REPIAMA | Revista Peruana de Ingeniería, Arquitectura y Medio Ambiente

ARTÍCULO ORIGINAL

e-ISSN: 3084-7850

Análisis comparativo de métodos de tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas rurales del Perú

Comparative evaluation of domestic wastewater treatment methods in rural areas of Peru

Jhomel Albornoz Jaimes[1], **Angela Isabel Aliaga Fernández**[1], **Bany Gladimer Caico Meza**[1], **Yajaira Encarnación Tucto**[1]

Filiación institucional

[1] Municipalidad Provincial de Huánuco, Huánuco, Perú.

Recibido: 23-05-25
Aprobado: 04-07-25
Publicado: 17-07-25

RESUMEN

En las zonas rurales del Perú, el tratamiento de aguas residuales domésticas representa un desafío persistente debido a la limitada cobertura de saneamiento y a restricciones técnicas y económicas, lo que contribuye a la contaminación de cuerpos de agua, afecta la salud pública y dificulta el desarrollo sostenible de las comunidades rurales. El propósito de la presente investigación fue comparar la eficiencia de tres métodos alternativos de tratamiento de aguas residuales aplicables en contextos rurales. Se aplicó un enfoque descriptivo y parcialmente explicativo mediante el análisis documental de cuatro estudios científicos, tres tesis y un artículo, publicado entre 2015 y 2024, según su relevancia y aplicabilidad en comunidades rurales peruanas, evaluando biodigestores, tanques sépticos con bafles y humedales artificiales. Se evaluaron la eficiencia, los costos y la facilidad de instalación de estos tres métodos. Los resultados evidenciaron que los humedales artificiales mostraron la mayor eficiencia en la remoción de coliformes termotolerantes (99,99 %) y DBO5 (83,89 %), con bajo costo por vivienda (S/ 48.54) y una instalación sencilla. Los biodigestores presentaron también una alta eficiencia (97,48 % en coliformes), aunque con un costo significativamente mayor (S/ 4384.51 por vivienda) y una complejidad moderada en su instalación. Los tanques sépticos con bafles tuvieron una eficiencia limitada, un costo intermedio (S/ 417.56 por vivienda) y una mayor complejidad constructiva. Se concluyó que los humedales artificiales se posicionan como la opción más eficiente, económica y viable para zonas rurales; mientras que los biodigestores pueden implementarse en comunidades con mayores recursos, y los tanques sépticos requieren optimizaciones para alcanzar estándares adecuados de tratamiento.

Palabras clave: *saneamiento; desarrollo sostenible; medioambiente; salud pública; comparación de métodos.*

ABSTRACT

In rural areas of Peru, the treatment of domestic wastewater represents a persistent challenge due to limited sanitation coverage and technical and economic constraints, which contributes to the contamination of water bodies, affects public health, and hinders the sustainable development of rural communities. The purpose of the present research was to compare the efficiency of three alternative wastewater treatment methods applicable in rural contexts. A descriptive and partially explanatory approach was applied through documentary analysis of four scientific studies, three theses, and one article, published between 2015 and 2024, according to their relevance and applicability in Peruvian rural communities, evaluating biodigesters, septic tanks with baffles, and constructed wetlands. The efficiency, costs, and ease of installation of these three methods were evaluated. The results evidenced that constructed wetlands exhibited the highest efficiency in the removal of thermotolerant coliforms (99.99%) and BOD_5 (83.89%), with a low cost per household (S/ 48.54) and simple installation. Biodigesters also showed high efficiency (97.48% in coliforms), although with a significantly higher cost (S/ 4384.51 per household) and moderate complexity in installation. Septic tanks with baffles had limited efficiency, an intermediate cost (S/ 417.56 per household), and greater constructive complexity. It was concluded that constructed wetlands are positioned as the most efficient, economical, and viable option for rural areas; whereas biodigesters can be implemented in communities with greater resources, and septic tanks require optimizations to reach adequate treatment standards.

Keywords: *sanitation; sustainable development; environment; public health; comparison of methods.*

Citar como: Albornoz Jaimes, J., Aliaga Fernández, A. I., Caico Meza, B. G., Encarnación Tucto, Y. (2025). Análisis comparativo de métodos de tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas rurales del Perú. *Revista Peruana de Ingeniería, Arquitectura y Medio Ambiente, 2*(2), 118-27. https://doi.org/10.37711/repiama.2025.2.2.5

©Los autores.
Este es un artículo bajo la licencia de Creative Commons, CC-BY 4.0

Introducción

A nivel mundial, más del 80 % de las aguas residuales domésticas se vierten en cuerpos de agua sin tratamiento adecuado, lo que genera impactos sobre la salud y los ecosistemas (UN-Water, 2024). En países en desarrollo como la India, los problemas de saneamiento y agua potable persisten tanto en zonas rurales como urbanas, lo cual evidencia que la cobertura y el tratamiento de aguas residuales continúan siendo un desafío global (Agarwal et. al, 2022).

