

**LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y
Humanidades, Asunción, Paraguay.**

ISSN en línea: 2789-3855, 2025, Volumen VI

Diagnóstico operativo de los sistemas para el saneamiento de las aguas residuales mediante humedales construidos en una población de Los Altos de Jalisco, México

Operational diagnosis of wastewater sanitation systems using
constructed wetlands in a town in Los Altos de Jalisco, Mexico

Aldo Antonio Castañeda Villanueva

acastaneda@cualtos.udg.mx
<https://orcid.org/0000-0002-3818-9342>
Universidad de Guadalajara
Tepatitlan, Jalisco – México

Amelia Nayeli López Cerpa

nayeli.lopez@academicos.udg.mx
<https://orcid.org/0009-0009-4503-470X>
Universidad de Guadalajara
Guadalajara, Jalisco – México

Roberto Huerta Orozco

roberto.huerta@academicos.udg.mx
<https://orcid.org/0009-0009-1987-9266>
Universidad de Guadalajara
Guadalajara, Jalisco – México

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v6i3.4196>

Artículo recibido: 25 de junio de 2025

Aceptado para publicación: 21 de julio de
2025.

Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.


Redilat
Red de Investigadores
Latinoamericanos

NÚMERO

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v6i3.4196>

Diagnóstico operativo de los sistemas para el saneamiento de las aguas residuales mediante humedales construidos en una población de Los Altos de Jalisco, México

Operational diagnosis of wastewater sanitation systems using constructed wetlands in a town in Los Altos de Jalisco, Mexico

Aldo Antonio Castañeda Villanueva

acastaneda@cualtos.udg.mx
<https://orcid.org/0000-0002-3818-9342>
Universidad de Guadalajara
Tepatitlan, Jalisco – México

Amelia Nayeli López Cerpa

nayeli.lopez@academicos.udg.mx
<https://orcid.org/0009-0009-4503-470X>
Universidad de Guadalajara
Guadalajara, Jalisco – México

Roberto Huerta Orozco

roberto.huerta@academicos.udg.mx
<https://orcid.org/0009-0009-1987-9266>
Universidad de Guadalajara
Guadalajara, Jalisco – México

Artículo recibido: 25 de junio de 2025. Aceptado para publicación: 21 de julio de 2025.
Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Resumen

Este artículo presenta un diagnóstico operativo de los sistemas de saneamiento mediante humedales construidos en la región de Los Altos de Jalisco, México. Los humedales construidos (HC) representan una alternativa sostenible y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales domésticas al aprovechar procesos físico-químicos y biológicos en los que las macrófitas actúan como biofiltros naturales. Los estudios realizados muestran que estos sistemas pueden reducir significativamente la carga contaminante, alcanzando eficiencias de hasta el 92 % en parámetros como conductividad, nitrógeno, fósforo y demanda química de oxígeno (DQO), con tiempos de retención de aproximadamente cuatro días y temperaturas comprendidas entre los 12 y 25 °C. Su diseño es escalable y adaptable a las condiciones regionales, lo que permite su implementación en comunidades rurales con terrenos adecuados. La operación requiere mantenimiento periódico para evitar obstrucciones y garantizar su eficiencia, especialmente durante las temporadas frías. En conjunto, los HC no solo mejoran la calidad del agua, sino que también generan beneficios económicos, ambientales y sociales, promoviendo dinámicas sostenibles en la región. Esta investigación valida su viabilidad como una estrategia efectiva y ecológica para el saneamiento a nivel local y regional.

Palabras clave: humedales construidos, saneamiento ambiental, remoción de contaminantes, sostenibilidad

Abstract

This article presents an operational diagnosis of sanitation systems using constructed wetlands in the region of Los Altos de Jalisco, Mexico. Constructed wetlands (CW) represent a sustainable and low-

cost alternative for the treatment of domestic wastewater by taking advantage of physicochemical and biological processes in which macrophytes act as natural biofilters. Studies show that these systems can significantly reduce the pollutant load, reaching efficiencies of up to 92% in parameters such as conductivity, nitrogen, phosphorus and chemical oxygen demand (COD), with retention times of approximately four days and temperatures ranging from 12 to 25 °C. Its design is scalable and adaptable to regional conditions, allowing its implementation in rural communities with suitable land. Operation requires periodic maintenance to avoid blockages and ensure efficiency, especially during cold seasons. Overall, HCs not only improve water quality, but also generate economic, environmental and social benefits, promoting sustainable dynamics in the region. This research validates their viability as an effective and ecological strategy for sanitation at the local and regional level.

