

Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

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

Removal of water contaminants in artificial wetlands of subsurface flow, using *Typha domingensis*, tezontle and crushed gravel and their relationship with hydraulic conductivity

Roberto García-Acevedo,* Ezequiel García-Rodríguez y Norma Erika Pérez-Amezcu

Para citar este artículo: García-Acevedo Roberto, García-Rodríguez Ezequiel y Pérez-Amezcu Norma Erika, 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 no. 87, 108-120. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.660>



Historial del artículo:

Recibido: 25 de mayo de 2022

Aceptado: 25 de octubre de 2022

Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: roberto.garcia@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



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

Removal of water contaminants in artificial wetlands of subsurface flow, using *Typha domingensis*, tezontle and crushed gravel and their relationship with hydraulic conductivity

Roberto García-Acevedo,* Ezequiel García-Rodríguez y Norma Erika Pérez-Amezcu

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Morelia, Michoacán

Resumen

El tratamiento de aguas residuales es una problemática que conviene abordarse mediante humedales artificiales debido a sus bajos costos, particularmente en el caso de localidades de baja densidad poblacional. En esta investigación se utilizaron humedales artificiales de flujo subsuperficial, contruidos en terrenos del Centro de Información, Arte y Cultura de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, con material de soporte de tezontle y grava triturada, vegetados con *Typha domingensis*. Respecto a la NOM-001-SEMARNAT-1996, en cuanto a la temperatura, pH, DBO₅, SST y SSed presentes en el efluente, ambos humedales cumplen, por lo que la conductividad hidráulica no resulta determinante; sin embargo, la remoción es mayor con tezontle como material de soporte que con grava triturada.

Palabras clave: humedal artificial, tratamiento de agua residual, *Typha domingensis*, tezontle, grava triturada

Abstract

Wastewater treatment is a problem that should be addressed with artificial wetlands as they are a viable alternative because of their low costs, particularly in the case of low density populations. In this work, artificial subsurface flow wetlands were used. Those artificial wetlands were constructed at Information, Art and Culture Center of the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, with tezontle and crushed gravel as substrate, and vegetated with *Typha domingensis*. Regarding NOM-001-SEMARNAT-1996, in terms of temperature, pH, BOD₅, SST, and SSed present in the effluent, both wetlands comply, so hydraulic conductivity is not decisive; however, removal is greater with tezontle as a substrate than with crushed gravel.

Keywords: artificial wetlands, water treatment, *Typha domingensis*, tezontle, crused gravel

Introducción

En las últimas décadas, a nivel global, la creciente preocupación sobre el deterioro del medio ambiente ha llevado al estudio y desarrollo de nuevas alternativas para minimizar el impacto ambiental que causan las actividades humanas, siendo el agua uno de los recursos naturales más afectados. El crecimiento de la población y, por lo tanto, del consumo del vital líquido para diferentes usos, ha propiciado que se declare la veda en numerosas cuencas hidrográficas.

Cubrir adecuadamente los requerimientos de agua, constituye un reto cada vez mayor que hace necesario tratar las aguas residuales para reincorporarlas a los usos pertinentes. La construcción y operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, que requieren energía eléctrica y equipos electromecánicos costosos para su funcionamiento, se ve limitada por los recursos económicos disponibles (Lahera, 2010; Rojas, 2012), por lo tanto, una alternativa es la construcción de humedales artificiales.

La vida útil de los humedales artificiales depende del diseño, construcción y mantenimiento correspondiente; la disminución de la conductividad hidráulica en los medios de soporte determina la forma y el tiempo en que se debe realizar dicho mantenimiento.

La disminución de la conductividad hidráulica está asociada a fenómenos hidráulicos que derivan en la colmatación del interior del humedal, y que se debe a la acumulación de partículas finas en el material filtrante, por ejemplo, partículas que forman lodos debido a las elevadas concentraciones de sólidos en suspensión, así como aceites y grasas en las aguas a tratar, haciendo deficiente el funcionamiento de las etapas del tratamiento.

Objetivo: la finalidad del presente trabajo fue estudiar la evolución de la disminución de la conductividad hidráulica en humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS), realizando el estudio de dos diferentes medios de soporte y su afecto en la remoción de contaminantes del agua, utilizando la planta *Typha domingensis* en ambos casos; lo anterior con el propósito de realizar dos análisis comparativos: el primero cuando el medio de soporte está constituido por tezontle y el segundo cuando el medio de soporte está

constituido por grava triturada, con la fin de determinar cuál alternativa es mejor para implementar en este tipo de sistemas.

