

Saneamiento sostenible y ciudades resilientes: humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Cuenca-Ecuador

Estefanía Caridad Avilés Sacoto
Universidad Politécnica Salesiana Cuenca, Ecuador
eaviles@ups.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-6434-7810>

El vertido directo de aguas residuales domésticas a fuentes hídricas representa uno de los problemas de contaminación más importantes y que requiere intervenciones urgentes para asegurar el bienestar y el desarrollo sostenible de las ciudades. La gestión sostenible del agua, el tratamiento adecuado de aguas residuales y la optimización de los servicios de alcantarillado son aspectos esenciales para preservar la calidad ambiental, la salud pública y el bienestar de la población.

La ciudad de Cuenca, Ecuador, designada en 2015 por la ONU como una ciudad intermedia —por lo cual esta organización tiene un particular interés en su crecimiento sostenible— presenta una cobertura de tratamiento de aguas residuales del 95 %. El 5 % restante necesita ser tratado para evitar la contaminación de los cuatro ríos que la atraviesan, por lo que los humedales construidos surgen como una solución innovadora que garantiza el acceso equitativo a servicios básicos y minimiza el impacto ambiental.

El presente estudio tuvo como objetivo analizar la utilización de humedales construidos como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas en un barrio de la ciudad de Cuenca, el cual descarga directamente aguas residuales al río Tarqui, generando problemas a sus habitantes.

Se tomaron muestras de agua en un punto de descarga del sistema de alcantarillado al río y se evaluaron dos parámetros: demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y sólidos suspendidos (SS).

Se diseñó un humedal subsuperficial de flujo horizontal, basado en un modelo para la reducción de materia orgánica, y se montó una estación piloto del mismo con *Phragmites australis*, alimentado con esta agua. Se evaluaron nuevamente los mismos parámetros a la salida del humedal.

Los resultados indican que el sistema tiene una remoción de contaminantes con porcentajes promedio del 85 % para la demanda bioquímica de oxígeno y del 87 % para los sólidos suspendidos, y que, al ser comparados con la Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes, cumple con los requisitos legales establecidos.

Los humedales artificiales son una alternativa eficiente y sustentable para el tratamiento de aguas residuales domésticas, considerando la capacidad que tienen estos sistemas para capturar y procesar contaminantes provenientes de las mismas.

Introducción

El acceso al agua limpia y el tratamiento adecuado de las aguas residuales son un desafío importante que se debe considerar para la sostenibilidad de las ciudades, pues la falta de infraestructura de saneamiento genera impactos ambientales negativos que afectan no solo la calidad del agua y los ecosistemas, sino también la salud pública de las comunidades, lo que frena su desarrollo.

La contaminación del agua, resultado de la descarga incontrolada de aguas residuales sin tratar, contribuye a la proliferación de enfermedades hídricas, la degradación de cuerpos de agua y la pérdida de biodiversidad acuática (González *et al.*, 2020), lo que muestra la urgente necesidad de implementar soluciones efectivas y sostenibles para la gestión de estos residuos líquidos.

Esta situación se agrava en entornos urbanos en constante crecimiento, donde el aumento de la población y la expansión de la infraestructura generan una mayor demanda de agua potable y una mayor producción de aguas residuales. En los países en desarrollo, el desafío es aún mayor, ya que los recursos para construir sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales son limitados. Estos sistemas suelen implicar costos elevados tanto en infraestructura como en operación y mantenimiento, además de requerir un consumo energético significativo.

Para mitigar estos efectos, es fundamental invertir en plantas de tratamiento eficientes que permitan la eliminación de contaminantes y la reutilización del agua en actividades como la agricultura, la industria y el riego de espacios verdes urbanos. Además, la implementación de soluciones basadas en la naturaleza puede ayudar a mejorar la calidad del agua y reducir el impacto ambiental de las descargas residuales.

La educación ambiental y la participación comunitaria también desempeñan un papel clave en la conservación del agua y la promoción de prácticas responsables en su uso y tratamiento. Fomentar políticas públicas orientadas a la gestión integral del recurso hídrico es esencial para garantizar la sostenibilidad y resiliencia de las ciudades en el futuro (Álvarez-Tinoco y Preciado-Beltrán, 2019).

Frente a esta problemática, los humedales construidos surgen como una solución sostenible para el tratamiento de las aguas residuales, ya que, al ser sistemas no convencionales, no requieren energía eléctrica ni equipos costosos para su funcionamiento. Su diseño, basado principalmente en procesos naturales, permite una reducción significativa

de los contaminantes presentes en las aguas residuales sin generar un impacto ambiental adverso, lo que los convierte en una alternativa viable para aquellas comunidades que no cuentan con acceso a sistemas de saneamiento.

