



# PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUALES DOMÉSTICOS MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES EN COMUNIDADES RURALES

## PROPOSAL FOR THE TREATMENT OF DOMESTIC WASTE USING ARTIFICIAL WETLANDS IN RURAL COMMUNITIES

 MAGGIE BENÍTEZ GARCÍA<sup>1\*</sup>,  PEDRO PÉREZ ÁLVAREZ<sup>2</sup>,  YAINE LEBLANC GARCÍA<sup>3</sup>

Ing. Hidráulica, Especialista en proyectos de ingeniería. Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de la Habana (EIPHH). La Habana, Cuba. E-mail: [maggiebenitezgarcia@gmail.com](mailto:maggiebenitezgarcia@gmail.com)

Doctor en Ciencias Biológicas. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC). La Habana, Cuba. E-mail: [ppalvarez0569@gmail.com](mailto:ppalvarez0569@gmail.com);

Ing. Hidráulica, Especialista en proyectos de ingeniería. Empresa de Construcciones Metálicas y Eléctricas (COMELEC). La Habana, Cuba. E-mail: [leblancyaine53@gmail.com](mailto:leblancyaine53@gmail.com);

\* [maggiebenitezgarcia@gmail.com](mailto:maggiebenitezgarcia@gmail.com)

### Palabras claves: Resumen

residuales líquidos  
humedales artificiales  
reúso del agua

En Cuba, las pequeñas comunidades rurales que cuentan con sistemas de recolección, tratamiento y disposición de aguas residuales domésticas son relativamente pocas. La contaminación crónica de los suelos y aguas subterráneas requiere la búsqueda de alternativas a los métodos tradicionales de disposición de residuales líquidos. Los humedales artificiales son una alternativa válida para comunidades rurales apartadas que carecen de infraestructura y recursos económicos. Con el objetivo de lograr un sistema de tratamiento adecuado, se presenta una propuesta técnica de un sistema híbrido de humedales artificiales, combinando dos tipos de humedales de flujo subsuperficial: humedal vertical seguido de un horizontal, tomando como caso de estudio la comunidad rural de Dagame Nuevo, provincia de Artemisa. Este sistema combina los bajos costos de construcción y mantenimiento con una buena eficiencia de remoción de contaminantes. Las plantas pueden reutilizarse en época de cosecha y el efluente puede destinarse al fertirriego o recircularse para determinados usos. Esta combinación tiene como ventaja la obtención de un efluente que cumple con los parámetros normados en el país, y permite su reutilización en la comunidad, implementando así una economía circular basada en un sistema de gestión ambiental que promueve el reúso del agua.

### Keywords: Abstract

liquid waste  
artificial wetlands  
water reuse

In Cuba, the small rural communities that have domestic wastewater collection, treatment and disposal systems are relatively few. The chronic contamination of soils and groundwater requires the search for alternatives to the traditional methods of liquid waste disposal. Constructed wetlands are a valid alternative for remote rural communities that lack infrastructure and economic resources. In order to achieve an adequate treatment system, a technical proposal for a hybrid system of constructed wetlands is presented, combining two types of subsurface flow wetlands: vertical wetland followed by a horizontal one, taking the rural community of Dagame Nuevo, Artemisa province as a case study. This system combines low construction and maintenance costs with good pollutant removal efficiency. Plants can be reused at harvest time and the effluent can be used for ferti-irrigation or recirculated for certain uses. This combination has the advantage of obtaining an effluent that complies with the parameters regulated in the country, and allows its reuse in the community, thus implementing a circular economy based on an environmental management system that promotes the reuse of water.

Recibido: 29 de junio de 2024

Aceptado: 13 de julio de 2024

**Conflicto de intereses:** Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

**Declaración de contribución de los autores:** Conceptualización, metodología, análisis de datos, investigación, escritura,

revisión y edición: Maggie Benítez García. Conceptualización, revisión y edición: Pedro Pérez Álvarez. Metodología,

revisión: Yaine Leblanc García.

Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



## Introducción

En la actualidad el mundo enfrenta un dilema ambiental debido al rápido crecimiento de la población y la urbanización, ejerciendo presión sobre los recursos naturales (Valverde, 2021). Esto demanda apreciar el valor de los ecosistemas, sus funciones y servicios de agua, energía, producción de alimentos, salud y bienestar. Asumiendo el desafío del cambio climático, cuyos impactos ponen en peligro el desarrollo institucional, económico, social y ambiental de los países en desarrollo, se hace necesario controlar la creciente actividad del hombre, la cual está teniendo un impacto adverso sobre sí mismo y sobre el medio ambiente. Los efectos son, con frecuencia, irreversibles y se extienden más allá de las fronteras nacionales provocando daños globales. La contaminación del agua puede tener consecuencias graves, como la destrucción de la biodiversidad, la contaminación de la cadena alimentaria, la escasez de agua potable, enfermedades y mortalidad infantil (Astaroga, 2023).

