

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE HUMEDALES BIOINGENIERILES DOMICILIARIOS, SEMBRADOS CON PLANTAS ORNAMENTALES

WASTEWATER TREATMENT THROUGH HOME BIOENGINEERED WETLANDS, SOWN WITH ORNAMENTAL PLANTS

Álvarez-Hernández L.M.¹, Marín-Muñiz J.L.², Sandoval-Herazo L.C.³, Zamora-Castro S.⁴

^{1,2} Academia de Desarrollo Regional Sustentable. El Colegio de Veracruz. Xalapa, Veracruz. Carrillo Puerto, 26. 91000.

³ Laboratorio de humedales y sustentabilidad ambiental. División de estudios de posgrado e investigación. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Veracruz 93821, Mexico.

⁴ Facultad de Ingeniería, Construcción y Habitación, Universidad Veracruzana, Bv. Adolfo Ruíz Cortines 455, Costa Verde, Boca del Río, Veracruz 94294, Mexico.

*malvarezh.ddrs22@colver.info

Artículo Científico

Publicado: 30 abril 2024

RESUMEN

A pesar de la importancia del agua para la vida, su uso ha sido excesivo y su tratamiento escaso. Ante la constante escasez hídrica, el tratamiento para reutilizar el agua residual se ha tornado de gran importancia; sin embargo, los métodos convencionales son poco replicados por los altos costos de construcción y operación. El objetivo del presente estudio fue evaluar un sistema ecológico de tratamiento de aguas residuales mediante Humedales construidos o también llamados Bioingenieriles (HB) a nivel domiciliario, estos sembrados con plantas ornamentales, con aditamentos o difusores para entrada de oxígeno ambiental y cáscara de coco (pericarpio de *Cocos nucifera*) como fuente de carbono. Se evaluó un sistema domiciliario para 3 habitantes, que incluyó

8 celdas (o 4 mesocosmos) con plantas y 4 controles sin vegetación (12 celdas en total, 2 celdas para cada unidad experimental considerando sus réplicas). Todas las celdas se rellenaron de residuos rugosos o con dobleces de Tereftalato de Polietileno (PET). Se utilizaron 8 mesocosmos con plantas, 2 tenían difusores de oxígeno; 2 tenían fuente de carbono; 2 tenían la combinación de difusores y fuente de carbono y 2 más sin difusores de oxígeno ni fuente de carbono. Durante 13 meses se midió Nitrógeno total (NT) y Sólidos suspendidos totales (SST). Se observó que, en cuanto a los SST, el sistema más eficiente en la remoción fue el que únicamente tenía plantas con el 64.5%; en cuanto a la eficiencia en la remoción de NT, esta fue del 65% en mesocosmos sin plantas, incluyendo difusores de oxígeno y fuente de carbono, y entre 80-86% en los otros mesocosmos con

plantas, lo cual indica que el conjunto de oxígeno que proveen las plantas y el de los difusores, más la fuente de carbono adicionada son una opción a replicar en los nuevos diseños de humedales para mejorar las remociones, principalmente de Nitrógeno Total, ión de difícil remoción en humedales.

Palabras clave: humedales, remoción, aguas residuales, ecotecnología.

ABSTRACT

Despite the importance of water for life, its use has been excessive and its treatment scarce. Given the constant water scarcity, the treatment to reuse residual water has become of great importance; however, conventional methods are rarely replicated due to the high costs of construction and operation. The objective of this study was to evaluate an ecological system of wastewater treatment through Constructed Wetlands or also called Bioengineering (HB) at the household level, these planted with ornamental plants, with attachments or diffusers for the entry of environmental oxygen and coconut shell (pericarp of *Cocos nucifera*) as a carbon source. A home system for 3 inhabitants was evaluated, which included 8 cells (or 4 mesocosms) with plants and 4 controls without vegetation (12 cells in total, 2 cells for each experimental unit considering their replicates). All the cells were filled with rough residues or with folds of Polyethylene Terephthalate (PET). 8 mesocosms with plants were used, 2 had oxygen diffusers; 2 had a carbon source; 2 had the combination of

diffusers and carbon source and 2 more without oxygen diffusers or carbon source. Total Nitrogen (NT) and Total Suspended Solids (TSS) were measured for 13 months. It was observed that, in terms of TSS, the most efficient system in removal was the one that only had plants with 64.5%; Regarding the efficiency in the removal of NT, this was 65% in mesocosms without plants, including oxygen diffusers and carbon sources, and between 80-86% in the other mesocosms with plants, which indicates that the set of The oxygen provided by the plants and that of the diffusers, plus the added carbon source are an option to replicate in the new wetland designs to improve removals, mainly of Total Nitrogen, an ion that is difficult to remove in wetlands.