Pertinencia del uso de humedales artificiales

Una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales son los humedales artificiales, los cuales se utilizan ya sea de manera individual o combinada con otros procesos. De acuerdo con el Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento, en México existen 2 337 plantas en operación, de las cuales 211 (11.08% del total) corresponden a humedales artificiales, lo que indica la importancia del desarrollo de esta alternativa de tratamiento de aguas residuales, tanto en áreas rurales como en ciudades con caudales a tratar de hasta 120 litros por segundo (CONAGUA, 2015).

En el tratamiento de aguas residuales, los humedales artificiales son una alternativa viable debido a sus bajos costos de construcción y operación, lo que los convierte en una opción atractiva para aplicarla en localidades de baja densidad poblacional y donde exista disponibilidad suficiente de terreno, como suele ser el caso de las zonas rurales. 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; sin embargo, paulatinamente se van saturando y, por lo tanto, se va reduciendo su conductividad hidráulica, lo que representa una disminución en la eficiencia de remoción de contaminantes (Ferreyra, 2019).

Generalidades de los humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS)

En estos humedales el agua a tratar circula a través de un material granular (arena, gravilla, grava) de permeabilidad suficiente, confinado en un recinto impermeabilizado y que sirve de soporte para el enraizamiento de la vegetación. “Los HAFSS son instalaciones generalmente de menor tamaño comparados con los humedales artificiales de flujo superficial (HAFS), y

que en la mayoría de los casos se emplean para el tratamiento de las aguas residuales generadas en núcleos de poblaciones de menos de 2 000 habitantes” (Salas *et al.*, 2006, en Delgadillo *et al.*, 2010).

Ventajas de los HAFSs:

- Menor área de terreno en comparación a los humedales de flujo superficial (HAFS).
- No hay problemas de aparición de olores.
- No hay presencia de mosquitos.
- Mejor respuesta ante los descensos de temperatura ambiental.

Desventajas de los HAFSs:

- Mayores costos en su construcción al colocar el material de soporte.
- Mayores riesgos de colmatación del material de soporte.

En los HAFSs, de flujo horizontal, el agua residual se trata a medida que fluye a través de un medio poroso. La profundidad del lecho varía entre 0.45 m y 1 m, con pendiente de entre 0.5% y 1%. El agua residual que ingresa al sistema se mantiene en un nivel inferior al de la superficie (5-10 cm), lo que se logra regulando el nivel del dispositivo de salida (Delgadillo *et al.*, 2010). El agua circula horizontalmente de un extremo a otro del sistema; este tipo de humedales operan inundados permanentemente, por lo que el ambiente para la depuración es mucho más reductor que en los sistemas verticales (Figura 1).

Typha domingensis

Typha domingensis es el nombre científico de la planta que pertenece a la familia typhaceae, también es conocida con nombres comunes como espadaña,

tule, masa de agua, cola de gato, entre otros. Es una especie perenne, originaria de Europa, Asia y América. Su altura puede alcanzar más de tres metros, posee un color moreno claro, con una o más brácteas foliáceas caducas. En cuanto a sus hojas, espigas y frutos/semillas, Vibrans (2009) describe que:

Generalmente igualando o excediendo la altura de las espigas, parte superior de las vainas atenuada hacia la lámina, generalmente asimétricas, pero algunas veces simétricas, epidermis de la superficie ventral (hacia dentro) conteniendo gran cantidad de glándulas mucilaginosas de color oscuro, dispuestas en líneas longitudinales y comúnmente extendiéndose hacia la base de la lámina, láminas hasta de 1.5 m de largo y de 0.8 a 1.3 cm de ancho, envés ligeramente convexo cerca de la vaina y plano hacia el ápice, que es agudo.

Espigas masculinas hasta de 42 cm de largo y 1.5 cm de ancho y en general separadas de las femeninas por 0.7 a 5 cm, bractéolas de las flores masculinas filiformes a espatuladas, simples a ramificadas, algunas veces con incisiones que forman segmentos largos, frecuentemente coloreadas con puntos morenos en el ápice, de 2.5 a 3.5 mm largo, estambres de 2 a 4 total o parcialmente soldados, filamentos de 1 a 2.5 mm de largo, anteras de 2 a 3 mm de largo y 0.15 a 0.2 mm de ancho, conectivo generalmente obtuso y algunas veces con una punta corta y aguda, polen arreglado en mónadas; espigas femeninas hasta de 48 cm de largo y 2 cm de diámetro, flores femeninas con bractéolas largas y delgadas, acuminadas en el