En Europa, el 71 % de las aguas residuales industriales y municipales reciben tratamiento, en marcado contraste con el escaso 20 % en los países latinoamericanos. A nivel mundial, existe un creciente enfoque en tecnologías de tratamiento de aguas residuales domésticas rentables, de bajo mantenimiento y energéticamente eficientes. Estos métodos son particularmente valiosos en comunidades que carecen de servicio de alcantarillado, beneficiando tanto al medio ambiente como a la calidad del agua (Matovelle et al., 2024). En estos sistemas de tratamiento, la vegetación hidrófita emergente es la encargada de remover contaminantes, junto con el material de soporte: sustrato y zooglea, esta última que eventualmente se va formando con la zona de la rizosfera, y que contribuyen a la remoción mencionada (García et al., 2023).

Las macrófitas han mostrado ser especies eficientes para la remediación de aguas con contenidos de sustancias nocivas como arsénico, zinc, cadmio, cobre, plomo, cromo, y mercurio, la importancia de este tipo de plantas radica en la capacidad de ser utilizados en núcleos rurales por el bajo consumo de energía y la fácil operación de los sistemas de tratamiento (Vasco et al., 2023). La aplicación de estos sistemas para el tratamiento de aguas residuales ha ido aumentando de manera que se pueden emplear diferentes tipos de especies vegetales, de las cuales producen desechos que pueden ser aprovechados de diferentes maneras (López, 2023). En los humedales se han evaluado plantas ornamentales tratando aguas residuales domésticas logrando la remoción de 84 % a 99 % la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), fósforo, nitrógeno y coliformes totales. Del mismo modo, se ha estudiado el diseño logrando la remoción de 50 % hasta 96 % en nitrógeno y fósforo y variando el tamaño del

sustrato (medio sólido que protege y da soporte a la planta para el desarrollo de la raíz), obteniendo eficiencias de remoción de DBO, nitrógeno y DQO que oscilan entre el 41 % a 81 % (Romellón et al., 2023).

Estudios muestran que el carrizo presenta valores de remoción en los siguientes parámetros: alcalinidad, conductividad, sólidos totales, sólidos suspendidos y sólidos disueltos; mientras que el papiro presenta mayor remoción en los parámetros de DBO5, DQO, nitrógeno amoniacal, fósforo, coliformes totales y fecales. En el caso del nitrato, existe un mayor incremento en su concentración a la salida del humedal con papiro (Casco, 2023). En cuanto a las investigaciones que sustentan lo anterior, se puede referir un estudio enfocado en sistemas de humedales artificiales (HA) en serie que evaluó la calidad del agua tratada en un sistema compuesto por tres HA de flujo subsuperficial (HAFS), los cuales emplearon plantas como el junco (*Scirpus americanus*), la enea (*Typha domingensis*) y el lirio acuático (*Eichhornia crassipes*). Este sistema se estabilizó durante 44 días, con un tiempo de retención de 15 días para cada HAFS. Los resultados revelaron una disminución en parámetros como DQO (71 %), calcio (91 %), cloruro (77 %), nitrito (82 %), amonio (99.9 %), y fosfato (77 %). Sin embargo, el ion nitrato solo mostró una disminución del 36 %, y la conductividad eléctrica aumentó un 93 % (López et al., 2023). Un estudio de la implementación de tres humedales artificiales tipo batch, plantados con la especie *Chrysopogon zizanioides* (fitorremediador), para evaluar el post-tratamiento del agua residual doméstica de un pozo séptico en una vivienda rural en el municipio de Floridablanca (Colombia) muestran una remoción de DBO5 (Demanda Biológica de Oxígeno) de 75.93 %, con un DQO (Demanda Química de Oxígeno) de 58.76 % y nitrógeno de 46.10 % (Correa et al., 2023).

El abastecimiento y el saneamiento básico son elementos fundamentales para garantizar la calidad de vida de cualquier sociedad. Actualmente existen sistemas de saneamiento inadecuados e inseguros en muchas partes del país, especialmente en zonas rurales, y teniendo en cuenta los retos técnicos y los costos de los sistemas de saneamiento, se ha considerado el uso de sistemas descentralizados, como las soluciones más adecuadas para las regiones rurales, dado que son diseñados para operar cerca de los hogares, a pequeña escala y no requieren grandes inversiones; y en ciertas ocasiones, se considera la posibilidad de reutilizar el efluente (Enriquez & Pérez, 2017). El uso de humedales para depurar agua se ha incrementado y, hoy por hoy, son una opción de tratamiento de aguas residuales reconocida y recomendada. Las técnicas aplicadas en humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales se basan en los siguientes principios: aislamiento térmico, operación de flujo de marea, paso de alimentación, recirculación de efluentes, suministro de

fuentes de carbono externas, cosecha de biomasa, adición de lombrices de tierra, torres híbridas, aireación artificial, corredor de flujo circular, flujo subterráneo desconcertado, celda de combustible microbiana acoplados, electrólisis integrada y reactor biológico combinado (Nava *et al.*, 2023). Se ha demostrado que son efectivos en la reducción de la materia orgánica, para transformar y asimilar nutrientes y retienen o eliminan sustancias tóxicas que de otra manera serían vertidas sin tratamiento alguno al medio ambiente, transformándose en focos contaminantes (Arias & Brix, 2003).