En el Perú, gran parte de las aguas residuales domésticas son vertidas sin el tratamiento apropiado, según la Superintendencia Nacional de Servicios y Saneamiento (SUNASS, 2016) & Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), el 32 % del volumen total de aguas residuales fue dispuesto directamente al ambiente, lo que generó impactos sociales, económicos y ambientales (Aguilar, 2018). Esta situación se agravó en los últimos años, y se registró un incremento del 6,4 % en las descargas sin tratamiento en el 2023 respecto al año anterior (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2024). En las zonas rurales, la cobertura de alcantarillado apenas alcanza el 26,5 % de la población, mientras que en las zonas urbanas llega al 86,6 %, lo que refleja una marcada desigualdad en el acceso a servicios de saneamiento (ComexPerú, 2023).

Esta deficiencia afecta la salud pública y la calidad de vida de los habitantes rurales, ya que las aguas servidas no tratadas causan enfermedades infecciosas como diarreas, parasitosis y hepatitis A, principalmente en niños y adultos mayores (World Health Organization, 2024). Ante esta problemática, diversos autores han propuesto soluciones tecnológicas sostenibles y de bajo costo. Mara (2004) plantea el uso de sistemas naturales como lagunas de estabilización y humedales construidos; Mekonnen & Hoekstra (2018) destacan los biodigestores como una opción para el tratamiento de residuos orgánicos y la generación de biogás, y Tilley et al. (2014) describen los tanques sépticos como una alternativa de tratamiento primario, aunque requieren procesos secundarios para cumplir con estándares ambientales. La identificación y la comparación de estos métodos resultan fundamentales para orientar políticas públicas y mejorar la gestión del saneamiento en el ámbito rural peruano.

Ante esta situación, la presente investigación tiene como objetivo comparar tres métodos alternativos de tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas rurales del Perú —biodigestores, tanques sépticos con bafles y humedales artificiales—, evaluando su eficiencia, costo, facilidad de instalación y sostenibilidad, con el fin de determinar la opción más viable para fortalecer la gestión hídrica y sanitaria en comunidades rurales.

Métodos

Según Creswell (2014), la investigación se basa en un enfoque cualitativo, dado que se centra en la recopilación, análisis e interpretación de información documental y científica para comprender las características y diferencias entre los métodos de tratamiento de aguas residuales domésticas aplicados en zonas rurales del Perú. Se trata de una revisión literaria: sintetizar y comparar información existente proveniente de tesis y artículos científicos que abordan el uso de tanques sépticos, biodigestores y humedales artificiales (Manterola et. al, 2013). Se emplea un diseño de investigación documental y comparativa, que permite identificar, describir y contrastar la eficacia de los parámetros, la instalación y el costo de los tres métodos, considerando su adecuación a las condiciones socioeconómicas y ambientales de las comunidades rurales (Carvajal, 2020). La revisión se centra en zonas rurales del Perú que requieren la implementación de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica de fuentes publicadas, incluyendo artículos científicos, informes técnicos y experiencias aplicadas, con el objetivo de identificar el estado actual, las limitaciones y las oportunidades de implementación de estos sistemas.

Variable e instrumentos de recolección de datos

En esta investigación se analizaron tres variables: eficiencia, costo y operación de los métodos de tratamiento de aguas residuales mediante tanques sépticos, humedales artificiales y biodigestores en zonas rurales del Perú. La eficiencia se midió a través de la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), de los niveles de coliformes fecales y de la calidad del agua (Cáceres Poma et al., 2019). Incluyó los costos de implementación,

operación y mantenimiento de los sistemas, considerando infraestructura, materiales y mano de obra (Quispe, 2021). La operación se evaluó según la facilidad de funcionamiento, la intervención humana y las necesidades de monitoreo (Jiménez Tamayo et al., 2024).

Técnicas y procedimientos de la recolección de datos

Se realizó una búsqueda sistemática entre abril y junio de 2024 en bases de datos como Scopus, Google Scholar, Redalyc y SciELO. Se utilizaron palabras clave combinadas con operadores booleanos ("tratamiento de aguas residuales" AND "zonas rurales" AND "Perú"). Inicialmente se identificaron cuarenta y ocho estudios; tras aplicar los criterios de inclusión (publicaciones entre 2015 y 2024, estudios aplicados al contexto rural peruano, acceso abierto y con datos técnicos sobre eficiencia, costo o instalación), quedaron doce estudios elegibles. Finalmente, se seleccionaron cuatro investigaciones (tres tesis y un artículo científico) por su mayor relevancia técnica y disponibilidad de información (Tabla 1). Este proceso se resume en un diagrama de flujo tipo PRISMA simplificado, que muestra las etapas de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión según el flujo mostrado en la Figura 1 (Corona Martínez y Fonseca Hernández, 2023).

