

Depuración de aguas residuales urbanas con humedal de flujo vertical construido con sustrato reciclado

Urban Wastewater Treatment with a Vertical Flow Wetland Constructed with Recycled Substrate

Fidel Gregorio Aparicio Roque ¹, Cristhian Juan Mogollon Vizueta ²

¹Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz-Ancash-Perú

²Universidad Nacional del Santa, Chimbote-Ancash, Perú

Cómo citar

F. G. Aparicio Roque, and C. J. Mogollon Vizueta. "Depuración de aguas residuales urbanas con humedal de flujo vertical construido con sustrato reciclado," Ingeniería: ciencia, tecnología e innovación, vol. 12, 2025.

<https://doi.org/10.26495/g3h8ys08>

Información del artículo

Recibido: 06/05/2025

Aceptado: 14/11/2025

Publicado: 01/12/2025

Autor correspondencia

Cristian Juan Mogollon Vizueta

2022812006@uns.edu.pe

Este artículo es de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la Licencia Creative Commons

Attribution (CC BY)



RESUMEN: El presente trabajo tuvo como **objetivo** analizar la influencia de la implementación de un humedal de flujo vertical construido con sustrato proveniente de ladrillo de arcilla reciclado en la depuración de aguas residuales urbanas. La **metodología** empleada se basó en una investigación experimental de nivel explicativo; se construyó una planta depuradora experimental y se trabajó con una población muestral constituida por el agua residual urbana de una comunidad rural del distrito de Buenos Aires en el norte del Perú. Los instrumentos para recolectar los datos fueron adaptados de las normas técnicas peruanas para granulometría, conductividad hidráulica y porosidad del medio filtrante y de las normas peruanas para evaluación de efluentes de plantas de tratamientos de aguas residuales. Los **resultados** determinaron que la granulometría a utilizar debe tener un coeficiente de uniformidad entre 3.8 y 5.0. En la depuración de las aguas residuales urbana se obtuvo un porcentaje de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno de 95.74 %, de la demanda química de oxígeno de 88.47 % y de turbiedad del 76.67 %. La **conclusión** de la investigación determinó que la implementación de un humedal de flujo vertical construido con sustrato conformado por ladrillo de arcilla reciclado influye positiva y estadísticamente significativa en la depuración de aguas residuales urbanas evidenciando su potencial como una alternativa sostenible y de bajo costo, viable para su aplicación en comunidades rurales.

Palabras clave: aguas residuales, arcilla reciclada, humedal construido, sustrato.

ABSTRACT: This study **aimed** to analyze the influence of implementing a vertical flow wetland constructed with recycled clay brick substrate on the treatment of urban wastewater. The **methodology** employed was based on an explanatory-level experimental investigation. An experimental wastewater treatment plant was constructed, and the study used a sample population consisting of urban wastewater from a rural community in the Buenos Aires district of northern Peru. The data collection instruments were adapted from Peruvian technical standards for particle size distribution, hydraulic conductivity, and porosity of the filter media, as well as from Peruvian standards for the evaluation of wastewater treatment plant effluents. The **results** determined that the particle size distribution used should have a uniformity coefficient between 3.8 and 5.0. In the treatment of urban wastewater, a removal percentage of 95.74% was obtained for biochemical oxygen demand, 88.47% for chemical oxygen demand, and 76.67% for turbidity. The **conclusion** of the research determined that the implementation of a vertical flow wetland constructed with a substrate made of recycled clay brick has a positive and statistically significant influence on the treatment of urban wastewater, demonstrating its potential as a sustainable and low-cost alternative, viable for application in rural communities.

Keywords: Wastewater, recycled clay, constructed wetland, substrate.

1. INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales urbanas son el resultado del uso del agua en actividades humanas y, antes de ser vertidas a ríos u otros cuerpos de agua, deben ser tratadas mediante procesos físicos, químicos y biológicos; sin embargo, aproximadamente el 80 % de estas aguas residuales a nivel mundial se descargan a medios superficiales sin tratamiento previo, lo que provoca una contaminación hídrica [1].

Esta contaminación se agrava en zonas rurales o periurbanas que no cuentan con sistemas adecuados de tratamiento de aguas residuales [2]; en Latinoamérica, una de las principales fuentes de contaminación de ríos proviene precisamente de las aguas residuales de comunidades que se descargan sin tratamiento [3]. El 44 % del total de aguas residuales producidas en países con niveles de desarrollo bajos se recogen y se disponen al medio natural sin un tratamiento adecuado [4].

Para enfrentar esta problemática se tienen mecanismos de protección del medio hídrico y de reciclaje de los recursos hídricos como el tratamiento eficiente y eficaz de las aguas residuales urbanas [5]. Este tratamiento es fundamental para eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en las aguas residuales y que permitan su reutilización en actividades no potables [4], pues sólo el 28 % del total de las aguas contaminadas son tratadas en los países de ingreso medio bajo, y en aquellos países con un ingreso bajo sólo reciben tratamiento el 8 % [6].

Es de precisar que los tratamientos de aguas residuales urbanas no han avanzado al mismo ritmo que el crecimiento de la población, lo que ha resultado en un aumento de la contaminación en las ciudades [7]. En este contexto, se propone la implementación de humedales construidos de flujo vertical como tecnología ecológica que resulta una solución rentable y sostenible en comunidades dispersas y en áreas rurales [8]. Para conservar la eficiencia del tratamiento en este tipo de humedales, debido a la disminución de la porosidad drenable, se requieren construirse con un sustrato con granulometría óptima [9].

El medio filtrante seleccionado en la construcción de este modelo debe contar con una alta eficiencia de intercepción para los contaminantes; de igual modo debe contar con una alta capacidad anti-obstrucción con el objeto de preservar la porosidad y la conductividad hidráulica [10].

Con el objeto de evitar la problemática de la obstrucción en este tipo de sistemas subsuperficiales se han planteado soluciones utilizando sustratos alternativos como el hormigón y el ladrillo reciclado [11]; del mismo modo se recomienda la utilización de manera gradual de la escoria de alto horno en sustitución de sustratos convencionales, sin embargo, el problema de la obstrucción permanece a largo plazo en el ingreso de aguas residuales en el sistema [9]. Por otro lado, se considera que el uso del agregado ligero de arcilla expandida, conocido como LECA, produce un mejor rendimiento en el proceso de depuración, pero se requiere realizar un seguimiento a fin de medir el nivel de eficiencia en la remoción de contaminantes [12].

En la selección del sustrato, para este tipo de sistemas, es fundamental considerar la resistencia hidráulica, el costo, la disponibilidad del mismo y el rendimiento de eliminación de contaminantes, ya que una mala selección tiene como consecuencia bajos niveles en la inversión en gestión y en daños ambientales [14]. Por su parte, una selección inadecuada del sustrato puede causar obstrucciones en el modelo de tratamiento, no mejora la eficiencia ecológica y no se reducen los riesgos a la salud de la población ni el daño al medio ambiente [13].