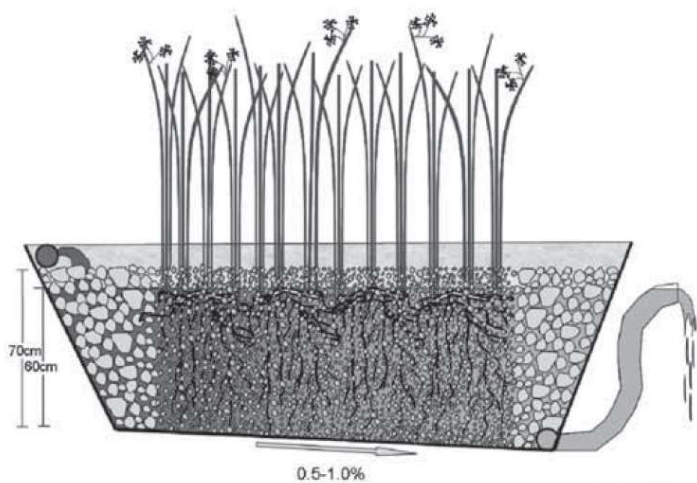


Figura 1. Corte longitudinal de un humedal de flujo subsuperficial horizontal (Delgadillo *et al.*, 2010).

ápice, más largas que los pelos del ginóforo (estructura que levanta al ovario), de color moreno claro en el ápice, de 3 a 5 mm de largo, pelos del ginóforo ligeramente coloreados en la punta y más cortos que los estigmas, ovario fusiforme (con extremos que se alargan y la parte media ancha), estilo de 1 a 2 mm de largo, estigma largo y delgado, de 0.5 a 1.5 mm de largo. Frutos y semillas: Fruto fusiforme, de 1 a 1.5 mm de largo.

Typha domingensis es una especie que requiere medios amplios para su desarrollo y reproducción, por ello, se le caracteriza como especie que crece en zonas amplias, pero al mismo tiempo limitadas por sus cuerpos de agua, donde se lleva a cabo su desarrollo y reproducción. Puede ser utilizada en humedales que se han construido para el tratamiento de efluentes con alta salinidad y pH, características comunes de efluentes industriales (Mufarrege, 2012). También se ha utilizado en espacios adaptados para el tratamiento de efluentes, diseñando el hábitat adecuado para el desarrollo de la especie, así como para el proceso del tratamiento de los efluentes, ya sean industriales o de pequeñas poblaciones. Se ha comprobado que esta especie tiene la capacidad de realizar fitorremediaciones en el tratamiento de aguas residuales, así como soportar la acumulación de altos grados de metales pesados como Cobre (Cu), Plomo (Pb), Zinc (Zn), Hierro (Fe) y Cromo (Cr). Las raíces crecen con vigor en soportes con textura arenosa, franca o arcillosa, pueden mantenerse empapados y sobrevivir en medios acuosos y se les debe situar en lugares con exposición directa al sol (Pérez, 2013, en Alcívar, 2018).

El impacto de *Typha domingensis* para el tratamiento de aguas residuales es muy favorable, ya que se logra la integración del agua tratada a los cuerpos de aguas naturales, o a los usos agrícolas, con una calidad acorde con la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tezontle y grava triturada (materiales de soporte)

El diseño de los humedales subsuperficiales de flujo horizontal, por lo general consiste en una cama o relleno de soporte, ya sea de tierra o arena y grava, en la que se plantan macrófitas acuáticas, en la mayoría de los casos con la caña común o carrizo (*Phragmites australis*). El volumen de material de soporte, que constituye la arena y grava del humedal, se recubre con una membrana impermeable para evitar fugas de agua hacia el suelo (Kolb, 1998, en Ferreyra, 2019).

Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica (k) es la propiedad del suelo que describe la facilidad con la que los poros del suelo permiten el flujo de agua. Cuando el suelo se satura, todos los poros pueden dirigir el agua, la conductividad está en su máxima expresión y es representada como (K_s). Los parámetros que definen a la conductividad hidráulica son: tamaño, orientación, distribución, continuidad de los poros y número, es por ello que existe una relación cuantitativa entre la conductividad hidráulica y el volumen de agua en un suelo.