Keywords: wetlands, removal, wastewater, ecotechnology.

INTRODUCCIÓN

La existencia de agua favoreció el surgimiento de la vida y por consiguiente la existencia del hombre; a pesar de su importancia, su uso ha sido excesivo y el tratamiento de las aguas residuales ha sido escaso (CONAGUA, 2018). En países en vías de desarrollo como México, el tratamiento de las aguas residuales es un problema que no se ha abordado completamente (Sandoval-Herazo et al., 2016), ya que sólo el 63% de las aguas residuales municipales son tratadas (CONAGUA, 2020) y las políticas hídricas del país contemplan principalmente sistemas de tratamiento en zonas urbanas, pero no en comunidades rurales (menores a 2500

habitantes), como es el caso de las 185 243 comunidades existentes en México (INEGI, 2020).

Las aguas residuales provienen del uso doméstico y son las provenientes de lavabos, regaderas, lavadoras, inodoros, mingitorios etc., ante la constante escasez del vital líquido, el tratamiento de estas aguas resulta de gran importancia para reutilizarla en la irrigación de cultivos, jardines o muchas otras actividades, disminuyendo la demanda del agua de primer uso. Sin embargo, en tal condición el agua presenta contaminantes y bacterias que resultan perjudiciales para su uso en todos los aspectos.

Darles tratamiento a las aguas residuales resulta fundamental para evitar la contaminación del medio ambiente y contribuir a la preservación de los ecosistemas. Los sistemas de tratamiento convencionales son poco replicados por los altos costos de construcción y operación y por la dispersión de la población (Zurita-Martínez, 2011). Sin embargo existen alternativas ecológicas y económicamente viables como lo son los HB, los cuales, de acuerdo con Marín-Muñiz (2017) consisten en celdas impermeables rellenas de un sustrato que a su vez sirve como anclaje para la vegetación y como filtros para el agua; existiendo de acuerdo a su flujo de agua los humedales superficiales que son los más parecidos a los humedales naturales, pues es por encima del sustrato donde corre el agua en contacto con la atmósfera y los humedales subsuperficiales, celdas rellenas de un medio granular donde el agua corre por

debajo del sustrato; de acuerdo con la dirección del agua, pueden ser verticales, en donde el agua cae mediante un dispersor sobre todo el costado del humedal de arriba hacia abajo y los verticales en donde el agua corre de un costado al otro del humedal de forma paralela al sustrato (Mitsch y Gosselink, 2007; Marín-Muñiz, 2017).

La eficiencia de los humedales en la remoción de los contaminantes se ha demostrado ampliamente en diferentes investigaciones que han corroborado remociones de patógenos y compuestos orgánicos hasta del 95% (Merino-Solís et al., 2015). En México se ha corroborado ya el uso de esta alternativa hasta en 167 casos en estudios a pequeña y gran escala (Marín-Muñiz et al. 2023), sin embargo, existen ciertos compuestos inorgánicos como los nitrogenados cuyos porcentajes de remoción no superan el 70%, representando un reto el obtener mayores porcentajes de remoción mediante el uso de los humedales artificiales, lo que ha motivado a algunos autores como Zurita (2018) a utilizar fuentes de carbono como el olote de maíz, para acelerar las remociones de nitrógeno en condiciones anaerobias (desnitrificación), fuente necesaria para el funcionamiento de las bacterias desnitrificantes, y la cual solo resulta de ciertos exudados de carbono de las raíces de las plantas o de la presencia de tales componentes en el agua a tratar (Saeed y Sun, 2012). Sumado a lo anterior, otros compuestos cuya remoción se ve favorecida en condiciones aerobias, suelen disminuir en poca proporción porque la única condición oxigenada se

da en la zona rizosférica (Bhattarai, 2005). Lo anterior descrito demuestra la necesidad de intensificar la entrada de oxígeno para propiciar condiciones aerobias, y la necesidad de proveer fuentes externas de carbono para favorecer procesos de desnitrificación. Por lo anterior, en este estudio se propuso como objetivo evaluar el efecto de la adición de oxígeno mediante respiraderos, para acelerar los procesos aerobios, así como la adición de una fuente externa de carbono (pericarpio de cocos nucífera) para acelerar los procesos anaerobios y la presencia/ausencia de vegetación en el tratamiento de las aguas residuales mediante HB domiciliarios horizontales subsuperficiales.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema de tratamiento evaluado se ubicó en el traspatio de una vivienda ubicada en la comunidad de San José Pastorías, perteneciente al Municipio Actopan, Veracruz, México - 96O57'08''N, 19O55'83''S (Figura 1).