Keywords: constructed wetlands, environmental remediation, pollutant removal, sustainability

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicado en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons.



Cómo citar: Castañeda Villanueva, A. A., López Cerpa, A. N., & Huerta Orozco, R. (2025). Diagnóstico operativo de los sistemas para el saneamiento de las aguas residuales mediante humedales construidos en una población de Los Altos de Jalisco, México. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 6 (3), 3299 – 3310. <https://doi.org/10.56712/latam.v6i3.4196>

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales es un desafío global que requiere soluciones eficientes, sostenibles y de bajo costo operativo. En este contexto, los Humedales Construidos (HC) han emergido como una alternativa viable para la depuración de efluentes domésticos, industriales y agrícolas, replicando los procesos de filtración y remoción de contaminantes observados en los humedales naturales.

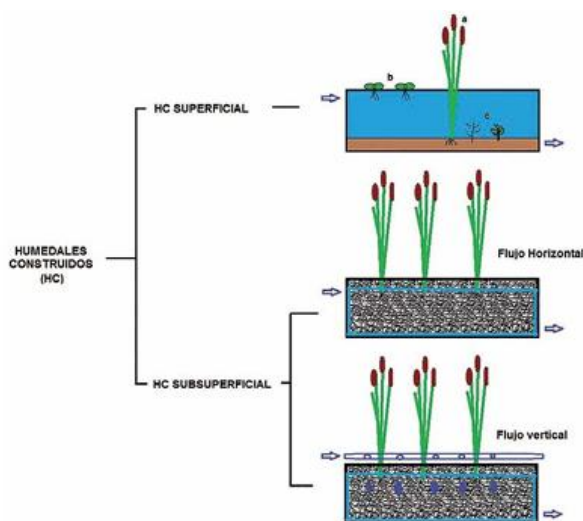
Los HC se fundamentan en procesos fisicoquímicos y biológicos donde la fito-depuración desempeña un papel clave. En estos sistemas, macrófitas emergentes y microorganismos asociados facilitan la absorción, transformación y eliminación de sustancias potencialmente nocivas, mejorando la calidad del agua tratada y minimizando la producción de biosólidos. Además, su diseño puede adaptarse a distintas condiciones climáticas y geográficas, lo que permite su implementación en diversos entornos con una inversión menor respecto a las plantas de tratamiento convencionales.

Las macrófitas, organismos vegetales caracterizados por su desarrollo en medios con saturación de agua, actúan como biofiltros naturales favoreciendo la absorción y metabolización de sustancias potencialmente nocivas.

Los principales tipos de HC utilizados en tratamiento de aguas residuales son: 1) Superficiales y 2) Sub-superficiales, así mismo el flujo en estos sistemas pueden ser: a) horizontal b) vertical y/o c) mixto (figura 1).

Figura 1

Principales tipos de HC para tratamiento de aguas residuales domésticas



Fuente: Marín-Muñiz, 2018.

Los Humedales Construidos Superficiales (HCS) se distinguen por mantener el agua en contacto directo con la atmósfera, replicando las condiciones presentes en los humedales naturales. En esencia, constituyen una variante de los sistemas de lagunas convencionales, con la particularidad de que su instalación debe realizarse sobre terrenos altamente impermeables, con el objetivo de prevenir la infiltración de contaminantes en los mantos freáticos y garantizar la eficiencia del proceso de depuración.

Así mismo, en los Humedales Construidos Sub-superficiales (HCSS), el agua permanece confinada dentro del sustrato y en las raíces de las plantas, sin estar en contacto directo con la atmósfera. En

estos sistemas, las reacciones biológicas ocurren principalmente por la actividad de microorganismos que intervienen en la degradación de contaminantes. Debido a su diseño, los HCSS pueden requerir menos superficie en comparación con los Humedales Construidos Superficiales (HCS) para tratar volúmenes equivalentes de aguas residuales.