La conductividad hidráulica se mide en laboratorio mediante el uso de permeámetros de carga variable o constante. La conductividad hidráulica es una propiedad cuantitativa importante del movimiento del agua, en especial del agua subterránea que se filtra a través de medios porosos, así como también de irrigación, drenaje, recarga, conservación de suelos, flujo a través de presas y de vasos de embalses, entre otros. El flujo pasa a través de los espacios porosos, esta trayectoria del flujo es complicada, ya que la geometría de estos espacios es muy irregular. La trayectoria que suele tomar el flujo es descendente, de un punto alto a un punto bajo. Para determinar la colmatación se requiere saber, por medio de la conductividad hidráulica, cómo se comporta el fluido.

Tabla 1
Características típicas del medio de soporte en humedales de flujo subsuperficial
(Reed *et al.*, 1995, en Ferreyra, 2019).

Tipo de medio	Tamaño efectivo D_{10} (mm)	Porosidad n (%)	Conductividad hidráulica saturada k_s ($\text{pie}^3/\text{pie}^2/\text{d}$)
Arena gruesa	2	28 a 32	300 a 3000
Arena con grava	8	30 a 35	1600 a 16000
Grava fina	16	35 a 38	3000 a 32000
Grava mediana	32	36 a 40	32000 a 160000
Roca triturada	128	38 a 45	16×10^4 a 82×10^4



Para determinar la conductividad hidráulica, Fetter (2001) propone el siguiente procedimiento:

$$q = -k \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (1)$$

Donde:

$q = Q/\text{sección}$ (caudal que circula por m^2 de sección)

$\frac{\Delta h}{\Delta L}$ = Gradiente hidráulico, expresado en incrementos

infinitesimales (adimensional)

$-k$ = Conductividad hidráulica. El signo negativo se

debe a que el caudal es una magnitud vectorial cuya

dirección es hacia los Δh decrecientes.

Despejando k

$$k = \frac{q}{\frac{\Delta h}{\Delta L}} \quad (2)$$

Donde:

$k = \left[\frac{L}{T}\right]$, unidades.

La conductividad hidráulica es la propiedad del medio poroso (del tipo de roca de la que está compuesto el humedal). Conociendo el valor de k se puede calcular el caudal, o aplicando la Ley de Darcy se puede calcular la k . Por otro lado, la conductividad hidráulica (k) y la permeabilidad (K) están relacionadas. La permeabilidad del medio poroso y las propiedades del fluido se determina con la Ecuación 3.

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} \quad (3)$$

Donde:

K = Permeabilidad, propiedad del material poroso

(m^2)

k = Conductividad hidráulica (m/d)

ρ = Densidad del fluido (Kg/m^3)

g = Aceleración de la gravedad (m/d^2)

μ = Viscosidad del fluido (m^2/d).

$\frac{\rho g}{\mu}$ = Propiedad del fluido

En la determinación cuantitativa del movimiento del agua en el suelo, la conductividad hidráulica es un parámetro esencial para solucionar problemas relativos a irrigación, drenaje, recarga, conservación del suelo, flujo a través de presas y de vasos de embalses, entre otros (Romaña, 2014).

Metodología

Características de diseño del modelo de los humedales artificiales construidos en el Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).

En el presente trabajo se utilizaron dos humedales artificiales construidos en los terrenos de la planta de tratamiento del Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Se trata de humedales de flujo horizontal subsuperficial con vegetación a base de *Typha domingensis*, así como tezontle y grava triturada como materiales de soporte. Tanto los materiales de soporte como *Typha domingensis*, se encuentran en el estado de Michoacán; siendo esta última una especie nativa y, por lo tanto, su obtención y costo son accesibles, además de tener excelente capacidad de adaptación y resistencia a las plagas.

En la Figura 2 se observan los HAFSs horizontal vegetados con *Typha domingensis*, planta anfibia (emergente), ya que una parte de ella se encuentra sumergida y el resto expuesta en el exterior y arraigada al sustrato o material de soporte. Cada uno de los dos humedales tiene las siguientes características de diseño: Largo: $L = 2.10 \text{ m}$; ancho: $A = 0.70 \text{ m}$; área superficial: $A_s = 1.47 \text{ m}^2$; temperatura: $\text{Temp} = 7^\circ\text{C}$; demanda bioquímica de oxígeno: $\text{DBO}_{\text{inf}} = 220 \text{ mg/L}$. Los