Se tiene en estudios previos que el comportamiento de un sistema de humedal construido de flujo vertical permite la obtención de una remoción de la demanda bioquímica de oxígeno de 46 % hasta 72 %; de la demanda química de oxígeno de 40 % hasta 68 % y de aceites y grasas de 37 % hasta 66 %. Estos valores permiten inferir que la remoción de contaminantes presenta un alto nivel de eficiencia [15].

La evaluación de aguas residuales urbanas tratadas utilizando la tecnología de humedales construidos de flujo vertical en distintas combinaciones de diseño arrojó resultados de 88 % de remoción de demanda química de oxígeno, 94 % de remoción de demanda bioquímica de oxígeno y 91 % de remoción de sólidos suspendidos totales. Este tipo de tecnología resulta viable tanto en la construcción como en la operación y mantenimiento en núcleos poblacionales menores a 2000 habitantes [16].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar la implementación del humedal construido de flujo vertical con sustrato reciclado se estableció un diseño experimental con grupo de control y análisis de pre y post prueba. Se procedió a diseñar y construir una planta depuradora en la localidad El Ala en el distrito de Buenos Aires ubicado en la zona norte del Perú. Las muestras se tomaron durante un periodo de 5 meses. Los cálculos de diseño estructural e hidráulico siguieron el modelo indicado en [17]. La cámara de rejas y las arquetas de distribución se construyeron siguiendo la guía de diseño de humedales verticales de flujo vertical implementados en Dinamarca y con los componentes indicados en la Figura 1.

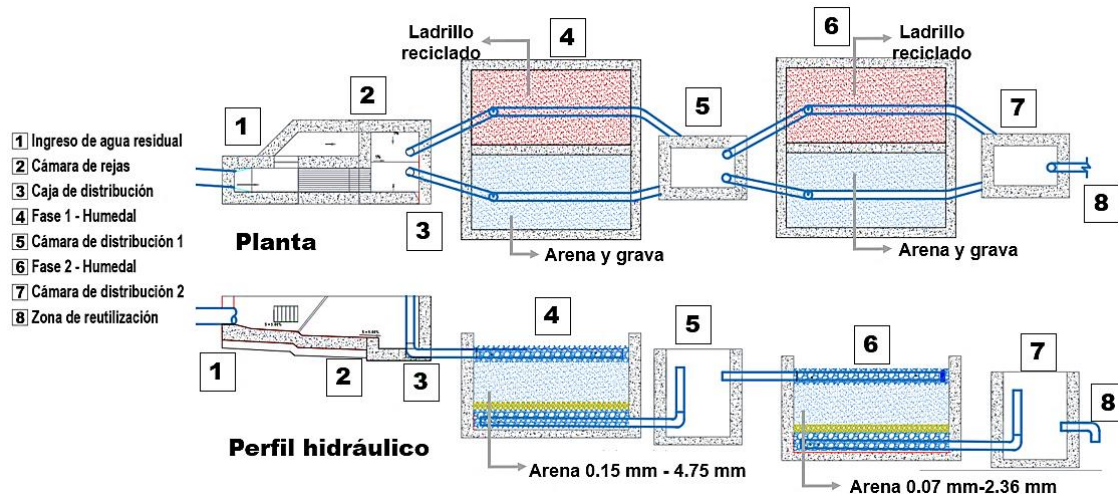


Figura 1. Componentes de la planta depuradora. Fuente: elaboración propia.

2.1 Fase 1. Diseño y construcción del humedal de flujo vertical

La estación depuradora se conformó de 4 celdas de flujo sub superficial de tipo vertical. En ambas fases indicados como componente 4 y 6 en la Figura 1 se construyeron 4 celdas; en dos de ellas se utilizaron gravas y arenas (sustrato convencional: SC) con granulometría seleccionada de acuerdo a los ensayos de capacidad de infiltración y con un coeficiente de uniformidad menor a 5.12; en las otras 2 celdas se instalaron dos humedales de flujo vertical conformado por sustrato de ladrillo de arcilla reciclado (sustrato reciclado: SR) con granulometría seleccionada. La conformación de las celdas en cada fase siguió el modelo señalado en la Figura 2.

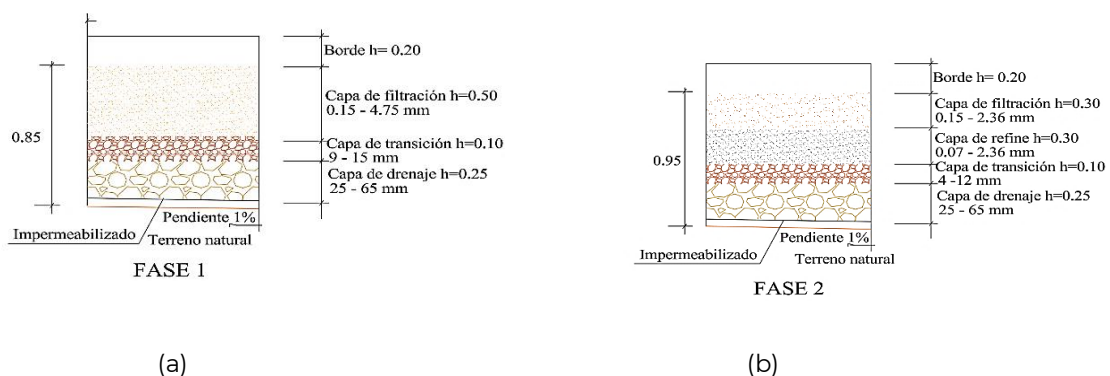


Figura 2. (a) y (b) Conformación de las fases 1 y 2 de las celdas de humedal de flujo vertical. Fuente: elaboración propia.

El enfoque metodológico fue a través de un diseño experimental. La población de estudio estuvo conformada por las aguas residuales urbanas generadas en un grupo poblacional localizado en el distrito de Buenos Aires. Los instrumentos utilizados fueron certificados por la unidad de gestión

municipal de la comuna local. Se establecieron tres grupos experimentales y un grupo de control, que siguieron la secuencia indicada en la Figura 3.

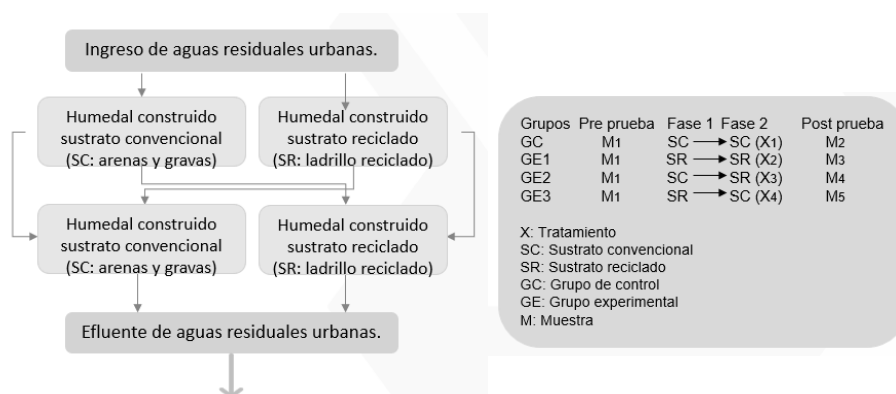


Figura 3. Conformación de los grupos experimentales y grupo de control.
Fuente: elaboración propia.