El tratamiento por medio de humedales artificiales se utiliza como una tecnología verde, que surge de la necesidad de replicar los beneficios ecosistémicos de los humedales naturales, para tratar diversos afluentes de aguas residuales. De acuerdo a su clasificación según su flujo, existen los humedales artificiales superficiales, subsuperficiales verticales (HAFSSV) u horizontales (HAFSSH) y sistemas híbridos a partir de sus combinaciones. Estos sistemas de tratamiento de agua se están implantando en numerosos países, y sin duda, parece una magnífica opción para municipios y pequeñas poblaciones con un número de habitantes equivalentes inferior a 2 000 (Espitia, 2022).

El tratamiento de las aguas residuales en el país constituye una problemática que afecta directamente la vida del hombre y requiere la búsqueda de soluciones eficaces y sostenibles. La inadecuada gestión de las aguas residuales de origen doméstico en la comunidad de Dagame Nuevo genera un impacto negativo sobre el medio ambiente y la salud de sus habitantes, incidiendo negativamente en la calidad de las aguas subterráneas de la cuenca hidrológica HS3 (Costera Sur Artemisa - Quivicán), donde está ubicada, debido a que no se dispone de un sistema de tratamiento de agua residual. El objetivo del presente trabajo reside en la formulación de una propuesta de diseño de un humedal

construido para el tratamiento de los residuales líquidos en la comunidad, demostrando ser una alternativa viable para zonas aisladas con características similares, que carecen de infraestructura y recursos económicos.

## Materiales y métodos

La comunidad de Dagame Nuevo se localiza en el municipio de Güira de Melena, provincia de Artemisa, entre las coordenadas Lambert: Este: 328550 y 329150; Norte: 327450 y 327850 de las hojas cartográficas 3684-II-a. Limita al norte con los poblados de Mariel y Guanajay; al este con Alquizar y Güira de Melena; al sur con el golfo de Batabanó y al oeste con el poblado de Artemisa. En la siguiente figura se observa una vista satelital del poblado, así como el área prevista para el sistema de tratamiento:

Dagame Nuevo, es una comunidad rural, aislada, con una situación precaria con respecto al tratamiento de sus residuales líquidos, debido a la necesidad de encontrar una solución factible, con la menor brevedad posible, la Empresa de Proyectos Hidráulicos de la Habana (EIPHH), con la colaboración de otras entidades de diseño, ha desarrollado un proyecto para el saneamiento de la comunidad. En este se contemplaba la rehabilitación total del sistema de alcantarillado, la construcción de cuatro tanques sépticos como órganos de tratamiento, aproximadamente de 17 m de largo, 5 de ancho y una profundidad de 2. A partir de este precedente, se propone la incorporación de un sistema híbrido de humedales artificiales, combinando dos tipos de humedales de flujo subsuperficial: humedal vertical seguido de un horizontal, como órgano de tratamiento posterior, para lograr una mayor remoción de contaminantes, y evaluar la posibilidad de la reutilización de efluente.



**Figura 1.** Vista satelital poblado de Dagame Nuevo (Tomado y modificado de Google Earth Pro, 2023)

**Figure 1.** Satellite view of Dagame Nuevo town (Taken and modified from Google Earth Pro, 2023)

## Población y caudal de diseño

Según los datos obtenidos en el último censo de población y vivienda en el año 2015 había un total de 1551 habitantes. En este caso, conforme a la Norma Cubana NC (ONN, 2013). Determinación de la Demanda de Agua Potable en Poblaciones Urbanas, a una población de diseño menor de 5000 habitantes, corresponde una dotación de 155 L / hab.día.

El caudal de las aguas residuales de la comunidad Dagame Nuevo, está formado por aguas de origen doméstico y aguas pluviales que pueden drenar al sistema, arrastrando parte del fluido utilizado en la agricultura. Para diseñar de manera correcta un sistema de tratamiento de aguas es importante determinar los caudales de agua residual que van a ingresar al sistema. Para conocer este caudal, lo ideal es realizar en la entrada y salida, aforos en el sistema de alcantarillado, en este caso, no es posible, debido a que se encuentra en proceso de rehabilitación. En estos casos se puede estimar partiendo de otras fuentes de información, como puede ser la dotación de agua potable suministrada a una determinada población, mediante la fórmula:

$$Q_{diseño} = \frac{Pob * Dot}{86400} = \frac{1551 \text{ hab} * 155 \text{ L/habxdía}}{86400 \text{ seg}} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$Q_{diseño} = 2.78 \text{ L/s}$$

El aporte al sistema de alcantarillado es el 80 %, por lo tanto, el caudal de diseño disminuye a 2.22 L/s, que expresados en otra unidad son 192.15 m<sup>3</sup>/d.