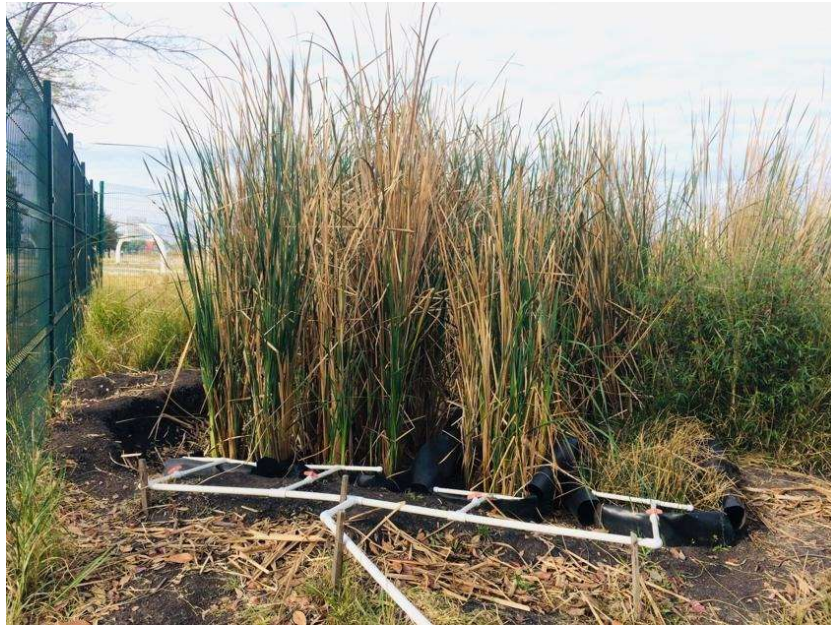


Figura 2. Humedales artificiales de flujo subsuperficial contruidos en el Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).

valores de DBO y SST del influente, se tomaron de recomendaciones del libro *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización* (Metcalf & Eddy, 1995).

Tezontle y grava triturada

La grava triturada (Figura 3) es un material que posee características distintas a las del tezontle, ya que tiene menor porosidad, baja absorción y mayor tamaño.

Algunas de las características de la grava triturada son las siguientes (Ferreya, 2019):

- Coeficiente de uniformidad = 1.51;
Absorción = 1.65%
- Densidad = 2.65 gr/cm³;
Porosidad = 0.40 = 40%



Figura 3. Grava triturada.

Algunas de las características del tezontle son las siguientes (Ferreya, 2019):

- Coeficiente de uniformidad = 1.51;
Absorción = 22.26%
- Densidad = 1.6 gr/cm³;
Porosidad = 0.63 = 63%

En la construcción de los humedales se utilizaron tezontle y grava triturada previamente caracterizados en laboratorio (Figuras 3 y 4); son materiales con características físicas favorables para el desarrollo de los microorganismos. En el caso del tezontle, debido a su alta porosidad y alto porcentaje de absorción de agua, permite mayor eficiencia en la remoción de contaminantes (Ferreya, 2019).



Figura 4. Tezontle.

Tabla 2
Caudales de diseño de los humedales construidos en el CIAC de la UMSNH.

<i>Medio de soporte</i>	<i>Caudal</i>
Tezontle	$Q = 0.09259 \text{ m}^3/\text{d} = 92.59 \text{ l/d}$
Grava triturada	$Q = 0.05879 \text{ m}^3/\text{d} = 58.79 \text{ l/d}$



Figura 5. Limpieza y mantenimiento de los humedales y del entorno.



Figura 6. Poda de *Typha domingensis* y remoción de la vegetación ajena.

Caudales de diseño de los humedales en cada uno de los medios de soporte

Ver la Tabla 2.

Mantenimiento de los humedales

Como parte del trabajo se realizó el mantenimiento necesario (Figura 5), tanto del lugar como del sistema de humedales, de tal manera que se garanti-

zara que el sistema de abastecimiento de agua residual (sistema de bombeo, línea de conducción y red de distribución) funcionara adecuadamente.

Como parte del mantenimiento también se realizó la poda de la vegetación de los humedales, así como retiro de la vegetación ajena que crece en los mismos, esto con el objetivo de propiciar un mejor crecimiento de la vegetación del tratamiento y, por lo tanto, un mejor funcionamiento del humedal (Figura 6).



Figura 7. Muestras de agua del influente y efluente de los humedales para su análisis físico-químico.