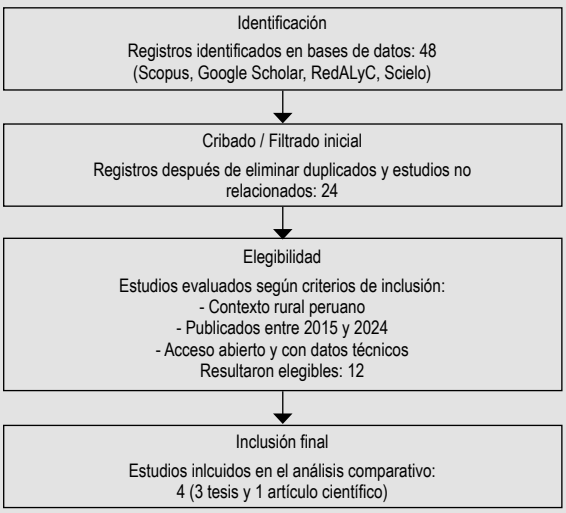
Tabla 1

Características de las investigaciones seleccionados para el análisis

Nombre del trabajo	Tipo de investigación / Autores	Lugar de estudio / Área rural	Coordenadas	Método de tratamiento	Link
"Eficiencia de los biodigestores prefabricados en el tratamiento de aguas residuales domésticas en la localidad de Ñausilla"	Tesis para optar el título profesional de ingeniero civil (Prudencio y Vargas, 2018)	Huánuco, Pachitea, Umari/Ñausilla	Lat. -9.8710 / Lon. -75.9641 (aprox.)	Biodigestor	https://hdl.handle.net/20.500.13080/4408
"Tratamiento de aguas residuales con el tanque séptico con bafles en comparación al tanque imhoff"	Tesis para optar el título profesional de ingeniera civil (Carbajal Huincho, 2021)	Junín, Huancayo, El Tambo	Lat. -12.0736 / Lon. -75.2062 (aprox.)	Tanque séptico con bafles	https://hdl.handle.net/20.500.12848/2936
"Tratamiento de aguas residuales domésticas con la especie vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en humedales de flujo subsuperficial"	Artículo científico, (Purihuamán y Rojas, 2018)	Lambayeque, Lambayeque, San José	Lat. -6.7685 / Lon. -79.9086 (aprox.)	Humedal artificial con Chrysopogon zizanioides (vetiver)	https://revistas.uss.edu.pe/index.php/tzh/article/view/792/pdf
"Diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales para el centro poblado de Chijichaya-Puno"	Tesis para optar el título profesional de ingeniero ambiental (Ticona, (2024)	Puno, San Román, Cabanillas /Chijichaya	Lat. -15.4891 / Lon. -70.1374 (aprox.)	Humedal artificial de flujo subsuperficial	https://repositorio.upsc.edu.pe/bitstream/handle/UPSC/704/Brandonly_Jens_TICONA_CALLATA.pdf

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA



Fuente: adaptado de Corona Martínez y Fonseca Hernández (2023).

Análisis de datos

El análisis de datos se realizó mediante tablas comparativas que organizaron y contrastaron la información técnica de los tres métodos evaluados. Según Hernández Sampieri et al. (2014), este recurso es esencial en estudios descriptivo-comparativos para identificar diferencias clave entre variables. Se utilizó Microsoft Excel como herramienta de apoyo, dado su valor en la representación visual y ordenada de los datos, lo que también es respaldado por Hernández Martín (2012) al promover el uso de aplicaciones informáticas accesibles en el análisis descriptivo.

Resultado

Para el análisis comparativo de métodos de tratamiento de aguas residuales en zonas rurales del Perú, se utilizaron tres métodos: biodigestores, tanques sépticos con bafles y humedales artificiales, de los cuales se abarcaron tres datos técnicos: su instalación, su costo y sus parámetros.

a) Datos técnicos del método de biodigestor

Instalación

La instalación del biodigestor inició con su transporte cuidadoso, evitando arrastres o golpes para proteger las conexiones internas. Se eligió un lugar apropiado, conforme a la norma IS.020, considerando futuras ampliaciones de la vivienda. La excavación fue adecuada para un biodigestor de 600 L, con 30 cm de margen, base compactada y una cama de arena de 20 cm. Tras perfilar el talud, el biodigestor se colocó y niveló cuidadosamente. Se conectaron las tuberías de entrada y salida con pegamento de PVC y se estabilizó la estructura rellenando con arena y agua. Posteriormente, se llenó el biodigestor con agua, se instaló el biofiltro (aros PETS y piedras planas) para evitar obstrucciones y se selló la tapa con cinta teflón. Finalmente, se colocó la caja de lodos prefabricada, conectando la válvula para permitir la infiltración del líquido al subsuelo mediante un sistema sin fondo (Prudencio y Vargas, 2018).

Costo

El biodigestor representa una alternativa técnicamente eficiente, aunque económicamente más costosa, para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas rurales. Su costo directo incluye materiales, mano de obra, transporte e impuestos (IGV). Según un estudio realizado en la localidad rural de Ñausilla, el costo total de instalación de un biodigestor para 42 beneficiarios fue de S/ 184 149.42, lo que equivale a un costo por vivienda de S/ 4384.51 (Prudencio y Vargas, 2018).

