIDAD	DESCRIPCION	P. UNIT.	TOTAL
1		SERVICIO DE ANALISIS AGUA RESIDUAL  Análisis de aguas grises de la Tesis "Evaluación de dos sistemas de tratamiento de aguas grises para el reúso en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023"	[REDACTED]	[REDACTED]

**SON: NOVECIENTOS CUARENTA Y CINCO CON 18/100 SOLES**

**% Detracción :** 12% **Monto Detracción :** S/ [REDACTED]

Operación Sujeta al Sistema de Pago de Obligaciones Tributarias con el Gobierno Central Cta. Cte.00-001-136380 Decreto Legislativo N° 940

**SUB - TOTAL** S/ [REDACTED]

**IGV %** S/ [REDACTED]

**TOTAL** S/ [REDACTED]

Código. 037 Otros Servicios Empresariales gravados con IGV (12%)  
Favor de enviar confirmación al E-mail: facturacion@alab.com.pe  
indicando razon social y número(s) de comprobantes(s) a cancelar.



CADENA DE CUSTODIA - MATRIZ AGUA

Datos del cliente: **Johnny Arvel Mejía Iñido**  
 Razón Social: **Testes Johnny Mejía**  
 Persona de contacto: **Testes Johnny Mejía**  
 Nombre del proyecto: **Título de la investigación: Evaluación de los sistemas de tratamiento de aguas grises para el riego en zonas verdes en escuelas públicas Lima 2023**

Código / Teléfono: **[Redacted]**

Orden de servicio: **OS-2023-5981-Lvrd** Pág. **1** de **1**

Plan de Muestreo: **IE-23-23369** **11 CC-93-69124**

Informe de ensayo: **IE-23-23369** **11 CC-93-69124**

Procedencia e lugar de muestreo: **Escuela San Andrés Tábaco - Distrito - Lima (lugar de origen)**

Lote	Punto de muestreo / Estación	Código de laboratorio	Muestreo	Clasificación	Sub-grupo	Ubicación	N° Frascos		Preservante	Dilución	Sólidos totales	Sólidos suspendidos	Heces de hebra finas	Escherichia coli	Coliformes termotóxicos	pH y T°	Tª Agua (°C)	pH	CE (mg/L)	Cloro Total (mg/L)	Cloro Libre (mg/L)	OBRERVACIONES	
							N	E															
1	OC	72528	F: 23/10/23 H: 11:00	Dondeña (resaca)	N: 887783 E: 278727		X		080														
2	OC	72529	F: 23/10/23 H: 11:00	Dondeña (resaca)	N: 887783 E: 278727		X		000														
3	OC	72530	F: 23/10/23 H: 11:00	Dondeña (resaca)	N: 887783 E: 278727		X																
4	OC	72531	F: 23/10/23 H: 11:00	Dondeña (resaca)	N: 887783 E: 278727		X																
5	OC	72532	F: 23/10/23 H: 11:00	Dondeña (resaca)	N: 887783 E: 278727		X																
6	OC	72533	F: 23/10/23 H: 11:00	Dondeña (resaca)	N: 887783 E: 278727		X																
7	OC	72534	F: 23/10/23 H: 11:00	Dondeña (resaca)	N: 887783 E: 278727		X																
8																							

Descripción de equipos utilizados:

Item	Código interno del equipo	Nombre de equipo	F: Fecha	N: Marca	V: Valor	Tª: Temperatura en muestra	CE: Conservación Estricta
1		Temperómetro	H: Hora	E: Especificación	P: Proveedor	Tª: Temperatura ambiente	OO: Organismo Orogano
2		Clulas de pH	Muestreador port: <b>Chloride</b>				
3		GPS	Muestreador: <b>Johnny Mejía</b>				
4			Fecha: <b>23 de octubre del 2023</b>				

Legenda:

CE: Conservación Estricta

OO: Organismo Orogano

Clasificación de la Red de Agua, Ref: NTP 214.042

Estado: **LABORATORIO**

Fecha: **23 OCT 2023 15:13**

Lugar: **CALLAO**

Muestreador por:  ALAB  Chula



Fecha del día: \_\_\_\_\_

Razón Social: **Jhonny Anival Mejía Lizaro**

Persona de contacto: **Tereisa Jhonny Mejía**

Ciudad / Teléfono: \_\_\_\_\_

Nombre del proyecto: **Título de Investigación: Evaluación de las salinemas de tratamiento aguas grises para el riego en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023**

Orden de servicio: **05-2023-5661-Vero**

Plan de Muestreo: **CC-23-67 675**

Libro de campo: **FE-23-23 867**

Muestreo o lugar de muestreo: **Laboratorio de campo (Escuela San Alda's Ticho) - Comuna - Lima**

Página: **2** de **2**

**REGISTRACION DE LA MATRIZ**

Eje	Punto de muestreo / Etiqueta	Codigo de laboración	Muestreo	Calificación		Ubicación		N° Frascos		Preservante							Fases del muestreo							Tiempos (min)			Observaciones				
				DR	S	Comunidades (UBI) y UEL	V	F	DBO	DCO	Sólidos totales	Sólidos suspendidos	Hechos de helmintos	Escherichia coli	Coliformes termotol.	pH y T°	T-Tubo (T°)	pH (pH)	CE (CE)	Cloro (Cloro)	Cloro Total (Total)										
1	S2	74554	F: 27/10/23 H: 10:57	AR	Dondeño (escuela)	N: M07147 E: 210725	X		✓												1.0										
2	S2	74555	F: 27/10/23 H: 10:57	AR	Dondeño (escuela)	N: M07147 E: 210725	X		✓													1.0									
3	S2	74556	F: 27/10/23 H: 10:57	AR	Dondeño (escuela)	N: M07147 E: 210725	X		✓													1.0									
4	S2	74557	F: 27/10/23 H: 10:57	AR	Dondeño (escuela)	N: M07147 E: 210725	X		✓													1.0									
5	S2	74558	F: 27/10/23 H: 10:57	AR	Dondeño (escuela)	N: M07147 E: 210725	X		✓													1.0									
6	S2	74559	F: 27/10/23 H: 10:57	AR	Dondeño (escuela)	N: M07147 E: 210725	X		✓													1.0									
7	S2	74560	F: 27/10/23 H: 10:57	AR	Dondeño (escuela)	N: M07147 E: 210725	X		✓													1.0									
8																															

**Descripción de equipos utilizados:**

Nº	Nombre del equipo	Marca de equipo
1	Tamblor	
2	Cilindros de pH	
3	GPS	
4		

**Descripción de Contenedores:**

Nº	Nombre	Fecha	Final

**Legenda**

F: Fecha	S: Hora	V: Hora	U: Hora	T: Hora	C: Hora	D: Hora
H: Hora	E: Hora	C: Hora	R: Hora	T: Hora	T: Hora	T: Hora



**Caracterización de la Matriz Agua. Ref: NIT 274287**

ESTADO	DE	PARA	CON	CON
NO	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA
NO	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA
NO	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA
NO	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA
NO	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA

## Anexo 5: Resultado de ensayos analíticos



LABORATORIO DE ENSAYO  
ACREDITADO POR EL  
ORGANISMO DE  
ACREDITACION INACAL-DA  
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

### INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-23369

N° Id.: 0000091534

#### I. DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZON SOCIAL : JHONNY ANIVAL MEJÍA ISIDRO  
2.-DIRECCIÓN : Escuela San Judas Tadeo (Av. Ricardo Palma 550), Comas - Lima  
3.-PROYECTO : TÍTULO DE INVESTIGACIÓN: "EVALUACIÓN DE DOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS GRISAS PARA EL REÚSO EN ÁREAS VERDES EN ESCUELAS PÚBLICAS, LIMA, 2023"  
4.-PROCEDENCIA : ESCUELA SAN JUDAS TADEO - COMAS - LIMA  
5.-SOLICITANTE : JHONNY ANIVAL MEJÍA ISIDRO  
6.-ORDEN DE SERVICIO N° : 0000005661-2023-0000  
7.-PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : NO APLICA  
8.-MUESTREADO POR : MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA  
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME : 2023-11-06

#### II. DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO : Agua Residual  
2.-NÚMERO DE MUESTRAS : 7  
3.-FECHA DE RECEP. DE MUESTRA : 2023-10-23  
4.-PERÍODO DE ENSAYO : 2023-10-23 al 2023-11-06

Liz Y. Quispe Quispe  
Jefe de Laboratorio  
CIP N° 211662

Marleni V. Rivera Castromonte  
Supervisor de Laboratorio de  
Microbiología e Hidrobiología  
CBP N° 16639



Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R. L. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia.