Los humedales construidos imitan los mecanismos de purificación que se desarrollan en un humedal natural. A través de la interacción de sus componentes —incluyendo sustratos, vegetación y microorganismos— se llevan a cabo procesos físicos, químicos y biológicos que favorecen la eliminación de contaminantes (Larra Borrero, 1988).

Una de las principales ventajas de los humedales construidos radica en su multifuncionalidad. Además de cumplir su propósito como sistemas de tratamiento de aguas residuales, pueden integrarse en el paisaje urbano como espacios verdes que proporcionan beneficios adicionales. Estos sistemas pueden diseñarse como zonas de recreación y esparcimiento, promoviendo la conexión de las comunidades con la naturaleza y generando conciencia ambiental. Asimismo, contribuyen a la mitigación de los efectos del cambio climático al capturar carbono, mejorar la infiltración del agua en el suelo y reducir la vulnerabilidad de las ciudades ante eventos climáticos extremos, como inundaciones y sequías.

Este capítulo surge como una alternativa para enfrentar el problema de la falta de saneamiento y la contaminación del recurso hídrico en el barrio Tres Puentes, en la ciudad de Cuenca, a través de la utilización de sistemas naturales como los humedales construidos. Considerando que su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales ha sido probada y que su implementación es de bajo costo, se plantea como una solución que no solo promueve una gestión sostenible del agua, sino que también mejora la calidad de vida urbana. Además, al descentralizar el tratamiento de aguas residuales, se fomenta la resiliencia de las comunidades y se disminuye la carga sobre las infraestructuras convencionales de saneamiento, permitiendo una gestión más equitativa y accesible del recurso hídrico, reduciendo así las desigualdades sociales (World Bank Group, 2017).

En este contexto, la adopción de humedales construidos representa una estrategia clave para avanzar hacia ciudades más sostenibles, resilientes y adaptadas a los desafíos ambientales actuales. La integración de estos sistemas en la planificación urbana no solo contribuiría a mejorar la calidad del agua y reducir la contaminación, sino que también impulsaría la generación de nuevos hábitats para especies de flora y fauna, promoviendo la biodiversidad local (Rojas *et al.*, 2015). Además, su implementación podría complementarse con programas de educación ambiental y participación ciudadana, fortaleciendo el compromiso comunitario con la protección y el uso responsable de los recursos hídricos.

Estado del arte

Los humedales construidos son sistemas biológicos confinados mediante algún tipo de impermeabilización, diseñados para replicar los mecanismos naturales de los humedales en la depuración del agua. En estos sistemas, las aguas residuales interactúan con las plantas, el suelo que actúa como medio filtrante y, a la vez, da soporte físico a las plantas que en él se encuentran, los microorganismos y la atmósfera, dando lugar a procesos físicos, químicos y biológicos que contribuyen a su tratamiento (Environmental Protection Agency [EPA], 2012).

Entre los principales procesos que tienen lugar en los humedales construidos se encuentran la sedimentación, la coagulación, la adsorción, la filtración, la absorción biológica y la transformación microbiana. Estos mecanismos, en combinación con la luz solar y la oxigenación del agua, permiten la eliminación de contaminantes y mejoran la calidad del recurso hídrico. En conjunto, estos elementos contribuyen a la eliminación de materiales disueltos y suspendidos en las aguas residuales (Lipps *et al.*, 2022).

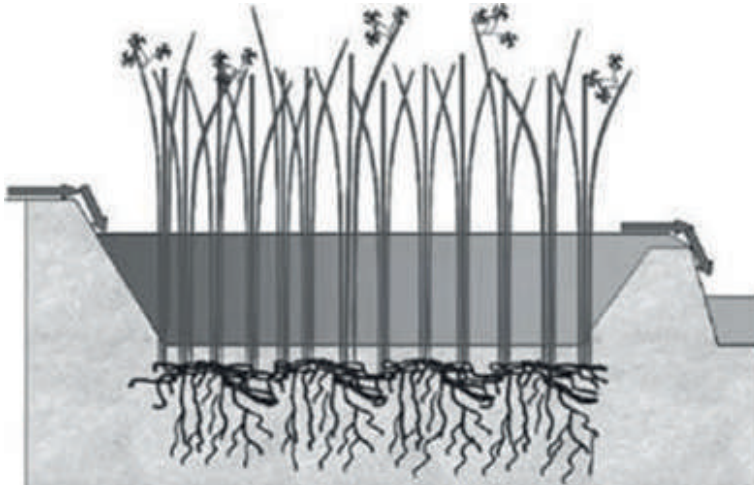
Además de mejorar la calidad del agua, la implementación de humedales construidos ofrece una oportunidad para recuperar espacios degradados y fomentar la biodiversidad en entornos urbanos, además de ser sistemas de bajo costo de operación y mantenimiento (Dávila y López, 2020).