Parámetros

El uso de biodigestores muestra una alta eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas, con una remoción del 97,48 % de coliformes termotolerantes, destacando su efectividad contra la contaminación biológica. Se alcanzó una eficiencia del 20,18 % en demanda química de oxígeno (DQO), dentro de los límites normativos, y del 91,43 % en DBO, superando los estándares del Reglamento Nacional de Edificaciones-Norma OS.090. Además, los sólidos totales fueron de 1.0 mg/l, con una eficiencia del 44,81 %. Estos resultados confirman que los biodigestores son una opción viable y eficiente para tratar excretas, logrando más del 80 % de remoción de DBO en Ñausilla (Prudencio y Vargas, 2018).

b) Datos técnicos del método de tanques sépticos con bafles

Instalación

Según la tesis, la instalación del tanque séptico con bafles requiere la construcción de varios componentes interconectados. Estos incluyen una cámara de rejas de concreto armado para la preeliminación de sólidos gruesos; el tanque séptico con bafles de concreto armado diseñado para la sedimentación, almacenamiento y digestión de la materia orgánica, y filtros anaerobios también de concreto armado para un tratamiento secundario. Adicionalmente, se construye una caja de reunión para la confluencia de flujos, una cámara de contacto de cloro para la desinfección, un lecho de secado de lodos para el manejo de los subproductos sólidos y un medidor de

caudal para el control del flujo del sistema. Esta instalación tiene una duración de aproximadamente sesenta días (Carbajal Huincho, 2021).

Costo

Según la tesis, el costo total de construcción de un tanque séptico con bafles fue de S/ 81 842.76, incluyendo partidas técnicas como trabajos preliminares (S/ 361.57), movimiento de tierras (S/ 7278.51), concreto simple (S/ 744.34), concreto armado (S/ 52 491.40), revoques y enlucidos (S/ 6339.82), pintura y complementos (S/ 1131.15), pruebas de calidad del concreto (S/ 675) e instalaciones hidráulicas (S/ 12 820.97). El diseño fue para 810 personas (196 viviendas), estimando un costo por familia de S/ 417.57. Esto representa una opción viable y técnicamente adecuada para zonas rurales, con beneficios en salud pública y reducción de contaminación (Carbajal Huincho, 2021).

Parámetros

Según la tesis, el efluente del tanque séptico con bafles presenta las siguientes características fisicoquímicas: la DBO5 alcanza los 162,00 mg/L, la DQO se sitúa en 220,00 mg/L y la concentración de aceites y grasas es de 10,40 mg/L. El pH del efluente es de 8.54, mientras que los sólidos suspendidos totales (SST) alcanzan los 390,00 mg/L. Además, se registra una concentración de coliformes termotolerantes de 606 NMP/100 mL, y la temperatura del agua es de 14 °C (Carbajal Huincho, 2021).

c) Datos técnicos del método de humedales artificiales

Instalación

Se acondicionó el área para la estación experimental mediante la limpieza y excavación de un humedal artificial de 100 cm de largo, 80 cm de ancho y 50 cm de profundidad. Se rellenó con capas de rocas menores de seis pulgadas, piedra chancada de media pulgada, arena, tierra agrícola y humus para soporte de plantas de vetiver. Se instaló un sistema de riego con un tanque PET de 50 L que recibió agua residual doméstica, y se colocaron tubos de PVC de una pulgada con llaves de paso en la entrada y salida para controlar el caudal y facilitar la toma de muestras y la descarga del reactor (Ticona, 2024).

Costo

El presupuesto referencial para la construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSH) fue de S/ 15 970, para beneficiar a 329 viviendas del centro poblado de Chijichaya, lo que representa un costo por vivienda de S/ 48.54. Este monto incluyó la limpieza del terreno (375 m^2) por S/ 180, trazado y replanteo (350 m^2) por S/ 520, excavación del terreno (280 m^3) por S/ 1800, contratación de topógrafo por S/ 2000, compactado y mejoramiento (350 m^2) por S/ 900, construcción de taludes (78 m^3) por S/ 1500, impermeabilización con geomembrana (358 m^2) por S/ 7200, provisión y colocación de grava (40 m^3) por S/ 500, tubería de doce pulgadas para afluente y efluente por S/ 30, adquisición de cincuenta plantas acuáticas por S/ 100 e implementación por S/ 90. Estos costos cubren todos los elementos necesarios para garantizar el adecuado funcionamiento del humedal como sistema de tratamiento natural de aguas residuales (Ticona, 2024).