2.2 Fase 2. Ensayos a las variables y recolección de datos

Se realizaron ensayos de laboratorio al sustrato utilizado, como análisis granulométrico para determinar el coeficiente de uniformidad, porcentaje de humedad, porcentaje de absorción de agua, peso específico y peso unitario, porosidad y capacidad de infiltración de agua tanto del sustrato convencional como del sustrato reciclado siguiendo las normas técnicas peruanas. La técnica de recolección de datos para los efluentes obtenidos en la planta depuradora experimental fue la observación durante el periodo de investigación. Para determinar la capacidad de remoción de contaminantes se realizaron los ensayos a las aguas residuales urbanas tratadas de acuerdo a lo señalado en la Tabla 1.

Tabla 1. Ensayos realizados a las aguas residuales urbanas tratadas.

Nº	Propiedad	Método de ensayo
1	Temperatura	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5550 B Temperature. Laboratorio y métodos de campo. 23rd Edición, 2017
2	pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ BpH Valor con método electromecánico. 23rd Edición, 2017
3	Turbiedad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 BTurbidity. 23rd Edición, 2017.
4	DBO ₅	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test. 22nd Edition, 2012.
5	DQO	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D. Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method. 23rd Edition, 2017.
6	Coliformes termotolerantes	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 B. Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Standard Total Coliform Fermentation Technique. 23rd Edition, 2017

Fuente: elaboración propia.

2.2 Fase 3. Análisis de datos

Los ensayos fueron analizados en la oficina del área técnica municipal de la comuna local. Se tomaron 5 muestras al ingreso y a la salida del sistema de forma mensual durante 5 meses. Para el procesamiento de datos se tomaron los datos obtenidos en laboratorio de los grupos de control y experimentales del sistema tanto de las propiedades físicas, químicas y biológicas del afluente y

efluente del sistema y se digitalizaron en formato en una base de datos en el programa Excel, posteriormente se procesaron mediante el programa SPSS versión 28.01.

La toma de datos se efectuó de manera mensual. Se utilizaron el equipo HANNA HI 93703-11 y equipo medidor multiparámetro waterproof HANNA. El análisis de los resultados se efectuó mediante la contrastación de las hipótesis aplicando la distribución t de Student, posteriormente se analizaron si los datos obtenidos en el efluente o ingreso del sistema (pre prueba) difirieron con los valores del afluente o salida (post prueba) en ambas fases respecto a los valores de las medias obtenidas. El estadístico t se calculó con (1).

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}} \quad (1)$$

Donde:

$\bar{X}_{1,2}$: Medias de las observaciones obtenidas.

S_1^2 : Desviación estándar de las diferencias.

n: Cantidad de pares de observaciones.

d_i : Diferencia entre dos mediciones por sujeto.

\bar{d} : Media de las diferencias.

Se asumió: Rechazar la H_0 si $\text{sig} < \alpha$ (0.05) y aceptar la H_0 si $\text{sig} > \alpha$ (0.05)

3. RESULTADOS

En la Tabla 2 se muestran los resultados de las características constructivas del modelo experimental y las propiedades físicas e hidráulicas del medio filtrante en ambas fases del sistema. Se precisó que la capacidad de infiltración del medio filtrante osciló entre 3.53 y 4.00 mm/segundo. La porosidad del medio filtrante se situó entre el 38.07 % y 39.41 %.

Tabla 2.

(a) características constructivas de los humedales de flujo vertical.

(b) propiedades físicas e hidráulicas del medio filtrante de ambas fases del sistema.

(a)

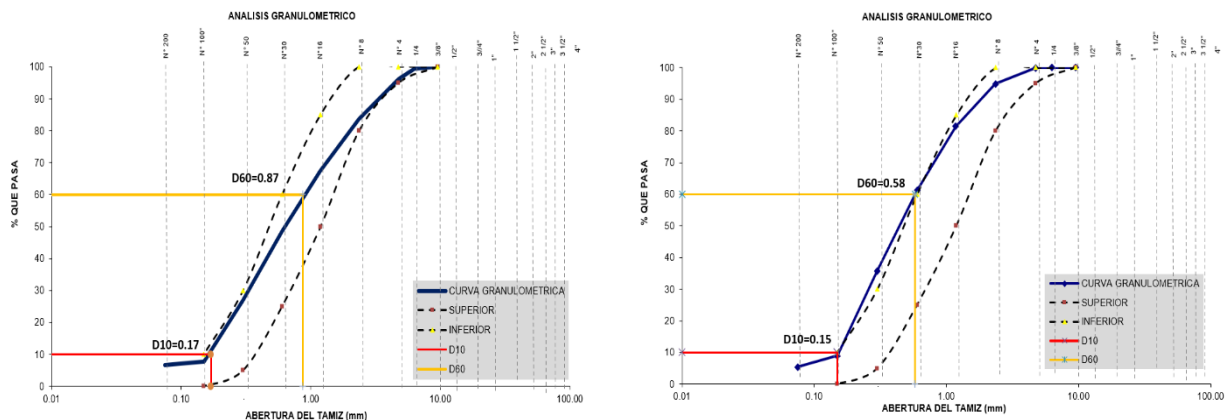
Fase	Tipo	m ²	Sustrato mm.	Altura m.
Fase 1	Humedal construido arenas y gravas	1.87	0.15-4.75	0.50
	Humedal construido ladrillo reciclado		9-15	0.10
			25-65	0.25
Fase 2	Humedal construido arenas y gravas	1.87	0.15-2.36	0.30
	Humedal construido ladrillo reciclado		0.07-2.36	0.30
			4-12	0.10
			25-65	0.25

(b)

Ensayo	Unidad	Valores	
		Fase 1	Fase 2
Contenido de humedad	%	3.76	2.02
Coeficiente de uniformidad	valor	5.12	3.87
Peso específico	gr/cm ³	2.58	2.58
Peso unitario	gr/cm ³	1.621	1.586
Porcentaje de absorción	%	0.70	0.70
Porosidad	%	38.07	39.41
Capacidad de infiltración	mm/segundo	3.53	4.00

Fuente: elaboración propia.

Para un óptimo funcionamiento del sistema el coeficiente de uniformidad del sustrato se situó entre 3.87 y 5.12, de acuerdo con las curvas granulométricas señaladas en la Figura 3.



(a)

(b)

Figura 3. (a) y (b) Curvas granulométricas de la fase 1 y fase 2 del sistema.

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4 se muestran los valores obtenidos en los parámetros de turbiedad medidos en unidades de turbidez nefelométrica (NTU). El valor de ingreso osciló entre 59 NTU y 62 NTU durante los 5 meses de observación. En el primer mes del experimento se obtuvieron valores entre 14 NTU y 17 NTU con una eficiencia entre el 72 % y 77 %. En el quinto mes de observación con el sistema consolidado se registraron valores de salida de 13.45 NTU en el grupo experimental 1, de 10.2 NTU en el grupo experimental 2 y de 12.0 NTU en el grupo experimental 3. La mayor eficiencia se registró en el grupo experimental 2 con un valor de 82.71 %.

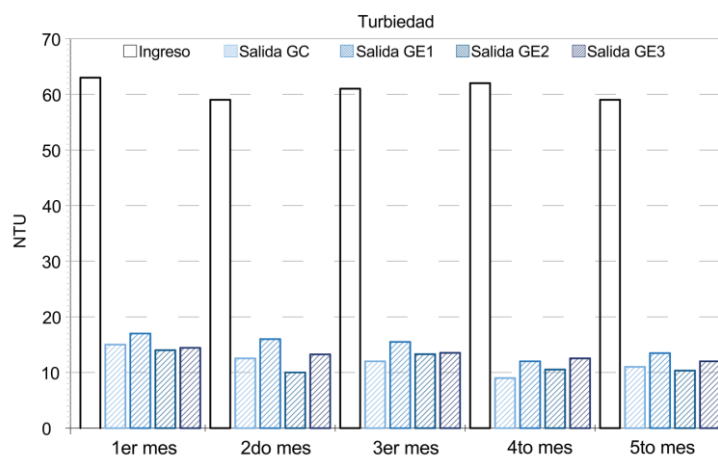


Figura 4. Valores de remoción del parámetro turbiedad. Fuente: elaboración propia.

Los datos que se muestran en la Figura 5 reflejan la eficiencia en la remoción de contaminantes de la demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días. El valor de ingreso durante los 5 meses de observación fue entre 305 mg/L y 410 mg/L, el valor mayor de ingreso se registró durante el 4to mes de observación. El grupo experimental 1 registró valores de salida entre 12 mg/L y 28 mg/L. El grupo experimental 2 registró durante el 5to mes un valor de salida de 17 mg/L y el grupo experimental 3 registró durante el último mes de observación 18 mg/L.

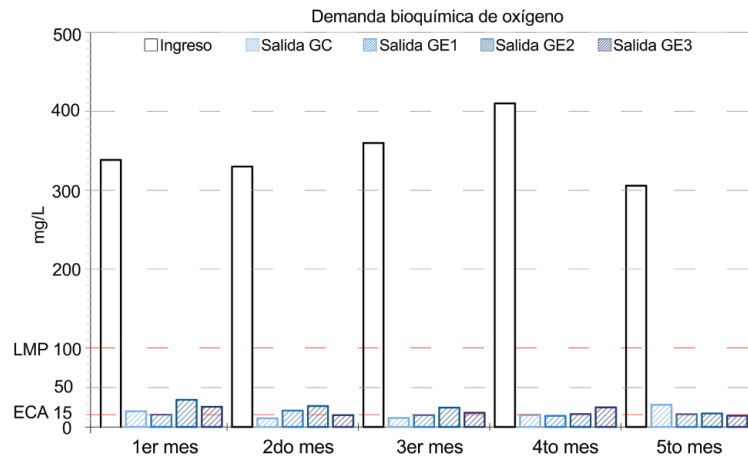


Figura 5. Valores de remoción del parámetro Demanda bioquímica de oxígeno.
Fuente: elaboración propia.

Los datos que se presentan en la Figura 6 corresponden al parámetro de la demanda química de oxígeno. En el ingreso de la estación depuradora se registraron valores entre 520 mg/L y 658 mg/L. Durante el primer mes se registró el mayor valor de ingreso. Durante el primer mes los grupos experimentales 1, 2 y 3 reportaron valores de salida de 78 mg/L, 88 mg/L y 81 mg/L respectivamente. Durante el segundo mes de observación se registraron valores entre 75 mg/L y 95 mg/L. La eficiencia de la remoción de los contaminantes durante el quinto mes de observaciones fue entre 86.97 % y 88.93 % obteniendo el grupo experimental 1 el mayor valor de eficiencia.

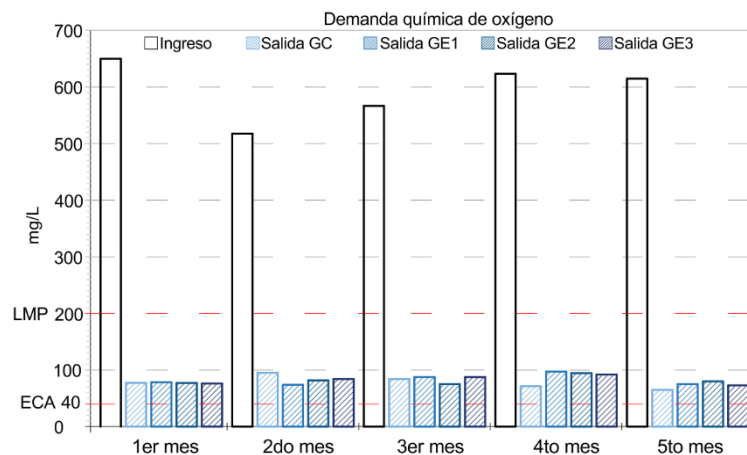


Figura 6. Valores de remoción del parámetro Demanda química de oxígeno.
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7 se reportan los valores obtenidos en la remoción del parámetro biológico de coliformes termo tolerantes o fecales. Se muestran los valores de los logaritmos de los reportes obtenidos. En el ingreso a la planta depuradora construida se registraron valores entre $3.5E+05$ y $4.52E+05$. En el tercer mes de observación se obtuvieron valores de salida entre 150 NMP/100 ml y 650 NMP/100 ml, reportándose que el grupo experimental 3 reportó el menor valor. Durante el quinto mes se obtuvieron los registros de mayor eficiencia registrándose valores de 99.9 % de eficiencia de remoción en los tres grupos experimentales.

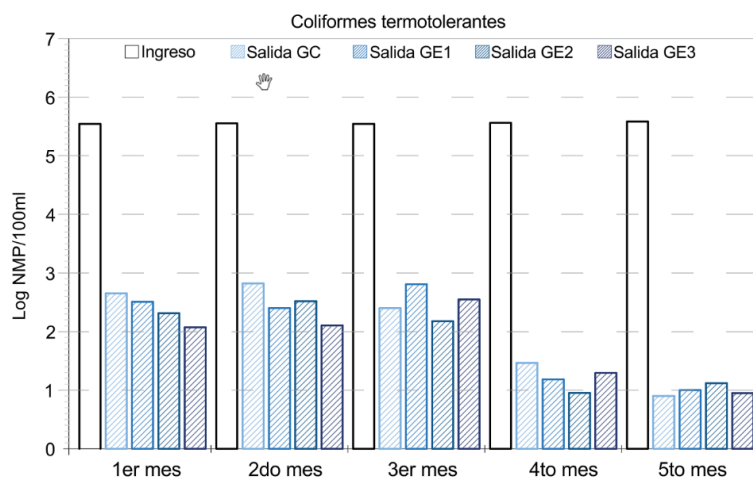


Figura 7. Valores de remoción del parámetro Coliformes termo tolerantes.

Fuente: elaboración propia.

Los valores obtenidos en los parámetros físicos, químicos y biológicos de las aguas residuales urbanas tratadas en la planta depuradora se detallan por cada mes y por cada grupo experimental. Asimismo, se tomaron los datos del grupo de control a fin de comparar la eficiencia de la remoción de contaminantes presentes en las aguas tratadas. De igual modo se registran los valores de los contaminantes al momento de ingresar al sistema. Todos estos valores se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores obtenidos de los parámetros físico, químicos y biológicos en la planta depuradora.

Parámetros		Turbiedad	DBO ₅	DQO	CT
		NTU	mg/L	mg/L	NMP/100ml
1er mes	Entrada	63.00	338.00	658.00	275000.00
	Salida GC	15.40	14.00	77.00	84.00
	Salida GE1	16.20	27.00	75.00	114.00
	Salida GE2	12.50	16.00	84.00	195.00
	Salida GE3	14.35	23.50	81.00	245.00
2do mes	Entrada	58.00	330.00	520.00	473000.00
	Salida GC	12.10	22.00	84.00	120.00
	Salida GE1	14.60	16.00	95.00	59.00
	Salida GE2	8.00	21.00	58.00	95.00
	Salida GE3	13.25	27.00	82.00	65.00
3er mes	Entrada	56.00	360.00	577.00	352000.00
	Salida GC	12.00	19.00	86.00	63.00
	Salida GE1	12.00	18.00	84.00	62.00
	Salida GE2	13.10	15.00	89.00	57.00
	Salida GE3	13.50	19.00	75.00	93.00
4to mes	Entrada	60.50	410.00	622.00	355000.00
	Salida GC	9.00	23.50	96.00	45.00
	Salida GE1	13.10	20.00	78.00	33.00
	Salida GE2	16.00	13.00	98.00	99.00
	Salida GE3	12.50	22.00	95.00	63.00
5to mes	Entrada	60.00	305.00	590.00	420000.00
	Salida GC	10.10	27.00	70.00	15.00
	Salida GE1	14.00	13.00	68.00	15.00
	Salida GE2	13.10	17.00	75.00	19.00
	Salida GE3	11.00	14.00	80.00	13.00

Fuente: elaboración propia.

Los datos recogidos al ser una muestra menor a 50 elementos fueron analizados mediante la prueba de Shapiro – Wilk a fin de determinar que provenían de una distribución normal de acuerdo a las pruebas gráficas de normalidad indicadas en la Figura 8 y posteriormente al verificar el supuesto de normalidad se aplicó la prueba estadística paramétrica de *t de Student* para

comprobar que los tratamientos realizados sean estadísticamente significativos en la eficiencia de la remoción de contaminantes de la demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, turbiedad y coliformes termotolerantes.

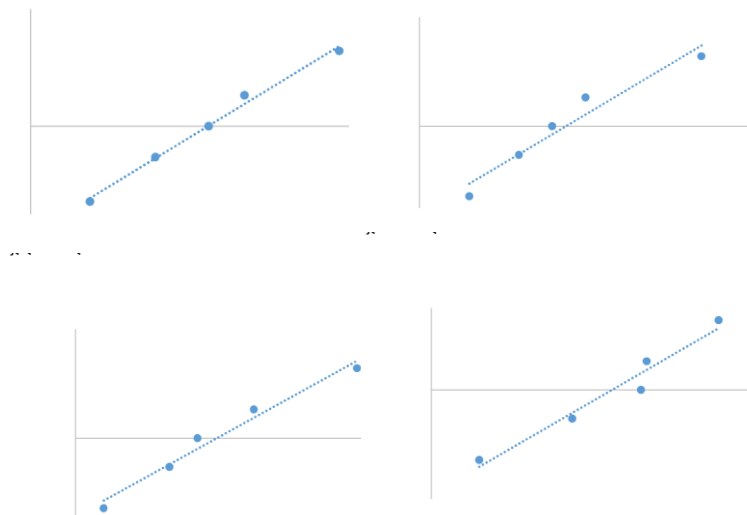


Figura 8. Pruebas gráficas de normalidad a los datos obtenidos mediante el análisis Q-Q
Fuente: elaboración propia.

En el análisis efectuado se tuvieron valores de “P” Sig. menores a 0.05 en todos los parámetros analizados, como se muestra en la Tabla 4, y en todas las combinaciones de tratamiento; por tanto, se afirmó que la implementación de un humedal de flujo vertical conformado por ladrillo de arcilla reciclado en ambas fases, en una primera fase y por arenas y gravas en una segunda fase y viceversa influye positivamente en la depuración de aguas residuales urbanas en los parámetros de turbiedad, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y coliformes termo tolerantes.

Tabla 4. Resultados de la prueba de “t de student”. Fuente: elaboración propia.

Prueba de T de Student				
	Valores	Estadístico	gl.	Sig.
<i>Turbiedad</i>	Grupo experimental 1	35.52	4	0.000002
	Grupo experimental 2	31.54	4	0.000003
	Grupo experimental 3	36.73	4	0.000002
	Valores	Estadístico	gl.	Sig.
<i>Demanda bioquímica de oxígeno</i>	Grupo experimental 1	19.35	4	0.000002
	Grupo experimental 2	17.81	4	0.000003
	Grupo experimental 3	18.99	4	0.000002
	Valores	Estadístico	gl.	Sig.
<i>Demanda química de oxígeno</i>	Grupo experimental 1	19.34	4	0.000002
	Grupo experimental 2	27.26	4	0.000001
	Grupo experimental 3	22.81	4	0.000001
	Valores	Estadístico	gl.	Sig.
<i>Coliformes termotolerantes</i>	Grupo experimental 1	11.16	4	0.00018
	Grupo experimental 2	11.15	4	0.00018
	Grupo experimental 3	11.15	4	0.00018

Fuente: elaboración propia.

La evaluación de la construcción del humedal de flujo vertical de dos fases con sustrato incorporando ladrillo de arcilla reciclado permitió obtener valores de remoción del parámetro físico de turbiedad entre el 72 % y el 82 %. En la remoción del parámetro químico de demanda bioquímica de oxígeno se tuvieron valores de salida entre 12 mg/L y 28 mg/L; en la demanda química de

oxígeno se registraron valores de salida entre 75 mg/L y 95 mg/L. La eficiencia de remoción del parámetro biológico de coliformes termotolerantes fue de 99.9 %.

4. DISCUSIÓN

La discusión de resultados se realizó contrastando los resultados obtenidos en esta investigación con los valores obtenidos y publicados en las revistas científicas consultadas. Se tomaron en cuenta los valores obtenidos en los parámetros físicos, químicos y biológicos de las aguas residuales urbanas tratadas mediante este sistema; asimismo se tomaron en cuenta los valores obtenidos y se contrastaron con los límites máximos permisibles establecidos en el Perú para los efluentes establecidos en [18].

Por su lado, se tomaron en cuenta, para el caso que el agua obtenida pueda ser reutilizado para el riego de árboles de tallo largo, así como para su uso en riego de jardines de áreas verdes el cumplimiento de los estándares de calidad ambiental normados para el Perú que se encuentran regulados en [19].

En cuanto al diseño hidráulico se tomó en cuenta la guía de diseño de humedales verticales de Dinamarca adaptando el uso de agregados locales como medio filtrante, así como el uso de ladrillo de arcilla reciclado que se obtuvo en la localidad de investigación. Asimismo, se realizaron variables en la composición del sustrato con el objeto de evitar la obstrucción y la saturación del sistema, de modo tal que se amplíe la vida útil del sistema.

En la Tabla 5 se muestran los porcentajes de eficiencia obtenidos en la remoción de los contaminantes por cada parámetro y por cada grupo experimental.

Tabla 5. Eficiencia de remoción de parámetros físicos, químicos y biológicos.

Parámetro	Unidad	GC (%)	GE1 (%)	GE2 (%)	GE3 (%)
Turbiedad	UNT	83.17	76.67	78.17	81.67
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	91.15	95.74	94.43	95.41
Demanda química de oxígeno	mg/L	88.14	88.47	87.29	86.44
Coliformes termo tolerantes	NMP/100ml	99.9	99.9	99.9	99.9

Fuente: elaboración propia.

4.1 Grupo experimental 1

Los resultados obtenidos de la implementación del uso de ladrillo reciclado en la implementación de un humedal de flujo vertical en un sistema de dos fases en la depuración de aguas residuales urbanas demostraron que la aplicación del modelo es eficiente en la remoción de contaminantes físicos, químicos y biológicos.

En la remoción de la demanda química de oxígeno se tuvo un 88.47 % resultado que supera a lo obtenido en [13] que obtuvo en su investigación una eficiencia de 74.9 % en la eliminación de la demanda química de oxígeno. Sobre esta diferencia es posible inferir que la concentración de contaminantes es menor en la entrada del sistema, ya que el sistema conformado con cámara de rejillas y desarenador recibe las descargas de viviendas rurales, en cambio en la investigación consultada se tuvo un tratamiento con tanque Imhoff que controla la carga orgánica de viviendas ubicadas en zonas urbanas.

Por su parte, la eficiencia de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno con esta combinación de fases con ladrillo reciclado en ambas fases fue del orden de 95.74 % similar a lo obtenido por [15] que obtuvo en su investigación una eficiencia de 72.00 %. Dicha similitud permite concluir que este tipo de modelos que hacen uso de arcilla cocida a través de la reutilización de ladrillo de arcilla reciclado muestran una consolidación en la remoción de este contaminante.

Sobre la granulometría utilizada, se tiene que en la fase 1 del modelo experimental tuvo una capa de filtración con una altura de 0.50 m con una granulometría de 0.075 mm a 4.75 mm, asimismo tuvo una segunda capa de transición con una altura de 0.10 m y un agregado reciclado de 10 mm a 20 mm; finalmente la capa inferior se conformó de piedra de 20 mm a 60 mm. Esta granulometría es similar a la utilizada por [16] que realizó un experimento para determinar la influencia de la granulometría en el modelo de humedal flujo vertical, de este modo se evitaron las obstrucciones en el sistema. Sobre el medio filtrante se seleccionaron manualmente las cantidades óptimas de cada fino a efectos de obtener una remoción efectiva como se muestra en la Figura 9a.

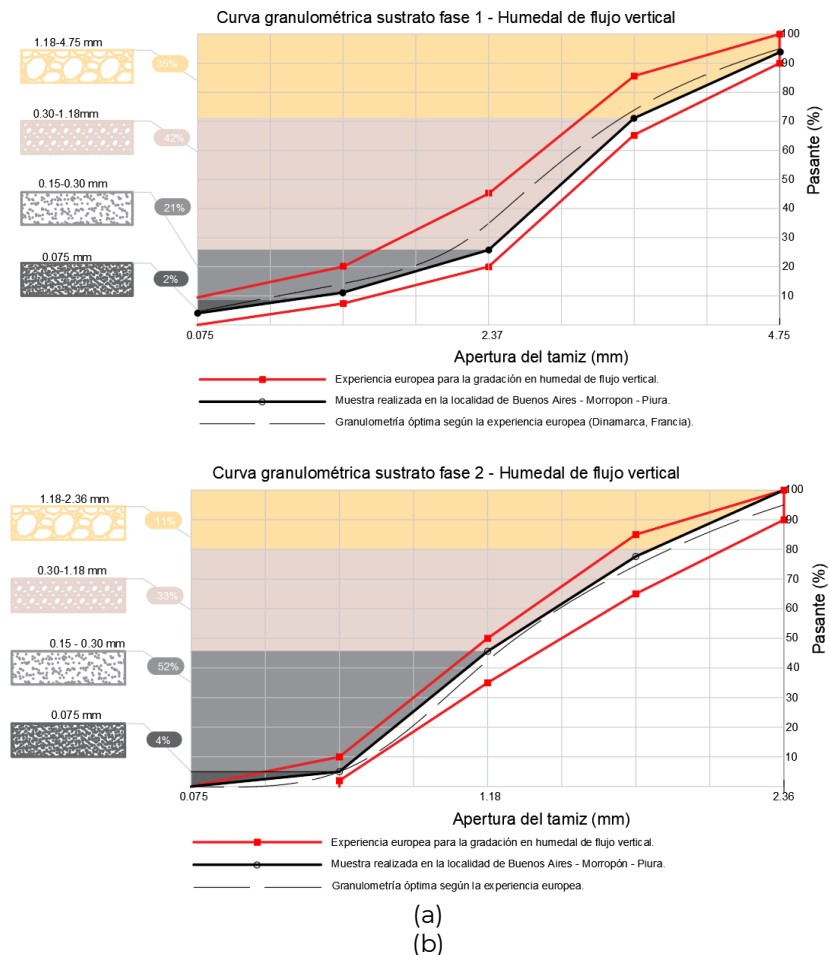


Figura 9. (a) Granulometría del medio filtrante agregado de la fase 1 y
(b) Granulometría del medio filtrante agregado de la fase 2
Fuente: elaboración propia.

4.2 Grupo experimental 2

En el modelo experimental los resultados del uso de arenas y gravas en la primera fase y ladrillo de arcilla reciclado en la segunda fase en la depuración de aguas residuales urbanas demostraron eficiencia en la remoción de contaminantes físicos, químicos y biológicos.

El valor obtenido en la remoción de la demanda bioquímica fue de 94.43 % y resultó un valor aceptable, similar al valor obtenido por [20] quien obtuvo un 98.00 % de remoción, sobre esta diferencia se puede colegir que la carga orgánica que ingresó al modelo experimental presentó una variabilidad en el tiempo, debido, entre otras razones a los hábitos de los miembros de las familias y al incremento de los mismos en los meses de diciembre y enero, asimismo, es posible deducir que, tal como se indicó en la discusión del objetivo específico 1 el ingreso directo del afluente sin pretratamiento influye en la diferencia de remoción.

La investigación que realizó [16] demostró que un correcto diseño y una correcta utilización de la granulometría evita la obstrucción del modelo, de este modo, se siguieron los esquemas utilizados en Dinamarca a efectos de seleccionar las cantidades óptimas, teniendo en la fase 2, que es donde

se realizó el refinado del tratamiento de las aguas residuales, la utilización de arenas desde 0.075 mm a 2.36 mm como se observa en la Figura 10b.

Los resultados de esta investigación fueron sometidos al análisis y a la comparación con los valores establecidos en la normativa del Perú tanto para la disposición a los cuerpos de agua regulado en [18] como para el reúso en el riego de vegetales de tallo alto regulado para el Perú en [19], concluyendo que los valores obtenidos cumplen con el límite máximo para el vertimiento final de los efluentes, sin embargo, no cumplen con los valores para el reúso del mismo, debido a que la demanda bioquímica de oxígeno señala que el valor máximo es de 15 mg/L y se obtuvo en la investigación un valor de 17 mg/L como se verifica en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de medición de aguas residuales urbanas tratadas.

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>Límite máximo D.S. 03-2010</i>	<i>Reúso DS 04-2017</i>	<i>Resultados</i>
Demanda bioquímica de oxígeno	DBO ₅	100 mg/l	15 mg/l	17 mg/l
Demanda química de oxígeno	DQO	200 mg/l.	40 mg/l.	75 mg/l
Temperatura	°C	< 35	Δ 3	25.1°C
Potencial del hidrógeno	pH	6.5-8.5	6.5-8.5	7.25
Coliformes termo tolerantes	NMP/100ml	10,000	1000	19

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en lo que respecta al cumplimiento de la demanda química de oxígeno, se tiene que, en la remoción de este contaminante se obtuvo un valor de 75 mg/L, sin embargo, para el caso del reúso del agua tratada se requiere un valor máximo de 40 mg/L. Por su parte, se verificó que se obtuvo cumplimiento con los parámetros de temperatura, potencial de hidrógeno y coliformes termo tolerantes como se verifica en la Tabla 6.

4.3 Grupo experimental 3

En el modelo experimental que se construyó con el uso de ladrillo de arcilla reciclado en la primera fase y con arenas y gravas en la segunda fase con la granulometría indicada en la Figura 9a y 9b se obtuvo un valor de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno en el 5to mes de observación de 14 mg/L y de acuerdo a la normativa que se indica en la Tabla 7 se verificó que se cumplió con el límite máximo para el Perú que se señala en [18] que precisa un límite máximo de 100 mg/L, vale decir que las aguas tratadas con este modelo experimental pueden ser dispuestas a los cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneas.

Del mismo modo, en la Tabla 7 se tienen los resultados de la investigación, que determinaron que el valor obtenido en la remoción de la demanda química de oxígeno fue de 80 mg/L que resultó mayor a lo señalado en la normativa nacional en el Perú para el reúso en el riego de vegetales de tallo alto o riego de áreas verdes urbanas, debido a que el valor máximo es de 40 mg/L, sobre este resultado se concluye que el agua residual tratada con este modelo experimental no puede ser reutilizada, y el autor considera que se requiere una fase adicional a fin de obtener los valores establecidos en las disposiciones legales.

Tabla 7. Parámetros de medición de aguas residuales urbanas tratadas.

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>Límite máximo D.S. 03-2010</i>	<i>Reúso DS 04-2017</i>	<i>Resultados</i>
Demanda bioquímica de oxígeno	DBO ₅	100 mg/l	15 mg/l	14mg/l
Demanda química de oxígeno	DQO	200 mg/l.	40 mg/l.	80 mg/l
Temperatura	°C	< 35	Δ 3	25.2°C
Potencial del hidrógeno	pH	6.5-8.5	6.5-8.5	7.2
Coliformes termo tolerantes	NMP/100ml	10,000	1000	13

Fuente: elaboración propia.

El valor agregado de la presente investigación radica en que se ha generado un nuevo conocimiento sobre las ya existentes relacionado con el tratamiento adecuado de aguas residuales urbanas en núcleos poblacionales rurales con menos de 2000 habitantes. La incorporación de ladrillo de arcilla reciclado y la adaptación de agregados locales en humedales contruidos de flujo vertical de dos fases permiten solucionar la incorrecta disposición de aguas residuales urbanas, mejoran las condiciones de vida y de salud pública de las comunidades rurales, reducen la contaminación en el medio ambiente y resuelven el problema de sostenibilidad de los recursos hídricos.

Las implicancias prácticas de los resultados de la investigación se resumen en la viabilidad de construir un nuevo marco teórico que permita la creación de una norma técnica en el Perú para regular las pautas y procedimientos en la implementación de procesos de depuración conformados por humedales contruidos de flujo vertical en dos fases utilizando distintos tipos de medios filtrantes e incorporando ladrillo de arcilla reciclado. Los resultados obtenidos se presentan como una solución concreta que resuelve la deficiente disposición de aguas residuales urbanas, tiene un costo de operación y mantenimiento bajo y puede replicarse en comunidades con similares características climatológicas y que cuentan con suelos de baja permeabilidad.

5. CONCLUSIONES

La implementación de un humedal de flujo vertical construido con sustrato conformado por ladrillo de arcilla reciclado en ambas fases generó la remoción de contaminantes de la demanda bioquímica de oxígeno en un 95.74 % con el sistema estabilizado y una remoción de la turbiedad del 76.67 % con un tiempo de retención hidráulica de 2.5 días. Esta combinación de fases no tuvo obstrucción durante el periodo de observación.

La implementación de un humedal de flujo vertical construido con sustrato conformado por arenas y gravas en una primera fase y por ladrillo de arcilla reciclado en una segunda fase presentó una remoción de la demanda química de oxígeno de 87.29 % y un valor de remoción de coliformes termotolerantes de 99.9 %. Esta combinación de fases presentó una alta eficiencia de remoción de contaminantes biológicos.

La implementación de un humedal de flujo vertical construido con sustrato conformado por ladrillo de arcilla reciclado en una primera fase y por arenas y gravas en una segunda fase generó un porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno de 95.41 % y una remoción de la turbiedad de 81.67 %. La combinación presentó un buen comportamiento en la remoción de contaminantes químicos y biológicos. El agregado a utilizar en las fases del sistema debe presentar un coeficiente de uniformidad entre 3.8 y 5.0 y una porosidad entre 38 % y 40 %.

