TERRA LATINOAMERICANA

Adaptación de *Canna* sp. al Uso de Material Estabilizado como Sustrato en Humedales Artificiales
Adaptation of *Canna* sp. to the Use of Stabilized Material as Substrate in Constructed Wetlands

Hugo de Jesús Fuentes-Clemente[1], Samuel Enciso-Sáenz[1], José Humberto Castañón-González[1] y Juan José Villalobos-Maldonado[1‡]

[1] Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Carretera Panamericana km 1080, Boulevares. 29050 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México; (H.J.F.C.), (S.E.S.), (J.H.C.G.), (J.J.V.M.),
[‡] Autor para correspondencia: juan.vm@tuxtla.tecnm.mx

RESUMEN

Las ventajas de los humedales artificiales, como su bajo costo de construcción y operación, así como el aporte de servicios ecosistémicos, le atribuyen un alto potencial para ser utilizados en el tratamiento de aguas en países en desarrollo; la búsqueda de nuevos materiales de soporte es una de las vías para optimizar estos sistemas. En este sentido los materiales estabilizados, que son residuos provenientes de celdas clausuradas de rellenos sanitarios, podrían ser potencialmente favorables para esta aplicación ya que las características fisicoquímicas que se han reportado para estos pueden contribuir a la remoción de compuestos presentes en el agua residual, además la presencia de microorganismos adaptados a la asimilación de contaminantes puede coadyuvar a incrementar la eficiencia del sistema, por otra parte, se ha demostrado que los materiales estabilizados pueden contribuir al desarrollo vegetal lo cual permitiría el establecimiento de cultivos de interés comercial con mayores requerimientos como lo son las plantas ornamentales. En este trabajo fueron evaluadas cuatro mezclas de material estabilizado y grava (0/100%, 25/75%, 50/50%, 75/25%) como sustrato en humedales de tipo subsuperficial con un volumen efectivo de operación de 45 litros, plantados con *Canna* sp bajo un diseño completamente al azar, mismos que fueron realizados por triplicado. Los resultados sugieren que *Canna* sp. puede desarrollar mecanismos de adaptación que le permiten sobrevivir en un 100% a las condiciones de operación presentes en un humedal artificial, sin embargo, la presencia y la proporción de material estabilizado influyó positivamente en su desarrollo vegetal, incrementando significativamente la generación de biomasa, la producción de flores y el contenido de clorofila; respuesta atribuible al contenido de nitrógeno, fósforo y potasio encontrado en el material estabilizado, así como a su capacidad de intercambio catiónico. No obstante, proporciones de material estabilizado superiores al 50% afectan negativamente el comportamiento hidráulico del sistema.

Palabras clave: *biorremediación, calidad paisajística, plantas ornamentales, revalorización de residuos.*

SUMMARY

The advantages of constructed wetlands, such as their low cost of construction and operation, as well as the contribution of ecosystem services, give them a high potential to be used in wastewater treatment in developing countries; the search for new substrates is one of the ways to optimize these systems. In this sense, aged refuse, which are wastes from closed landfill cells, could be potentially favorable for this application since the physicochemical characteristics that have been reported for

Cita recomendada:

Fuentes-Clemente, H. J., Enciso-Sáenz, S., Castañón-González, J. H., & Villalobos-Maldonado, J. J. (2025). Adaptación de *Canna* sp al Uso de Material Estabilizado como Sustrato en Humedales Artificiales. *Terra Latinoamericana, 43*, 1-9. e1977. https://doi.org/10.28940/terra.v43i.1977

Recibido: 18 de junio de 2024.
Aceptado: 5 de enero de 2025.
Artículo. Volumen 43.
Marzo de 2025.

Editor de Sección:
Dr. Victor Manuel Ruiz Valdiviezo

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

these materials can contribute to the removal of compounds present in wastewater, In addition the presence of microorganisms adapted to the assimilation of pollutants can contribute to increase the efficiency of the system. On the other hand, it has been demonstrated that aged refuses can contribute to plant development, which would allow the establishment of crops of commercial interest with greater requirements, such as ornamental plants. In this work, four mixtures of aged refuses and gravel (0/100%, 25/75%, 50/50%, 75/25%) were evaluated as substrate in subsurface wetlands with an effective operating volume of 45 liters planted with *Canna* sp. under a completely randomized design, which were carried out in triplicate. The results suggest that *Canna* sp. can develop adaptation mechanisms that allow it to survive in the operating conditions present in an artificial wetland; however, the presence and proportion of aged refuses positively influenced the plant development, significantly increasing biomass generation, flower production, and chlorophyll content; a response attributable to the nitrogen, phosphorus, and potassium content found in the aged refuses, as well as to its cation exchange capacity. However, proportions of aged refuse higher than 50 % negatively affect the hydraulic behavior of the system.