Tipos de humedales construidos

Humedales de flujo superficial: son aquellos en los que el agua está expuesta a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos de las plantas (figura 1). Este tipo de humedales consiste en canales o balsas de poca profundidad (0,1 a 0,6 m) construidas sobre el terreno con algún tipo de barrera que confine el sistema y evite filtraciones. Contienen un lecho de grava o arena para soportar las raíces de la vegetación emergente y a través de los cuales circula el agua residual. Estos sistemas son utilizados principalmente para tratamientos terciarios y, en algunos casos, para tratamientos secundarios (Kadlec y Wallace, 2008).

Figura 1

Humedal de flujo superficial



Nota. BIOINGEPRO, 2023.

Humedales de flujo subsuperficial

Los humedales de flujo subsuperficial se caracterizan porque la circulación del agua en los mismos se realiza a través de un material

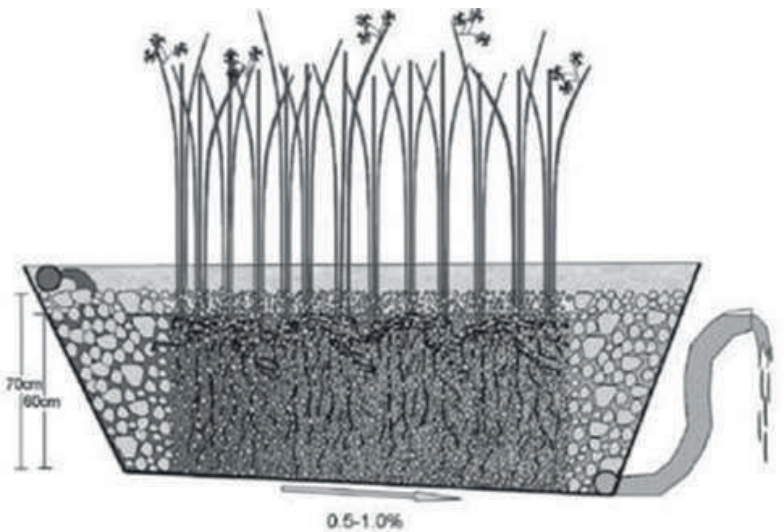
sólido poroso que ocupa casi toda la profundidad. El agua residual circula por debajo de la superficie del lecho, a través del medio poroso, que normalmente está compuesto por grava. La vegetación se planta en este medio granular y el agua entra en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. Los microorganismos encargados de degradar la materia orgánica se desarrollan formando una biopelícula alrededor de las partículas de grava y de las raíces vegetales (Kadlec y Wallace, 2008).

Dentro de los sistemas de flujo subsuperficial se pueden identificar dos tipos principales de flujo (Kadlec y Wallace, 2008):

- **Sistema de flujo subsuperficial horizontal:** funciona con una alimentación continua, realizada a lo largo de uno de los laterales. La recolección del agua tratada se efectúa en la parte inferior del lado opuesto al de entrada (figura 2).

Figura 2

Humedal de flujo subsuperficial horizontal



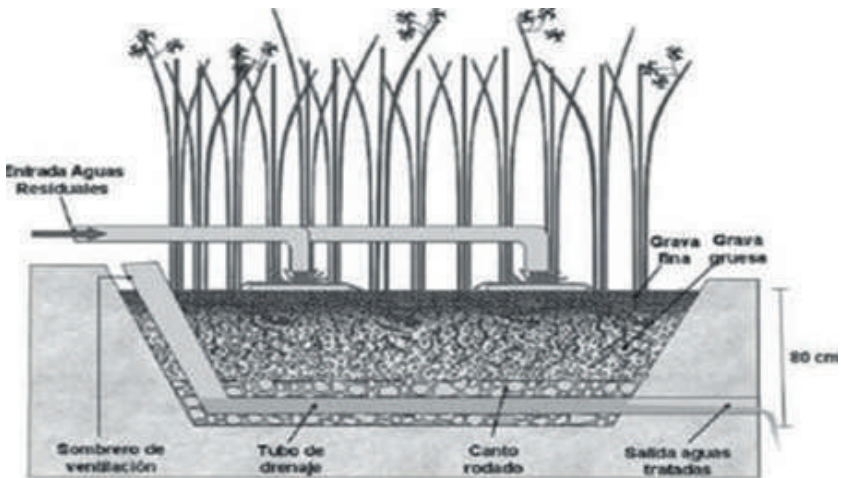
Nota. BIOINGEPRO, 2023.

Sistema de flujo subsuperficial vertical

Este tipo de humedales recibe las aguas residuales desde la parte superior, a través de un sistema de tuberías de distribución. La alimentación se realiza de manera uniforme y periódica, mediante cargas distribuidas sobre toda la superficie del lecho. El agua se infiltra verticalmente a través de un sustrato inerte —compuesto por arenas y gravas— y se recoge en una red de drenaje situada en el fondo del humedal (figura 3).

Figura 3

Humedal de flujo subsuperficial vertical



Nota. BIOINGEPRO, 2023.