Con los resultados obtenidos se concluye que la implementación de un humedal de flujo vertical construido con sustrato conformado por ladrillo de arcilla reciclado en ambas fases, y también combinado con arenas y gravas en una segunda fase y alternado influye positivamente en la depuración de aguas residuales urbanas ya que los valores de remoción obtenidos cumplen con los límites máximos establecido en las disposiciones legales vigentes del Perú. Asimismo, se verificó que durante el proceso de operación de la planta depuradora no se presentaron obstrucciones al sistema.

6. ACERCA DEL ARTÍCULO

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por los autores.

Agradecimientos: Los autores agradecen al personal del área técnica municipal de la comuna de Buenos Aires por su colaboración en el análisis de las muestras realizadas conforme al Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, aprobado mediante la Resolución Ministerial N° 273-2013-VIVIENDA del Perú.

Contribuciones de autoría: Todos los autores participaron en la conceptualización del estudio, el diseño experimental, la realización de experimentos, el análisis de datos y la redacción del manuscrito.

Declaración del investigador principal: Declaro que asumo la responsabilidad total por el contenido, la integridad académica y los resultados presentados en este trabajo, garantizando su rigor científico y cumplimiento ético.

Conflictos de interés: Los autores declaran la ausencia de conflictos de interés relacionados con la investigación, la autoría y/o la publicación de este artículo. Los investigadores certifican que el trabajo se ha realizado con total independencia y transparencia.

REFERENCIAS

- [1] Programa de las Naciones Unidas Hábitat y Organización Mundial de la Salud, "Progreso en el tratamiento de las aguas residuales". Accedido el 10 dic. 2024. [En línea]. Disponible en: https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/10/sdg6_indicator_report_631_progress-on-wastewater-treatment_2021_es.pdf
- [2] J. Zhao, F. Mo, J. Wu, B. Hu, Y. Chen, and W. Yang, "Clogging simulation of horizontal subsurface-flow constructed wetland," *Environ. Eng. Sci.*, vol. 34, no. 5, pp. 343–349, May. 2017. <https://doi.org/10.1089/ees.2016.0025>
- [3] Y. A. Pérez, D. A. García Cortés, and U. J. Jauregui Haza, "Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión," *Ecosistemas*, vol. 31, no. 1, p. 2279, Apr. 2022. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2279>
- [4] C. B. Agaton, and P. M. C. Guila, "Ecosystem services valuation of constructed wetland as a nature-based solution to wastewater treatment," *Earth*, vol. 4, no. 1, pp. 78–92, Feb. 2023. <https://doi.org/10.3390/earth4010006>
- [5] H. Zhong, N. Hu, Q. Wang, Y. Chen, and L. Huang, "How to select substrate for alleviating clogging in the subsurface flow constructed wetland?," *Sci. Total Environ.*, vol. 828, p. 154529, Jul. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154529>
- [6] M. Qadir, "Hacia un mundo libre de agua no tratada: emergiendo del callejón sin salida en el que se encuentran muchos países en desarrollo," blogs.iadb.org. Accessed: Aug. 15, 2024. [Online.] Available: <https://blogs.iadb.org/agua/es/3195/>
- [7] S. Saravia Matus, et al., "Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe," Comisión Económica para América latina y el Caribe, repositorio.cepal.org. Accessed: Aug. 15, 2024. [Online.] Available: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/48613-oportunidades-la-economia-circular-tratamiento-aguas-residuales-america-latina>
- [8] S. Troesch, D. Esser, and P. Molle, "Natural rock phosphate: A sustainable solution for phosphorous removal from wastewater," *Procedia Eng.*, vol. 138, pp. 119–126, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.069>
- [9] A. Teixeira de Matos, M. Pimentel de Mateus, R. de Almeria Costa, and M. V. Sperling, "Influence factors in the adjustment of parameters of the modified first order kinetics equation used to model constructed wetland systems," *Universidade Estadual de Maringá*, vol. 41, Jun. 2019. <https://www.redalyc.org/journal/3032/303260200022/html/>
- [10] A. R. A. Zidan, M. M. El-Gamal, A. A. Rashed, and M. A. A. El-Hady Eid, "Wastewater treatment in horizontal subsurface flow constructed wetlands using different media (setup stage)," *Water Sci.*, vol. 29, no. 1, pp. 26–35, May. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wsi.2015.02.003>
- [11] S. T. Miranda, A. T. de Matos, M. P. de Matos, C. B. Saraiva, and D. L. Teixeira, "Influence of the substrate type and position of plant species on clogging and the hydrodynamics of constructed wetland systems," *J. Water Proc. engineering*, vol. 31, p. 100871, Oct. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100871>
- [12] R. Mlih, F. Bydalek, E. Klumpp, N. Yaghi, R. Bol, and J. Wenk, "Light-expanded clay aggregate (LECA) as a substrate in constructed wetlands – A review," *Ecol. Eng.*, vol. 148, p. 105783, Apr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105783>
- [13] Y. Li, J. Wang, X. Lin, H. Wang, H. Li, and J. Li, "Purification effects of recycled aggregates from construction waste as constructed wetland filler," *J. Water Proc. engineering*, vol. 50, p. 103335, Dec. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103335>
- [14] T. Zhang, D. Xu, F. He, Y. Zhang, and Z. Wu, "Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990–2010," *Ecol. Eng.*, vol. 47, pp. 189–197, Oct. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.022>

- [15] A. Mena, "Eficiencia del sistema de humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos" Tesis de doctorado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, 2022. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/18006>
- [16] J. R. Pidre Bocado, "Influencia del tipo y granulometría del sustrato en la depuración de las aguas residuales por el sistema de humedales artificiales de flujo vertical y horizontal" Tesis de doctorado, Universidad de Cádiz, España, 2010. <https://rodin.uca.es/handle/10498/15878>
- [17] C. A. Arias I. and H. Brix, "Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales," *Cienc. Ing. Neogranadina*, vol. 13, no. 1, pp. 17–24, Jul. 2003. <https://revistas.umng.edu.co/index.php/rcin/article/view/1321>
- [18] Decreto Supremo N° 003-2010, Aprueba límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, 003-2010, Ministerio del Ambiente del Perú, Lima, Perú, 2010. https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds_003-2010-minam.pdf
- [19] Decreto Supremo N° 004-2017, Aprueban estándares de calidad ambiental (ECA) para agua y establecen disposiciones complementarias, 004-2017, Ministerio del Ambiente del Perú, Lima, Perú, 2017. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- [20] A. E. Navarro-Frómeta, F. Beissos, J. Marc-Bec, T. Jaumejoan "Desempeño de humedales contruidos de flujo vertical en el tratamiento de aguas residuales municipales," *Revista Cubana de Química*, vol. 32, no. 3, Sep. 2020. <https://www.redalyc.org/journal/4435/443565548001/html/>