Parámetros

Los resultados obtenidos en cuanto al porcentaje de remoción de estos parámetros fueron los siguientes: 99,53 % (turbidez), 95,51 % (SST), 83,89 % (DBO5), 72,97 %(DQO), 88,89 % (aceites y grasas) y 99,99 % (coliformes termotolerantes), encontrándose diferencias significativas ($p<0.05$). Por lo tanto, al comparar estos resultados con los límites permisibles de efluentes para vertidos a cuerpos de agua, los valores están por debajo de los establecidos (Purihuamán y Rojas, 2018).

Análisis comparativo de los tres métodos

La Tabla 2 muestra que el biodigestor requiere una instalación moderada en cincuenta días; los tanques sépticos son más complejos y tardan más de sesenta días; mientras que los humedales artificiales son sencillos de instalar, con solo diez días de ejecución.

Tabla 2

Tabla comparativa de la instalación de los métodos de biodigestor, tanques sépticos con bafles y humedales artificiales

Criterio	Biodigestor	Tanques sépticos con bafles	Sistemas de humedales artificiales
Descripción de la instalación	Incluye diagnóstico inicial, limpieza del terreno, excavación, construcción de caja de lodos y fijación de tuberías.	Construcción de múltiples componentes: cámara de rejas, tanque séptico, filtros anaerobios y cámara de cloración para desinfección.	Excavación del área del humedal, colocación de capas filtrantes (rocas, piedra chancada, arena, tierra agrícola) y sistema de riego.
Complejidad técnica	Moderada: requiere fases técnicas básicas y componentes específicos, pero no altamente especializados.	Alta: exige integración de varios sistemas de tratamiento (físico, biológico y químico), lo que incrementa la dificultad.	Baja: implica preparación del terreno, siembra de plantas acuáticas y riego; construcción sencilla y de bajo mantenimiento.
Tiempo estimado de ejecución	Aproximadamente cincuenta días para la instalación completa, considerando obra civil y conexión hidráulica.	Aproximadamente sesenta días o más, debido a su estructura compleja y múltiples etapas de instalación.	Aproximadamente diez días, gracias a su implementación simple y rápida en campo.

La Tabla 3 muestra que el tanque séptico tiene un costo intermedio y el biodigestor resulta el más costoso por hogar, pese a beneficiar menos familias.

Tabla 3

Tabla comparativa del costo de los métodos de biodigestor, tanques sépticos con bafles y humedales artificiales

Método	N.° de familias	Costo total	Costo por familia
Biodigestor	42	S/ 184 149.42	S/ 4384.51
Tanques sépticos con bafles	196	S/ 81 842.76	S/ 417.56
Humedales artificiales	329	S/ 15 970	S/ 48.54

La Tabla 4 muestra que el biodigestor destaca en la reducción de sólidos y coliformes; los tanques sépticos con bafles tienen eficiencia moderada, especialmente en materia orgánica, y los humedales artificiales muestran una alta eficacia en parámetros físicos y microbiológicos, siendo la opción más completa.

Tabla 4

Tabla comparativa de los parámetros de los métodos de biodigestor, tanques sépticos con bafles y humedales artificiales

Parámetro / Criterio	Biodigestor	Tanques sépticos con bafles	Humedales artificiales
DBO5 (demanda bioquímica de oxígeno)	Reducción del 84,9 %	Valor final: 162 mg/L	Reducción del 83,89 %
DQO (demanda química de oxígeno)	Reducción del 82 %	Valor final: 220 mg/L	Reducción del 72,97 %
Aceites y grasas	Reducción del 82,5 %	Concentración: 10.4 mg/L	Reducción del 88,89 %
Sólidos suspendidos totales (SST)	Reducción del 89,5 %	—	Reducción del 95,51 %
Turbidez	—	—	Reducción del 99,53 %
Coliformes totales	Reducción del 98,3 %	—	—
Coliformes termotolerantes	Reducción del 97,3 %	606 NMP/100 mL	Reducción del 99,99 %
Resultado general / Eficiencia	Alta eficiencia, especialmente en la eliminación de coliformes y sólidos.	Eficiencia moderada, con mejores resultados en parámetros biológicos y orgánicos.	Alta eficiencia, destacando en parámetros físicos y microbiológicos.

Discusión

La instalación de tecnologías de tratamiento de aguas residuales en zonas rurales del Perú varía en su nivel de complejidad. En el caso de los biodigestores, Prudencio y Vargas (2018) afirman que su instalación es de complejidad moderada porque requiere excavaciones profundas, tuberías y caja de lodos. Esto coincide directamente con lo que señala Mara (2004), quien también resalta la dificultad en su implementación debido a la necesidad de impermeabilizar correctamente el sistema y controlar las pendientes del terreno. Dichos autores están hablando de lo mismo, ya que se refieren a la instalación compleja por las condiciones físicas del terreno y los cuidados técnicos requeridos.