Diseño de humedales construidos

Existen diversos modelos para el diseño de humedales construidos. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency [EPA]) propone en su manual un modelo basado en la remoción de materia orgánica, en el cual se considera que todos los sistemas de humedales artificiales pueden funcionar como reactores

biológicos, y que su rendimiento puede aproximarse al descrito por la cinética de primer orden de un reactor de flujo pistón (EPA, 2012).

La expresión para estimar el área superficial requerida del humedal, en metros cuadrados (A_s), se presenta en la ecuación 1.

Ecuación 1

Área superficial

$$A_S = \frac{Q * (\ln C_o - \ln C_e)}{KT * y * n}$$

La constante de temperatura KT viene dada por la ecuación 2.

Ecuación 2

Constante de temperatura

$$K_T = K_{20} * \theta^{(T-20)}$$

El valor de K20 es de 0,19 d^{-1} y el rango de porosidad, n, es de 0,65 a 0,75

El tiempo de retención hidráulico (TRT) viene dado por la expresión que se presenta en la ecuación 3.

Ecuación 3

Tiempo de retención hidráulico

$$HRT = \frac{A_s * y * n}{Q}$$

El ancho del humedal (W) está en la ecuación 4.

Ecuación 4*Ancho del humedal*

$$W = 1 * \left(\frac{Q * A_s}{ym * K_s} \right)^{0.5}$$

La conductividad hidráulica K_s es en $m^3/m^2/d$ y la pendiente en decimales. El largo del humedal es igual a la expresión representada en la ecuación 5.

Ecuación 5*Largo del humedal*

$$L = \frac{A_s}{W}$$

Casos de aplicación de humedales construidos para tratamiento de aguas residuales domésticas

En la tabla 1 se presentan algunos ejemplos de aplicación de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales.

Tabla 1

Casos de aplicación de humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales

Título	Eficiencia en remoción de contaminantes	País	Año	Referencia
Constructed wetlands as a sustainable solution for wastewater treatment in small villages	86 % de DBO5, 90 % de sólidos suspendidos	España	2003	(Solano <i>et al.</i> , 2004)
Constructed wetlands. Are they safe in reducing protozoan parasites?	Tasas de reducción de 2 log para quistes de <i>Cryptosporidium</i> y Giardia	Alemania	2008	(Redder <i>et al.</i> , 2010)

Performance of integrated household constructed wetland for domestic wastewater treatment in rural areas	96,5 % de DBO, 97 % de sólidos suspendidos, 88 % nitrógeno, 87,8 % de fósforo	China	2011	(Wu <i>et al.</i> , 2011)
A pilot-scale study for modeling a free water surface constructed wetlands wastewater treatment system	83 % de DBO5, 75 % de nitrógeno	Grecia	2013	(Galanopoulos <i>et al.</i> , 2013)
Implementación de humedales artificiales de flujo subsuperficial para la remoción de nitrógeno y materia orgánica, acoplados a reactores con microalgas	73,4 % de DBO5, 87 % de coliformes fecales	Colombia	2014	(Quintero García, 2021)
Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia	96,7 % de DBO5, 81,4 % de sólidos suspendidos	Colombia	2013	(Bedoya <i>et al.</i> , 2014)
Treatment of water waste by wetlands artificial tropical in Tabasco, México	Remociones entre 81,10 % y 95,44 % para DBO5, DQO, sólidos suspendidos, NT, PT con <i>Pontederia cordata</i> Remociones entre 53 % y 89 % para DBO5, DQO, sólidos suspendidos, NT, PT con <i>Phragmites australis</i>	México	2007	(Acosta <i>et al.</i> , 2007)
Removal of nutrients y organic matter in a constructed wetland, in function of the development of the macrophyte <i>Typha dominiguensis</i> Pers.	34,63 % y 31,63 % para DBO5, 43,9 % y 52,4 % para sólidos suspendidos	Venezuela	2010	(Vera <i>et al.</i> , 2010)
Estudio de comparación del tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales	50-86 % de DBO5	Colombia	2010	(Rodríguez-Miranda <i>et al.</i> , 2010)
Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica	90 %-95 % de DQO	México	2010	(Romero-Aguilar <i>et al.</i> , 2009)

Metodología

Zona de estudio

El barrio Tres Puentes se encuentra ubicado en la parroquia Yanuncay, en la ciudad de Cuenca, y sus coordenadas geográficas corresponden al sistema UTM zona 17S, con valores de $X = 720\ 737$ m y $Y = 9\ 677\ 248$ m. En esta zona se ha identificado un punto de descarga directa de aguas residuales al río Tarqui, como se muestra en la figura 1.

Figura 1

Descarga de agua residual al río Tarqui



En la figura 2 se observa la ubicación del punto de descarga, representada en una imagen satelital obtenida de Google Earth.