📍 SEDE PRINCIPAL  
Av. Guardia Chalaca N° 1877,  
Bellavista - Callao  
Telf.: (+01) 713 0756  
Cel.: 977 516 675 / 940 598 572

📍 SEDE ZARUMILLA  
Prolongación Zarumilla Mz. D2 Lt. 3,  
Bellavista - Callao  
Telf.: (+01) 713 0636  
Cel.: 937 111 379 / 940 598 572

📍 SEDE AREQUIPA  
COOP SIDSUR Mz E Lt. 9,  
Arequipa  
Telf.: (+054) 616 843  
Cel.: 932 646 642 / 940 598 572

📍 SEDE PIURA  
Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,  
Castilla - Piura  
Telf.: (+073) 542 335  
Cel.: 919 475 133 / 940 598 572

Pág. 1 de 4

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-23369**

N° Id.: 0000091534

**III. MÉTODOS Y REFERENCIAS**

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) <sup>(*)</sup>	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 F.2, 24th Ed. 2023.	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Escherichia coli Procedure Using Fluorogenic Substrate. Simultaneous Determination of Termotolerant Coliforms and E.coli.
Demanda Bioquímica de Oxígeno <sup>(*)</sup>	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed. 2023.	Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test
Demanda Química de Oxígeno <sup>(*)</sup>	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23 rd Ed. 2017	Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method
Escherichia coli (NMP) <sup>(*)</sup>	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 F.2, 24th Ed. 2023.	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Escherichia coli Procedure Using Fluorogenic Substrate. Simultaneous Determination of Termotolerant Coliforms and E.coli.
Huevos de Helmintos <sup>2</sup>	MVAL-LAB-24, VALIDATED, 2018.	Quantification and Identification of Helminth Eggs in Water.
pH <sup>(**)</sup>	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24th Ed. 2023.	pH Value Electrometric Method
Sólidos Suspendidos Totales <sup>(*)</sup>	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed. 2023.	Solids. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C
Sólidos Totales <sup>(*)</sup>	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 B, 24th Ed. 2023.	Solids. Total Solids Dried at 103-105°C
Temperatura <sup>(**)</sup>	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2550 B, 24th Ed. 2023.	Temperature. Laboratory and Field Methods.

<sup>1</sup> "SMEWW" : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

<sup>2</sup> "APHA" : American Public Health Association

<sup>(\*)</sup> Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

<sup>2</sup> Ensayo acreditado por el IAS

<sup>(\*\*)</sup> El Ensayo indicado no ha sido acreditado

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-23369**

N° Id.: 0000091534

**IV. RESULTADOS**

ITEM	1	2	3	4			
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-23-72528	M-23-72529	M-23-72530	M-23-72531			
CÓDIGO DEL CLIENTE:	GC	GC	GC	GC			
COORDENADAS:	E:0276727	E:0276727	E:0276727	E:0276727			
UTM WGS 84:	N:8677283	N:8677283	N:8677283	N:8677283			
PRODUCTO:	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual			
SUB PRODUCTO:	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica			
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA						
FECHA y HORA DE MUESTREO :	23-10-2023 11:00	23-10-2023 11:00	23-10-2023 11:00	23-10-2023 11:00			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	-	-	-	-
Escherichia coli (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	-	-	-	-
Huevos de Helminthos †	Huevo/L	NA	1,0	-	-	-	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,4	2,0	52,0	-	-	-
pH (**)	Unidad de pH	NA	0,01	-	-	-	-
Temperatura (**)	(°C)	NA	0,1	-	-	-	-
Sólidos Suspendedos Totales (*)	mg/L	2,0	5,0	-	-	-	20,6
Sólidos Totales (*)	mg/L	2,00	5,00	-	-	506,00	-
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	-	121,7	-	-

(\*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

(\*\*) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

† Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "&lt;=" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "&lt;=" Menor que el L.D.M.

-: No ensayado

NA: No Aplica

**SEDE PRINCIPAL**

 Av. Guardia Chalaca N° 1877,  
 Bellavista - Callao  
 Telf.: (+01) 713 0756  
 Cel.: 977 516 675 / 940 598 572

**SEDE ZARUMILLA**

 Prolongación Zarumilla Mz. D2 Lt. 3,  
 Bellavista - Callao  
 Telf.: (+01) 713 0636  
 Cel.: 937 111 379 / 940 598 572

**SEDE AREQUIPA**

 COOP SIDSUR Mz E Lt. 9,  
 Arequipa  
 Telf.: (+054) 616 843  
 Cel.: 932 646 642 / 940 598 572

**SEDE PIURA**

 Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,  
 Castilla - Piura  
 Telf.: (+073) 542 335  
 Cel.: 919 475 133 / 940 598 572

Pág. 3 de 4



**INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-23369**

N° Id.: 000091534

ITEM	5	6	7
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-23-72532	M-23-72533	M-23-72534
CÓDIGO DEL CLIENTE:	GC	GC	GC
COORDENADAS:	E:0276727	E:0276727	E:0276727
UTM WGS 84:	N:8677283	N:8677283	N:8677283
PRODUCTO:	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual
SUB PRODUCTO:	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA		
FECHA y HORA DE MUESTREO :	23-10-2023 11:00	23-10-2023 11:00	23-10-2023 11:00

ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS		
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	-	3 500,0	-
Escherichia coli (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	-	2 400,0	-
Huevos de Helmintos <sup>2</sup>	Huevo/L	NA	1,0	<1,0	-	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,4	2,0	-	-	-
pH (**)	Unidad de pH	NA	0,01	-	-	6,80
Temperatura (**)	(°C)	NA	0,1	-	-	22,9
Sólidos Suspendedos Totales (*)	mg/L	2,0	5,0	-	-	-
Sólidos Totales (*)	mg/L	2,00	5,00	-	-	-
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	-	-	-

(\*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

(<sup>1</sup>) El Ensayo indicado no ha sido acreditado  
(<sup>2</sup>) Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<=" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<=" Menor que el L.D.M.

