ISSN-e: 2542-3401
Período: octubre–diciembre, 2026

Universidad, Ciencia y Tecnología
Vol. 30, Núm. 133 (pp. 76–84)

Artículo de investigación

https://doi.org/10.47460/uct.v30i133.1131

Eficiencia de *Guadua angustifolia Kunth* en la fitorremediación de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales

Yesica Yesenia Neira Huacchillo*
https://orcid.org/0009-0004-8756-9335
2016101418@ucss.pe
Universidad Católica Sedes Sapientiae
Lima, Perú

Cornelio Mulatillo Ruiz
https://orcid.org/0000-0002-8047-1253
cmulatillo@ucss.edu.pe
Universidad Católica Sedes Sapientiae
Lima, Perú

Anacely Yovani Calderon Montalvan
https://orcid.org/0000-0002-6713-3428
2014101921@ucss.pe
Universidad Católica Sedes Sapientiae
Lima, Perú

**Autor de correspondencia: 2016101418@ucss.pe*

Recibido: (05/08/2026), Aceptado: (30/10/2026)

Resumen. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de *Guadua angustifolia Kunth* en la fitorremediación de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical. Se desarrolló un estudio experimental con tres tratamientos: un humedal con cinco plantas (H1), otro con diez plantas (H2) y un sistema testigo sin vegetación (Ht). Se analizaron la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), aceites y grasas y coliformes termotolerantes. Los resultados evidenciaron que H2 alcanzó los mayores porcentajes de remoción, con 98,0 % para DBO_5, 97,0 % para DQO, 95,5 % para SST, 69,1 % para aceites y grasas y 80,5 % para coliformes termotolerantes. Asimismo, este tratamiento presentó un comportamiento favorable respecto al cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles establecidos en la normativa peruana. Se concluye que *Guadua angustifolia Kunth* presenta potencial para su aplicación en sistemas de tratamiento descentralizado de aguas residuales domésticas, particularmente como alternativa de saneamiento ambientalmente sostenible.

Palabras clave: tratamiento de aguas residuales, fitorremediación, *Guadua angustifolia*, humedal artificial.

Efficiency of *Guadua angustifolia Kunth* in the Phytoremediation of Domestic Wastewater Using Constructed Wetlands

Abstract. The objective of this research was to evaluate the efficiency of *Guadua angustifolia Kunth* in the phytoremediation of domestic wastewater through artificial wetlands of vertical subsurface flow. An experimental study was developed with three treatments: a wetland with five plants (H1), another with ten plants (H2) and a control system without vegetation (Ht). Biochemical oxygen demand (BOD_5), chemical oxygen demand (COD), total suspended solids (TSS), oils and fats and thermotolerant coliforms were analyzed. The results showed that H2 reached the highest removal percentages, with 98.0 % for BOD_5, 97.0 % for COD, 95.5 % for TSS, 69.1 % for oils and fats and 80.5 % for thermotolerant coliforms. Likewise, this treatment presented a favorable behavior regarding compliance with the Maximum Permissible Limits established in Peruvian regulations. It is concluded that *Guadua angustifolia Kunth* presents potential for its application in decentralized domestic wastewater treatment systems, particularly as an environmentally sustainable sanitation alternative.

Keywords: wastewater treatment, phytoremediation, *Guadua angustifolia*, constructed wetland.

CC BY

I. INTRODUCCIÓN

El tratamiento adecuado de las aguas residuales domésticas constituye uno de los principales desafíos ambientales y sanitarios a escala mundial, especialmente en regiones donde las limitaciones de infraestructura dificultan el acceso a servicios eficientes de saneamiento. En América Latina, la descarga de efluentes insuficientemente tratados continúa ejerciendo una presión considerable sobre los ecosistemas acuáticos, comprometiendo la disponibilidad de recursos hídricos y la calidad ambiental [1], [2]. En el Perú, esta problemática adquiere especial relevancia en localidades rurales y periurbanas, donde las restricciones de cobertura y capacidad operativa de los sistemas convencionales favorecen la contaminación de ríos, quebradas y suelos agrícolas, con posibles consecuencias para la salud pública y las actividades productivas [3]. Este escenario evidencia la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas accesibles, ambientalmente sostenibles y adaptables a las condiciones territoriales.