Index words: *bioremediation, landscape quality, ornamental plants, waste revaluation.*

INTRODUCCIÓN

Las ventajas de los humedales artificiales respecto a otros sistemas de tratamiento recaen principalmente en su construcción y operación asequibles, la cual puede ser hasta 80% más económica que la de un sistema convencional (Avellán y Gremillion, 2019; Nuamah *et al.,* 2020; Stefanakis, 2019). Además, también provee servicios ecosistémicos como la captación de CO_2, recuperación de ecosistemas, reservorio de biodiversidad, así como la mejora de la calidad paisajística (Zhang *et al.,* 2020; Zhang *et al.,* 2014). Sin embargo, como todos los sistemas, los humedales artificiales presentan ciertas limitaciones relacionadas con los altos tiempos de retención hidráulica necesarios para el tratamiento eficiente de las aguas residuales, por lo que su demanda de área también es mayor (Vymazal, Zhao y Mander, 2021), lo que en espacios de área con potencial cultivable representa una pérdida de productividad. Actualmente, la búsqueda de nuevos materiales de soporte es una de las vías para optimizar estos sistemas (Yang, Zhao, Liu, y Morgan, 2018), buscando materiales que participen activamente en la remoción de contaminantes, capacidad relacionada con características como su capacidad de intercambio catiónico, contenido de aluminio (Al), calcio (Ca), hierro (Fe) y magnesio (Mg) y su capacidad para donar electrones para que se lleve a cabo el metabolismo microbiano (Ji, Tang y Pei, 2022). En la búsqueda de materiales que sean accesibles y asequibles, la revalorización de residuos para ser usados con este fin ha cobrado relevancia (Wang *et al.,* 2020). Ante este panorama los materiales estabilizados (M.E.), que son residuos provenientes de celdas clausuradas de rellenos sanitarios, podrían ser potencialmente favorables para esta aplicación ya que las características fisicoquímicas que se han reportado para estos materiales (Feng *et al.,* 2019; Li *et al.,* 2011; Lou *et al.,* 2009) se encuentran dentro de los rangos deseados en un material de soporte para contribuir a la remoción de compuestos presentes en el agua residual, además, la presencia de microorganismos que por su origen están adaptados a la asimilación de contaminantes puede coadyuvar a incrementar la eficiencia del sistema, ya que a estos se les ha atribuido remociones entre el 70 y 90% en términos de DQO y nutrientes como el nitrógeno y fósforo en su estudio en reactores empacados (Gutiérrez-Hernández *et al.,* 2021; Nájera-Aguilar *et al.,* 2019; Xie *et al.,* 2012; Zhao *et al.,* 2007), por otra parte, se ha demostrado que los materiales estabilizados pueden contribuir al desarrollo vegetal (Li *et al.,* 2011), lo cual permitiría el establecimiento de cultivos de interés comercial con mayores requerimientos como lo son las plantas ornamentales; generando así, un beneficio económico adicional, así como mejorando la calidad paisajística del sistema y la aceptación social del mismo (Sandoval, Zamora, Vidal y Marín, 2019); a pesar de esto, hasta la fecha no se encuentra reporte en la literatura que aborde esta inferencia, por lo que la realización de esta investigación permitirá dilucidar el potencial del material estabilizado para ser usado como material de soporte en humedales artificiales y aportar ese conocimiento al mejoramiento de esta tecnología, y con ello posicionarla como una alternativa sustentable y ecológica capaz de integrarse de forma holística en los paradigmas actuales de la gestión hídrica de las políticas mundiales y del país.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se evaluaron cuatro mezclas de material estabilizado y grava a diferentes proporciones (0/100%, 25/75%, 50/50%, 75/25%) como sustrato en humedales de tipo subsuperficial plantados con *Canna* sp bajo un diseño completamente al azar, mismos que fueron realizados por triplicado. El estudio se realizó en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en Chiapas, México.