": No ensayado

NA: No Aplica

**V. OBSERVACIONES**

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

**"FIN DE DOCUMENTO"**

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-23867**

N° Id.: 0000092032

**I. DATOS DEL SERVICIO**

1.-RAZON SOCIAL	: JHONNY ANIVAL MEJÍA ISIDRO
2.-DIRECCIÓN	: Escuela San Judas Tadeo (Av. Ricardo Palma 550), Comas - Lima
3.-PROYECTO	: TÍTULO DE INVESTIGACIÓN: "EVALUACIÓN DE DOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS GRISAS PARA EL REÚSO EN ÁREAS VERDES EN ESCUELAS PÚBLICAS, LIMA, 2023"
4.-PROCEDENCIA	: LABORATORIO DE CAMPO (ESCUELA SAN JUDAS TADEO) - COMAS - LIMA
5.-SOLICITANTE	: JHONNY ANIVAL MEJÍA ISIDRO
6.-ORDEN DE SERVICIO N°	: 0000005661-2023-0000
7.-PROCEDIMIENTO DE MUESTREO	: NO APLICA
8.-MUESTREADO POR	: MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	: 2023-11-07

**II. DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO**

1.-PRODUCTO	: Agua Residual
2.-NÚMERO DE MUESTRAS	: 14
3.-FECHA DE RECEP. DE MUESTRA	: 2023-10-27
4.-PERÍODO DE ENSAYO	: 2023-10-27 al 2023-11-07



Liz Y. Quispe  
Jefe de Laboratorio  
CIP N° 211662



Marleni V. Rivera Castromonte  
Supervisor de Laboratorio de  
Microbiología e Hidrobiología  
CBP N° 16639



Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R. L. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia.

📍 **SEDE PRINCIPAL**  
Av. Guardia Chalaca N° 1877,  
Bellavista - Callao  
Telf.: (+01) 713 0756  
Cel.: 977 516 675 / 940 598 572

📍 **SEDE ZARUMILLA**  
Prolongación Zarumilla Mz. D2 Lt. 3,  
Bellavista - Callao  
Telf.: (+01) 713 0636  
Cel.: 937 111 379 / 940 598 572

📍 **SEDE AREQUIPA**  
COOP SIDSUR Mz E Lt. 9,  
Arequipa  
Telf.: (+054) 616 843  
Cel.: 932 646 642 / 940 598 572

📍 **SEDE PIURA**  
Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,  
Castilla - Piura  
Telf.: (+073) 542 335  
Cel.: 919 475 133 / 940 598 572

Pág. 1 de 6

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-23867**

N° Id.: 0000092032

**III. MÉTODOS Y REFERENCIAS**

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) <sup>(1)</sup>	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 F.2, 24th Ed. 2023.	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Escherichia coli Procedure Using Fluorogenic Substrate. Simultaneous Determination of Termotolerant Coliforms and E.coli.
Demanda Bioquímica de Oxígeno <sup>(1)</sup>	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed. 2023.	Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test
Demanda Química de Oxígeno <sup>(1)</sup>	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23 rd Ed. 2017	Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method
Escherichia coli (NMP) <sup>(1)</sup>	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 F.2, 24th Ed. 2023.	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Escherichia coli Procedure Using Fluorogenic Substrate. Simultaneous Determination of Termotolerant Coliforms and E.coli.
Huevos de Helmintos <sup>2</sup>	MVAL-LAB-24, VALIDATED, 2018.	Quantification and Identification of Helminth Eggs in Water.
pH <sup>(1)</sup>	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24th Ed. 2023.	pH Value Electrometric Method
Sólidos Suspendedos Totales <sup>(1)</sup>	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed. 2023.	Solids. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C
Sólidos Totales <sup>(1)</sup>	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 B. 24th Ed. 2023.	Solids. Total Solids Dried at 103-105°C
Temperatura <sup>(1)</sup>	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2550 B, 24th Ed. 2023.	Temperature. Laboratory and Field Methods.

<sup>1</sup> "SMEWW" : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

<sup>2</sup> "APHA" : American Public Health Association

<sup>(1)</sup> Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

<sup>2</sup> Ensayo acreditado por el IAS

<sup>(\*)</sup> El Ensayo indicado no ha sido acreditado

**SEDE PRINCIPAL**  
 Av. Guardia Chalaca N° 1877,  
 Bellavista - Callao  
 Telf.: (+01) 713 0756  
 Cel.: 977 516 675 / 940 598 572

**SEDE ZARUMILLA**  
 Prolongación Zarumilla Mz. D2 Lt. 3,  
 Bellavista - Callao  
 Telf.: (+01) 713 0636  
 Cel.: 937 111 379 / 940 598 572

**SEDE AREQUIPA**  
 COOP SIDSUR Mz E Lt. 9,  
 Arequipa  
 Telf.: (+054) 616 843  
 Cel.: 832 646 642 / 940 598 572

**SEDE PIURA**  
 Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,  
 Castilla - Piura  
 Telf.: (+073) 542 335  
 Cel.: 919 475 133 / 940 598 572

Pág. 2 de 8

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-23867**

N° Id.: 000002032

**IV. RESULTADOS**

ITEM	1	2	3	4			
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-23-74547	M-23-74548	M-23-74549	M-23-74550			
CÓDIGO DEL CLIENTE:	S1	S1	S1	S1			
COORDENADAS:	E:0766729	E:0766729	E:0766729	E:0766729			
UTM WGS 84:	N:8677477	N:8677477	N:8677477	N:8677477			
PRODUCTO:	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual			
SUB PRODUCTO:	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica			
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA						
FECHA y HORA DE MUESTREO :	27-10-2023 10:45	27-10-2023 10:45	27-10-2023 10:45	27-10-2023 10:45			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	-	-	-	-
Escherichia coli (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	-	-	-	-
Huevos de Helmintos <sup>2</sup>	Huevo/L	NA	1,0	-	-	-	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,4	2,0	<2,0	-	-	-
pH (**)	Unidad de pH	NA	0,01	-	-	-	-
Temperatura (**)	(°C)	NA	0,1	-	-	-	-
Sólidos Suspendedos Totales (*)	mg/L	2,0	5,0	-	-	-	<5,0
Sólidos Totales (*)	mg/L	2,00	5,00	-	-	414,50	-
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	-	<5,0	-	-

(\*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

(\*\*) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

<sup>2</sup> Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<=" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<=" Menor que el L.D.M.

-. No ensayado

NA: No Aplica

**SEDE PRINCIPAL**  
Av. Guardia Chalaca N° 1877,  
Bellavista - Callao  
Telf.: (+01) 713 0756  
Cel.: 977 516 675 / 940 598 572

**SEDE ZARUMILLA**  
Prolongación Zarumilla Mz. D2 Lt. 3,  
Bellavista - Callao  
Telf.: (+01) 713 0636  
Cel.: 937 111 379 / 940 598 572

**SEDE AREQUIPA**  
COOP SIDSUR Mz E Lt. 9,  
Arequipa  
Telf.: (+054) 616 843  
Cel.: 832 646 642 / 940 598 572

**SEDE PIURA**  
Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,  
Castilla - Piura  
Telf.: (+073) 542 335  
Cel.: 919 475 133 / 940 598 572

Pág. 3 de 6

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-23867**

N° Id.: 0000092032

ITEM	5	6	7	8			
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-23-74551	M-23-74552	M-23-74553	M-23-74554			
CÓDIGO DEL CLIENTE:	S1	S1	S1	S2			
COORDENADAS:	E:0766729	E:0766729	E:0766729	E:0766729			
UTM WGS 84:	N:8677477	N:8677477	N:8677477	N:8677477			
PRODUCTO:	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual			
SUB PRODUCTO:	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica			
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA						
FECHA y HORA DE MUESTREO :	27-10-2023 10:45	27-10-2023 10:45	27-10-2023 10:45	27-10-2023 10:57			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	-	<1,8	-	-
Escherichia coli (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	-	<1,8	-	-
Huevos de Helminfos <sup>2</sup>	Huevo/L	NA	1,0	<1,0	-	-	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,4	2,0	-	-	-	<2,0
pH (**)	Unidad de pH	NA	0,01	-	-	7,48	-
Temperatura (**)	(°C)	NA	0,1	-	-	22,7	-
Sólidos Suspendedos Totales (*)	mg/L	2,0	5,0	-	-	-	-
Sólidos Totales (*)	mg/L	2,00	5,00	-	-	-	-
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	-	-	-	-

(\*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

(\*\*) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

<sup>2</sup> Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<=" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<=" Menor que el L.D.M.