Las aguas residuales domésticas contienen materia orgánica biodegradable, sólidos suspendidos, aceites, grasas y microorganismos potencialmente patógenos, cuya presencia puede alterar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de los cuerpos receptores. Su vertimiento sin tratamiento apropiado contribuye al deterioro de los ecosistemas, afecta los procesos naturales de depuración y puede incrementar los riesgos asociados con la exposición a fuentes hídricas contaminadas [4]. Frente a esta problemática, la fitorremediación ha adquirido creciente importancia como una alternativa biotecnológica que aprovecha la capacidad de determinadas especies vegetales y sus comunidades microbianas asociadas para favorecer la retención, transformación y degradación de contaminantes. Entre sus principales ventajas destacan los requerimientos energéticos relativamente bajos, la posibilidad de reducir los costos operativos y su integración con estrategias de gestión ambiental sostenible [1], [5].

Entre las aplicaciones de la fitorremediación, los humedales artificiales representan una tecnología de tratamiento basada en la interacción de procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren entre el agua residual, el medio filtrante, la vegetación y los microorganismos asociados. Estos sistemas pueden favorecer la sedimentación, filtración, adsorción y transformación de contaminantes, contribuyendo a la disminución de la carga orgánica y de otros componentes presentes en los efluentes [6]. En particular, los humedales de flujo subsuperficial permiten conducir el agua a través de un medio poroso, donde las condiciones hidráulicas, las características del sustrato y el desarrollo radicular intervienen en el desempeño del tratamiento. Diversas investigaciones han documentado su aplicación en la remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), aceites, grasas y microorganismos indicadores de contaminación fecal, lo que respalda su potencial para complementar o sustituir determinadas etapas de los sistemas convencionales de depuración, según las condiciones de operación [7].

En este contexto, *Guadua angustifolia Kunth*, conocida comúnmente como guayaquil, constituye una especie vegetal de interés para el desarrollo de alternativas naturales de tratamiento de aguas residuales. Su sistema radicular, capacidad de crecimiento y producción de biomasa representan características relevantes para su incorporación en sistemas de humedales artificiales, debido a su posible contribución al establecimiento de comunidades microbianas y a los procesos de interacción entre las raíces, el sustrato y los contaminantes presentes en el agua [7]. Asimismo, sus atributos ecológicos y su importancia en la conservación de los recursos naturales permiten considerar su aprovechamiento en aplicaciones ambientales orientadas al manejo sostenible del agua [8]. No obstante, resulta necesario profundizar en el conocimiento de su comportamiento bajo condiciones experimentales específicas, particularmente en relación con la densidad de plantación y la eficiencia de remoción de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos en sistemas de flujo subsuperficial.

En atención a lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de *Guadua angustifolia Kunth* en la fitorremediación de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical. Para ello, se analizaron tres tratamientos experimentales: un humedal con cinco plantas, otro con diez plantas y un sistema testigo sin vegetación. La evaluación comprendió la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), aceites y grasas, potencial de hidrógeno (pH), temperatura y coliformes termotolerantes, considerando las variaciones registradas entre el ingreso y la salida de los sistemas. Adicionalmente, se compararon los resultados

con los Límites Máximos Permisibles establecidos en la normativa ambiental peruana. De esta manera, el estudio busca aportar evidencia experimental sobre el desempeño de esta especie vegetal y su potencial aplicación en alternativas de saneamiento descentralizado, particularmente en comunidades que requieren soluciones de tratamiento de aguas residuales ambientalmente sostenibles.