Obtención del Material de Soporte

La grava se obtuvo de un banco de extracción de materiales en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez y posteriormente fue triturada a un tamaño de partícula entre 4 y 16 mm, según lo reportado por Wang *et al.* (2020). Por su parte, el material estabilizado fue extraído de la zona clausurada en 2013 del relleno sanitario de Berriozábal, Chiapas; posteriormente, este fue tamizado a un tamaño de partícula inferior a 10 mm para eliminar restos de plásticos, vidrios y otros, según la metodología del equipo de trabajo de Nájera-Aguilar *et al*. (2019).

Caracterización del Material Estabilizado

La caracterización fisicoquímica consistió en la determinación de fósforo disponible, potasio disponible, nitrógeno total, capacidad de intercambio catiónico y contenido de materia orgánica con base en la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), mientras que el diámetro efectivo de partícula, el coeficiente de uniformidad y el índice de conductividad hidráulica se determinaron siguiendo las metodologías planteadas en Das (2015); finalmente, la capacidad de retención de agua y la capacidad de campo se realizaron acorde a lo planteado por Luna-Flores, Estrada, Jiménez y Pinzón (2012).

Manejo Fitosanitario y Nutrimental de las Plantas

Las plantas de *Canna* sp. fueron adquiridas con un productor local en Berriozábal, Chiapas, y un manejo nutricional y fitosanitario fue llevado a cabo con el objetivo de disminuir posibles bajas durante el estudio a causa de enfermedades o deficiencias preexistentes. Dicho manejo consistió en la aplicación de Ultrasol®, Raizal®, Cupravit® y Calypso® según las indicaciones del fabricante en un periodo de 30 días.

Construcción de los Prototipos

Los prototipos estuvieron hechos de polietileno de alta densidad (HDPE) con un volumen efectivo de operación de 45 litros, un área superficial de 0.15 m^2 y una profundidad de 0.4 m (Aguirre, Ojeda, García, Barragán y Mujeriego, 2005; Dhulap y Patil, 2016; Webb *et al.,* 2013). Con una densidad de plantación de 12 plantas m^{-2}. Las proporciones de grava y material estabilizado fueron adicionadas por capas, colocando grava en la base y cobertura del humedal, mientras que el material estabilizado se colocó a medio estrato.

Formulación del Agua Residual Sintética

Para simular los contaminantes típicos presentes en el agua residual, se elaboró un agua residual en laboratorio tomando como base la norma alemana DIN 38412 y la metodología de Akratos y Tsihrintzis (2007) usando peptona (200 mg L^{-1}) como fuente de proteínas, sacarosa (200 mg L^{-1}) como fuente de carbohidratos, ácido acético (50 mg L^{-1}) como fuente de ácidos orgánicos, urea (30 mg L^{-1}) y fosfato ácido de potasio (28 mg L^{-1}), como microelementos fueron añadidos 7 mg L^{-1} de cloruro de sodio, 4 mg L^{-1} de cloruro de calcio y 2 mg L^{-1} de sulfato de magnesio. La caracterización del agua residual sintética se muestra en el Cuadro 1.

Condiciones de Operación

Los prototipos fueron operados bajo un régimen de operación tipo BATCH con una duración de 72 horas por lote, durante la primera etapa del acondicionamiento los humedales fueron saturados con agua potable para simular las condiciones de anegamiento durante cuatro semanas, posteriormente, para la segunda etapa el agua residual sintética fue alimentada a los sistemas de forma gradual hasta alcanzar la carga orgánica del 100%, manteniendo esta concentración hasta finalizar el monitoreo.

Cuadro 1. Caracterización del agua residual sintética.
Table 1. Characterization of synthetic wastewater.

Parámetro	Cantidad
	mg L^{-1}
DQO	520
Nitrógeno Total	50
Fosfatos totales	20
pH	7.2

Monitoreo del Desarrollo Vegetal

Para la primera etapa, los parámetros morfométricos elegidos como indicadores del desarrollo vegetal fueron el número de flores, el número y longitud de las hojas, el número de brotes generados y el porcentaje de supervivencia, mientras que para la segunda se eligieron como indicadores el número de flores y el contenido de clorofila en unidades SPAD y de nuevo se observó el porcentaje de supervivencia, estos parámetros fueron medidos al finalizar cada etapa y fueron analizados mediante un ANOVA simple.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características Fisicoquímicas e Hidráulicas del Material Estabilizado