Estructuralmente, estos sistemas consisten en canales de poca profundidad, con un sustrato diseñado para favorecer el crecimiento de macrófitas emergentes, cuyos sistemas radiculares desempeñan un papel clave en la depuración del agua. Además, la cobertura vegetal proporciona sombra, lo que limita el desarrollo de algas y contribuye a la estabilidad del ecosistema (Mitsch & Mander, 2018).

Desde el punto de vista técnico y operativo, los HC presentan múltiples ventajas respecto a las plantas de tratamiento tradicionales, de entre las cuales los aspectos más relevantes destacan:

Sus requerimientos de electricidad, equipos mecánicos y personal capacitado son mínimos.

Los costos de construcción, operación y mantenimiento son considerablemente menores.

Pueden ser utilizados como tratamientos complementarios, cuando las condiciones climatológicas como la temperatura sean adecuadas.

La producción de biosólidos (lodos orgánicos) es mínima, por lo que se reduce la necesidad de gestión y disposición de residuos secundarios.

Presentan alta tasa para la remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), metales y compuestos orgánicos, requiriendo según las condiciones climatológicas, Tiempos de Retención Hidráulico (TRH), sin embargo, para la disminución del contenido de Nitrógeno y Fósforo se requiere de TRH mayores (Mander et al., 2021).

Menor impacto ambiental asociado a vectores biológicos debido a la ausencia de contacto directo entre el agua y la atmósfera por lo que los HCSS minimizan la proliferación de mosquitos y otros organismos acuáticos.

A pesar de sus ventajas operativas y económicas, los HC presentan desafíos técnicos asociados a la acumulación de contaminantes en el sustrato y la reducción de eficiencia en climas fríos. No obstante, su implementación sigue siendo una opción viable para el saneamiento ambiental, especialmente en regiones con acceso limitado a infraestructura convencional.

La investigación y optimización de estos sistemas continúan evolucionando, ofreciendo oportunidades para mejorar su rendimiento y ampliar su aplicabilidad en el contexto de una gestión hídrica más sostenible.

METODOLOGÍA

En este estudio se evaluaron dos sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante HC recientemente instalados (Agosto/2023) en la región Altos-Norte, del estado de Jalisco, México.

Los sistemas para el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico mediante HCSS, se instalaron en el municipio de San Diego de Alejandría (SDA), cuya cabecera municipal se encuentra en las coordenadas 20°59'29.76" latitud norte y 101°59'24.00" de longitud oeste, a una altura de 1,939 metros sobre el nivel del mar (msnm), colinda al norte con el municipio de Unión de San Antonio, al sur con el municipio de Arandas, al este con el estado de Guanajuato y al oeste con el municipio de San Julián. La mayor parte del municipio tiene un clima semicálido/semihúmedo, la temperatura media anual es de 18.1°C, y su temperatura mínima y máxima promedio oscila entre los 6.1°C y 29.37°C, la precipitación media anual es de 718 milímetros (mm) mientras que la precipitación promedio

acumulada es de 605.54 mm (IIEG, 2023). Según el Censo de Población, en el 2020 la población en la cabecera municipal era de 6,025 habitantes (INEGI, 2023).

Las principales fuentes de agua en el municipio son subterráneas y superficiales, su territorio se encuentra ubicado dentro de 3 acuíferos, de los cuales el 100 % no tienen disponibilidad ya que están sobreexplotados, así mismo el 83.4 % de los ríos y embalses presentan déficit de disponibilidad (CONAGUA, 2021). Las aguas residuales colectadas en la cabecera municipal de SDA, ascienden a más de 8.5 litros por segundo (lps), divididos en dos colectores; uno con capacidad para 1.5 lps y otro para 7 lps, ambos colectores descargan por gravedad en dos predios diferentes localizados en la periferia de la zona urbana de la población de SDA (figuras 2 y 3).

Figura 2

Laguna de captación para las aguas residuales en la población de SDA (1.5 lps)



Fuente: elaboración propia.