II. MARCO TEÓRICO

Los humedales artificiales constituyen sistemas de tratamiento que reproducen determinados procesos naturales de depuración mediante la interacción entre el medio filtrante, la vegetación y las comunidades microbianas. Su funcionamiento integra mecanismos físicos, químicos y biológicos, entre los que destacan la sedimentación, filtración, adsorción y degradación de materia orgánica. Estas características favorecen su aplicación en el tratamiento de aguas residuales domésticas y otros efluentes, particularmente cuando se requieren tecnologías de operación relativamente sencilla y bajo consumo energético. La eficiencia de estos sistemas depende de factores como la configuración hidráulica, las propiedades del sustrato, el tiempo de retención y las condiciones de desarrollo de la vegetación [9], [6], [10].

La evidencia científica disponible muestra que el desempeño de los humedales artificiales puede variar según la naturaleza del efluente y las características de las especies vegetales empleadas. Fernández y García [11] estudiaron un sistema de flujo subsuperficial horizontal destinado al tratamiento de aguas mieles de café, mientras que Martínez et al. [12] abordaron la aplicación de humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales de origen porcino. Por su parte, Osorio y Bustamante [13] analizaron el potencial de estos sistemas para la recuperación de lagunas urbanas contaminadas. Estos antecedentes permiten reconocer la diversidad de aplicaciones de los humedales artificiales y la importancia de adaptar su configuración a las características de los contaminantes y a las condiciones específicas de tratamiento.

En el tratamiento de aguas residuales domésticas, la incorporación de vegetación representa un componente de interés debido a las interacciones que se establecen entre las raíces, el sustrato y los microorganismos asociados. Arias et al. [7] plantearon el empleo de *Bambusa* sp. en un humedal artificial de flujo subsuperficial, proporcionando un antecedente para explorar la utilización de especies de bambú en sistemas de saneamiento. Desde una perspectiva más amplia, los mecanismos de fitorremediación comprenden procesos de absorción, retención, transformación e inmovilización de contaminantes, cuya participación depende de las propiedades del medio, la especie vegetal y la composición del efluente [1], [5]. En consecuencia, la selección de plantas constituye una decisión relevante para el diseño de humedales artificiales, aunque su contribución debe evaluarse conjuntamente con los demás componentes del sistema.

Dentro de este grupo de especies, *Guadua angustifolia Kunth* presenta características ecológicas que justifican su estudio en aplicaciones ambientales. Su desarrollo radicular, producción de biomasa y vinculación con procesos de conservación de suelos y recursos hídricos han motivado el interés por sus posibles aplicaciones en estrategias de gestión sostenible. Los estudios sobre los beneficios ambientales del bambú y los servicios ecosistémicos asociados a *Guadua angustifolia* proporcionan fundamentos para explorar nuevas alternativas de aprovechamiento de esta especie [8], [3]. Sin embargo, sus atributos ecológicos no permiten establecer por sí solos su eficiencia en la depuración de aguas residuales, por lo que resulta necesario examinar su comportamiento en condiciones experimentales definidas, considerando tanto la respuesta de los contaminantes como las características operativas del sistema.

Desde el punto de vista del desempeño, la evaluación de los humedales artificiales requiere considerar indicadores que permitan caracterizar la reducción de la carga contaminante y la calidad del efluente tratado. Entre los parámetros de mayor interés se encuentran la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos suspendidos totales (SST), los aceites y grasas y los indicadores microbiológicos. La remoción de estos componentes se relaciona con mecanismos complementarios que ocurren en el medio filtrante y en las zonas de interacción entre raíces, microorganismos y agua residual [14], [15]. En este sentido, los porcentajes de remoción permiten describir la eficiencia de cada tratamiento, mientras que la comparación estadística proporciona información adicional para determinar si las diferencias observadas entre condiciones

experimentales alcanzan significancia estadística.

La densidad de plantación constituye una variable de interés en la configuración de los humedales vegetados, debido a su posible influencia sobre la distribución del sistema radicular y las interacciones biológicas presentes en el medio. No obstante, su relación con la eficiencia de depuración debe interpretarse considerando las condiciones hidráulicas y las características del sistema experimental [10]. Bajo esta perspectiva, la evaluación comparativa de humedales con diferentes cantidades de plantas de *Guadua angustifolia Kunth* y un tratamiento testigo sin vegetación permite caracterizar el comportamiento de los contaminantes e identificar tendencias asociadas a las condiciones de plantación. Este enfoque contribuye al estudio de alternativas de tratamiento descentralizado de aguas residuales domésticas y proporciona elementos para futuras investigaciones orientadas al aprovechamiento de especies vegetales con potencial ambiental.