Como se observa en el Cuadro 2, el material estabilizado presenta una composición del 90% de arena y 10% de limos y arcillas. La alta proporción de arena coincide con el índice de conductividad encontrado y en conjunto sugieren un flujo de agua adecuado, según los rangos convenidos en la mecánica de suelos para proveer un buen drenaje (Juárez-Badillo y Rico, 2005). Por su parte el porcentaje de porosidad permite una buena cantidad de espacio para la retención de agua y la colonización de biopelículas (Wang *et al.,* 2020). Mientras que la capacidad de intercambio catiónico puede favorecer la disponibilización de nutrientes.

como tercer punto se encontraron cantidades de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio por debajo de los rangos reportados en materiales estabilizados provenientes de otros rellenos, lo cual se atribuye a la diferente composición de los residuos que fueron confinados en dichos rellenos, así como la edad de confinamiento (Li, Hou, Guo, Yao y Sang, 2011); sin embargo, las concentraciones de nutrientes presentes en el material estabilizado son suficientes para promover el desarrollo vegetal, esto de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) que indica que tanto para el fósforo como el potasio las cantidades son consideradas como muy altas mientras que el nitrógeno se presenta en un nivel medio.

Cuadro 2. Características fisicoquímicas y contenido de nutrientes en el material estabilizado de Berriozábal, Chiapas.
Table 2. Physicochemical characteristics and nutrient content of aged refuse from Berriozábal, Chiapas.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámentro	Valor
Conductividad hidráulica	$1.05x10^{-2}$ cm s^{-1}	Capacidad de campo	53.1%	Diámetro efectivo de partícula	0.104 mm	Capacidad de retención de agua	58.61%
Nitrógeno total	3.1 mg g^{-1}	Potasio disponible	0.7 mg g^{-1}	Coeficiente de uniformidad	11.39	Contenido de materia orgánica	2.27%
Fósforo disponible	0.049 mg g^{-1}	C.I.C.	18.70 cmol kg^{-1}	Contenido de limos y arcillas	10%	Contenido de arena	90%

Desarrollo Vegetativo

Los resultados del análisis estadístico del desarrollo vegetal al término de la primera etapa indicaron una diferencia estadísticamente significativa en el número y longitud de hojas entre los tratamientos y el grupo control debido a la presencia del material estabilizado; sin embargo, la proporción de material estabilizado no influyó significativamente. Mientras que en lo relativo al número de brotes solo el nivel alto del tratamiento presentó una diferencia estadísticamente significativa respecto al control, se observa que a medida que incrementa la proporción de M.E. incrementa el número de brotes generados, mientras que respecto a la floración, tanto el nivel medio como el alto no presentaron diferencia estadística entre sí, pero fueron estadísticamente diferentes al grupo control.

El efecto positivo del material estabilizado en el desarrollo vegetal denotado en la Figura 1 es congruente con los hallazgos correspondientes al contenido de nutrientes presente en el material estabilizado, ya que estos se encuentran dentro o por encima de los rangos de concentración adecuada para el desarrollo vegetal, según la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) así como diversos autores tales como Mengel y Kirkby (2000) y Li, Hou, Guo, Yao y Sang (2011). Sin embargo, *Canna* presentó un 100% de supervivencia en todos los tratamientos, indicando el desarrollo de mecanismos de adaptación. Jampeetong y Janyasupab (2022) reportaron que el principal mecanismo de adaptación desarrollado por *Canna* ante situaciones de anegamiento es el aumento del aerénquima, el cual incrementa su área a medida que la aireación en el sustrato disminuye. Este mecanismo permite a la planta un transporte de oxígeno desde las partes aéreas a las partes sumergidas para suplir la falta de este y así evitar la asfixia radicular, así como participar en la adecuada absorción de nutrientes. Por su parte, el contenido de potasio disponible pudo contribuir a favorecer los mecanismos de regulación osmótica, lo que ayuda en condiciones saturadas de agua (Zhao *et al.,* 2021).