Figura 1. Ubicación de San José Pastorías, Actopan, México.

Se establecieron 12 celdas o mesocosmos (1.43 m de largo, 0.24 m de ancho y 0.53 m de profundidad) (Figura 2). Para el relleno de las celdas se utilizaron trozos rugosos o con dobleces con tamaño de entre 2 y 6 centímetros cuadrados de botellas de Tereftalato de Polietileno (PET), principalmente cuellos y bases/fondos de botellas, así como las tapas de Polipropileno (taparrosas) recolectadas en la misma comunidad.

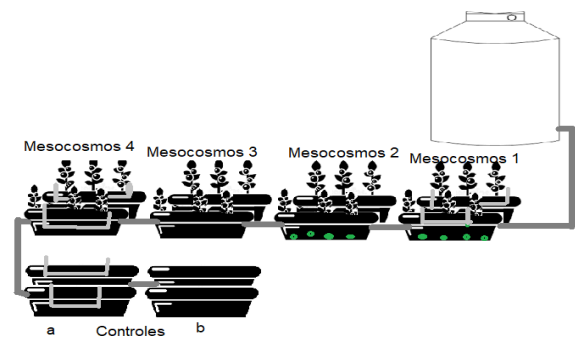


Figura 2. Diagrama y posición de los mesocosmos estudiados. Mesocosmos 1 con aditamentos de fuente de carbono y difusor de oxígeno; mesocosmos 2 solo con aditamento de fuente de carbono; mesocosmos 3 sin aditamentos; mesocosmos 4 solo con difusor de oxígeno; controles a con difusor de oxígeno y sin aditamentos.

Las 12 celdas tienen como sustrato PET y taparrosas; dividiéndose como sigue (Tabla 1):

Para las celdas donde se adicionó fuente externa de carbono, se colocó una capa de mesocarpio de fibra de coco de 10 cm en el fondo de cuatro celdas, (mesocosmos 1 y 2) y sobre esa capa se puso otra de PET de 40 cm; posteriormente se introdujo en dos celdas un tubo de PVC en forma de U (abarcando todo el largo de la celda) con

perforaciones (para la entrada de oxígeno) y finalmente se colocó una capa de 5 cm de ancho de grava volcánica, para evitar olores y la generación de larvas y mosquitos. Las otras dos celdas también con presencia de cáscara de coco no tenían los tubos para la entrada de oxígeno. Las siguientes dos celdas (mesocosmos 3) se llenaron con 50 cm de PET y una capa de grava de 5 cm, solo presencia de plantas sin difusores ni cáscara de coco. Los mesocosmos 4 se rellenaron igual que el 3 pero se le introdujo el tubo de PVC como difusor de oxígeno. Las celdas para los controles se rellenaron con PET y una cubierta de grava de 5 cm y solo a una se le introdujo el tubo de PVC como difusor de oxígeno. La celdas con vegetación incluyeron dos plantas conocidas como banderas (*Canna hybrids*) y dos jengibres rojos (*Alpinia purpurata*).

Tabla 1. Composición de los mesocosmos analizados

Mesocosmos	PET	Plantas	Difusor de oxígeno	Fuente de carbono
1	Si	Si	Si	Si
2	Si	Si	No	Si
3	Si	Si	No	No
4	Si	Si	Si	No
a	Si	No	Si	No
b	Si	No	No	No

Los cuatro mesocosmos fueron sembradas en octubre de 2018 y se realizaron muestreos de agua de manera quincenal durante 13 meses.