III. METODOLOGÍA

A. Enfoque y diseño de la investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, mediante un diseño experimental de alcance descriptivo-explicativo, orientado a evaluar la eficiencia de *Guadua angustifolia Kunth* en la remoción de contaminantes presentes en aguas residuales domésticas. Se emplearon humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical, considerando la densidad de plantación como condición diferenciadora entre los tratamientos. El estudio se realizó entre enero y mayo de 2024 en una planta de tratamiento de aguas residuales ubicada en el Perú, bajo condiciones experimentales destinadas a comparar el comportamiento de los sistemas vegetados con un tratamiento testigo sin vegetación.

B. Configuración de los humedales artificiales

Se implementaron tres unidades experimentales de dimensiones homogéneas, impermeabilizadas y acondicionadas con un medio filtrante compuesto por grava de diferentes granulometrías. La configuración permitió establecer tres tratamientos: H1, conformado por cinco plantas de *Guadua angustifolia Kunth*; H2, integrado por diez plantas de la misma especie; y Ht, correspondiente al humedal testigo sin vegetación. Los plantones utilizados fueron cultivados previamente en vivero y posteriormente trasplantados a las unidades experimentales, de acuerdo con la densidad establecida para cada tratamiento. Esta disposición permitió examinar el comportamiento de los sistemas bajo diferentes condiciones de cobertura vegetal y comparar su desempeño en la depuración de aguas residuales domésticas.

C. Muestreo y determinación de parámetros de calidad del agua

El seguimiento experimental comprendió cuatro campañas de muestreo realizadas a intervalos de quince días. Durante cada campaña se recolectaron muestras del agua residual antes de su ingreso al sistema y del efluente obtenido a la salida de cada humedal, con la finalidad de determinar las variaciones de los indicadores de calidad del agua asociadas al proceso de tratamiento. Se analizaron los parámetros fisicoquímicos demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), aceites y grasas, potencial de hidrógeno (pH) y temperatura. Asimismo, se determinaron los coliformes termotolerantes como indicadores microbiológicos.

Los análisis se efectuaron en un laboratorio acreditado, mediante procedimientos normalizados establecidos en *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA y WEF, 24.ª edición, 2023), con el propósito de caracterizar las condiciones del agua antes y después de su paso por las unidades experimentales.

D. Evaluación de la eficiencia de remoción y análisis estadístico

La eficiencia de los tratamientos se determinó mediante el cálculo del porcentaje de remoción de los contaminantes, considerando la relación entre las concentraciones registradas a la entrada y a la salida de cada humedal. Para los parámetros expresados como concentración, se empleó la siguiente ecuación:

$$E_r = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

donde E_r representa la eficiencia de remoción (%), C_i corresponde a la concentración inicial del contaminante (mg/L o la unidad correspondiente) y C_f representa la concentración final después del tratamiento, expresada en la misma unidad.

Los resultados se organizaron mediante estadística descriptiva, considerando los valores registrados y los porcentajes de remoción correspondientes a cada tratamiento. Complementariamente, se aplicó la prueba t de Student para muestras pareadas, con el propósito de examinar las diferencias entre las mediciones de entrada y salida. Para la comparación entre tratamientos se utilizó el análisis de varianza (ANOVA), seguido de la prueba de Duncan para la identificación de diferencias estadísticas, considerando un nivel de significancia de 0,05.

La interpretación del desempeño de los humedales integró las concentraciones de los parámetros evaluados y sus respectivos porcentajes de remoción. Adicionalmente, los valores obtenidos se contrastaron con los Límites Máximos Permisibles establecidos para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales mediante el Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM. Esta evaluación permitió caracterizar el comportamiento de los sistemas experimentales y establecer una comparación descriptiva de la eficiencia de remoción asociada a las condiciones de plantación estudiadas.