Figura 3

Laguna de captación para las aguas residuales en la población de SDA (7 lps)



Fuente: elaboración propia.

En estos predios se instalaron los dos sistemas de tratamiento mediante HCSS de flujo horizontal (tabla 1), iniciando operación en agosto del 2023, los cuales se encuentran conformados por:

Pre-tratamiento: para la separación y retención de sustancias ligeras (grasas, aceites, plásticos, entre otros) por flotación, y de materiales pesados (metales, arenas, etc...) por sedimentación.

Celda con geo-membrana para el HCSS: con tezontle rojo como sustrato y especímenes de plantas endémica de la región como el tule (*Typha latifolia*).

Pos-tratamiento: conformado por la etapa de cloración y un embalse con geo-membrana para estabilización microbiológica.

Tabla 1

Descripción de los sistemas de tratamiento mediante HCSS evaluados

Clave	Capacidad (litros por segundo)
HC1	1.5
HC2	7.0

Fuente: elaboración propia.

Los principales parámetros analizados fueron Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno Total (Nt), Fósforo Total (Pt) y Conductividad Específica (CE), evaluados tanto en la entrada como en la salida de cada sistema, con el propósito de determinar los porcentajes de reducción de cada contaminante.

Para la toma de muestras de agua y la ejecución de los análisis en laboratorio, se siguieron los protocolos y metodologías establecidos en la normatividad oficial vigente en México, así como las recomendaciones técnicas del Manual de Métodos Estándar para el Análisis de Aguas y Aguas Residuales (APHA, 2017).

Las mediciones se realizaron con equipos de la marca HACH, incluyendo el medidor portátil SensION+ EC5 con sonda 5060 (Figura 4), el reactor digital DRB200 y el fotómetro DR 2800 (Figura 5).

Figura 4

Medidor portátil modelo Sension+ EC5.



Fuente: HACH, 2018.

Figura 5

Espectrofotómetro DR-2800



Fuente: HACH, 2018.

Estos procedimientos garantizan la fiabilidad y precisión de los resultados obtenidos, asegurando que las mediciones reflejan con exactitud la calidad del agua analizada. La aplicación de estándares reconocidos y el uso de tecnología especializada permitieron una evaluación rigurosa de los parámetros clave, proporcionando datos sólidos para la interpretación y comparación de la eficiencia del sistema de tratamiento.

RESULTADOS

Durante el período de muestreo, los tiempos de retención hidráulica (TRH) en ambos sistemas de tratamiento oscilaron entre 2.5 y 4 días, asegurando un contacto prolongado del agua residual con los procesos fisicoquímicos y biológicos propios de los humedales construidos. Este intervalo de retención es fundamental para la remoción efectiva de contaminantes, ya que permite que los microorganismos y las macrófitas actúen en la degradación de materia orgánica y en la adsorción de nutrientes.

Las condiciones ambientales durante el estudio fueron relativamente estables, con una temperatura promedio de 22°C, la cual favorece la actividad biológica dentro de los sistemas de humedales. La humedad relativa promedio del 45% también contribuyó a la eficiencia del proceso, manteniendo un equilibrio adecuado entre la evapotranspiración y la dinámica del flujo hídrico.

Los muestreos y análisis de laboratorio se llevaron a cabo entre mayo y junio de 2024, con la finalidad de evaluar el desempeño de los sistemas de tratamiento en condiciones climáticas típicas de la temporada. Se aplicaron metodologías estandarizadas para la toma de muestras y la determinación analítica de los parámetros clave, garantizando la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados.

La evaluación de la calidad del agua incluyó mediciones tanto en la entrada (agua cruda) como en la salida (agua tratada) de cada sistema, permitiendo la comparación directa de los valores obtenidos y el cálculo de los porcentajes de reducción de cada contaminante. Estos resultados, organizados en Tabla 2, proporcionan evidencia cuantitativa sobre la eficiencia de los humedales construidos en la remoción de carga orgánica, sólidos suspendidos y nutrientes, contribuyendo a la validación científica de estos sistemas como alternativas viables para el tratamiento de aguas residuales.

Tabla 2

Resultados de las evaluaciones paramétricas y porcentajes de reducción en los HCSS

Parámetro (unidad)	DQO (mg/L)			Nt (mg/L)			Pt (mg/L)			CE (µS/cm)		
	E	S	%R	E	S	%R	E	S	%R	E	S	%R
HC1	464	22	95.26	47	13	72.34	4.1	1.1	73.17	1148	110	90.42
HC2	917	175	80.92	68	28	58.82	10.6 5	5.18	51.36	1188	236	80.13
Referencia		120			15			5			250	

Nota: E=Entrada, S=Salida, %R=Porcentaje de reducción.

Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN

La efectividad en la remoción de contaminantes observada en los sistemas de tratamiento 1 (Figura 6) y 2 (Figura 7) es consistente con estudios previos realizados en la región, lo que respalda la eficacia de los humedales construidos (HC) como alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales. Particularmente, los resultados obtenidos presentan similitudes con los HC implementados en Ojo Zarco (municipio de Jesús María) y Martínez Valadez (municipio de Arandas), los cuales emplean macrófitas y tezontle como sustrato, logrando notables niveles de depuración.

En estos sistemas, los tiempos de retención hidráulica promedian 4.4 días, operando bajo un rango de temperaturas de 12 a 25°C. Los niveles de reducción de contaminantes alcanzan 75-92% en Conductividad Específica (CE), 72-88% en Nitrógeno Total (Nt), 63-82% en Fósforo Total (Pt) y 50-86% en Demanda Química de Oxígeno (DQO) (Castañeda, 2021). Estos resultados demuestran la capacidad de los HC para eliminar carga orgánica y sustancias nocivas, favoreciendo la recuperación de la calidad del agua a través de procesos de fito-depuración.

Figura 6

Sistema de tratamiento HC1 en SDA



Fuente: elaboración propia.

Figura 7

Sistema de tratamiento HC2 en SDA



Fuente: elaboración propia.

Más allá de su impacto ambiental, los HC han despertado interés en diversas áreas del conocimiento. Escalante y colaboradores (2022) destacan que estos sistemas no solo contribuyen a la gestión eficiente del recurso hídrico, sino que también generan nuevas dinámicas económicas y culturales. Su integración con Plantas Tratadoras de Aguas Residuales (PTAR) permite explorar la fitorremediación como una estrategia complementaria para mejorar la calidad del agua tratada. Además, la transformación de materia residual en energía abre oportunidades para su aprovechamiento en sectores estratégicos, posibilitando la creación de mercados emergentes en comunidades rurales y regiones con limitados recursos, lo que fortalece su potencial en países de Latinoamérica.

La implementación de humedales construidos en programas de saneamiento ambiental y desarrollo regional ofrece un enfoque multidimensional, combinando beneficios ecológicos, económicos y sociales. A medida que avanza la investigación en este campo, su adopción y optimización pueden consolidarse como una solución eficaz para la gestión sostenible del agua residual, con aplicaciones a gran escala en territorios que requieren estrategias adaptadas a sus condiciones locales.

CONCLUSIÓN

El presente estudio evidencia reducciones significativas en todos los parámetros evaluados, destacando la eficiencia del sistema de tratamiento HC1, el cual mostró los mejores rendimientos operativos y el cumplimiento con la normatividad vigente en México (NOM-003-SEMARNAT-1997). Estos resultados confirman la viabilidad y efectividad de los humedales construidos (HC) como una alternativa de saneamiento sostenible para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Desde una perspectiva económica y ambiental, los HC representan una solución rentable y ecológica, especialmente para poblaciones rurales con disponibilidad de terrenos adecuados y condiciones climáticas favorables. Su implementación requiere bajos costos de instalación y operación, en comparación con los sistemas de tratamiento convencionales, además de minimizar el consumo energético y la producción de lodos residuales.

A pesar de estas ventajas, es fundamental considerar la importancia del mantenimiento regular para garantizar la eficiencia del proceso. Las actividades clave incluyen la extracción de sedimentos y materiales flotantes en las etapas de pre-tratamiento, así como la remoción periódica de biomasa y vegetación excesiva dentro de las celdas de los humedales. Estas acciones permiten evitar obstrucciones en el flujo del agua, optimizando los tiempos de contacto y asegurando una adecuada depuración, especialmente en temporadas de bajas temperaturas, cuando la actividad biológica puede disminuir.