-.: No ensayado

NA: No Aplica

♦ SEDE PRINCIPAL  
Av. Guardia Chalaca N° 1877,  
Bellavista - Callao  
Telf.: (+01) 713 0756  
Cel.: 977 516 675 / 940 598 572

♦ SEDE ZARUMILLA  
Prolongación Zarumilla Mz. D2 Lt. 3,  
Bellavista - Callao  
Telf.: (+01) 713 0636  
Cel.: 937 111 379 / 940 598 572

♦ SEDE AREQUIPA  
COOP SIDSUR Mz E Lt. 9,  
Arequipa  
Telf.: (+054) 616 843  
Cel.: 932 646 642 / 940 598 572

♦ SEDE PIURA  
Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,  
Castilla - Piura  
Telf.: (+073) 542 335  
Cel.: 919 475 133 / 940 598 572

Pág. 4 de 6

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-23867**

N° Id.: 0000092032

ITEM	9	10	11	12			
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-23-74555	M-23-74556	M-23-74557	M-23-74558			
CÓDIGO DEL CLIENTE:	S2	S2	S2	S2			
COORDENADAS:	E:0766729	E:0766729	E:0766729	E:0766729			
UTM WGS 84:	N:8677477	N:8677477	N:8677477	N:8677477			
PRODUCTO:	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual			
SUB PRODUCTO:	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica			
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA						
FECHA y HORA DE MUESTREO :	27-10-2023 10:57	27-10-2023 10:57	27-10-2023 10:57	27-10-2023 10:57			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	-	-	-	-
Escherichia coli (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	-	-	-	-
Huevos de Helmintos <sup>2</sup>	Huevo/L	NA	1,0	-	-	-	<1,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,4	2,0	-	-	-	-
pH (**)	Unidad de pH	NA	0,01	-	-	-	-
Temperatura (**)	(°C)	NA	0,1	-	-	-	-
Sólidos Suspendedos Totales (*)	mg/L	2,0	5,0	-	-	<5,0	-
Sólidos Totales (*)	mg/L	2,00	5,00	-	425,00	-	-
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	<5,0	-	-	-

(\*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

(\*\*) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

<sup>2</sup> Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, \*<= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, \*<= Menor que el L.D.M.

-: No ensayado

NA: No Aplica

📍 SEDE PRINCIPAL

Av. Guardia Chalaca N° 1877,  
Bellavista - Callao  
Telf.: (+01) 713 0756  
Cel.: 977 516 675 / 940 598 572

📍 SEDE ZARUMILLA

Prolongación Zarumilla Mz. D2 Lt. 3,  
Bellavista - Callao  
Telf.: (+01) 713 0636  
Cel.: 837 111 379 / 940 598 572

📍 SEDE AREQUIPA

COOP SIDSUR Mz E Lt. 9,  
Arequipa  
Telf.: (+054) 616 843  
Cel.: 832 646 642 / 940 598 572

📍 SEDE PIURA

Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,  
Castilla - Piura  
Telf.: (+073) 542 335  
Cel.: 919 475 133 / 940 598 572

Pág. 5 de 6

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-23867**

N° Id.: 0000082032

ITEM	13	14			
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-23-74559	M-23-74560			
CÓDIGO DEL CLIENTE:	S2	S2			
COORDENADAS:	E:0766729	E:0766729			
UTM WGS 84:	N:8677477	N:8677477			
PRODUCTO:	Agua Residual	Agua Residual			
SUB PRODUCTO:	Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica			
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA				
FECHA y HORA DE MUESTREO :	27-10-2023 10:57	27-10-2023 10:57			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	4,5	-
Escherichia coli (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	2,0	-
Huevos de Helmintos <sup>2</sup>	Huevo/L	NA	1,0	-	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,4	2,0	-	-
pH (**)	Unidad de pH	NA	0,01	-	7,22
Temperatura (**)	(°C)	NA	0,1	-	22,6
Sólidos Suspendedos Totales (*)	mg/L	2,0	5,0	-	-
Sólidos Totales (*)	mg/L	2,00	5,00	-	-
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	-	-

(\*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

 (\*\*) El Ensayo indicado no ha sido acreditado  
 2 Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, \*&lt;= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, \*&lt;= Menor que el L.D.M.

"-": No ensayado

NA: No Aplica

**V. OBSERVACIONES**

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

**"FIN DE DOCUMENTO"**
**SEDE PRINCIPAL**

 Av. Guardia Chalaca N° 1877,  
 Bellavista - Callao  
 Telf.: (+01) 713 0756  
 Cel.: 977 516 675 / 940 598 572

**SEDE ZARUMILLA**

 Prolongación Zarumilla Mz. D2 Lt. 3,  
 Bellavista - Callao  
 Telf.: (+01) 713 0636  
 Cel.: 937 111 379 / 940 598 572

**SEDE AREQUIPA**

 COOP SIDSUR Mz E Lt. 9,  
 Arequipa  
 Telf.: (+054) 616 843  
 Cel.: 932 646 642 / 940 598 572

**SEDE PIURA**

 Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,  
 Castilla - Piura  
 Telf.: (+073) 542 335  
 Cel.: 919 475 133 / 940 598 572

Pág. 6 de 6

## Anexo 6: Acreditación de laboratorio ante el INACAL



**INACAL**  
Instituto Nacional  
de Calidad  
Acreditación

# Certificado

La Dirección de Acreditación del Instituto Nacional de Calidad - INACAL, en el marco de la Ley N° 30224 OTORGA el presente certificado de Renovación de la Acreditación a:

## ANALYTICAL LABORATORY E.I.R.L.

**Laboratorio de Ensayo**

En su sede ubicada en: Prolongación Zarumilla Mz. D2 Lote 3, Asociación Daniel Alcides Carrión, distrito de Bellavista, provincia Constitucional del Callao, departamento de Lima

Con base en la norma

### NTP-ISO/IEC 17025:2017 Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración

Facultándolo a emitir Informes de Ensayo con Símbolo de Acreditación. En el alcance de la acreditación otorgada que se detalla en el DA-acr-06-P-21F que forma parte integral del presente certificado llevando el mismo número de registro indicado líneas abajo.

Fecha de Renovación: 26 de julio de 2023  
Fecha de Vencimiento: 25 de julio de 2027



Firmado digitalmente por AGUILAR RODRIGUEZ Lidia Patricia FAU  
20600283615 soft  
Fecha: 2023-08-18 08:51:19  
Motivo: Soy el Autor del Documento

**PATRICIA AGUILAR RODRÍGUEZ**  
Directora (d.c.), Dirección de Acreditación - INACAL

Fecha de emisión: 02 de agosto de 2023



Cédula: N° 234-2023-INACAL/DA  
Adenda N° 04 del contrato N° 025-16/INACAL/DA  
Registro N° LE-096

El presente certificado tiene validez con su correspondiente Alcançe de Acreditación y otorgado a título de información, dado que el alcance puede estar sujeto a ampliaciones, re-dimensiones, actualizaciones o modificaciones temporales. El alcance y vigencia debe confirmarse en la página web: [www.inacal.gob.pe/asesoramiento/asesoramiento/acreditacion](http://www.inacal.gob.pe/asesoramiento/asesoramiento/acreditacion), y/o a través del código QR al momento de hacer uso del presente certificado.