IV. RESULTADOS

En esta sección se presentan los cambios observados en los indicadores fisicoquímicos y microbiológicos del agua residual doméstica después de su tratamiento en humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical. Se describen las concentraciones de entrada y salida, las eficiencias de remoción de los tratamientos H1, H2 y Ht, los resultados de las pruebas estadísticas reportadas y su comparación con los Límites Máximos Permisibles establecidos en la normativa peruana.

La Tabla 1 muestra una disminución de las concentraciones de DBO_5, DQO y SST a la salida de los humedales respecto de los intervalos registrados en el agua de ingreso. Los tratamientos con *Guadua angustifolia* presentaron intervalos de concentración de salida reducidos, particularmente H2 para DQO y SST. El pH y la temperatura permanecieron dentro de intervalos relativamente estrechos durante el proceso. Estos resultados son consistentes con la participación conjunta de mecanismos de filtración, retención y degradación biológica en los sistemas de humedales artificiales [15]. La presencia de vegetación puede favorecer las interacciones entre las raíces, el sustrato y las comunidades microbianas asociadas [16], [9].

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos del agua residual antes y después del tratamiento

Parámetro	Agua de ingreso	Humedal H1 (5 plantas)	Humedal H2 (10 plantas)	Humedal testigo
DBO_5 (mg/L)	42,8–99,2	0–6,4	0–6,3	5,5–7,4
DQO (mg/L)	61,7–226,9	1,1–20,3	1,59–10,6	11,5–88,2
SST (mg/L)	38–240	0,1–9,8	0,2–5,3	5,7–12,5
pH	7,2–7,5	7,1–7,2	7,05–7,18	7,26–7,50
Temperatura (°C)	22,2–24,2	22,3–24,3	22,3–24,3	22,1–24,2
Aceites y grasas (mg/L)	0,35–9,8	0,45–1,75	0,20–1,85	0,35–3,15

La Tabla 2 resume los porcentajes de remoción reportados para los tres tratamientos. H2 presentó los valores descriptivos más elevados en todos los indicadores evaluados: 98,0 % de DBO_5;

97,0 % de DQO; 95,5 % de SST; 69,1 % de aceites y grasas; y 80,5 % de coliformes termotolerantes. H1 registró porcentajes cercanos a los de H2, mientras que Ht mostró valores inferiores para los parámetros con información comparable. La eficiencia del sistema puede relacionarse con factores como la densidad vegetal, la estructura radicular y las condiciones hidráulicas del humedal [6], [10].

Tabla 2. Eficiencia promedio de remoción de contaminantes

Parámetro	H1 (5 plantas)	H2 (10 plantas)	Testigo
DBO_5 (%)	97,4	98,0	91,3
DQO (%)	95,4	97,0	79,9
SST (%)	94,0	95,5	87,9
Aceites y grasas (%)	62,7	69,1	s/d
Coliformes termotolerantes (%)	76,3	80,5	70,9

Para facilitar la lectura comparativa de estos resultados, la Figura 1 representa los porcentajes de remoción de los cinco indicadores mediante una matriz cromática. Esta visualización sintetiza el comportamiento de los tratamientos sin sustituir las comparaciones estadísticas que se presentan posteriormente.

Como se aprecia en la Figura 1, el humedal H2 concentra los porcentajes de remoción más altos, especialmente para DBO_5, DQO y SST. La figura también evidencia remociones en el sistema testigo, compatibles con la contribución de los procesos propios del medio filtrante. La comparación es descriptiva y no debe interpretarse, por sí sola, como evidencia de diferencias estadísticamente significativas entre todos los tratamientos.