Para los tanques sépticos con bafles, Carbajal Huincho (2021) indica que su instalación es compleja por tener múltiples cámaras, filtros y sistemas de desinfección. Tchobanoglous et al. (2003) coinciden plenamente al mencionar que este sistema exige un diseño hidráulico preciso y materiales resistentes. Es decir, estos autores coinciden en que se trata de un sistema difícil de implementar y lo explican desde el mismo enfoque: la necesidad de precisión técnica y materiales adecuados. En tal sentido, resulta importante destacar que los tanques sépticos requieren obligatoriamente un tratamiento secundario complementario, como filtros anaerobios o humedales subsuperficiales, para cumplir con los límites máximos permisibles de vertimiento establecidos por las normas ambientales peruanas, garantizando así la protección de los cuerpos receptores y la salud pública. En cambio, los humedales artificiales son considerados de instalación sencilla según Ticona (2024), ya que requieren solo excavaciones superficiales y plantación de vegetación. Kadlec & Wallace (2009) también destacan que pueden implementarse rápidamente con recursos locales. Esto muestra una coincidencia clara, ya que ambas fuentes reconocen que los humedales son fáciles de instalar porque requieren pocos recursos y poca profundidad.

En cuanto al costo, el biodigestor, valorizado en S/ 4384.51 por beneficiario (Prudencio y Vargas, 2018), es señalado como costoso para zonas rurales. Esto contrasta con lo afirmado por Flores et al. (2022), quienes lo consideran una alternativa económica. Aquí hay una discrepancia directa entre autores que analizan el mismo sistema desde perspectivas distintas: uno según el costo real observado en campo y otro desde la teoría. Para los tanques sépticos con bafles, Carbajal Huincho (2021) informa un alto costo de S/ 81 845.76, Deeptha, Sudarsan y Baskar (2015) coinciden en señalar que los sistemas convencionales tienen elevados costos de instalación y mantenimiento. Ambas fuentes están hablando del alto costo que impide su aplicación en comunidades rurales de bajos recursos. En cuanto a los humedales artificiales, Ticona (2024) menciona un costo de S/ 15 970 y Pezzaniti et al. (2019) agregan que su bajo requerimiento operativo y de mantenimiento los hace sostenibles. Coinciden en la misma idea: aunque no son los más baratos inicialmente, los humedales terminan siendo económicos a largo plazo, lo que los hace atractivos para las comunidades rurales.

Respecto a la eficiencia de tratamiento, los biodigestores logran el 91,43 % de remoción de DBO y el 97,48 % en coliformes (Prudencio y Vargas, 2018). Esta afirmación se refuerza con Rios Garay et al. (2019), quienes señalan que los biodigestores pueden superar el 89 % de eficiencia. Aquí hay un acuerdo directo, ya que dichos autores destacan la alta efectividad de este sistema en contextos rurales. Los tanques sépticos con bafles, según Carbajal Huincho (2021), registran eficiencia limitada: 162 mg/L de DBO5 y 606 NMP/100 mL en coliformes. Tilley et al. (2014) refuerzan esta afirmación al referir que estos sistemas solo brindan un tratamiento primario básico. Ambas fuentes coinciden en que esta tecnología es insuficiente si se utiliza sola y necesita ser complementada para cumplir con los estándares ambientales. En este sentido, desde una perspectiva técnica y normativa, se resalta la necesidad de incorporar tratamientos secundarios —como filtros biológicos o humedales de flujo subsuperficial— para que los tanques sépticos cumplan efectivamente con los parámetros exigidos por la legislación peruana sobre vertimientos. Por último, los humedales artificiales alcanzan una remoción del 83,89 % en DBO5 y del 99.99 % en coliformes (Ticona, 2024). Deeptha, Sudarsan y Baskar (2015) confirman su alta eficiencia en la eliminación de materia orgánica y patógenos. Dichos autores están hablando de lo mismo: la gran capacidad de los humedales para mejorar la calidad del agua tratada.

En el contexto de la política pública y la sostenibilidad, los resultados de este estudio evidencian la necesidad de promover tecnologías de tratamiento de aguas residuales que sean descentralizadas, sostenibles y adaptables a las condiciones rurales. Los humedales artificiales destacan como una alternativa que puede ser incorporada

en los programas nacionales de saneamiento rural, al requerir baja inversión y mínimo mantenimiento, así como generar beneficios ambientales y sociales directos. Igualmente, la implementación de estas tecnologías contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 6 y 13), relacionados con el acceso al agua limpia, al saneamiento y a la acción por el clima, fortaleciendo así las estrategias de gestión ambiental del Estado y de las municipalidades rurales.

La investigación se basó en el análisis documental de fuentes secundarias, por lo que los resultados dependen de la precisión, calidad y metodología de los estudios consultados. No se realizaron mediciones experimentales en campo, lo que impide contrastar directamente la eficiencia real de los sistemas evaluados bajo condiciones locales. Algunos estudios presentaron diferencias en sus unidades de medida o condiciones de operación, lo cual puede generar ligeras variaciones comparativas entre tecnologías. La información económica proviene de estudios con contextos geográficos distintos, por lo que los costos podrían variar en función de la ubicación y disponibilidad de materiales.