En síntesis, los humedales construidos representan modelos reproducibles y escalables, con viabilidad demostrada en términos económicos y ambientales. Su aplicación es especialmente pertinente para comunidades con acceso limitado a infraestructura convencional, proporcionando una alternativa eficaz y sostenible para el manejo de aguas residuales. La optimización de estos sistemas, a través de la investigación y el monitoreo continuo, puede contribuir significativamente a mejorar la gestión hídrica y la conservación del entorno natural.

REFERENCIAS

APHA. 2017. "Standard methods for the examination of water and wastewater". American Public Health Association. EPA, Washington DC, USA.

Castañeda, A. 2021 "Evaluación de Humedales Construidos en Los Altos de Jalisco: Los casos de Jesús María (Ojo Zarco) y Arandas (Martínez Valadez). En Revista Latinoamericana el Ambiente y Ciencias, BUAP. México. disponible <https://rlac.baup.mx/sites/default/files/2012%2830%29-6pdf> [Consultado: 15 de mayo, 2024].

CONAGUA., 2021. "Estadísticas del Agua en México". Disponible en: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf> [Consultado: 28 mayo, 2024].

Delgadillo, O.; Camacho, A.; Pérez, F.; Andrade, M., 2010. "Depuración de Aguas Residuales por medio de Humedales Artificiales". Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). Bolivia.

Escalante, S.; Fajardo, J., 2022. "Evaluación de la descontaminación de la cuenca media del río Bogotá y alternativas de solución con humedales artificiales". *Inventum*, vol. 17, n.º 33, pp. 27-43, julio - diciembre 2022 doi: 10.26620/uniminuto.inventum.17.33.2022.27-43

Fernández, J.; De Miguel, E.; De Miguel, J.; Curt, M., 2014. "Manual de Fitodepuración". Filtros de macrofitas en flotación. Proyecto LIFE. Universidad politécnica de Madrid. Disponible en: https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2020/01/manual_fitodepuracion.pdf [Consultado: 15 junio, 2024].

HACH, 2018. "Catálogo de productos y accesorios". Disponible en: <https://latam.hach.com/quick.search-download.search.jsa?keywords=DR2800> [Consultado: 28 mayo, 2024].

IIEG, 2023. "Municipios de Jalisco". Disponible, San Diego de Alejandría. Disponible en: <https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2023/08/San-Diego-de-Alejandr%C3%ADa-1.pdf>. (<http://www.municipios.mx/jalisco/san-diego-de-alejandria/>) [Consultado: 12 mayo, 2024].

INEGI, 2023. "Censo de Población y Vivienda 2010 y 2020". Fuente IIEG en base a INEGI. Disponible en: https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/jal/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=14 [Consultado: 12 junio, 2024].

Kadlec, R.; Wallace, S., 2009. "Treatment Wetlands". 2da ed. CRC Press. USA.

Mander, Ü.; Tournebize, J.; Espenberg, M.; Chaumont, C.; Torga, R.; Garnier, J.; Soosaar, K. 2021. "High denitrification potential but low nitrous oxide emission in a constructed wetland treating nitrate-polluted agricultural run-off". *Science of the Total Environment*, 779, 146614.

Marín-Muñiz, J. 2018. "Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reúso del agua". *Agroproductividad: Vol. 10, Núm. 5*, pp: 90-95. Academia en Desarrollo Regional Sustentable, Colegio de Postgraduados. El Colegio de Veracruz, México. <https://core.ac.uk/download/pdf/249320799.pdf>

Mitsch, W.; Mander, U. 2018 "Wetlands and carbon revisited". *Ecological Engineering*, Volume 114, pp 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.027>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857417306602>)

Norma Oficial Mexicana. NOM-003-SEMARNAT-1997. "Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público". Normas Oficiales Mexicanas SEMARNAT-CONAGUA.
<https://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/sgaa-15-13.pdf>

Todo el contenido de **LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades**, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons