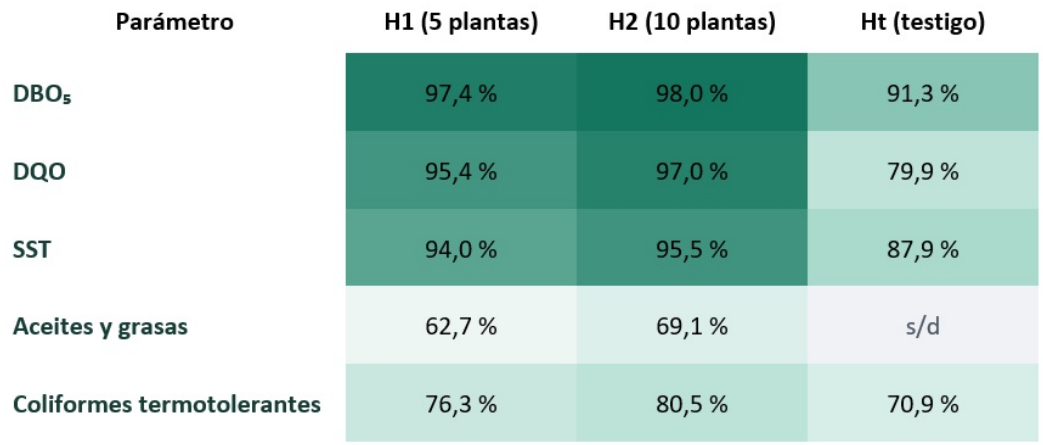

Fig. 1. Mapa de calor de la eficiencia de remoción de contaminantes por tratamiento

Nota. s/d: dato no reportado para aceites y grasas en el testigo. Los colores representan únicamente la magnitud de la remoción. Fuente: elaboración gráfica a partir de los valores de la Tabla 2.

De acuerdo con los valores de p presentados en la Tabla 3, se observaron diferencias estadísticamente significativas para DBO_5 y DQO ($p \leq 0{,}05$), mientras que SST, aceites y grasas, y coliformes termotolerantes no alcanzaron dicho umbral. Esto permite distinguir entre reducciones porcentuales importantes y diferencias estadísticamente respaldadas por las pruebas realizadas. La interpretación de los contrastes debe considerar tanto la magnitud de los cambios como el número de observaciones disponibles [17], [18], [19]. Según los resultados de ANOVA reportados en las conclusiones del estudio, la diferencia entre tratamientos fue significativa únicamente para DBO_5 ($p = 0{,}04$), por lo que la mayor remoción descriptiva en H2 no supone una superioridad estadística generalizada.

Tabla 3. Resultados del análisis estadístico (prueba t de Student)

Parámetro	Valor de p	Decisión
DBO_5	0,01	Diferencia significativa (se rechaza H_0)
DQO	0,03–0,04	Diferencia significativa (se rechaza H_0)
SST	0,11–0,13	No significativa (no se rechaza H_0)
Aceites y grasas	0,07–0,10	No significativa (no se rechaza H_0)
Coliformes termotolerantes	0,26	No significativa (no se rechaza H_0)

La Tabla 4 presenta el cumplimiento normativo reportado para los indicadores evaluados. Según esta comparación, H1 y H2 cumplieron el límite establecido para DBO_5, mientras que DQO, SST, pH, temperatura y aceites y grasas se consignaron como conformes en los tratamientos indicados en la tabla. En el caso de los coliformes termotolerantes, H2 cumplió en todas las evaluaciones, H1 lo hizo desde el día 30 y el testigo presentó incumplimientos en varias mediciones. Esta diferenciación permite describir con mayor precisión el comportamiento de cada tratamiento respecto de los criterios normativos. Los resultados son congruentes con el interés documentado por los humedales artificiales como opciones de tratamiento de aguas residuales con menores requerimientos de energía y mantenimiento [16], [14].

Tabla 4. Comparación con los Límites Máximos Permisibles (D. S. N.º 003-2010-MINAM)

Parámetro	Cumplimiento del LMP después del tratamiento
DBO_5	Cumple en H1 y H2
DQO	Cumple en H1, H2 y Ht
SST	Cumple en los tres humedales
pH	Cumple en todos los tratamientos
Temperatura	Cumple en todos los tratamientos
Aceites y grasas	Cumple en todos los tratamientos
Coliformes termotolerantes	H2 cumple en todas las evaluaciones; H1 cumple desde el día 30; Ht presentó incumplimientos en varias mediciones.