## Caracterización del aporte residual

Para la realización de esta etapa de la investigación se estima la carga contaminante en el afluente a partir de la metodología descrita por el Centro de Información, Gestión y Educación Ambiental (CIGEA, 2000), donde se reflejan las contribuciones per cápita utilizadas en el ámbito nacional para la determinación de la carga contaminante, generada por el sector doméstico. Los valores recomendados se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 1.** Carga per cápita recomendada

**Table 1.** Recommended per capita load

Parámetro	Valor recomendado (g/hab/día)
DBO	42
DQO	100
Nt	2
Pt	0.8

La carga másica del afluente se determina a partir de la fórmula:

$$Mi = Población * Parámetro \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde el parámetro se encuentra en (g/hab/d).

Posteriormente, se estima la concentración del afluente mediante la fórmula:

$$Ci = \frac{Mi}{Qi} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde Ci es la concentración del afluente en (mg/DBO<sub>5</sub>/L), Mi es la carga másica del afluente en (gDBO<sub>5</sub>/d) y Qi es el caudal de diseño en (m<sup>3</sup>/d).

A partir de lo anterior, las concentraciones estimadas en el afluente doméstico de Dagame Nuevo, son las siguientes:

**Tabla 2.** Concentraciones estimadas en el efluente

**Table 2.** Estimated concentrations in the effluent

Parámetro	Valor estimado (mg/L)
DBO	242.15
DQO	538.12
Nt	35
Pt	10

Para la estimación de estos parámetros también se tiene en cuenta que el sistema de tratamiento primario de Tanque séptico antes del humedal, es capaz de remover en óptimo funcionamiento hasta el 30 % de carga contaminante, a partir de estos valores se procede al diseño del humedal.

## Criterios de diseño

Los cálculos para el diseño y dimensionamiento de los humedales subsuperficiales se basaron en metodologías europeas de diferentes autores (Kadlec & Wallace, 2008). Los sistemas de humedales artificiales pueden ser considerados como reactores biológicos, y su rendimiento puede ser estimado mediante una cinética de primer orden de flujo a pistón para la remoción de DBO y nitrógeno. En un humedal este concepto es necesario para asegurar que las condiciones de flujo subsuperficial se mantienen en circunstancias normales durante el periodo de funcionamiento del sistema. Esto solo es posible a través de un cuidadoso diseño hidráulico y unos métodos constructivos apropiados. El flujo a través del humedal debe superar la resistencia por fricción del mismo sistema. Esta resistencia es impuesta por la vegetación, la capa de sedimentos, y el medio, las raíces de las plantas y los sólidos acumulados.

## Resultados y discusión

En el siguiente esquema se muestra un diagrama de flujo con la integración del sistema híbrido, basados en la utilización de los tanques sépticos como tratamiento primario del residual doméstico en la comunidad rural de Dagame Nuevo.

El sistema de tratamiento proyectado para los residuales de Dagame Nuevo consta de varios procesos. Se realiza un

pretratamiento a partir de la ubicación de un canal de desbaste, con una rejilla mecánica para la separación de los sólidos. Opcionalmente, se puede tener un desengrasador al final del pretratamiento, en caso de que el agua tenga un alto contenido de aceites y grasas, en el caso del sistema que se encuentra en ejecución no lo tiene, por lo tanto, esta última operación se realiza en el propio tratamiento primario (tanque séptico). Este permite la sedimentación de la materia en suspensión y su acumulación en el fondo en forma de lodos que se van descomponiendo por vía anaeróbica.

Debido a que los humedales de flujo vertical requieren que la alimentación se efectúe de forma intermitente, se decide la construcción de sifones autocebantes a la salida de los tanques sépticos, en este caso la topografía lo permite debido a que las cotas descienden, y existe una diferencia considerable entre la salida del tanque y el humedal. Es muy importante que durante la fase de puesta en marcha se compruebe que los sifones funcionen.

La combinación en serie de humedales de flujo subsuperficial verticales y horizontales para formar un sistema híbrido, como la que se propone utilizar, permite nitrificar en la primera etapa y desnitrificar en la segunda. En los sistemas híbridos es posible eliminar más de un 90 % de la materia en suspensión, de la DBO y del nitrógeno (García & Corzo, 2008). En este caso la aplicación de este sistema, aunque sea más robusto, permite obtener un efluente de mejor calidad.

A pesar de que hay una cierta tendencia a diseñar los sistemas de humedales construidos de pequeños municipios

sin equipos para la medición de caudal, no se considera justificada su ausencia. La falta de estos equipos produce una gran incertidumbre sobre las cargas hidráulicas y contaminantes reales, lo que no permite diagnosticar el estado de la instalación ni su funcionamiento. Se propone la construcción de una obra hidrométrica a partir de un vertedor trapezoidal, también conocido como vertedor Cipolletti, debido a las facilidades operativas de su uso. El mismo se puede ubicar a la salida de los humedales artificiales.

### Diseño del humedal artificial subsuperficial de flujo vertical

Los sistemas de flujo vertical se diseñan con flujo intermitente, lo que les confiere propiedades muy diferentes respecto a los sistemas horizontales. El cambio de frecuencia en la alimentación mejora mucho la transferencia de oxígeno y por tanto el medio granular se encuentra en condiciones más oxidadas si se compara con lo que se observaría en un sistema de tipo horizontal (Arias & Brix, 2003). Esto permite que los sistemas verticales puedan operar con cargas superiores a las de los horizontales (entre 20 y 40 g DBO/m<sup>2</sup>.día) y por tanto ocupan menor espacio para tratar un mismo caudal, es por esta razón que se decide utilizarlo primero en el sistema híbrido propuesto.

El dimensionamiento de los sistemas verticales se realiza mediante la aplicación de reglas prácticas basadas en superficies unitarias (superficie requerida por habitante equivalente). Como norma general los sistemas se pueden dimensionar tomando 2.5 m<sup>2</sup>/hab-eq (siendo recomendable

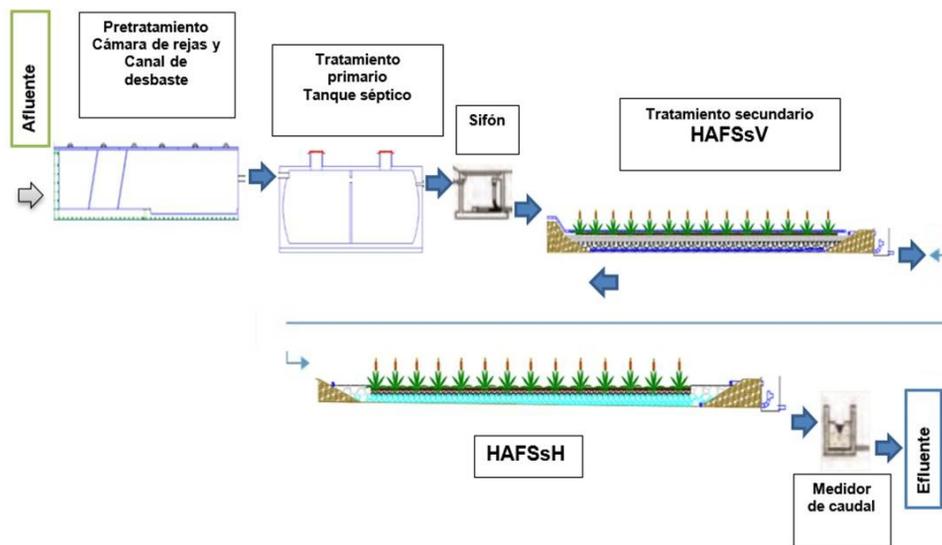


Figura 2. Sistema de tratamiento propuesto

Figure 2. Proposed treatment system

considerar en el caso de pequeños municipios 1 hab-eq = 45 g/DBO. día). Se requiere de celdas con la misma superficie para facilitar su rotación y lograr así alternar fases de llenado, reacción y vaciado (aireación). En el diseño proyectado es necesaria la construcción de 4 celdas iguales de 10 m de ancho x 20 m de largo, con un área de 200 m<sup>2</sup> cada una. La dosificación de agua residual se realiza en 4 pulsos diarios cada 6 horas. Debido a las frecuentes precipitaciones de la zona, se decide dejar un bordo libre de 1 m en el humedal, previendo el reboso del mismo durante eventos extremos de lluvia. La red de aireación - drenaje está conectada con la atmósfera a través de tubos rectos que forman respiraderos, cubiertos con una especie de campana para su protección. Es el camino que utiliza el aire contenido en el lecho y que es expulsado durante una fase de vaciado. Es también gracias a ella que se realizan las transferencias por difusión desde el fondo del filtro. Por eso se denomina red de aireación-drenaje, ya que cumple ambas funciones (Lombard & Molle, 2019).

Se utiliza una relación largo/ ancho de 3:1, con una pendiente de fondo del 2 %. La especie de planta escogida es la Typha, que es acuática emergente, con sistema radicular arraigado en el fondo del humedal, y estructura vegetativa que emerge por encima de la lámina de agua, permaneciendo erguidas y desarrollando un gran tamaño que alcanzan más de 3 m de altura. Estas plantas, con un hábitat intermedio entre el medio terrestre y el acuático, son muy vigorosas y productivas, ya que aprovechan las ventajas de los dos medios, no sufren limitaciones de agua y tienen un mayor acceso a la luz que las plantas sumergidas. Por otra parte, están adaptadas para tolerar las condiciones de falta de oxígeno que se producen en un suelo encharcado, ya que poseen canales o zonas de aireación que facilitan el paso del oxígeno de las hojas a las raíces.

### **Diseño del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal**

Su dimensionamiento se realiza a partir de las concentraciones de contaminantes derivadas de la remoción realizada en el humedal vertical. En el HAFSSH el lecho de grava opera con flujo saturado y plantado con plantas macrófitas emergentes, en este caso también se utiliza la Typha. El agua entra al sistema de tratamiento por uno de sus extremos, fluye a través del medio de grava de mayor granulometría, sin estar expuesta a la atmósfera, donde ocurre el primer filtrado, y continúa su recorrido por la capa intermedia de zeolita, donde ocurren los procesos de remoción. Posteriormente es colectado en el lado opuesto del lecho mediante una tubería perforada para su descarga final. Una tubería vertical instalada en el registro de descarga, e independiente del lecho del humedal, controla el nivel de agua dentro del medio.

La ruta microbiológica predominante de eliminación en humedales de flujo horizontal es anaerobia. La superficie de tratamiento es diseñada para operar según el criterio de que, la carga orgánica superficial sea menor de 6 g DBO/m<sup>2</sup>·d (García & Corzo, 2008). El diseño consta de 2 unidades de humedal de 16 m de ancho x 48 m de largo, donde se realiza la última etapa del tratamiento. La relación largo/ancho es de 3:1, con una pendiente del 2 %. De igual forma, se decide dejar un bordo libre de 1 m en el humedal, previendo el reboso del mismo durante eventos extremos de lluvia.

Es necesaria realizar la impermeabilización de la celda con el objetivo asegurar la contención de las aguas en el interior evitando así infiltraciones que puedan contaminar las aguas subterráneas. La impermeabilización se realiza en los taludes de la zona de entrada, de salida de los laterales y del fondo de la celda. Se puede recomendar el uso de una capa de arcilla, material local que permite reducir las importaciones.

### **Análisis de los beneficios de la implantación del sistema**

La implantación del sistema híbrido de humedales artificiales, combinando dos tipos de humedales de flujo subsuperficial: humedal vertical seguido de un horizontal, se diseña para potenciar la eliminación de los contaminantes. Ambos humedales son eficientes en la remoción de materia orgánica. En el caso del nitrógeno, para potenciar la eliminación de este contaminante, el agua residual en primera instancia pasa por el humedal de flujo vertical, donde ocurre de forma óptima el proceso de nitrificación y posteriormente por el humedal horizontal subsuperficial donde se produce la desnitrificación. En el caso del fósforo se plantea la utilización en el humedal horizontal como material filtrante principal de zeolita. En el caso de su aplicación en la depuración de agua indican eficiencias de eliminación del fósforo superiores al 70 %, aunque se espera que con el paso del tiempo esta eficiencia disminuya (Araya, 2012). Para evaluar las eficiencias de remoción de los contaminantes obtenidas en los humedales artificiales se utilizan los criterios, donde se expresan los porcentajes de remoción en cada humedal, basados en el funcionamiento real de cada tipo de sistema artificial (Rabat, 2016).

A continuación se muestra en forma de tabla los resultados:

Se decide optar para realizar las comparaciones con lo estipulado en la NC (ONN, 2012), a partir de la utilización de dos cuerpos receptores: clase A y clase C. El cuerpo receptor clase A incluye las zonas hidrogeológicas que se utilizan para la captación de aguas destinadas al abasto público, como es el caso. El cumplimiento con este vertimiento plantea la posibilidad de descargar el efluente en la zona, a partir de pozos de infiltración, opción no recomendada, siempre y cuando existan otras posibilidades.

**Tabla 3.** Concentraciones estimadas a partir del uso de los humedales**Table 3.** Estimated concentrations from the use of wetlands

Parámetro	C <sub>e</sub> (mg/L)	Remoción en el HAFSsV (%)	C <sub>e</sub> HAFSsV (mg/L)	Remoción en el HAFSsH (%)	C <sub>e</sub> HAFSsH (mg/L)
DQO	242.15	90	24.21	85	3.63
DBO <sub>5</sub>	538.12	80	107.62	80	21.52
Nitrógeno total	20	65	7	20	5.6
Fósforo total	10	30	8	20	5.6
Sólidos suspendidos totales	220	90	22	90	2.2

C<sub>e</sub> : Concentración del efluente en (mg/DBO<sub>5</sub>/L).

**Tabla 4.** Comparación de las concentraciones obtenidas con las normadas**Table 4.** Comparison of the concentrations obtained with the normed ones

Parámetros	C <sub>e</sub> (mg/L)	Límites máximos permisibles		Cumplimiento NC27
		NC27:2012 (Clase C)	NC27:2012 (Clase A)	
DQO	3.63	100	40	ok
DBO <sub>5</sub>	21.52	250	90	ok
Nitrógeno total	5.6	15	5	ok
Fósforo total	5.6	10	5	ok
Sólidos suspendidos totales	2.2	5	1	ok

El cuerpo receptor clase C, es donde único hace mención la norma con respecto a la utilización del efluente para el riego, solución que se propone en este caso.

A continuación se muestra en forma de tabla los análisis de estas comparaciones:

Como se observa la mayoría de los parámetros son acertados, sin embargo los parámetros en gris con respecto al cumplimiento de la norma para el vertimiento en cuerpos clase A, no son totalmente acertados, al ser un cuerpo receptor de máxima exigencia.

Otra de las ventajas de la aplicación del sistema es la necesidad como mínimo de dos operadores, encargados de garantizar el mantenimiento y correcto funcionamiento del humedal. Esta es una opción para crear puestos de trabajo dentro de la comunidad, además de propiciar el incremento de la biodiversidad en el lugar, permitir su inserción dentro de la urbanización, mejorar la paisajística local y facilitar sitios para la recreación. Etapas del proyecto pueden concebir no solo el sistema para tratar residuales líquidos, sino también una intervención de reanimación urbanística al prever dentro del área la construcción de un parque infantil y parque para el descanso, la relajación y el recreo de los habitantes de la comunidad.