Todas las celdas se mantuvieron con un flujo de agua constante combinando el agua residual de la vivienda con agua del río para la estabilización de las plantas, durante los primeros tres meses, con un tiempo de retención hidráulica de tres días y un flujo de 16 ml/min; luego se alimentaron continuamente con solo aguas residuales hasta el final del estudio (390 días). Las aguas residuales utilizadas provienen de duchas, lavado de ropa y cocina. El agua residual se colectó en un tinaco Rotoplas de 1,100 L, que también funcionó como sedimentador (tratamiento secundario) debido a los 5 centímetros de la salida a la base; a este tinaco se le colocó una malla plástica en la entrada para retener los sólidos suspendidos (tratamiento primario). Los humedales actuaron como tratamiento terciario.

Mediciones in situ: Para la caracterización del efluente se elaboró el protocolo de muestreo con el fin de obtener una toma de la salida de cada uno de los mesocosmos que conforman el HB, además de una muestra tomada del tinaco que actuó como sedimentador a la entrada del humedal (afluente), obteniendo en total 13 tomas (2 por cada mesocosmo mas 1 de la entrada) por cada día de análisis. Inmediatamente a la toma de la muestra, se midieron los parámetros de temperatura y SST, para lo cual se utilizó un termómetro-higrómetro digital y un medidor digital de SST (sonda multiparamétrica) de marca HQ40 y cuyos datos se reportaron en formatos de campo. La medición de SST fue considerada porque altos niveles de

este pueden afectar el rendimiento de los sistemas de filtración, y generan efectos nocivos en sistemas ecológicos.

Mediciones de laboratorio: Para la realización de los muestreos se utilizó la metodología señalada por la NMX-AA-003-1980, para la obtención de muestras simples de cada celda del humedal; para el transporte y conservación de las muestras se utilizaron recipientes de plástico de 300 ml, respectivamente marcados y rotulados indicando fecha de muestreo y número de celda del que fue tomado.

Las muestras de agua se analizaron en laboratorio mediante pruebas colorimétricas, para la obtención de los datos de NT. Los porcentajes de eliminación se calcularon a partir de los valores de entrada y los valores de salida obtenidos en los muestreos de los humedales, utilizando la relación correspondiente.

Análisis estadístico: los análisis estadísticos para detectar el efecto de la presencia de vegetación de difusores de oxígeno, así como de la adición de fuente de carbono ante la remoción de contaminantes se realizaron con el software Minitab versión 19.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

SST en la entrada y salida del sistema.

En cuanto a los SST, se obtuvieron valores en la entrada con rangos de entre 29.4 y 79.4 mg/L, la cual generó en promedio 47.5 mg/L durante todo el periodo de estudio. Las máximas

concentraciones detectadas indican ligera contaminación de acuerdo con SEMARNAT (2007), por lo que su disminución resulta pertinente. En los mesocosmos con plantas el promedio de remoción fue de 64.4 % mientras que en los mesocosmos sin plantas el promedio de remoción encontrado fue de 55%, los cuales son mayores a los reportados por Hernández (2016) en donde el rango de remoción de SST fue de entre el 25% y el 43%.

Por otro lado, si se comparan estos resultados con los obtenidos por Sandoval-Herazo (2018), se observan valores similares en las celdas con plantas en donde el rango de remociones fue de entre 52% y 68%, difiriendo en los controles, donde en esa investigación el rango de remoción varió entre el 20.4% y 29%, lo que indica que la vegetación jugó un papel importante como filtro en este proceso.

Y dada la existencia de diferencia estadística entre las medias de los sólidos disueltos totales en los mesocosmos, gráficamente (**Figura 3**) se observa la mayor concentración de este parámetro, contrastado con la entrada, en los controles (mesocosmos sin plantas) y una menor concentración en los mesocosmos con plantas (con carbono + oxígeno, con carbono, sin aditamentos y con oxígeno). Las remociones observadas conllevaron a concentraciones entre 10 y 40 mg/L, señaladas por SEMARNAT (2007) de buena a excelente calidad.

Nitrógeno Total (NT). La **Figura 4**, muestra los resultados de las concentraciones de NT; la entrada del sistema registró en promedio de 10.4 mg/L, y al salir del sistema se obtuvo un promedio de 1.2 mg/L con excepción del mesocosmo 1, donde la concentración promedio fue de 3.4 mg/L, encontrando

diferencias significativas ($p=0.001$) entre este mesocosmo y los demás; por otro lado, la eficiencias de eliminación en el mesocosmos 1 fue de 65%, mientras que en los mesocosmos 2 al 6 en promedio fue del 86%, sin mostrar diferencias entre sistemas con y sin presencia de plantas (mesocosmos 2 al 6).

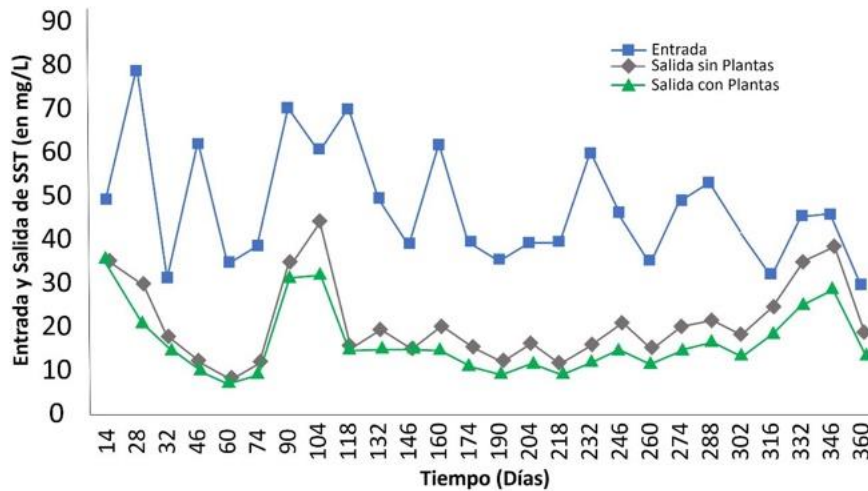


Figura 3. Entradas y salidas promedio de SST durante el periodo de estudio.

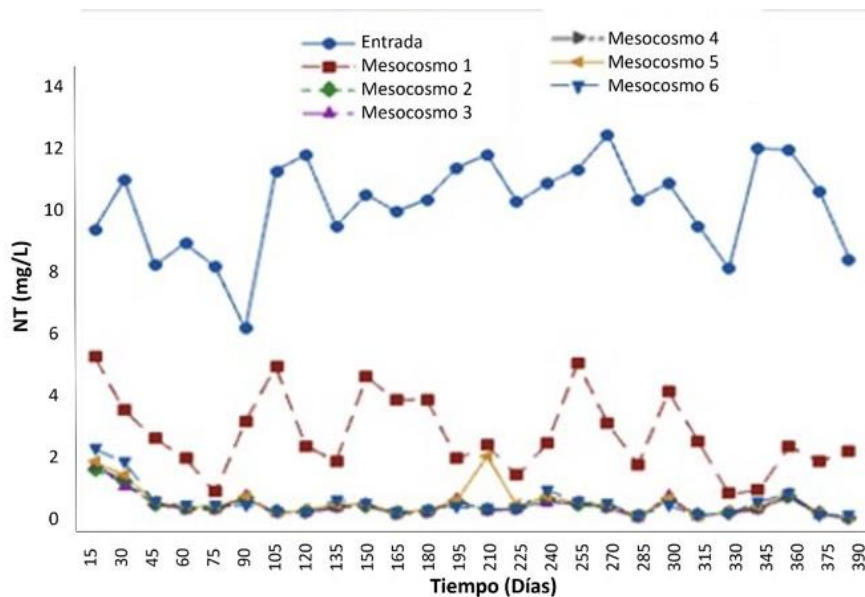


Figura 4 Salida de Nitrógeno Total por mesocosmo

Estos resultados fueron similares a los encontrados por Zamora et al. (2019), quienes no encontraron diferencias significativas entre sistemas con vegetación y sin vegetación y eliminaciones hasta 10% menores que las encontradas en este estudio, en condiciones similares; lo anterior se puede deber a las adiciones de oxígeno y materia orgánica que se desarrollaron en los humedales en estudio. El suministro de oxígeno pudo haber favorecido el proceso de nitrificación, mientras que la fuente de carbono favoreció los procesos de desnitrificación, en conjunto eliminando las concentraciones de nitrógeno.

CONCLUSIONES

Entre los principales hallazgos del presente estudio se tiene que las plantas favorecieron la eliminación de los diversos contaminantes analizados.

La adición de carbono y oxígeno mostró resultados favorables con respecto a la reducción de NT y SST; sin embargo, mostró mayores remociones la utilización de solo el difusor de oxígeno, seguida de la fuente de carbono.