Figura 2

Ubicación de descarga de agua residual



Nota. Google Earth.

La zona de descarga se encuentra ubicada detrás de la Escuela de Educación Básica Francisca Arízaga Toral y por debajo del centro comercial Mall del Río (figura 3). Las autoridades del plantel educativo han manifestado su preocupación por las molestias que estas descargas generan, principalmente debido a los malos olores.

Figura 3*Escuela Francisca Arízaga Toral*

Dentro de la misma zona donde se encuentra la descarga, detrás de la escuela, existe un área verde municipal, la cual, tras estudios urbanísticos y de paisaje, podría albergar el humedal propuesto para el tratamiento de estas aguas residuales, constituyéndose en el primer humedal urbano de la ciudad de Cuenca destinado al tratamiento de aguas residuales domésticas (figura 4).

Figura 4*Espacio para emplazamiento de humedal***Caracterización de las aguas residuales**

Se realizó una campaña de muestreo de seis meses para determinar los valores de DBO₅ (demanda bioquímica de oxígeno a cinco días) y TSS (sólidos totales suspendidos) del agua residual que alimentaría al humedal. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2.

Tabla 2*Características del agua residual*

Parámetro	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
Caudal m ³ /d	217,3	220	214,6	3,81
DBO ₅ mg/l	233,7	282,5	185	68,9
SS mg/l	223,5	246,8	200,3	32,88

Diseño y dimensionamiento del humedal

El diseño del humedal se basó en el modelo de remoción de materia orgánica (DBO_5) planteado por la Environmental Protection Agency (EPA). Siguiendo este modelo, y considerando los valores máximos de caudal y DBO_5 registrados para el agua residual, se obtuvieron los siguientes parámetros de diseño, los cuales se presentan en la tabla 3.

Tabla 3

Parámetros de diseño para el humedal artificial

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Planta	Planta	<i>Phragmites australis</i>	
Medio	Medio	Grava fina 16 mm	
K20	K20	0,19	
Temperatura ambiente	Ta	15	°C
Θ	θ	1,1	
Constante de temperatura	KT	0,117975051	
Caudal	Q	220	m ³ /d
Concentración de DBO a la entrada	DBO5 e	285	mg/l
Concentración de DBO a la salida	DBO5 s	100	mg/l
Altura	Y	0,6	m
Porosidad	n	0,35	
Pendiente en decimales	m	0,01	m/m
Conductividad hidráulica	Ks	10000	m ³ /m ² /d

En la tabla 4 se encuentran los datos concernientes al dimensionamiento del humedal propuesto.

Tabla 4
Dimensionamiento del humedal artificial

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Área superficial	As	9300	m ²
Tiempo de retención hidráulico	HRT	8,87 (9)	d
Ancho	W	238,39 (240)	m
Largo	l	38,75 (40)	m

Pilotaje

Se montó una estación piloto a 200 metros de la zona de estudio, destinada a tratar el 5 % del caudal generado, la cual operó durante seis meses. Durante su funcionamiento, se hicieron 12 análisis tanto del agua que alimentaba al humedal como del agua tratada que salía del mismo. El dimensionamiento de la estación piloto se presenta en la tabla 5.

Tabla 5
Dimensionamiento de humedal artificial piloto

Caudal (m ³ /d)	Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	HRT (d)	Material	Planta
11	2	12	0,6	9	Grava fina	<i>Pragmites australis</i>

Resultados y discusión

Los valores promedio de las muestras obtenidas se presentan en la tabla 6.

Tabla 6*Resultados antes y después de tratamiento en el humedal*

Muestra	DBO ₅ entrada (mg/l)	DBO ₅ salida (mg/l)	SS entrada (mg/l)	SS salida (mg/l)
1	260,30	36,40	238,20	21,80
2	210,50	28,00	210,00	22,50
3	214,20	28,56	221,20	20,90
4	241,00	33,74	224,60	44,80
5	254,22	39,04	210,00	21,00
6	248,00	44,64	212,00	30,30
7	190,60	26,60	215,05	20,80
8	270,20	43,80	233,60	41,94
9	199,30	27,86	226,21	24,60
10	235,75	26,18	212,20	37,08
11	246,15	40,12	206,75	22,60
12	197,00	33,49	230,20	31,64
Media	230,60	34,04	220,00	28,33
Mínimo	190,60	26,18	206,75	20,80
Máximo	270,20	44,64	238,20	44,80
Desviación estándar	27,08	6,72	10,47	8,72

El agua residual que alimenta el humedal presenta una concentración media de 230,6 mg/L de DBO₅, mientras que, después del tratamiento, esta se reduce a 34,04 mg/L, valor que cumple con la normativa ecuatoriana para descarga en fuentes hídricas, la cual establece un límite máximo de 100 mg/L (TULSMA, 2003).

En cuanto a los sólidos suspendidos (SS), el agua residual presenta una media de 220 mg/L, que, luego del tratamiento, disminuye a 28,33 mg/L. Este resultado también se encuentra dentro del límite permitido por la normativa ecuatoriana para descarga en cuerpos hídricos (100 mg/L) (TULSMA, 2003).

En las figuras 5 y 6 se presentan las concentraciones de DBO_5 y SS antes y después del tratamiento.

Figura 5

Concentraciones de DBO_5 antes y después del tratamiento en el humedal

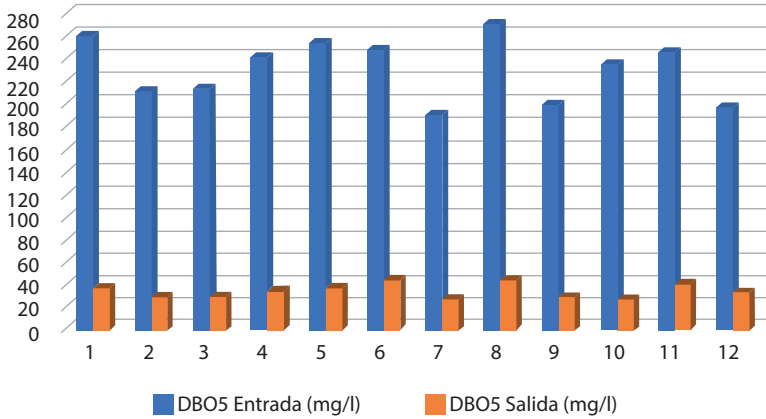
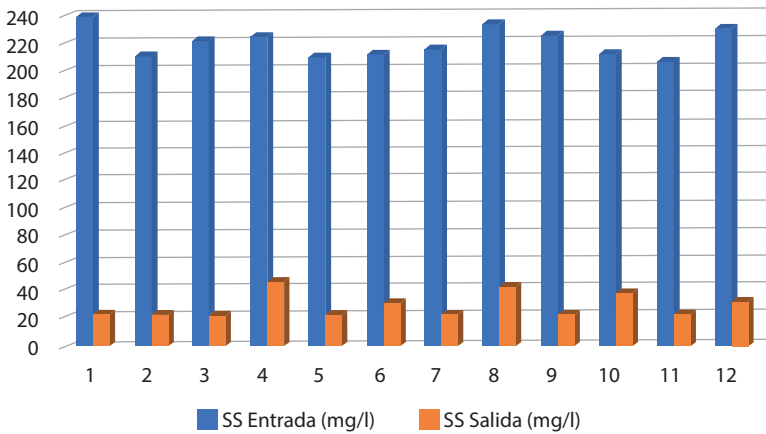


Figura 6

Concentraciones de SS antes y después del tratamiento en el humedal



La eficiencia de remoción para DBO_5 varía entre 82 % y 88,9 %, con un promedio de 85 %; mientras que, para sólidos suspendidos (SS), la eficiencia oscila entre 80 % y 90,8 %, con un promedio de 87,7 %. Estos resultados se visualizan en las figuras 7 y 8.

Figura 7

Porcentaje de remoción de DBO_5 luego del tratamiento en el humedal

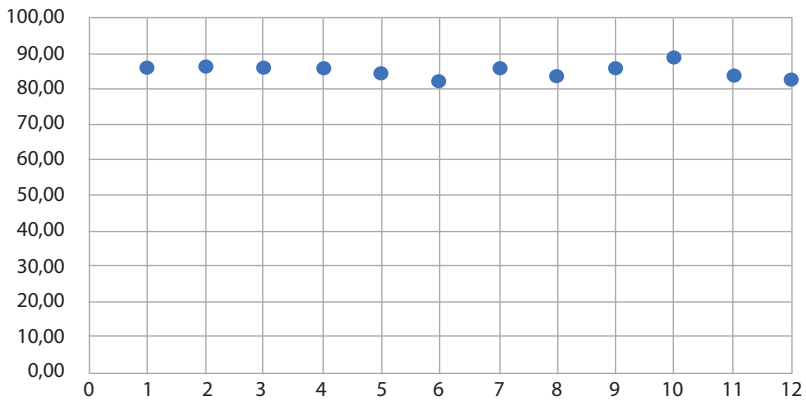
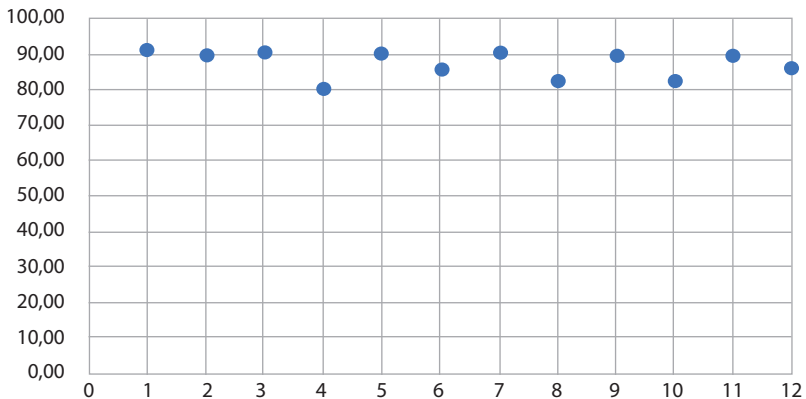


Figura 8

Porcentaje de remoción de SS luego del tratamiento en el humedal



El uso de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas representa una alternativa viable debido a su capacidad para remover contaminantes de manera eficiente, como se ha demostrado en el presente estudio y en investigaciones anteriores (Solano *et al.*, 2004). Estudios previos han evidenciado que estos sistemas pueden eliminar eficazmente no solo materia orgánica y sólidos en suspensión, sino también nutrientes como nitrógeno y fósforo (Galanopoulos *et al.*, 2013; Acosta *et al.*, 2007), así como reducir la presencia de patógenos (Redder *et al.*, 2010; Quintero García, 2021), lo que los convierte en una opción adecuada para mejorar la calidad del agua antes de su descarga en fuentes hídricas.

En este estudio, se obtuvieron porcentajes de remoción elevados, entre 85 % y 89 % para DBO₅ y SS. En otras investigaciones se han registrado eficiencias aún mayores, con valores de hasta 86 % para DBO₅ y 90 % para SS (Solano *et al.*, 2004). Algunos estudios reportan eficiencias superiores, con 96 % de remoción de DBO₅ y 97 % de SS (Wu *et al.*, 2011), o 96,7 % para DBO₅ y 81 % para SS (Bedoya *et al.*, 2014).

Estas variaciones en la eficiencia de remoción dependen de diversos factores, como el tipo (Galanopoulos *et al.*, 2013) y el diseño del sistema (Quintero García, 2021), el tipo de vegetación utilizada (Rodríguez-Miranda *et al.*, 2010), el tiempo de retención hidráulico (Vera *et al.*, 2010), así como las condiciones climáticas de la zona, la topografía del terreno, entre otros aspectos.

Conclusiones

Este estudio demuestra la factibilidad de utilizar humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Estos sistemas representan una alternativa innovadora y sostenible para abordar el problema del saneamiento en contextos urbanos y periurbanos.

Su capacidad para remover contaminantes y su integración con el entorno natural los convierte en una opción viable frente a los sistemas de saneamiento convencionales.

En el caso del barrio Tres Puentes, en la parroquia Yanuncay de la ciudad de Cuenca, se evidencia que la combinación de este tipo de tratamiento con programas de educación ambiental puede contribuir significativamente a la mejora no solo de la calidad del agua y la reducción de la contaminación en fuentes hídricas, sino también a promover la sostenibilidad urbana, al aumentar la cobertura de saneamiento en la ciudad. Este modelo incluso podría replicarse en las parroquias rurales de Cuenca, que presentan menor acceso a estos servicios.

La implementación de humedales construidos no solo tendría un impacto ambiental positivo, sino que también fortalecería la conciencia ciudadana sobre la importancia del saneamiento ecológico. Además, estos sistemas podrían servir como espacios de aprendizaje y capacitación para la comunidad, especialmente para los niños, niñas y adolescentes de la Escuela Francisca Arízaga Toral, promoviendo la participación activa del estudiantado en la gestión del agua y la restauración ecológica. La educación ambiental desempeña un papel crucial en la consolidación de este tipo de proyectos. A través de talleres, campañas informativas y programas de sensibilización, se puede fomentar una cultura de cuidado y uso responsable del agua, asegurando el éxito y la permanencia de los humedales construidos como una solución efectiva y sostenible para el tratamiento de aguas residuales.

Asimismo, la integración de estos humedales en la planificación urbana podría contribuir a la creación de corredores ecológicos que conecten distintos espacios verdes de la ciudad, favoreciendo la biodiversidad y proporcionando hábitats para diversas especies de flora y fauna. Esto, a su vez, puede generar beneficios recreativos y paisajísticos, incrementando el bienestar de la población y promoviendo un entorno urbano más saludable.

Los humedales construidos tienen costos de mantenimiento relativamente bajos en comparación con otras infraestructuras de saneamiento, lo que facilita su adopción en comunidades de bajos recursos. Su implementación puede complementarse con incentivos gubernamentales y programas de financiamiento.

Son múltiples los beneficios ambientales y sociales que estos sistemas ofrecen: depuran el agua de manera eficiente, reducen la concentración de contaminantes, protegen los ecosistemas acuáticos, promueven la creación de espacios verdes que mejoran la calidad de vida de las comunidades y la calidad ambiental de las ciudades. Todo ello los convierte en una solución prometedora para avanzar en la sostenibilidad urbana.