Los resultados muestran que los tres sistemas contribuyeron a la disminución de distintos contaminantes y que H2 registró las mayores eficiencias porcentuales descriptivas. La lectura integrada de los indicadores fisicoquímicos, microbiológicos, estadísticos y normativos permite caracterizar el comportamiento de los humedales evaluados, manteniendo diferenciados el rendimiento observado, la significancia estadística y el cumplimiento de los límites aplicables.

CONCLUSIONES

La evaluación experimental de *Guadua angustifolia Kunth* en humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical evidenció su potencial para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Los sistemas vegetados presentaron elevados porcentajes de remoción de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos, destacándose el humedal H2, conformado por diez plantas, con eficiencias promedio de 98,0 % para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), 97,0 % para la demanda química de oxígeno (DQO), 95,5 % para los sólidos suspendidos totales (SST), 69,1 % para aceites y grasas y 80,5 % para coliformes termotolerantes. Estos resultados reflejan un desempeño favorable del tratamiento con mayor densidad de plantación dentro de las condiciones experimentales evaluadas.

La comparación entre los tratamientos permitió identificar una tendencia de mayor eficiencia de remoción en los humedales con vegetación, particularmente en H2, seguido de H1 y del sistema testigo

sin plantas, para los parámetros con información comparable. Asimismo, las reducciones registradas en el humedal testigo evidenciaron que el tratamiento del agua no dependió exclusivamente de la presencia de vegetación, sino también de los procesos de depuración asociados al medio filtrante. En este sentido, los resultados destacan la importancia de considerar la interacción entre el sustrato, la vegetación y los mecanismos físicos y biológicos que intervienen en el funcionamiento de los humedales artificiales.

El análisis estadístico mediante la prueba t de Student identificó diferencias significativas entre las condiciones de entrada y salida para los parámetros DBO_5 y DQO ($p \leq 0{,}05$), mientras que las variaciones correspondientes a SST, aceites y grasas y coliformes termotolerantes no alcanzaron significancia estadística. Por su parte, el análisis de varianza (ANOVA) reportó diferencias significativas entre tratamientos únicamente para la DBO_5 ($p = 0{,}04$). Por tanto, aunque H2 registró los mayores porcentajes descriptivos de remoción, esta superioridad no fue estadísticamente significativa para todos los indicadores evaluados.

La comparación de los efluentes tratados con los Límites Máximos Permisibles establecidos por la normativa ambiental peruana mostró un comportamiento favorable de los sistemas experimentales, especialmente del humedal H2. Este tratamiento presentó cumplimiento de los parámetros fisicoquímicos evaluados y mantuvo los coliformes termotolerantes dentro de los límites establecidos durante las evaluaciones realizadas. Estos hallazgos respaldan la viabilidad técnica de continuar explorando la aplicación de *Guadua angustifolia Kunth* en humedales artificiales destinados a la depuración de aguas residuales domésticas.

La investigación aporta evidencia experimental sobre el potencial de *Guadua angustifolia Kunth* como componente vegetal de sistemas naturales de tratamiento, con especial interés para el desarrollo de alternativas de saneamiento descentralizado. Los resultados constituyen una base para futuras investigaciones orientadas a evaluar el comportamiento de estos sistemas bajo diferentes densidades de plantación, condiciones hidráulicas y periodos de operación, con el propósito de fortalecer su aplicación en localidades que requieren soluciones de tratamiento ambientalmente sostenibles.

REFERENCIAS

[1] A. Kafle *et al.*, "Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents," *Environmental Advances*, vol. 8, 2022.