En la comunidad de Dagame, en recorridos de campo al lugar se observó a los pobladores utilizar agua potable para regar campos recién sembrados de árboles maderables, propósito que ahora podría suplir el efluente del agua residual, sin poner en riesgo la salud humana. Los beneficios potenciales del riego con aguas residuales son

enormes, sin embargo, en este caso, hay que tener en cuenta la utilidad agronómica y sus efectos sobre el sistema suelo-planta.

Con respecto a los residuos generados en la siega periódica de la vegetación de los humedales pueden emplearse en procesos de compostaje de residuos. Los lodos extraídos de los tanques sépticos, después de un proceso de secado, pueden reutilizarse como abono y en materia de reutilización se puede estudiar la posibilidad de emplear digestores anaeróbicos para tratar los residuos ganaderos y agrícolas. La zeolita es utilizada en la agricultura para ayudar con la retención del agua en el suelo, y junto a fertilizantes orgánicos e inorgánicos, para lograr una liberación más lenta de los nutrientes. Estudios señalan a partir de pruebas piloto en laboratorios, que la zeolita puede ser reutilizada como fertilizante, después de haber sido empleada como medio de soporte en el humedal (Araya, 2012).

Estos conceptos integrados, que implican la convergencia de diversas áreas como, los riesgos para la salud, la regulación y la percepción pública, representan un desafío significativo para la reutilización del agua.

#### **Análisis de la factibilidad económica de la solución propuesta**

Debido a la falta de recursos económicos que presentan las zonas rurales en Cuba, las tecnologías no convencionales, en este caso los humedales artificiales, combinados con una tecnología primaria de tratamiento,

como tanques sépticos, práctica común en este tipo de asentamiento, son una alternativa viable para el tratamiento de sus aguas residuales; ya que los costes asociados con el consumo energético pueden ser nulos o muy reducidos, presentan un menor coste de implementación, explotación y mantenimiento en comparación a los sistemas de tratamiento convencional.

Los costos de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), ascienden en el país a más de un millón de pesos, sin embargo, a partir del presupuesto realizado en este trabajo, mediante la utilización del Software PRESWIN versión 9.1, estos costos ascienden a 561 368.76 pesos, el cual es inferior, además los materiales que se proponen en el trabajo para la creación de las capas de filtro (zeolita y grava), pueden encontrarse en el país, y no requieren proceso de importación.

Además, las PTAR requieren de mantenimientos excesivos, así como del uso constante de químicos, factores negativos que se evitan con el uso de una tecnología verde, como los humedales artificiales. Estos no generan ruidos, ni olores desagradables, con un adecuado diseño, su operación y mantenimiento es fácil, con la necesidad mínima de solo dos operadores, que requieren capacitaciones sencillas. En este caso, el sistema propuesto no requiere energía eléctrica, lo que disminuye su costo de operación, no requiere de aditivos químicos adicionales y el diseño que se propone soporta cambios en la carga hidráulica y orgánica, a partir de las variaciones de caudal. Remueven materia orgánica, así como nitrógeno, fósforo y microorganismos patógenos. En los humedales de flujo subsuperficial, es bajo el riesgo de desarrollo de moscas y mosquitos, lo que evita la propagación de enfermedades. El agua tratada, la cosecha de sus plantas, así como el material de sus filtros puede ser reutilizado, lo que implementa una economía circular, imitando procesos naturales de ciclos cerrados, incluso proporcionando oportunidades recreativas y educativas.

## Conclusiones

- Existe una problemática preocupante relacionada con saneamiento básico a nivel nacional en el país para las poblaciones rurales, la aplicación de las propuestas de este trabajo, constituyen un modelo sostenible, económico y ecológico para estas comunidades.
- Hay suficiente material bibliográfico que sustenta el empleo de humedales artificiales como una ecotecnología capaz de lograr remociones favorables, a la vez que material relacionado con diseño y mantenimiento.
- A partir de su diseño correcto, se demuestra su efectividad en cuanto a la remoción de los principales contaminantes presentes en las aguas residuales

domésticas: (DBO<sub>5</sub>, SST, Nitrógeno, Fósforo y Patógenos).

- Los humedales artificiales son una alternativa óptima para atender la problemática en zonas rurales cubanas debido a que su clima es cálido, lo que favorece la actividad microbiana y la ocupación de terreno inutilizado en estas zonas aisladas.
- Mediante su aplicación, se puede lograr reutilizar el efluente, la biomasa obtenida en las cosechas de las plantas y el material de los filtros, garantizando cero contaminaciones ambientales.
- Se debe continuar el estudio respecto a la aplicación los humedales artificiales para el tratamiento de agua en zonas rurales, así como la aplicación de técnicas para el tratamiento de los desechos animales en la comunidad.
- Aplicar las ecuaciones y parámetros obtenidos en el diseño, para la construcción de un humedal artificial a nivel de prototipo en el laboratorio, para demostrar su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas.
- Se debe repetir el estudio una vez culminadas las labores de rehabilitación en el lugar, a partir de datos reales de pruebas químicas del residual y de la medición de los aportes de caudal al sistema.
- Es necesario ampliar el conocimiento de los pobladores en estas zonas, acerca de la facilidad de los humedales artificiales y los peligros de un mal manejo de aguas residuales.
- Las entidades gubernamentales y centros de conocimiento deben apoyar este tipo de ecotecnologías en los territorios, mediante el apoyo financiero y técnico para su implementación.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado como parte de un programa de mejoras a partir de proyectos hidráulicos de saneamiento a comunidades rurales sin sistemas de alcantarillado, desarrollado en la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de la Habana (EIPHH), y por medio del financiamiento de la entidad estatal Empresa de Servicios Ingenieros de Artemisa (ESIHO), el cual se encuentra en fase constructiva, para su posterior puesta en marcha y evaluación de resultados.