En este estudio, se evaluó el efecto del uso de difusores de oxígeno en la remoción de contaminantes en mesocosmos con plantas, en comparación con mesocosmos sin plantas. Los resultados demostraron que el uso de difusores de oxígeno potenció la remoción de

contaminantes en los mesocosmos con plantas, sugiriendo su implementación en futuros diseños de humedales con el fin de mejorar su eficiencia en la eliminación de contaminantes. Además, las plantas utilizadas en este estudio fueron capaces de adaptarse a las condiciones de los mesocosmos y utilizar los contaminantes para su crecimiento. Por lo tanto, se recomienda el uso de estas plantas ornamentales en HB utilizados para el tratamiento de aguas residuales en comunidades que cuenten con el espacio necesario para su implementación.

REFERENCIAS

- [1] Comisión Nacional del Agua. (2018). Estadísticas del Agua en México. Disponible en http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- [2] Sandoval-Herazo, L. C.; Marín-Muñiz, J.L.; Alvarado, A.; Castelán, R.; Ramírez, D. (2016) Diseño de un mesocosmo de humedal construidos con materiales alternativos para el tratamiento de aguas residuales en la comunidad de pastorías actopan, ver. In Congreso Interdisciplinario de Ingenierías (p.35).
- [3] Comisión Nacional del Agua. (2020). Estadísticas del Agua en México. Disponible en

http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2020.pdf

- [4] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020) “Censo Nacional de Población y Vivienda 2020” Estados Unidos Mexicanos’, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (consultado el 10 de octubre de 2022)
- [5] Zurita-Martínez, Florentina; Castellanos-Hernández, Osvaldo A.; Rodríguez-Sahagún, A. (2011). El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (1), 139–150.
- [6] Marín-Muñiz, J. L. (2017). Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reuso del agua. *Agroproductividad*, 10, 90–95
- [7] Mitsch W.J. y Gosselink J. G. (2007). *Wetlands*. Cuarta edición. Nueva York: Ed. John Wiley and Sons, 581pp.
- [8] Merino-Solís, M. L., Villegas, E., De Anda, J., & López-López, A. (2015). The effect of the hydraulic retention time on the performance of an ecological wastewater treatment system: An anaerobic filter with a constructed wetland. *Water*, 7(3), 1149-1163.
- [9] Marín-Muñiz, J. L., Sandoval Herazo, L. C., López-Méndez, M. C., Sandoval-Herazo, M., Meléndez-Armenta, R. Á., González-Moreno, H. R., & Zamora, S. (2023). Treatment Wetlands in Mexico for Control of Wastewater Contaminants: A Review of Experiences during the Last Twenty-Two Years. *Processes*, 11(2), 359.
- [10] Zurita, F., Tejeda, A., Del Toro, A., Sánchez, M. P., & Martínez, N. B. (2018). Nitrogen removal in pilot-scale partially saturated vertical wetlands with and without an internal source of carbon. *Science of the Total Environment*, 645, 524-532.
- [11] Saeed, T., & Sun, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *Journal of environmental management*, 112, 429-448.
- [12] Bhattarai, S. P., Su, N., & Midmore, D. J. (2005). Oxygenation unlocks yield potentials of crops in oxygen-limited soil environments. *Advances in Agronomy*, 88, 313-377.
- [13] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión

Nacional del Agua. (2007).
Estadísticas del Agua en México.

[14] Hernández Alarcón, M. E. (2016).
Humedales ornamentales con
participación comunitaria para el
saneamiento de aguas
municipales en México. *Revista
Internacional de Desarrollo
Regional Sustentable*, 1(2), 1-12.

[15] Sandoval-Herazo, L. C.,
Alvarado-Lassman, A., Marín-
Muñiz, J. L., Méndez-Contreras, J.
M., & Zamora-Castro, S. A.
(2018). Effects of the use of
ornamental plants and different
substrates in the removal of
wastewater pollutants through
microcosms of constructed
wetlands. *Sustainability*, 10(5),
1594.

[16] Zamora, S., Marín-Muñiz, J. L.,
Nakase-Rodríguez, C.,
Fernández-Lambert, G., &
Sandoval, L. (2019). Wastewater
Treatment by Constructed
Wetland Eco-Technology:
Influence of Mineral and Plastic
Materials as Filter Media and
Tropical Ornamental Plants.
Water, 11(11), 2344.