La Dirección de Acreditación del INACAL es firmante del Acuerdo de Reconocimiento Multilateral (MLA) de Inter American Accreditation Co-operation (IAAC) e Inter national Accreditation Forum (IAF) y del Acuerdo de Reconocimiento Multilateral con la International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC).

DA-acr-01P-02M/Ver-03 EC-LAB-56

DNC: Documento No Controlado



## Anexo 7: Autorizaciones institucionales

### DOCUMENTO DE ACEPTACIÓN PARA COLABORACIÓN EN INVESTIGACIÓN

#### Partes involucradas:

##### 1. Institución de Origen:

- Nombre de la universidad: Universidad Cesar Vallejo – Sede Los Olivos
- Facultad: Ingeniería y Arquitectura
- Escuela profesional: Ingeniería Civil
- Investigador: Jhonny Anival Mejía Isidro
- Título de la investigación: Evaluación de dos sistemas de tratamiento de aguas grises para el reúso en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023

##### 2. Institución Anfitriona:

- Nombre de la Escuela: Institución Educativa N° 3068 San Judas Tadeo
- Dirección: Av. Ricardo Palma 550, Comas 15328, Comas, Lima
- Directora: Solís Pecho Neli Hermelinda

#### Objetivo de la colaboración:

El objetivo de este acuerdo es formalizar la colaboración entre las partes para llevar a cabo la investigación titulada "Evaluación de dos sistemas de tratamiento de aguas grises para el reúso en áreas verdes en escuelas públicas, Lima, 2023" en las instalaciones de la escuela San Judas Tadeo, con el propósito de evaluar los sistemas de tratamiento de aguas grises y su reutilización potencial en áreas verdes en entornos escolares.

#### Alcance de la colaboración:

1. Muestreo de aguas grises: El investigador llevará a cabo muestreos de aguas grises en las instalaciones de la Escuela San Judas Tadeo, de acuerdo con los procedimientos establecidos en el protocolo de investigación y normas nacionales vigentes para dicho propósito.
2. Uso de instalaciones: Se autoriza el acceso a las instalaciones de la escuela necesarias para la toma de muestras y la ejecución de los prototipos de tratamiento; y se brinda demás facilidades.
3. Procedimientos y protocolos: El investigador se compromete a seguir los procedimientos y protocolos de investigación establecidos, garantizando la seguridad de los estudiantes, el personal escolar y demás participantes o involucrados.

#### Permisos y seguridad:

1. El Investigador se compromete a obtener todos los permisos necesarios para llevar a cabo la investigación y cumplir con las normativas legales y éticas.
2. Se implementarán medidas de seguridad para garantizar un entorno seguro durante la investigación.

#### Firma y aprobación:

Este acuerdo de colaboración entra en vigencia tras la firma de ambas partes y su aprobación.

Fecha de Inicio:  
Lunes, 23 de octubre del 2023

Fecha de Finalización:  
Viernes, 27 de octubre del 2023

\_\_\_\_\_  
Institución de Origen – Investigador

  
Institución Anfitriona

Your IBM SPSS Statistics trial is ready to use

IBM <no-reply@mail-prod.admin.ibmcloud.com>

Jun 26 Oct 2023 14:56

Para: Jhonny Mejía <janival@outlook.com>



Hi Jhonny,

Thank you for signing up for a subscription to:

— **IBM SPSS Statistics Subscription Trial**

Below are your subscription details.

### IBM SPSS Statistics Subscription Trial

ASR Expiration Date

November 25, 2023

Duration

30 days

Start date

October 26, 2023

End date

November 25, 2023

Customer Account

Jhonny Mejía's Company

[Get started](#) →

Need help? [Get support](#)

[Learn about this service](#)

This service is governed by these [terms and conditions](#).

Thanks for choosing IBM,

IBM SPSS Team

© 2023 IBM All rights reserved

## Anexo 8: Tablas y figuras complementarias

Tabla 15. Concentraciones físicas típicas en aguas grises domésticas

Temperatura (°C)	Sólidos disueltos totales (mg/L)	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	Sólidos totales (mg/L)	Sólidos fijos (mg/L)	Sólidos volátiles (mg/L)	Referencia
Resultados previos al tratamiento, en diversas partes del mundo						
–	308	35.3	–	–	–	Roslan & Sajji, 2020
25	–	–	788	706	82	Pedroza et al., 2021
–	769 ±326	5176 ±3518	6071 ±3904	–	–	Niwagaba et al., 2014
–	196.3	182.5	378.8	–	–	Yaseen et al., 2019 μ
27 ±1	303 ±203	–	–	–	27 ±1	Patil, 2016
–	575	186	–	–	–	Nigam et al., 2013
–	573	184	–	–	–	Denyer & Tranfield, 2009
–	572.2	254	826.3	–	–	Deepa et al., 2019 UJ
Valores obtenidos luego del tratamiento, en diversas partes del mundo						
–	100.3 (67.4%)	3.0 (91.5%)	–	–	–	Roslan & Sajji, 2020
24.9	–	–	679 (13.8%)	601 (14.9%)	78 (4.9%)	Pedroza et al., 2021
–	1428 (-85.7%)	689 (86.7%)	2271 (62.6%)	–	–	Niwagaba et al., 2014
–	198,9 (-1,34%)	25.4 (86.1%)	224.3 (40.8%)	–	–	Yaseen et al., 2019 μ
–	174 (70%)	40 (78.5%)	–	–	–	Nigam et al., 2013
–	172 (70%)	32 (82.6%)	–	–	–	Denyer & Tranfield, 2009
–	95 (83.4%)	52.4 (79.4%)	147.4 (82.2%)	–	–	Deepa et al., 2019 UJ

NOTA:

UJ: Resultados del promedio de cuatro ciclos.

μ: Promedio de valores reportados de dos puntos muestreados.

Comprender los distintos tipos de sólidos en el agua es fundamental para asegurar su dinámica y comportamiento en el tratamiento:

- Sólidos disueltos totales - SDT: Sustancias disueltas en el agua a nivel molecular o iónico y no son visibles a simple vista. Incluyen sales inorgánicas, minerales, nutrientes y otras sustancias químicas disueltas.
- Sólidos suspendidos totales - SST: Son partículas sólidas visibles que están suspendidas en el agua y no se han disuelto completamente. Pueden incluir sedimentos, arcilla, partículas finas de arena, materia orgánica en suspensión y otros sólidos no disueltos.
- Sólidos fijos: Partículas que no se evaporan cuando se calientan a altas temperaturas y suelen consistir en minerales inorgánicos. Son una subdivisión de los SDT y TSS. Es la fracción de sólidos que permanece después de la incineración.
- Sólidos volátiles: Sólidos que se volatilizan o evapora cuando se calientan a altas temperaturas, generalmente es materia orgánica y determina la misma. Son una subcategoría de los SDT y SST y, determinan la cantidad de materia orgánica presente.
- Sólidos suspendidos volátiles: Representan la fracción de los SST que se volatiliza al calentarse a altas temperaturas y suelen estar compuestos por materia orgánica en suspensión.
- Sólidos sedimentables: Partículas sólidas que se asientan en el fondo de un recipiente después de un período de tiempo y se utiliza para evaluar la cantidad de partículas en suspensión que pueden afectar la claridad del agua y la eficiencia de los procesos de tratamiento.
- Sólidos totales: constituye la totalidad de sólidos presentes en el agua, típicamente la suma sólidos disueltos (SDT) y suspendidos (SST).

Fuente: Adaptado de Quispe et al. *Journal of Water Process Engineering* 48 (2022) 102908, p. 10-13.

Tabla 16. Concentraciones químicas típicas en aguas grises domésticas

pH	Conductividad eléctrica (μS/cm)	Demanda biológica de oxígeno a 5 días - DBO <sub>5</sub> (mg/L)	Demanda química de oxígeno – DQO (mg/L)	Referencia
Resultados previos al tratamiento, en diversas partes del mundo				
–	–	131 ± 50	496 ± 87	Dalahmeh, 2016 Ψ
7.3	2511	1175 ± 25	1908 ± 108	Qrenawi & Mahmoud, 2019
6,23 ± 0,51	1540 ± 652	4667 ± 2198	7307 ± 1102	Niwagaba et al., 2014
7.06	319.2	446.8	1276.4	Yaseen et al., 2019 μ
7,08 ± 0,45	277 ± 55	68 ± 15	84 ± 14	Patil, 2016
4.48	–	70.75	138.75	Mohamed et al., 2014 π
8.5	7231	400	600	Saihu, 2017
–	–	124.1	268.2	Deepa et al., 2019
8.33 ± 00.21	1812.00 ± 92.86	137,69 ± 10,65	362,91 ± 29,56	Chithra & Dandapani, 2017
Valores obtenidos luego del tratamiento, en diversas partes del mundo				
–	–	5 ± 2 (96,2%)	23 ± 14 (95,4%)	Dalahmeh, 2016 Ψ
8.2	2411 (3,98%)	12,5 ± 2,5 (98,9%)	691,5 ± 151,5 (63,67%)	Qrenawi & Mahmoud, 2019
–	–	182 (96,1%)	672 (90,8%)	Niwagaba et al., 2014 ω
6.5	372,5 (-16,7%)	398.9 (10,7%)	840.8 (34,1%)	Yaseen et al., 2019 μ
6,95 ± 0,44	194 ± 49 (30%)	51 ± 17 (25%)	63 ± 15 (25%)	Patil, 2016
6.8	–	44.5 (37,1%)	120.75 (13%)	Mohamed et al., 2014 π
7.1	3161 (56,3%)	50 (87,5%)	40 (93,3%)	Saihu, 2017 (*)
–	–	20 (84%)	45.9 (82,6%)	Deepa et al., 2019
7.94 ± 00.10	642,29 ± 60,30 (65%)	16,34 ± 2,76 (88%)	68,23 ± 6,70 (81%)	Chithra & Dandapani, 2017

NOTA:

Ψ: Valores de DQO y DBO<sub>5</sub> reportados para HLR (tasas de carga hidráulica) de 37 ± 7 L/m<sup>2</sup>-día.

ω: Valores reportados en la TRH (tiempo de retención hidráulico) de 36 h.

μ: Promedio de valores reportados de dos puntos monitoreadas o muestreadas.

π: Valores promedio reportados semanalmente.

(\*): Resultados de filtrar con biochar de árbol de higuera, biochar de árbol de caoba y biochar de árbol de karité.

Fuente: Adaptado de Quispe et al. *Journal of Water Process Engineering* 48 (2022), p. 10-14.

Tabla 17. Concentraciones biológicas típicas en aguas grises domésticas

Coliformes fecales (UFC/100 ml)	Escherichia Coli (UFC/100 ml)	Enterococo fecal (log <sub>10</sub> MPN/100 mL)	Bacteriófago MS2 (PFU/100 mL)	Bacteriófago Phi-X174 (PFU/mL)	Salmonella spp. (UFC/ml)	Referencia
Resultados previos al tratamiento, en diversas partes del mundo						
-	3.3E3 – 9.0E6	-	3.6E6 – 1.9E8	2.6E5 – 1.9E6	-	Perez et al., 2019
-	E2 – E6	10 – E6*	E6 – E8	E5 – E7	E5 – E7	Dalahmeh, 2016 $\cup$
-	-	-	3.07E6 – 3.68E7	3.79E5 – 1.57E7	1.59E5 – 1.01E7	Sidibe, 2014
4.2E7 ± 3.79E7	-	-	-	-	-	Niwagaba et al., 2014
2.88E3 – 3.76E3	-	-	-	-	-	Biruktawit, 2019
-	-	E5*	3.5E7	2.0E6	7.0E7	Molaei, 2014
-	2.64E4 $\pounds$	-	-	-	-	Moges et al., 2015
-	5.1 ± 1.2 $\pounds$	0,77 ± 0,75	<1 ± 0	-	-	Dalahmeh et al., 2016
Valores obtenidos luego del tratamiento, en diversas partes del mundo						
-	0.2–4.5	-	0.2 – 2.3	0.2 – 1.3	-	Perez et al., 2019
-	>4	2.4 ± 1.3	1,4 ± 0,8	0,9 ± 0,5	2,4 ± 1,0	Dalahmeh, 2016 $\cup$
-	-	-	0.94	-	2,72 ± 0,74	Sidibe, 2014
1,85E6 $\alpha$ (95,5%)	-	-	-	-	-	Niwagaba et al., 2014
87% (FBC) - 90% (FBCS)**	-	-	-	-	-	Biruktawit, 2019
-	-	1–4	<1-3	<1-4	3	Molaei, 2014
-	1.46E2 $\pounds$ - 99.4%	-	-	-	-	Moges et al., 2015
-	0.66	-1,44	-	-	-	Dalahmeh et al., 2016

NOTA:

\*: Expresado en UFC/ml.  $\pounds$ : Expresado en MPN/100 mL.  $\pounds$ : Expresado en log<sub>10</sub> MPN/100 mL.  $\alpha$ : valor expresado en UFC/100 ml.

\*\* : Valores reportados para biochar fino (FBC) y biochar fino con arena (FBCS).

$\cup$ : Valores notificados para HLR (tasas de carga hidráulica) y OLR (tasa de carga orgánica) de 32 L/m<sup>2</sup>-día y 70g DBO/m<sup>2</sup>-día, excepto para E. coli (HLR: 34 L/m<sup>2</sup>-día, OLR: 20g DBO/m<sup>2</sup>-día).

Respecto a los contaminantes parasitológicos, la Escherichia Coli (es un coliforme termotolerante), el Enterococo fecal y Salmonella spp. son bacterias que actúan como indicadores de contaminación fecal en el agua. Los bacteriófagos "MS2" y "Phi-X174" se utilizan como indicadores de contaminación viral en el agua, sin tener una relación directa con las bacterias coliformes o los helmintos.

Fuente: Adaptado de Quispe et al. Journal of Water Process Engineering 48 (2022), p. 11-16.

Tabla 18. Principales sistemas miniaturizados en el mundo

Configuración del sistema	Dimensión	Hora (día)	OLR (gDBO <sub>5</sub> /m <sup>2</sup> -día)	HLR / Caudal	TRH (h)	Referencia
<b>Filtro de biocarbón único</b>						
2,5 cm de profundidad de grava (arriba) + 50 cm de profundidad de biochar/carbón activado (centro) + 2,5 cm de profundidad de grava (abajo)	h: 65 cm $\varnothing$ : 4,3 cm	65	-	43 $\pi$	108 $\varphi$	Berger, 2012
2,5 cm de profundidad de grava (arriba) + 60 cm de profundidad de biochar (centro) + 2,5 cm de profundidad de grava (abajo)	h: 70 cm $\varnothing$ : 7,5 cm	39–77	3.9–19.4	34–400 $\pi$	66–85	Perez et al., 2019
5 cm de profundidad de grava (arriba) + 55–60 cm de profundidad de biochar/carbón activado/arena (centro) + 5 cm de profundidad de grava (abajo)	h: 55–60 cm $\varnothing$ : 5–20 cm	365	5–20	32–200 $\varphi$	66–108	Dalahmeh, 2016
2,5 cm de profundidad de grava (arriba) + 50 cm de profundidad de biochar/carbón activado/corteza (centro) + 2,5 cm de profundidad de grava (abajo)	h: 65 cm $\varnothing$ : 4,3 cm	70	76	32 $\pi$	-	Sidibe, 2014
16 cm de profundidad de biochar/arena/aserrad(arriba) + mosquitera y malla de alambre + grava	h: 22 cm $\varnothing$ : 19 cm	30	-	-	48	Adonadaga et al., 2020
1,4 cm de profundidad de grava (arriba) + 27 cm de profundidad de biochar/arena/biochar+arena +1,4 cm de profundidad de grava (abajo)	h: 36 cm $\varnothing$ : 7 cm	4	-	-	146.4	Biruktawit, 2019
2,5 cm de profundidad de grava (arriba) + 50 cm de profundidad de biochar/corteza/carbón activado/corteza+carbón activado (centro) + 2,5 cm de profundidad de grava (abajo)	h: 65 cm $\varnothing$ : 4,3 cm	63	76	32 $\pi$	90 $\varphi$ y 170 $\omega$	Molaei, 2014
Dosis: 0.25–2 g de (biochar/carbón activado) /L, tiempo de contacto: 2 h, velocidad de mezcla: 120 rpm	-	140	-	-	-	Thompson et al., 2020
<b>Filtro basado en multicapa</b>						
L0: Papel de filtro + L1: biochar puro/biochar enriquecido + L2: arena + L3: Esponja	-	1	-	-	-	Basnet, 2015

Configuración del sistema	Dimensión	Hora (día)	OLR (gDBO <sub>5</sub> /m <sup>2</sup> -día)	HLR / Caudal	TRH (h)	Referencia
L1: una mezcla de 2,5 g de biocarbón y 0,5 kg de arena	h: 400 cm ø: 1,27 cm	–	–	0,6 φ	–	Grenawi & Mahmoud, 2019
L1: 100 mm de altura de grava inferior (5–10 mm) + L2: 600 mm de altura de biochar (D10 = 1,4 mm, D60 = 3,1 mm) + L3: altura de 2 mm de polímero geotextil + L4: altura de 80 mm de mantillo + L5: altura de 70 mm de grava superior (5–10 mm) + L6: Lombrices de tierra	h: 85 cm ø: 60 cm	90	519–1580	Años 60 π	30	Niwagaba et al., 2014
L1: 20 cm de altura de arena media + L2: 20 cm de altura del bloque de mezcla de suelo (suelo, carbón, aserrín y polvo de hierro) + L3: 20 alturas de arena gruesa + L4: 20 cm de altura de grava fina + L5: 20 cm de altura de guijarros	h: 100 cm ø: 7,5 cm	7	–	24,3 φ	–	Deepa et al., 2019
L1: 15cm de altura de conchas de ostras trituradas (7,49 mm) + L2: 15 cm de altura de carbón (11,92 mm) + L3: 50 cm de altura de arena de playa	h: 100 cm ø: 5,08 cm	21	–	–	–	Owusu & Adjei, 2014
L0: malla de 212 μm y membrana filtrante de 20 mm de espesor + L1: 50 mm de altura de arena + L2: 350 mm de altura de biochar/carbón activado	h: 40 cm ø: 10,16 cm	2	–	33 π	–	Salihu, 2017
L1: Arena de piedra triturada (0,1–10 mm), L2: Biocarbón triturado (1–5 mm), L3: Paja de teff (0,25–1,0 mm)	V: 100	7	–	24 φ	–	Yaseen et al., 2019
L1: 0,15 m de altura de arena, L2: 0,1 m de altura de ladrillos, L3: 0,2 cm de altura de carbón, L4: 0,15 cm de altura de aserrín, L5: 0,2 cm de altura de las cubiertas de cáscara de coco	–	30	327 ω	180 φ	–	Denyer & Tranfield, 2009
<b>Tratamiento paso a paso en cadena</b>						
(1) Cribado, (2) Proceso de decantación, (3) Filtración (carbones de coco, biochar, grava y arena)	–	1	–	–	–	Roslan & Saji, 2020
(1) Proceso de coagulación/floculación/decantación, (2) Filtración (arena 10 g de arena y 10 g de biocarbón)	h: 11 cm ø: 2,0 cm	–	–	0,3 φ	–	Pedroza et al., 2021
(1) Tanque de sedimentación (cámara de entrada: 100 L, cámara de salida: 50L), (2) Sistema de filtro convencional con grava y arena (0.5 m <sup>3</sup> ), (3) Filtro de pulido con carbón, arena Kqalaqadi y materiales de ladrillo de desecho Makoro (25–50 L)	h: 70 cm ø: 8 cm	7	–	0,2 φ	–	Kadenge, 2019
(1) Sedimentación/filtración), (2) Humedal construido, (3) Adsorción con filtro de carbón vegetal (contenía plantas de jacinto de 0,60 m de profundidad)	a: 150 cm d: 900 cm h: 900 cm	365	10–350 β	–	30–240	Patil, 2016
(1) Tanque de recolección, (2) Filtración (carbón y filtros de arena lenta), (3) Unidad de desinfección ultravioleta	h: 90 cm ø: 50 cm	6	–	–	–	Abd et al., 2016
(1) Filtración de tamiz (malla de 5–2 mm), (2) Espuma y fibra sintética (tamaño de partícula – 200/100/50 μm), (3) Filtración de carbón vegetal (tamaño de cama: 25 cm, tamaño de partícula: 0.7–1.0 mm), Filtración de arena (tamaño de cama: 20 cm, tamaño de partícula: 0.1–0.2 mm), (4) Lámpara UV (longitud de onda de 253.7 nm)	–	300	–	16–20 φ	–	Nigam et al., 2013
(1) Pretratamiento de grava (7,62 cm de altura) y arena (10,16 cm de altura), (2) suelo de turba (7,62 cm de altura), carbón vegetal (5,08 cm de altura) y arena (5,08 cm de altura)	a: 41 cm d: 25,5 cm h: 30 cm	28	–	–	–	Mohamed et al., 2014
(1) Biocama 1, (2) Biocama 2, (3) Biocama 3, (4) Filtración (L1: 8 cm de altura de arena, L2: 7 cm de altura de carbón, L3: 5 cm de altura de arena)	a: 39.5 cm d: 23 cm h: 55 cm	35	–	12,24 φ	–	Chithra & Dandapani, 2017
(1) A02 AGDTP Ecomotive, (2) Filtración (2,5 cm de profundidad de grava (arriba) + 60 cm de profundidad de biochar/filtralita + 2,5 cm de profundidad de grava (abajo)	h: 60 cm d: 14 cm	180	–	280 φ	–	Moges et al., 2015
(1) Fosa séptica, (2) Filtración (60 cm de profundidad de biochar (arriba) + 15 cm de profundidad de grava (abajo)	a: 240 cm d: 60 cm h: 180 cm	90	40	114 π	–	Dalahmeh et al., 2016

NOTA:

OLR (β: en kg DQO/hab./día, ω: en mg DQO/L).

HLR (π: en L/m<sup>2</sup>-día, φ: en L/h).

Φ: tiempo medio de residencia.

ω: tiempo de residencia más largo.

Fuente: Adaptado de Quispe et al. *Journal of Water Process Engineering* 48 (2022) 102908, p. 8.