Conclusiones

Los humedales artificiales se consolidan como la alternativa más eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas rurales del Perú, destacando por su alta remoción de coliformes termotolerantes (99,99 %), bajo costo por vivienda (S/ 48,54) y facilidad de implementación con recursos locales. Los biodigestores representan una solución funcional para el tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales, destacando por su alta eficiencia en la remoción de contaminantes biológicos. Sin embargo, su costo por vivienda (S/ 4384.51) resulta elevado en comparación con otras alternativas, lo que puede limitar su implementación a gran escala. Además, su instalación requiere un nivel de complejidad técnica moderado. Los tanques sépticos con bafles, a pesar de su aplicación en algunas zonas rurales, presentan limitaciones debido a su alta inversión inicial (S/ 81 842.76), instalación compleja y baja eficiencia en parámetros críticos de calidad del efluente, lo que exige tratamientos complementarios para cumplir con estándares ambientales.

La presente investigación resulta de gran importancia porque contribuye a la comprensión y comparación técnica de tecnologías descentralizadas de tratamiento de aguas residuales aplicables a zonas rurales del Perú, donde persisten brechas significativas de acceso al saneamiento y los sistemas convencionales no suelen ser viables por sus altos costos y su complejidad operativa. Los resultados obtenidos permiten orientar la toma de decisiones de municipalidades, programas de saneamiento y comunidades rurales, promoviendo alternativas sostenibles, de bajo costo y adaptadas a las condiciones socioeconómicas del país, como los humedales artificiales. Para futuras investigaciones, se recomienda desarrollar estudios experimentales en campo que permitan evaluar el desempeño real de estos sistemas bajo condiciones climáticas y geográficas diversas, así como analizar su sostenibilidad a largo plazo, los costos de mantenimiento y la aceptación social de las comunidades. Asimismo, sería valioso incorporar evaluaciones de impacto ambiental y estudios comparativos con tecnologías emergentes, con el fin de fortalecer las políticas públicas de saneamiento rural y promover soluciones eficientes y ambientalmente responsables.

Agradecimiento

Agradecemos sinceramente a nuestro asesor, el Mg. Niler Rosario Chahua García, por su valiosa orientación y asesoramiento técnico durante el desarrollo de esta investigación.

Igualmente, extendemos nuestro reconocimiento a Marino Percy Yauri Maylle por su importante colaboración en el presente artículo.

Referencias

Agarwal, S., Darbar, S., & Saha, S. (2022). *Chapter 25-Challenges in Management of Domestic Wastewater for Sustainable Development*. En A. L. Srivastav, S. Madhav, A. K. Bhardwaj & E. Valsami-Jones. (Eds.), *Current Directions in Water Scarcity Research: Urban Water Crisis and Management - Strategies for Sustainable Development* (vol. 6, pp. 531-552). Elsevier. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323918381000191?via%3Dihub

Cáceres Poma, D. K., Calisaya Vera, G. M., y Bedoya Justo, E. V. (2019). *Eficiencia de la lombriz roja californiana*

(*Eisenia foetida*) en el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista Ciencia y Tecnología para el Desarrollo-UJCM*, (4), 13-23. https://revistas.ujcm.edu.pe/index.php/rctd/article/view/115

Carbajal Huincho, Á. F. (2021). *Tratamiento de aguas residuales con el tanque séptico con bafles en comparación al tanque imhoff* [Tesis para optar el título profesional de ingeniera civil, Universidad Peruana Los Andes]. Repositorio Institucional UPLA. https://hdl.handle.net/20.500.12848/2936

Carvajal, R. V. (2020). *Metodología de la investigación: investigación bibliográfica/documental*. Universidad Francisco Gavidia. https://ri.ufg.edu.sv/jspui/bitstream/11592/9845/1/Tecnicas-de-investigacion-documental%20%281%29.pdf

ComexPerú. (2023). *3 de cada 4 personas en zonas rurales no posee el servicio de alcantarillado por red pública*. https://www.comexperu.org.pe/articulo/3-de-cada-4-personas-en-zonas-rurales-no-posee-el-servicio-de-alcantarillado-por-red-publica

Corona Martínez, L. A., y Fonseca Hernández, M. (2023). *Uso y abuso de los criterios de inclusión y exclusión en el proyecto de investigación. Medisur*, *21*(5), 1144-1146. https://medisur.sld.cu/index.php/medisur/article/view/5744/4247

Creswell, J. W. (2014). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (4.ª ed.). SAGE Publications. https://www.researchgate.net/profile/Leopold-Hamminger/post/Can_you_help_me_clarify_what_type_of_qualitative_research_design_to_use/attachment/59d64d4579197b80779a6db2/AS%3A487475249455105%401493234564396/download/Creswell+-+Research+Design.pdf

Deeptha, V. T., Sudarsan, J. S., & Baskar, G. (2015). *Performance and cost evaluation of constructed wetland for domestic waste water treatment*. *Journal of Environmental Biology, 36*(5), 1071–1074. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26521546/

Hernández Martín, Z. (2012). *Métodos de análisis de datos: apuntes*. Universidad de La Rioja. https://www.unirioja.es/cu/zehernan/docencia/MAD_710/Lib489791.pdf

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education. https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2024). *Perú: anuario de estadísticas ambientales 2024*. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1994/libro.pdf

Jiménez Tamayo, F. M., Moreno López, J. A., Encalada Zumba, M. C., y Vargas Peralvo, E. A. (2024). *Análisis de las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales: una revisión bibliográfica.* La Técnica: Revista de las Agrociencias, *14*(2), 103-117. https://doi.org/10.33936/latecnica.v14i2.6467

Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment wetlands* (2.ª ed.). CRC Press. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KADLEC%20WALLACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition_0.pdf

Manterola, C., Astudillo, P., Arias, E., y Claros, N. (2013). Revisiones sistemáticas de la literatura. Qué se debe saber acerca de ellas. *Cirugía Española, 91*(3), 149-155. https://www.elsevier.es/es-revista-cirugia-espa%C3%B1ola-36-articulo-revisiones-literatura-que-se-S0009739X11003307

Mara, D. (2004). *Domestic wastewater treatment in developing countries*. Earthscan. https://www.pseau.org/outils/ouvrages/earthscan_ltd_domestic_wastewater_treatment_in_developing_countries_2003.pdf

Pezzaniti, D., Beecham, S., & Myers, B. (2019). Economic viability of small-scale wastewater systems in remote communities. Journal of Cleaner Production, 228, 1473–1483. https://es.genesiswatertech.com/blog-post/small-scale-wastewater-treatment systems/#aeratedtreatmentsystems

Prudencio, J., & Vargas, R. O. (2018). *Eficiencia de los biodigestores prefabricados en el tratamiento de aguas residuales domésticas en la localidad de Ñausilla* [Tesis para optar el título profesional de ingeniero civil, Universidad Nacional Hermilio Valdizán]. Repositorio Institucional UNHEVAL. https://hdl.handle.net/20.500.13080/4408

Purihuamán, C. N., y Rojas, M. Y. (2018). Tratamiento de aguas residuales domésticas con la especie vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en humedales de flujo subsuperficial. *TZHOECOEN*, *10*(1), 13-24. https://revistas.uss.edu.pe/index.php/tzh/article/view/792/pdf

Quispe, W. (2021). Análisis de la variación de costos involucrados en los presupuestos de las obras de saneamiento antes y después de las paralizaciones de obra por efecto del COVID-19, Huancayo - 2020, Junín [https://purl.org/pe-repo/renati/type#tesis, Universidad Continental]. https://hdl.handle.net/20.500.12394/10423

Rios Garay, J. G., Cisneros Pariona, L. Z., & Amparo Cruz, M. (2019). *Eficiencia de un biodigestor en el tratamiento de agua residual doméstica a nivel familiar en la Asociación "Los Víquez" Carapongo – Lurigancho Chosica – Lima* (Tesis de licenciatura). Universidad Peruana Unión. https://hdl.handle.net/20.500.12840/1815

Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS) & Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). (2016). *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales en el ámbito de operación de las Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento*. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1099706/Sunass__GIZ__2016_._Diagn%C3%B3stico_de_las_plantas_de_tratamiento_de_aguas_residuales_en_el_%C3%A1mbito_de_operaci%C3%B3n_de_las_Entidades_Prestadoras_de_Servicios_de_Saneamiento..pdf?v=1596171957

Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4.ª ed.). McGraw-Hill. https://ptabdata.blob.core.windows.net/files/2017/IPR2017-01468/v22_FWS1016%20-%20Metcalf.pdf

Ticona, B. J. (2024). *Diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales para el centro poblado de Chijichaya-Puno* [Tesis para optar el título profesional de ingeniero ambiental, Universidad Privada San Carlos]. Repositorio Institucional UPSC. https://repositorio.upsc.edu.pe/bitstream/handle/UPSC/704/Brandonly_Jens_TICONA_CALLATA.pdf

Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. (2014). *Compendium of Sanitation Systems and Technologies* (2.ª ed.). Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/TILLEY%20et%20al%202014%20Compendium%20of%20Sanitation%20Systems%20and%20Technologies%202nd%20Revised%20Edition.pdf

UN-Water. (2024). *Progress on Wastewater Treatment-2024 Update*. https://www.unwater.org/publications/progress-wastewater-treatment-2024-update

Wastewater treatment technology for developing countries. (2015, January 5). *World Pumps.* https://www.worldpumps.com/content/features/wastewater-treatment-technology-for-developing-countries

World Health Organization. (2024). *Sanitation*. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/sanitation

Fuentes de financiamiento
La investigación fue realizada con recursos propios.

Conflictos de interés
Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Correspondencia:
Angela Isabel Aliaga Fernández
E-mail: aliagaangela890@gmail.com