[2] N. Véliz *et al.*, "Determinantes de conectividad a la red de saneamiento en la región junín, 2018–2022," *Revista Multidisciplinaria del Saber*, vol. 3, Dec. 2025. [Online]. Available: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2960-24672025000100249

[3] M. López, C. García, and R. Ladino, "Valuation of ecosystem services of guadua bamboo (*guadua angustifolia*) forest in the southwestern of pereira," *Caldasia*, vol. 43, no. 1, 2020. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/349870499_Valuation_of_ecosystem_services_of_guadua_bamboo_Guadua_angustifolia_forest_in_the

[4] A. Galaviz, A. Díaz, and H. Sandoval, "Evaluación de un humedal artificial piloto para el tratamiento de aguas residuales domésticas-fitorremediación con *eichhornia crassipes*," *Revista Ra Ximhai*, vol. 20, no. 3, pp. 17–37, Jan. 2024. [Online]. Available: https://raximhai.uaim.edu.mx/index.php/rx/issue/view/83/256

[5] D. López *et al.*, "Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación," *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, vol. 14, no. 2, May 2011. [Online]. Available: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002

[6] J. Vymazal, "Constructed wetlands for wastewater treatment," *Water*, vol. 2, no. 3, pp. 530–549, 2010. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2073-4441/2/3/530

[7] C. Arias, P. Ortiz, and V. Beltrán, "Propuesta de tratamiento de aguas residuales domésticas implementando un humedal artificial de flujo subsuperficial empleando *bambusa* sp. en la finca el recreo," *Revista Tecnológica*, no. 39, 2017. [Online]. Available: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6546150

[8] L. Cuadra *et al.*, "Aspectos socioeconómicos y ambientales del cultivo de bambú en el distrito de imaza," *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 2024. [Online]. Available: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212023000500010

[9] I. Hassan *et al.*, "Wastewater treatment using constructed wetland: Current trends and future potential," *Processes*, vol. 9, no. 11, 2021.

[10] J. Wei, J. Keenahan, and S. Cotterill, "Revisión de métodos experimentales y modelos numéricos para estudios hidráulicos en humedales artificiales," *Sustainability*, vol. 17, no. 8, 2025. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2071-1050/17/8/3303

[11] Z. Fernández and F. García, "Implementación de un sistema de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal para la biorremediación de aguas mieles de café, en la finca la clanera, vereda la chorrera del municipio de timbío," *Revista ConCiencia*, vol. 11, pp. 48–65, 2019. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/354248920

[12] A. Martínez *et al.*, "Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas," *Revista SENA*, vol. 74, 2010. [Online]. Available: https://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/5

[13] C. Osorio and P. Bustamante, "Propuesta de humedales artificiales, impulsores de biodiversidad que depuran aguas contaminadas para la recuperación de lagunas urbanas de concepción," *Hábitat Sustentable*, vol. 9, no. 1, Jun. 2019. [Online]. Available: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0719-07002019000100020&script=sci_arttext

[14] J. Santos *et al.*, "A state-of-the-art review (2019–2023) on constructed wetlands for greywater treatment and reuse," *Environmental Challenges*, vol. 16, 2024. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667010024001392

[15] N. Rojas *et al.*, "Remoción de contaminantes en los humedales artificiales de flujo subsuperficial: una revisión," *Terra Latinoamericana*, 2024. [Online]. Available: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792023000100402

[16] I. Arias and H. Brix, "Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales," *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 13, pp. 17–24, 2003. [Online]. Available: https://www.redalyc.org/pdf/911/91101302.pdf

[17] S. Villavicencio *et al.*, *Métodos estadísticos aplicados a la investigación científica con software SPSS y HLSTAT*. Editorial Mar Caribe, 2025.

[18] R. Hernández Sampieri and C. Mendoza, *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*, México, 2018. [Online]. Available: https://www.academia.edu/112987196/HernÃąndez_Sampieri_R_and_Mendoza_C_2018_MetodologÃŋa_de_la_investigaciÃşn_Las_rutas_cuantitativa_cualitativa_y_mixta

[19] W. Gan, "Impact of sample size and its estimation in medical research," *AJPM Focus*, vol. 5, no. 3, 2025. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773065425001397