Por tanto, es fundamental que gobiernos, instituciones y sociedad civil impulsen su adopción y desarrollo como una herramienta clave para la gestión del agua y el desarrollo urbano y social.

Referencias bibliográficas

- Álvarez-Tinoco, I. J., y Preciado-Beltrán, J. (2019). Revisión de estrategias por enfoques en torno a la gestión del agua a nivel global y latinoamericano. *Revista Nodo*, 15(29), 20-37. <https://doi.org/10.54104/nodo.v15n29.658/>
- Bedoya, J., Ardila, A., y Calle, J. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la institución universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. *Rev. Int. Contam. Amb*, 30(3), 275-283. <http://bit.ly/3TNQLnN/>
- BIOINGEPRO. (2023). *Qué es un wetland o humedal artificial*. <http://bit.ly/4ntiBDA/>
- Dávila, M., y López, E. (2020). *Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales construidos de flujo subsuperficial vertical utilizando diferentes plantas emergentes*. Universidad del Azuay. <http://bit.ly/4keSopu/>
- Environmental Protection Agency EPA. (2012). *Design Manual Constructed Wetlands y Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment*. USA BiblioGov. <http://bit.ly/45OFFpX/>
- Galanopoulos, C., Sazakli, E., Leotsinidis, M., y Lyberatos, G. (2013). A pilot-scale study for modeling a free water surface constructed wetlands wastewater treatment system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(4), 642-651. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.09.006/>
- González, A., Palacios, I., y Ábalos, A. (2020). Impacto ambiental del vertido de residuales en la cuenca hidrográfica Guaos-Gascón de Santiago de Cuba. *Revista Cubana de Química*, 32(1), 154-171. <http://bit.ly/4epM3WW/>
- Kadlec, R., y Wallace, S. (2008). *Treatment Wetlands* (2.^a ed.). CRC Press. <http://bit.ly/3G6r0w2/>

- Lara Borrero, J. (1988). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. Universidad Politécnica de Cataluña. <http://bit.ly/4nxzMnC/>
- Lipps, W., Braun, E., y Baxter, T. (2022). *Standard Methods for the Examination of Water y Wastewater* (24.ª ed.). American Water Works Association.
- Marín Acosta, C., Solís Silván, R., López Ocaña, G., Bautista Margulis, R. G., y Romellón Cerino, M. J. (2016). Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales tropicales en Tabasco, México / Treatment of water waste by wetlands artificial tropical in Tabasco. *CIBA Revista Iberoamericana De Las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 5(10), 1-20. <https://bit.ly/3J0UBrJ>
- Quintero García, K. L. (2021). Implementación de humedales artificiales de flujo subsuperficial para la remoción de nitrógeno y materia orgánica, acoplados a reactores con microalgas. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2021*, 1-13. <https://doi.org/10.26507/ponencia.1613/>
- Redder, A., Dürr, M., Daeschlein, G., Baeder-Bederski, O., Koch, C., Müller, R., Exner, M., y Borneff-Lipp, M. (2010). Constructed wetlands – Are they safe in reducing protozoan parasites? *International Journal of Hygiene y Environmental Health*, 213(1), 72-77. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2009.12.001/>
- Rodríguez-Miranda, J. P., Gómez, E., Garavito, L., y López, F. (2010). *Estudio de comparación del tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales*. <http://bit.ly/3Glxgfv/>
- Rojas, C., Sepúlveda-Zúñiga, E., Barbosa, O., Rojas, O., y Martínez, C. (2015). Patrones de urbanización en la biodiversidad de humedales urbanos en Concepción metropolitana. *Revista de Geografía Norte Grande*, 61, 181-204. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022015000200010/>
- Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., y Ortiz-Hernández, M. L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Rev. Int. Contam. Amb*, 25(3), 157-167. <http://bit.ly/4nqur15/>
- Solano, M. L., Soriano, P., y Ciria, M. P. (2004). Constructed Wetlands as a Sustainable Solution for Wastewater Treatment in Small Villages. *Biosystems Engineering*, 87(1), 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.10.005/>
- TULSMA. (2003). *Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente*. <http://bit.ly/4lhofqT/>
- Vera, A., Andrade, C., Flores, E., Núñez, M., Cárdenas, C., y Morales, E. (2010). Removal of nutrients y organic matter in a constructed wetland, in

- function of the development of the macrophyte *Typha dominguensis* Pers. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 33(2). <http://bit.ly/3Geb7Uj/>
- World Bank Group. (2017). *Reducing Inequalities in Water Supply, Sanitation, y Hygiene in the Era of the Sustainable Development Goals*. World Bank, Washington, DC. <https://doi.org/10.1596/27831/>
- Wu, S., Austin, D., Liu, L., y Dong, R. (2011). Performance of integrated household constructed wetland for domestic wastewater treatment in rural areas. *Ecological Engineering*, 37(6), 948-954. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.02.002/>