Tabla 19. Contaminantes regulados en el riego de vegetales

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales	
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido
<b>FISICOS Y QUÍMICOS</b>			
Aceites y Grasas	mg/L		5
Bicarbonatos	mg/L		518
Cianuro Wad	mg/L		0,1
Cloruros	mg/L		500
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co		100 (a)
Conductividad	( $\mu$ S/cm)		2 500
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L		15
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L		40
Detergentes (SAAM)	mg/L		0,2
Fenoles	mg/L		0,002
Fluoruros	mg/L		1
Nitratos (NO <sub>3</sub> -N) + Nitritos (NO <sub>2</sub> -N)	mg/L		100
Nitritos (NO <sub>2</sub> -N)	mg/L		10
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L		$\geq 4$
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH		6,5 – 8,5
Sulfatos	mg/L		1 000
Temperatura	$^{\circ}$ C		$\Delta 3$
<b>INORGÁNICOS</b>			
Aluminio	mg/L		5
Arsénico	mg/L		0,1
Bario	mg/L		0,7
Berilio	mg/L		0,1
Boro	mg/L		1
Cadmio	mg/L		0,01
Cobre	mg/L		0,2
Cobalto	mg/L		0,05
Cromo Total	mg/L		0,1
Hierro	mg/L		5
Litio	mg/L		2,5
Magnesio	mg/L		**
Manganeso	mg/L		0,2
Mercurio	mg/L		0,001
Níquel	mg/L		0,2
Plomo	mg/L		0,05
Selenio	mg/L		0,02
Zinc	mg/L		2
<b>ORGÁNICO</b>			
Bifenilos Policlorados (PCB)	$\mu$ g/L		0,04
<b>PLAGUICIDAS</b>			
Paratión	$\mu$ g/L		35
<b>Organoclorados</b>			
Aldrín	$\mu$ g/L		0,004
Clordano	$\mu$ g/L		0,006
Dicloro Difenil Tricloroetano (DDT)	$\mu$ g/L		0,001
Dieldrín	$\mu$ g/L		0,5
Endosulfán	$\mu$ g/L		0,01
Endrín	$\mu$ g/L		0,004
Heptacloro y Heptacloro Epóxido	$\mu$ g/L		0,01
Lindano	$\mu$ g/L		4
<b>Carbamato</b>			
Aldicarb	$\mu$ g/L		1
<b>MICROBIOLÓGICOS</b>			
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	1 000	2 000
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 ml	1 000	*
Huevos de Helminetos	Huevo/L	1	1

**Notas:**

(a): Para aguas claras, no se requieren ajustes adicionales. Sin embargo, en el caso de aguas que presenten coloración natural, no se considera un cambio anormal.

(b): Los valores indicados corresponden a mediciones después de aplicar un proceso de filtración simple.

(c): En el contexto del riego de áreas verdes, campos deportivos, parques públicos y plantas ornamentales, se aplican exclusivamente los parámetros microbiológicos específicos al tipo de riego no restringido.

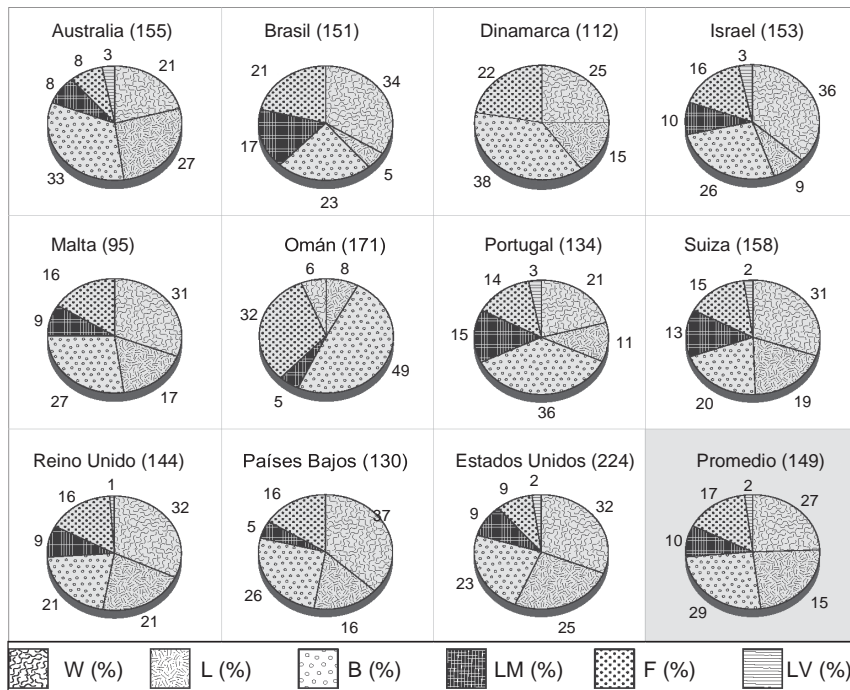
$\Delta 3$ : Este símbolo denota que se espera una variación de temperatura de hasta 3 grados Celsius con respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

El símbolo \* dentro de la tabla indica que el parámetro no es relevante ni aplicable en esta subcategoría.

Los valores de los parámetros se expresan en concentraciones totales, a menos que se indique lo contrario.

Fuente: Adaptado del Estándar de Calidad del Agua – ECA Agua (D.S. N° 004-2017-MINAM).

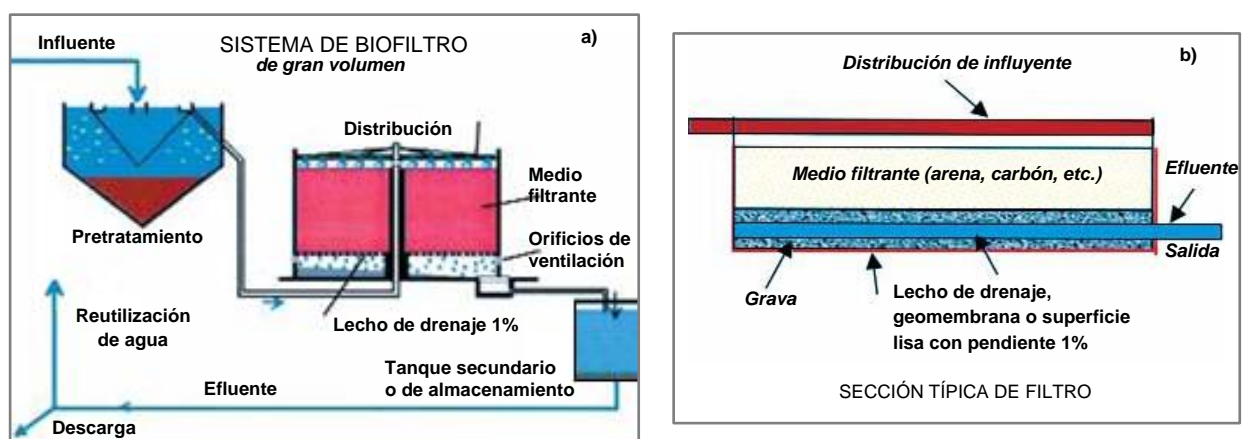
Figura 16. Características de las aguas grises domésticas en el mundo



**Nota:** Distribución del consumo de agua en hogares según su uso en distintos países (%). Los números entre paréntesis representan el consumo promedio diario de agua (L/hab./día). W: Descarga del inodoro o retrete. L: Lavadora. B: Baño y ducha. LM: Lavabo o lavamanos. F: Fregadero de cocina o lavaplatos. LV: Lavavajillas.

Fuente: Adaptado de Gross et al., 2015. p 2.

Figura 17. Esquema clásico de tratamiento de aguas grises domésticas



Fuente: Láminas a y b, sinóptico del tratamiento con filtro biológico. Adaptada de la Comisión Europea, 2001. p. 4-9.

Figura 18. Esquema de localización del lugar de estudio



Fuente: Google Maps, 2023. a) Vista aérea satelital y b) Vista aérea isométrica del estudio.