Obtención de muestras de agua y determinación de los parámetros de calidad del agua, tanto en el sitio como en el laboratorio

En cada muestreo se obtuvieron tres muestras de agua residual de dos litros cada una para su respectivo análisis físico-químico: una correspondiente al influente (entrada) de ambos humedales (agua proveniente del CIAC) y una en el efluente (salida) de cada uno de los dos humedales, una vez que el agua fue tratada (Figura 7). Asimismo, se obtuvieron tres muestras de 125 ml en bolsas estériles con cierre hermético, o mediante frascos de farmacia estériles de 100 ml para realizar los análisis bacteriológicos (Figura 8).

Determinación de parámetros de campo

Para la obtención de los parámetros de campo se utilizaron equipos de medición de la marca Hach, como fue el caso de un medidor de conductividad eléctrica o electrolítica que permite medir la conductividad electrolítica en $\mu\text{S}/\text{cm}$, así como la salinidad en partes por miles, la temperatura en $^{\circ}\text{C}$. Se utilizó un potenciómetro para medir el potencial de hidrógeno (pH) y un oxímetro para medir el oxígeno disuelto en



Figura 8. Muestras de agua del influente y efluente de los humedales para su análisis bacteriológico.

mg/L. En la Figura 9 se aprecia la obtención de parámetros físico-químicos de campo de las muestras de agua de los efluentes de los humedales.

Medición de niveles para la determinación de gradientes hidráulicos

En cada uno de los humedales se hincaron tres tubos en el sustrato: uno al inicio, otro a la mitad y el tercero al final, con el propósito de medir el nivel del agua en los tres puntos. Se midieron los niveles del agua en cada uno de los tubos (Figura 10) con la finalidad de determinar los gradientes hidráulicos. Para determinar los niveles del agua se utilizó una sonda y un nivel de referencia establecido en un punto que permaneció fijo durante el trabajo. La conductividad hidráulica se determinó mediante la comparación del comportamiento del flujo en el humedal que ha estado tratando el agua, con un humedal con el mismo tipo de material, pero limpio de sedimentos, para ello se instalaron humedales complementarios a los dos humedales en estudio, uno para cada tipo de material de soporte o sustrato.



Figura 9. Proceso de obtención de los parámetros de campo.



Figura 10. Medición del nivel del agua en cada punto de muestreo, utilizando el tubo hincado en los humedales.

Conductividad hidráulica

Se calculó la conductividad hidráulica de los dos humedales experimentales en estudio y su relación, en porcentaje, respecto a la conductividad de dos humedales de referencia con material de soporte nuevo. Cabe mencionar que, por lo antes mencionado, se construyeron dos humedales más llamados de referencia para comparar la conductividad de los dos humedales en estudio, con humedales de referencia con el mismo tipo de sustrato completamente nuevo y/o limpio.

Resultados

La comparación de los resultados del estudio de calidad del agua con la normatividad correspondiente y con los estudios realizados, se muestran en las Tablas 3 a la 6:

Parámetros de campo obtenidos en el muestreo 1

Se determinaron parámetros de campo, tales como temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y salinidad, cuyos valores sirven de referencia para conocer las condiciones del agua, tanto en el influente como en el efluente, además de servir de base y confirmación para algunos de los análisis de laboratorio.

- **Muestreo 1 – Fecha de muestreo: 20 de abril de 2021**

Ver la Tabla 3.

Como se observa en los resultados del primer muestreo (Tabla 3), el pH y la temperatura cumplen con la NOM-001-SEMARNAT-1996, y en ambos humedales se tienen prácticamente los mismos valores; sin embargo, el contenido de oxígeno disuelto (OD) no cumple con las recomendaciones de la literatura en cuanto al nivel compatible con la vida acuática y, además, se observa que el agua del humedal cuyo sustrato corresponde a la grava, presenta mayor cantidad de OD que la del humedal cuyo sustrato está constituido por tezontle.

Tabla 3
Muestreo 1. Parámetros de campo.

Parámetro	Influente	Enfluente Humedal con <i>Typha domingensis</i> - Tezontle	Enfluente Humedal con <i>Typha domingensis</i> - Grava triturada	NOM-001-SEMARNAT 1996 (Límites permisibles - Protecc. de la vida Acuática) Promedio Diario
Conductividad electrolítica (μS/cm)	1083	1124	1124	
Salinidad (ppt)	0.5	0.6	0.6	
Temperatura (°C)	18.0	18.3	18.0	40
pH	8.0	6.6	6.6	5–10
Oxígeno disuelto (mg/l)	0.64	1.2	1.1	>5 *

* Niveles compatibles con la vida de los peces (Colas R., 1972).

Tabla 4
Muestreo 1. Resultados de los análisis de laboratorio.

Muestreo	Fecha	Contaminante /Parámetro	Influyente	Enfluyente Humedal con <i>Typha domin-gensis</i> - Te-zontle	Enfluyente Humedal con <i>Typha do-mingensis</i> - Grava tritu-rada	NOM-001-SE-MARNAT 1996 (Límites permi-sibles - Pro-tecc. de la vida Acuática) Promedio Dia-rio
Muestreo 1	20/ 04/ 2021	DQO(mgO ₂ /L)	123.75	5	31.25	No aplica
		DBO5(mgO ₂ /L)	64.05	3.53	9.48	60
		SSed(ml/L)	0.5	0.15	0.25	2
		C.Fec.(NMP/100ml)	>2.4x10 ⁷	3x10 ⁴	1.1x10 ⁵	2000

Como se observa en la Tabla 4, en el caso de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y de los sólidos sedimentables (SSed), el agua tratada en los humedales cumple con la norma en ambos humedales, también se observa, nuevamente, mayor remoción en el humedal con tezontle como sustrato que en el humedal cuyo sustrato es grava triturada.

En el caso de los coliformes fecales, el agua de ambos humedales no cumple con la norma; sin embargo, existe remoción tanto en el humedal con sustrato a base de tezontle como en el humedal con sustrato a base de grava triturada, observándose, además, que es mayor la remoción en el humedal con tezontle como sustrato que en el humedal con grava triturada.

• **Muestreo 2 – Fecha de muestreo: 11 de mayo de 2021**

Ver Tabla 5.

Como se observa en los resultados del segundo muestreo (Tabla 5), las muestras de agua de los humedales cumplen en cuanto a pH y temperatura con la NOM-001-SEMARNAT-1996, y en ambos humedales se tienen prácticamente los mismos valores; sin embargo, en cuanto a oxígeno disuelto (OD) no se cumple con las recomendaciones de la literatura en cuanto al nivel compatible con la vida acuática y, además, se observa que el agua del humedal cuyo sustrato está formado por grava triturada presenta cantidad de OD ligeramente mayor que el humedal con tezontle.

Tabla 5
Muestreo 2. Parámetros de campo.

Parámetro	Influyente	Enfluyente Humedal con <i>Typha domin-gensis</i> - Tezontle	Enfluyente Humedal con <i>Typha domin-gensis</i> - Grava triturada	NOM-001-SEMARNAT 1996 (Límites permisibles - Protecc. de la vida Acuática) Promedio Diario
Conductividad electrolítica (μS/cm)	851	1192	1129	
Salinidad (ppt)	0.4	0.6	0.6	
Temperatura (°C)	21.0	20.5	20.2	40
pH	8.0	6.5	6.7	5–10
Oxígeno disuelto (mg/l)	0.75	0.79	1.07	>5 *

*Niveles compatibles con la vida de los peces (Colas R., 1972).

Tabla 6
Muestreo 2. Resultados de los análisis de laboratorio.

Muestreo	Fecha	Contaminante /Parámetro	Influente	Enfluente Humedal con <i>Typha domin-gensis</i> - Te-zontle	Enfluente Humedal con <i>Typha domin-gensis</i> - Grava triturada	NOM-001-SE-MARNAT 1996 (Límites permi-sibles - Pro-tecc. de la vida acuática-PD)
Muestreo 2	11/05/2021	DQO (mgO ₂ /L)	155	70	122	No aplica
		DBO ₅ mgO ₂ /L)	82.5	27.8	36.3	60
		SSed (ml/L)	<0.1	<0.1	<0.1	2
		C.Fec. (NMP/100ml)	2.40E+08	4.50E+06	4.60E+06	2000

Como se observa en la Tabla 6, respecto a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y de los sólidos sedimentables (SSed), el agua de ambos humedales cumple con la norma y, nuevamente, se observa, en el caso de la DBO₅, una mayor remoción en el humedal con sustrato de tezontle que en el humedal con sustrato de grava triturada.

En el caso de los coliformes fecales, el agua de ambos humedales no cumple con la norma; sin embargo, existe remoción en este parámetro, tanto en el humedal con sustrato de tezontle como en el humedal cuyo sustrato es de grava triturada; además, se puede observar que es mayor la remoción en el humedal con

sustrato de tezontle que en el humedal con sustrato de grava triturada.

La conductividad hidráulica (Tabla 7) es un indicador que varía con el efecto de la dinámica que genera la colmatación, dicha dinámica constituye un fenómeno complejo donde intervienen los sólidos presentes en el agua residual, el ingreso de agua de lluvia, el medio de soporte, su porosidad, su relación de vacíos y su posible estratificación, el sustrato y su posible intervención en la creación de fisuras y agujeros en el medio de soporte, la zona radicular, los rizomas y el ciclo de vida de la vegetación. Por lo antes mencionado, y de acuerdo a lo determinado, se puede decir que la colmatación aumenta a medida que el efecto

Tabla 7
Conductividad hidráulica en los humedales experimentales.

Humedales ex-perimentales	Número de determinación	Conductividad hidráulica K (m/día)	Porcentaje de Conductividad hi-dráulica Respecto al hume-dal de referencia K(m/día)	Grado de Colmatación
Humedal 1 Te-zontle y <i>Typha domingensis</i>	1	9.94	2.52	Se observa que la colmatación es mayor en el humedal con sustrato a base de tezontle, ya que tiene valores menores de conductividad hidráulica que el humedal con grava triturada.
	2	13.79	6.45	
	3	19.42	13.64	
Humedal 2 Grava triturada y <i>Typha domin-gensis</i>	1	90.45	30.00	La colmatación en el humedal con sustrato a base de grava triturada es menor, ya que tiene valores mayores en la conductividad hidráulica que el humedal con tezontle.
	2	135.67	45.00	
	3	271.34	90.00	

de dicha dinámica hace disminuir la conductividad hidráulica.

Conclusiones

Se estudió la eficiencia de remoción de contaminantes para los medios de soporte y el correspondiente cumplimiento de las características del agua tratada con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, y se concluye que, en ambos humedales en estudio, el efluente cumple con la norma mencionada en cuanto a temperatura, pH, DBO₅, y SSed; es mayor la remoción en el humedal con sustrato a base de tezontle que en el que se utilizó grava triturada, y en ninguno de los dos casos el efluente cumple con la norma en cuanto a OD y Coliformes fecales, por lo que se seguirá trabajando en la mejora del tratamiento.

En cuanto a la conductividad hidráulica, se concluye, con base en los resultados del presente trabajo, que no es determinante, pues en ambos humedales se cumple con la norma, inclusive se encontró que el tezontle, que tiene menor conductividad hidráulica, presenta mayor remoción de contaminantes. No obstante, cabe mencionar que, al tener menor conductividad hidráulica, se colmata más que la grava triturada, por lo que es recomendable estudiar la permeabilidad, otro parámetro hidráulico también relacionado con la dinámica de la saturación del medio de soporte y su posterior colmatación en los humedales.

Referencias

- Alcívar Cedeño, D.X., 2018, Propuesta de remoción de plomo en piscinas de relaves mineros utilizando la especie *Typha domingensis* pers en Camilo Ponce Enríquez, Ecuador: Tesis, *Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil*, p. 58.
- Colas, R., 1972, La pollution des eaux Que sais-je?: *France, Presses Universitaires de France*, 4a. ed., p. 128.
- CONAGUA, 2015, Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales: *México, CONAGUA*.
- Delgadillo, O., Camacho, A.F., Pérez, L. and Andrade, M., 2010, Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales: *Serie técnica del Proyecto GOV-AGUA, Programa ALFA de la Unión Europea*, p. 105.
- Ferreira, T. J.L., 2019, Medios de soporte alternativos para mejorar la eficiencia de los humedales artificiales de flujo subsuperficial, en el estado de Michoacán: Tesis de Maestría, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*.
- Fetter, C.W., 2001, *Applied Hydrogeology: Prentice-Hall*, 4ª ed., p. 81.
- Lahera, V., 2010, Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales: *Quivera. Revista de Estudios Territoriales*, 12(2), pp. 58-69.
- Metcalf y Eddy, INC., 1995, Ingeniería de aguas residuales, Tratamiento, vertido y reutilización: *Madrid, McGraw Hill*, p. 528.
- Mufarrege, M., 2012, Propuesta de remoción de plomo en piscinas de relaves mineros utilizando la especie *Typha domingensis* pers en Camilo Ponce Enríquez, Ecuador.
- Romaña, J.F., 2014, Los límites de la ley de Darcy: Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil.
- SEMARNAT, 1996, NORMA OFICIAL MEXICANA, NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación, 6 de enero de 1997.
- Vibrans, H., 2009, "Malezas de México". <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/typhaceae/typha-domingensis/fichas/ficha.htm> [consultado en mayo de 2022].