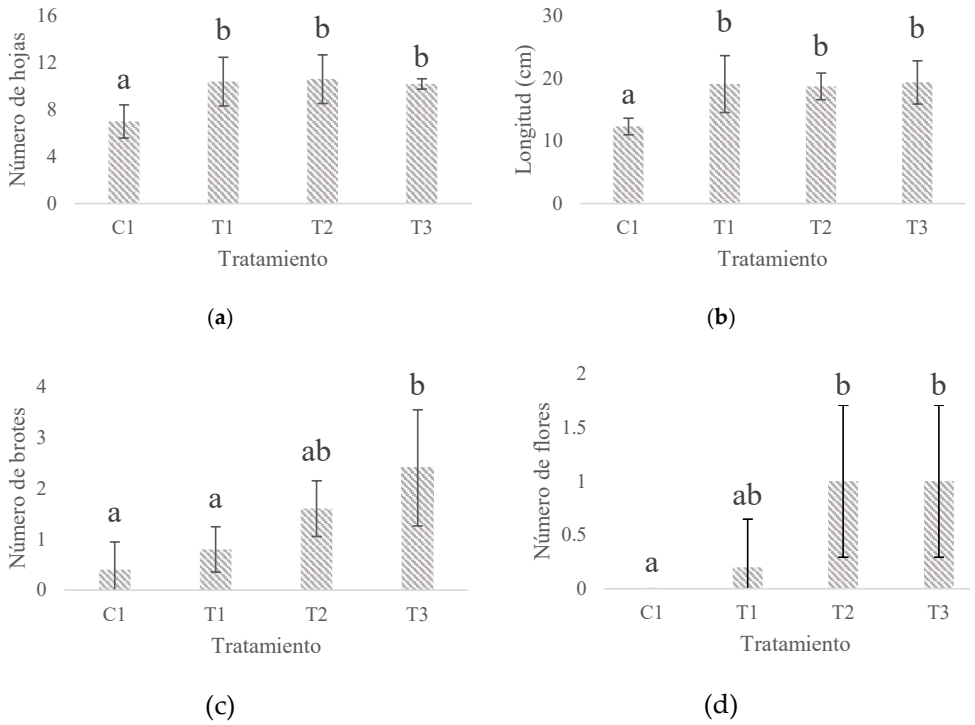

Figura 1. Datos morfométricos de Canna sp. (a) Número de hojas, (b) Longitud de hojas, (c) Brotes generados y (d) Flores generadas. Los datos son medias ± EE. Control (C1), 25% de M.E. (T1), 50% de M.E. (T2) y 75% M.E. (T3). Letras diferentes indican diferencia estadística significativa ($P < 0.05$) de acuerdo con la prueba de Tukey.

Figure 1. Morphometric data of Canna sp. (a) Number of leaves, (b) Length of leaves, (c) Shoots generated and (d) Flowers generated. The data are means ± EE. Control (C1), 25% M.E. (T1), 50% M.E. (T2) and 75% M.E. (T3). Different letters indicate significant statistical difference ($P < 0.05$) according to Tukey's test.

Durante este lapso se observó un efecto negativo en el comportamiento hidráulico de los sistemas puesto que los tratamientos medio y alto presentaron interrupción total del flujo de agua, Contradictorio a la conductividad hidráulica determinada al inicio del experimento; este comportamiento es atribuible a la capacidad de retención de agua y la capacidad de campo del material estabilizado, el cual puede retener más del 50% de su volumen en agua, por lo que en los niveles medio y alto de los tratamientos el volumen de alimentación no superó la capacidad de campo y el agua quedó retenida en su totalidad en el material estabilizado y parte de ella se perdiera por el efecto de la evaporación; además a altos volúmenes de material estabilizado el contenido de limos y arcillas atribuye un comportamiento plástico a la estructura del material (Moreno-Maroto y Alonso-Azcárate, 2018) lo que pudo haber provocado la formación de capas impermeables en el estrato (Neuzil, 2019), estas características imposibilitaron el poder incrementar los volúmenes de alimentación sin desbordar el sistema por lo que estas propiedades hace que humedales con proporciones de material estabilizado superiores al 50% solo puedan ser operados de forma semicontinua por lo que estos tratamientos fueron descartados para la siguiente etapa.

Durante la segunda etapa derivado del análisis de diferencias de medias de la prueba Tukey que se observa en la Figura 2 se observó que tanto en el número de flores generadas como en el contenido de clorofila hubo una diferencia estadística significativa entre el control y el tratamiento 1 debido a la presencia de material estabilizado en el material de soporte. el porcentaje de supervivencia en esta etapa se mantuvo del 100 por ciento.

El incremento de clorofila está relacionado a las concentraciones adecuadas de nitrógeno, lo que se ve reflejado en una fotosíntesis más efectiva y, por ende, una mayor producción de energía y crecimiento (Liang, Soranno y Wagner, 2020), lo que demanda una mayor absorción de nutrientes y en conjunto brinda mayor resiliencia a condiciones adversas.

Mientras que la quintuplicación de la producción de flores puede asociarse al contenido de fósforo, el cual, a la vez que promueve el crecimiento radicular para la absorción de nutrientes, es indispensable para la síntesis de energía que es requerida para la formación de órganos reproductores, así como para mantener la floración (Ye *et al.,* 2019), lo que denota que el establecimiento de *Canna* en este tratamiento es un sistema de producción viable. Además, la estructura del material estabilizado brinda mayor estabilidad radicular a la planta (Barbaro y Karlanián, 2020; Jampeetong y Janyasupab, 2022; Reyes-Pérez *et al.,* 2018), finalmente, en base a lo observado durante la experimentación se presume que la alimentación con agua residual sintética tuvo un efecto positivo para el crecimiento vegetal más, las limitaciones del diseño experimental usado no nos permite aseverarlo; pero se asume que el nitrógeno proveniente de la peptona y la urea está pasando a formas más bioasimilables de nitrógeno como nitratos y amonio por acción de los microorganismos (Xie *et al.,* 2013) y posteriormente absorbidos por la planta para su nutrición vegetal, por su parte el fosfato acido de potasio al solubilizarse se disocia en sus iones constituyentes: iones potasio y dihidrógeno de fosfatos ambos asimilables por las plantas.

De igual forma, la capacidad de intercambio catiónico puede contribuir al mejor intercambio de micronutrientes en forma de iones como el sodio, potasio y calcio, condiciones que reducen el estrés por limitación de nutrientes permitiendo un mejor desarrollo vegetal (Lambers, Raven, Shaver y Smith 2008). El desarrollo vegetativo durante el periodo de crecimiento y experimentación se muestra a continuación en la Figura 3.

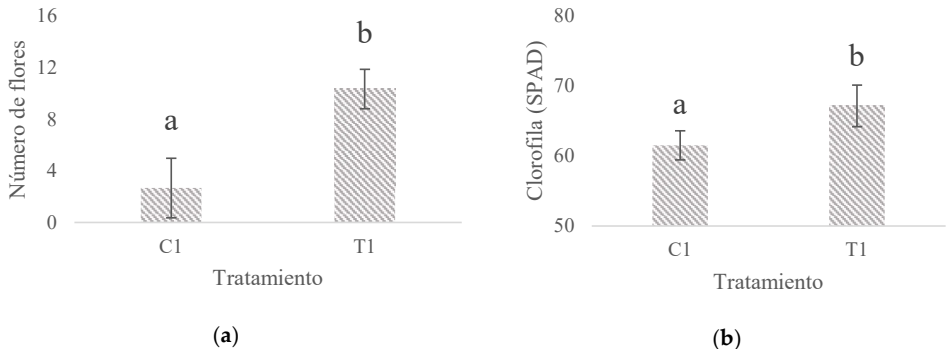

Figura 2. Datos morfométricos de Canna sp. (a) Número de flores, (b) Contenido de clorofila (SPAD). Los datos son medias ± EE. Control (C1), 25% de M.E. (T1). Letras diferentes indican diferencia estadística significativa ($P < 0.05$) de acuerdo con la prueba de Tukey.

Figure 2. Morphometric data of Canna sp. (a) Number of flowers, (b) Chlorophyll content (SPAD). The data are means ± EE. Control (C1), 25% of M.E. (T1). Different letters indicate significant statistical difference ($P < 0.05$) according to Tukey's test.

(**a**) (**b**)

Figura 3. Establecimiento y desarrollo de *Canna* sp. sobre material de soporte. a) Canna sp. al día cero después del trasplante. b) Canna sp. a ocho semanas después del trasplante.
Figure 3. Establishment and development of *Canna* sp. on support material. a) Canna sp. at day zero after transplanting. b) Canna sp. at eight weeks after transplanting.

CONCLUSIONES

Canna sp. puede desarrollar mecanismos de adaptación que le permiten sobrevivir en un 100% a las condiciones de operación presentes en un humedal artificial, sin embargo, la presencia y la proporción de material estabilizado influyó positivamente en su desarrollo vegetal, incrementando significativamente la generación de biomasa, la producción de flores y el contenido de clorofila; No obstante, proporciones de material estabilizado superiores al 50% afectan negativamente el comportamiento hidráulico del sistema interrumpiendo totalmente el flujo de agua probablemente ocasionado por el contenido de limos y arcillas, por lo tanto, la proporción de material estabilizado al 25% es la más adecuada para su uso como material de soporte en humedales artificiales, sin embargo, los resultados demuestran el potencial del material estabilizado para ser usado como abono para el cultivo de plantas ornamentales.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA LA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS DE APOYO

No aplicable.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener intereses contrapuestos.

FINANCIAMIENTO

Para la realización de este proyecto no hubo fuentes de financiamiento externas a los autores.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Conceptualización: H.J.F.C. y J.J.V.M. Metodología: H.J.F.C. y J.H.C.G. Validación: S.E.S. Investigación: H.J.F.C. Recursos: J.J.V.M. Tratamiento de datos: S.E.S. y J.H.C.G. Escritura, revisión y edición: H.J.F.C., J.J.V.M. y S.E.S. Supervisión: J.J.V.M. Administración del proyecto: J.J.V.M.

AGRADECIMIENTOS

Fuentes Clemente agradece al CONAHCYT por la beca otorgada para realizar los estudios de maestría.

LITERATURA CITADA

Aguirre, P., Ojeda, E., García, J., Barragán, J., & Mujeriego, R. (2005). Effect of water depth on the removal of organic matter in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, *40*(6-7), 1457-1466. https://doi.org/10.1081/ESE-200055886

Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2007). Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, *29*(2), 173-191. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.06.013

Avellán, T., & Gremillion, P. (2019). Constructed wetlands for resource recovery in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *99*, 42-57. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.024

Barbaro, L. A., & Karlanián, M. A. (2020). Of the physical properties substrate effect on the development of flowering potted plants. *Ciencia del Suelo(Argentina), 38*(1), 1-11.

Das, B. M. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (4ª ed.). México: Cengage Learning.

Dhulap, V. P., & Patil, S. S. (2016). Impact of Plant Density on the Sewage Treatment through selected Aquatic Macrophytes Using Angular Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *5*(6), 97-104. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2016.506.012

Feng, F., Liu, Z. G., Song, Y. X., Jiang, C. K., Chai, X. L., Tang, C. J., & Chai, L. Y. (2019). The application of aged refuse in nitrification biofilter: Process performance and characterization. *Science of the Total Environment*, *657*, 1227-1236. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.020

Gutiérrez-Hernández, R. F., Nájera-Aguilar, H. A., Araiza-Aguilar, J. A., Martínez-Salinas, R. I., García-lara, C. M., González-Vázquez, U., & Cruz-Salomón, A. (2021). Novel treatment of sugar mill wastewater in a coupled system of aged refuse filled bioreactors (Arfb): Full-scale. *Processes*, *9*(3), 1-12. https://doi.org/10.3390/pr9030516

Jampeetong, A., & Janyasupab, P. (2022). Effects of substrate types on nitrogen removal efficacy and growth of *Canna indica* L. *Applied Environmental Research*, *44*(1), 42-53. https://doi.org/10.35762/AER.2021.44.1.4

Ji, Z., Tang, W., & Pei, Y. (2022). Constructed wetland substrates: A review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal. *Chemosphere*, *286*(1), 131564. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131564

Juárez-Badillo, E., & Rico-Rodríguez, A. (2005). *Mecánica de suelos*. México: Limusa. ISBN: 968-18-0069-9

Lambers, H., Raven, J. A., Shaver, G. R., & Smith, S. E. (2008). Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age. *Trends in Ecology and Evolution, 23*(2), 95-103. https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.10.008

Li, G., Hou, F., Guo, Z., Yao, G., & Sang, N. (2011). Analyzing nutrient distribution in different particle-size municipal aged refuse. *Waste Management*, *31*(11), 2203-2207. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.010

Liang, Z., Soranno, P. A., & Wagner, T. (2020). The role of phosphorus and nitrogen on chlorophyll a: Evidence from hundreds of lakes. *Water Research*, *185*(15), 116236. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116236

Lou, Z., Zhao, Y., Chai, X., Yuan, T., Song, Y., & Niu, D. (2009). Landfill Refuse Stabilization Process Characterized by Nutrient Change. *Environmental Engineering Science*, *26*(11), 1655-1660. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116236

Luna-Flores, W., Estrada-Medina, H., Jiménez-Osornio, J., & Pinzón-López, L. (2012). Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y eficiencia del uso de agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias. *Terra Latinoamericana*, *30*(4), 343-353.

Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2000). *Principios de nutrición vegetal* (4ª ed.). Basilea, Suiza: Instituto Internacional de la potasa.

Moreno-Maroto, J. M., & Alonso-Azcárate, J. (2018). What is clay? A new definition of "clay" based on plasticity and its impact on the most widespread soil classification systems. *Applied Clay Science*, *161*, 57-63. https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.011

Nájera-Aguilar, H. A., Gutiérrez-Hernández, R. F., Bautista-Ramírez, J., Martínez-Salinas, R. I., Escobar-Castillejos, D., Borraz-Garzón, R., … & Giácoman-Vallejos, G. (2019). Treatment of low biodegradability leachates in a serial system of aged refuse-filled bioreactors. *Sustainability*, *11*(11), 3193. https://doi.org/10.3390/su11113193

Neuzil, C. E. (2019). Permeability of clays and shales. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 47*(1), 247-273. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-053018-060437

Nuamah, L. A., Li, Y., Pu, Y., Nwankwegu, A. S., Zang, h. Norgbey, E., … & Bofah-Buoh, R. (2020). Constructed wetlands, status, progress, and challenges. The need for critical operational reassessment for a cleaner productive ecosystem. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122340. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122340

Reyes-Pérez, J., Luna-Murillo, R. A., Espinoza-Coronel, A., Lara-Capistrán, L., Díaz-Rivera, E., Hernández-Montiel, L.G., … & Xalapa, M. (2018). Effect of substrate and growth regulators on the rooting of three ixora (*Ixora coccinea* L.) varieties under greenhouse. *Agroproductividad*, *11*(8), 145-148.

Sandoval, L., Zamora-Castro, S. A., Vidal-Álvarez, M., & Marín-Muñiz, J. L. (2019). Role of wetland plants and use of ornamental flowering plants in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Applied Sciences, 9*(4), 1-17. https://doi.org/10.3390/app9040685

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021 SEMARNAT-2000 antes NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*. D. F., México: SEGOB.

Stefanakis, A. I. (2019). The Role of Constructed Wetlands as Green Infrastructure for Sustainable Urban Water Management. *Sustainability*, *11*(24), 1-19. https://doi.org/10.3390/su11246981

Vymazal, J., Zhao, Y., & Mander, Ü. (2021). Recent research challenges in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*, *169*, 106318. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106318

Wang, Y., Cai, Z., Sheng, S., Pan, F., Chen, F., & Fu, J. (2020). Comprehensive evaluation of substrate materials for contaminants removal in constructed wetlands. *Science of the Total Environment, 701*, 134736. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134736

Webb, J. M., Quintã, R., Papadimitriou, S., Norman, L., Rigby, M., Thomas, D. N., & Le Vay, L. (2013). The effect of halophyte planting density on the efficiency of constructed wetlands for the treatment of wastewater from marine aquaculture. *Ecological Engineering*, *61*, 145-153. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.058

Xie, B., Lv, Z., Hu, C., Yang, X., & Li, X. (2013). Nitrogen removal through different pathways in an aged refuse bioreactor treating mature landfill leachate. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *97*, 9225-9234. https://doi.org/10.1007/s00253-012-4623-x

Xie, B., Xiong, S., Liang, S., Hu, C., Zhang, X., & Lu, J. (2012). Performance and bacterial compositions of aged refuse reactors treating mature landfill leachate. *Bioresource Technology*, *103*(1), 71-77. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.114

Yang, Y., Zhao, Y., Liu, R., & Morgan, D. (2018). Global development of various emerged substrates utilized in constructed wetlands. *Bioresource Technology, 261*, 441-452. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.085

Ye, T., Li, Y., Zhang, J., Hou, W., Zhou, W., Lu, J., … & Li, X. (2019). Nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization affects the flowering time of rice (*Oryza sativa* L.). *Global Ecology and Conservation*, *20*, e00753. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00753

Zhang, C., Wen, L., Wang, Y., Liu, C., Zhou, Y., & Lei, G. (2020). Can constructed wetlands be wildlife refuges? A review of their potential biodiversity conservation value. *Sustainability*, *12*(4), 1-18. https://doi.org/10.3390/su12041442

Zhang, D. Q., Jinadasa, K. B. S. N., Gersberg, R. M., Liu, Y., Ng, W. J., & Tan, S. K. (2014). Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries - A review of recent developments (2000-2013). *Journal of Environmental Management*, *141*, 116-131. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.03.015

Zhao, S., Zhang, Q., Liu, M., Zhou, H., Ma, C., & Wang, P. (2021). Regulation of plant responses to salt stress. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(9), 1-16. https://doi.org/10.3390/ijms22094609

Zhao, Y., Lou, Z., Guo, Y., & Xu, D. (2007). Treatment of sewage using an aged-refuse-based bioreactor. *Journal of Environmental Management*, *82*(1), 32-38. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.11.015