## Bibliografía

Araya, M. G. (2012). Alternativas de tratamiento de aguas servidas para núcleos urbanos de baja densidad poblacional mediante sistemas híbridos de humedales artificiales. Tesis presentada para optar al título de

- bioingeniero, Universidad de Concepción facultad de Ciencias Biológicas.
- Arias, A. C., & Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 1(13), 9.
- Astaroga, A. (2023). Diseño de un humedal artificial para implementarlo en el tratamiento de aguas residuales urbanas y cubrir picos de caudal provocados por la población flotante en el pueblo de San Pedro de Atacama, Chile. Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia.
- Casco, G. E. (2023). Evaluación de la eficiencia de la especie *Phragmites australis* en el tratamiento de aguas dulces mediante humedales artificiales en el río Chibunga del cantón Riobamba. Magíster en Ingeniería Química Aplicada, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- CIGEA. (2000). Metodología para la estimación de cargas. La Habana, Cuba.
- Correa Torres, S. N., Reátiga, A., Duran, M. C., & Florville, T. R. (2023). Eficiencia de la aplicación de *Chrysopogon zizanioides* en un sistema de agua residual doméstica rural con pretratamiento de pozo séptico. *Información Tecnológica*, 35(5), 10.
- Enríquez, D. L., & Pérez, P. (2017). Propuesta de tratamiento de residuales líquidos mediante un humedal construido en el asentamiento de Micro I, de la Cuenca Chambas, Cuba. *Congreso Abes Fenasan*, 8.
- Espitia, F. C. (2022). *Aplicación de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en pequeños centros poblados*. Trabajo de grado presentado, en la modalidad de Monografía para optar al Título de Ingeniero Ambiental, Universidad de Córdoba, Montería, Córdoba.
- García Acevedo, R., García Rodríguez, E., & Pérez Amezcua, N. E. (2023). Remoción de contaminantes del agua en humedales artificiales de flujo subsuperficial, utilizando *Typha domingensis*, tezontle y grava triturada y su relación con la conductividad hidráulica. *Ciencia Nicolaita*(87), 13.
- García, J. S., & Corzo, H. A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos* (Vol. I). Catalunya.
- Kadlec, R., & Wallace, S. (2008). *Treatment Wetlands* (Vol. II). CRC Press.
- Lombard, R. L., & Molle, P. (2019). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en la zona tropical (Vol. I). Martinica: IRSTEA.
- López Ocaña, G., Estrada Pérez, N., Aguilar Pérez, G., Alonso Mendoza, E. C., & Torres Balcázar, C. A. (2023). Degradación de contaminantes en humedales artificiales en serie con especies macrófitas del trópico húmedo. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias (Ciba)*, 30.
- López, P. Y. (2023). Uso potencial de la especie vegetal *Eichhornia crassipes* del humedal artificial de la planta piloto Arturo Pazos. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 18(1), 12.
- Matovelle, C., Quinteros, M., & Ochoa García Aurelio, S. (2024). Performance of *Equisetum* spp and *Zantedeschia aethiops* on the evaluation of artificial wetlands as an alternative for wastewater treatment in rural areas of the Ecuadorian Andes. *Current Research in Environmental Sustainability*, 8.
- Nava Rojas, J., Lango Reynoso, F., Castañeda Chávez, M., & Reyes Velázquez, C. (2023). Remoción de Contaminantes en los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial: Una Revisión. *Terra Latinoamericana*, 12.
- ONN. (2012). NC 27. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado .Especificaciones. La Habana. Cuba.
- ONN. (2013). NC 973. Determinación de la demanda de agua potable en poblaciones urbanas. La Habana, Cuba.
- Rabat, J. B. (2016). *Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración*. Trabajo para optar al grado de Máster, Escuela Politécnica Superior de Alicante, Alicante.
- Romellón Cerino, M. J., Cocolletzi Vázquez, E., & López Ocaña, G. (2023). Tratamiento de aguas residuales domésticas de una institución educativa por un sistema de humedales artificiales en serie. *Universita Ciencia*(30), 16.
- Valverde, Q. A. (2021). Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante el uso de humedales artificiales mejorados con la especie *Cyperus papyrus* y *Phragmites australis*. Tesis para optar al título de ingeniera ambiental, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú.