

DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA CON HUMEDALES CONSTRUIDOS SEMBRADOS CON POLICULTIVOS DE DIFERENTES DENSIDADES DE PLANTAS ORNAMENTALES

WASTEWATER TREATMENT FROM THE DAIRY INDUSTRY WITH CONSTRUCTED WETLANDS PLANTED WITH POLY CULTURES OF DIFFERENT DENSITIES OF ORNAMENTAL PLANTS

José Luis Marín Muñiz¹, Sergio A. Zamora Castro² y Damaris González Rivadeneyra³

SUMARIO: 1. Introducción, 2. Materiales y métodos, 2.1 Área de estudio, 2.2 Tratamientos en estudio, 2.3 Análisis de agua, 2.5 Análisis estadístico, 3. Resultados y discusión, 3.1 Parámetros físico-químicos, 3.2 Remociones de DQO y DBO₅, 4. Conclusiones, 5. Fuentes de consulta

RESUMEN

Las descargas de lactosuero en ríos, por la industria láctea, es un problema de contaminación por su alto contenido de materia orgánica que afecta la biodiversidad. Este estudio analizó el uso de humedales construidos de flujo subsuperficial sembrados con policultivos de plantas ornamentales (*Canna hibryds* y *Alpinia purpurata*) en dos diferentes densidades (4 y 6 plantas) y comparados con sistemas sin vegetación (controles), para remover DQO y DBO₅. Se detectó un efecto significativo respecto a la densidad de plantas comparado con los controles. Con altas concentraciones de DQO (1292-2796 mg/L) y DBO₅ (600-980 mg/L), se

ABSTRACT

The discharge of cheese whey wastewater into rivers by the dairy industry is a pollution problem due to its high content of organic matter, affecting biodiversity. This study analyzed the use of subsurface constructed wetlands planted with polycultures of ornamental plants (*Canna hibryds* and *Alpinia purpurata*) at two different densities (4 and 6 plants) and compared with systems without vegetation (controls), to remove COD and BOD₅. A significant effect was detected regarding plant density compared to controls. With high concentrations of COD (1292-2796 mg/L) and BOD₅ (600-980 mg/L), average removals of 81.9-83.3 % of COD, and 77.6-92.6 % of BOD₅ were

¹ Doctor en Ecología Tropical por la Universidad Veracruzana. Profesor-investigador de tiempo completo de El Colegio de Veracruz. Líneas de investigación: ingeniería ecológica, uso de ecotecnologías para mejorar la calidad ambiental y sus implicaciones sociales. <https://orcid.org/0000-0002-7814-8449>

² Doctor en Ingeniería por la Universidad Autónoma de Querétaro. Profesor de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería, Construcción y Hábitat. Universidad Veracruzana, Boca del Río, Ver., México. Líneas de investigación: mecánica de suelos, ingeniería civil y ambiental. <https://orcid.org/0000-0002-5237-6320>

³ Ingeniero Químico por la Universidad Veracruzana y Maestrante en Desarrollo Regional Sustentable en El Colegio de Veracruz. Líneas de investigación: ingeniería ecológica y sustentabilidad. <https://orcid.org/0009-0002-4624-8143>

observaron remociones promedio de 81.9-83.3 % de DQO, y 77.6-92.6 % de DBO_5 en tratamientos con 4 y 6 plantas, respectivamente. Los sistemas control mostraron remociones inferiores al 50 %, indicando que la remoción principal fue por fitorremediación. Las diferentes densidades de vegetación no fueron estadísticamente diferentes ($p \geq 0.05$), por lo que su uso como policultivos es sugerido para tratar lactosuero.

PALABRAS CLAVE: lactosuero, biorremediación, fitorremediación, soluciones basadas en la naturaleza.

observed in treatments with 4 and 6 plants, respectively. The control systems showed removals of less than 50 %, indicating that the main removal was by phytoremediation. The different vegetation densities were not statistically different ($p \geq 0.05$), so their use as polycultures is suggested to treat whey.

KEYWORDS: cheese whey wastewater, bioremediation, phytoremediation, nature-based solutions.

1. INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico es indispensable para la sobrevivencia humana; sin embargo, el crecimiento poblacional ha conllevado a mayor demanda del vital líquido tanto para consumo humano, la agricultura y la industria. Lo anterior ha resultado en escasez de agua para consumo y un incremento excesivo en las descargas de las aguas residuales a ríos y océanos, sin ningún tratamiento previo.

En México, son reportadas 757 cuencas hidrológicas con las que se administran las aguas superficiales nacionales; el problema se acentúa cuando a muchas de estas cuencas son descargadas aguas residuales por la escasa infraestructura de sistemas de tratamiento. CONAGUA (2022) reporta que, de las aguas colectadas, existe una cobertura de saneamiento

municipal del 67.5 %, y solo del 25.3 % para el sector industrial, lo cual demuestra una problemática latente que requiere atención prioritaria.

Cuando las aguas residuales son descargadas a los ríos, los contaminantes alteran las condiciones naturales del ecosistema, generando muerte de flora y de fauna, problemas de eutrofización; entrada excesiva de nitrógeno y fósforo que favorece el crecimiento masivo de algas y de disminución de oxígeno para los peces. Además de un recurso líquido ineficiente para el aprovechamiento humano y consumo de los animales, que pone en vulnerabilidad la supervivencia.

En términos industriales, específicamente de la industria láctea, esta genera productos de alto consumo como el yogurt, requesón y múltiples tipos de queso, cuyas aguas

de residuo o subproducto es conocido como lactosuero, y este es descargado, muchas veces, directamente al río sin previo tratamiento. En dicho espacio, el lactosuero se combina con las aguas negras municipales que también son descargadas y que incrementan la contaminación, lo cual resulta en un foco de posibles enfermedades para los propios humanos.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), el queso es uno de los principales productos alimenticios alrededor del mundo. En términos generales, los efluentes del queso (lactosuero) tienen valores de contenido orgánico medido como DQO de 800 a 1020 mg/L, mientras que medido como DBO5 su rango va de 60 a 600 g/L, lo cual revela concentraciones altamente tóxicas para los seres vivos si estos son descargados a otras fuentes de agua como ríos u océanos (Carvalho et al. 2013).

A nivel nacional, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en su artículo 4 describe que toda persona tiene derecho a un ambiente sano para su desarrollo y bienestar, y que es el Estado quien lo garantizará. Sumado a lo anterior, el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 (PND, 2019) contempla construir un país con bienestar, privilegiando a las clases más desprotegidas y en apego a la justicia social. Con lo anterior queda claro que se visibiliza el deterioro ambiental con estrategias para avanzar hacia un mejor uso de los recursos; sin embargo, en materia de agua, la problemática se enfatiza como una consecuencia de la demanda de recursos

por el incremento poblacional y la actividad industrial, para también complacer las necesidades humanas.

Con dichas problemáticas de polución, es oportuna la búsqueda de alternativas ecológica y económicamente viables para atenderlo. Una de ellas surge a partir de las soluciones basadas en la naturaleza, que son los humedales construidos o también conocidos como humedales de tratamiento (HC), los cuales son celdas impermeables con un sustrato, vegetación sembrada en tal sustrato, en donde se hace pasar el agua a tratar. Bajo esas condiciones se desarrolla un conjunto de microorganismos o películas microbianas que mediante procesos físicos, químicos y biológicos favorecen la remoción de contaminantes (Mitsch y Gosselink 2023; Marín-Muñiz et al. 2023). Dichos sistemas son considerados una innovación tecnológica que aún requiere mayor difusión para que se atiendan los problemas de contaminación (Fernández, 2023).

En un estudio de revisión sobre el uso de HC en México, Marín-Muñiz et al. (2023b) encontraron que al menos 67 estudios en México se han implementado para tratar aguas residuales; aunque de estos, un 18 % corresponde a estudios de investigación a nivel microcosmos (<0.99 m²; unidades experimentales a pequeña escala donde se simulan condiciones de un sistema mayor para procesos de investigación), 30 % a sistemas a nivel mesocosmos (área de 1 a 1.99 m²), 25 % de HC a escala piloto (área de 2 a 19.99 m²) y 27 % a HC a escala amplia, cuyo tamaño es mayor a los 20 m², tratando ya aguas residuales comunitarias o municipales y construidos en el sitio

donde se está generando el problema de contaminación. Esto demuestra la utilidad que ya se hace de tal alternativa, a pesar de que esta surgió desde los años 70 del siglo XX en países europeos. Tal estrategia ya representa un 8.25 % de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en México, de acuerdo a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2020).

Varios son los estudios que demuestran remociones de compuestos orgánicos entre 60-90 % al ser tratados con dicha ecotecnología, aunque la mayoría de tales estudios han sido realizados tratando aguas residuales domésticas o municipales (Marín-Muñiz et al., 2020; Sandoval et al. 2023; Romellón et al. 2023), pocas investigaciones se han hecho tratando aguas residuales de la industria láctea (Sultana et al., 2015) y aún menos considerando en los HC vegetación ornamental la cual, además de hacer a los sistemas más estéticos, resulta en un subproducto comercial del tratamiento.

Sumado a lo anterior, se enfatiza también que el uso de HC en México se ha dado en mayores casos a nivel laboratorio o a escala de microcosmos como parte de proyectos de investigación de tesis y analizando condiciones de diseño o de adaptación de plantas en estos sistemas (García-García et al. 2016). Desafortunadamente, aún son pocos los proyectos con HC atendiendo problemas reales y aún menos los que exploren nuevos sustratos reutilizados y económicos como los residuos plásticos, que en este estudio se mezclan con materiales minerales, y aún menos contemplando diferentes densidades de policultivos de plantas ornamentales.

Por lo anterior, este estudio tuvo como objetivo analizar la funcionalidad de humedales construidos sembrados con plantas ornamentales florales en la depuración de aguas de lactosuero respecto a la materia orgánica medida como DBO_5 y DQO.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la comunidad de San José Pastorías, municipio de Actopan, Veracruz, en la zona central del estado de Veracruz (552 habitantes; INEGI, 2010) a los $19^{\circ}33'53''N$, $96^{\circ}34'16''O$, a una altitud de 260 msnm. Tal población fue considerada porque ahí ya había instalados HC operando desde 2017; en este caso, el HC estudiado se ubica en el jardín de una casa, más detalles del humedal se describen en Marín-Muñiz et al. (2020). Cabe señalar que el sistema inicialmente trataba aguas residuales domiciliarias, pero para este estudio se cambió a las aguas industriales colectadas de la zona de Naolinco, región altamente productora de queso. Para el arranque del sistema se mantuvieron tres meses previos con flujo de las aguas de lactosuero, el cual se ha mantenido de manera continua.

2.2 Tratamientos en estudio

El humedal construido (HC) de flujo subsuperficial estudiado se basó en 6 celdas ($1.5 \times 0.3 \times 0.8$ m) de concreto de flujo subsuperficial horizontal (Figura 1). Todas las celdas fueron rellenas con tres capas. La primera capa, de abajo hacia arriba (20 cm), fue de piedra porosa de río, con un diámetro de 5-10 cm. La segunda capa, de 40 cm, consistió de residuos de plástico con ranuras o dobleces como taparrosas

(polipropileno) y plástico PET (tereftalato polietileno), para el caso de los cuellos de botellas y bases con dobleces de las botellas. Sobre el relleno de plástico, una capa de 20 cm de grava volcánica, también conocida como tezontle, fue colocada con un diámetro promedio de 2 cm. De los 0.8 m de altura de la celda, 0.7 m permanecían en flujo subsuperficial, los otros 0.1 m eran la primera capa de arriba donde no había agua.

En promedio, la porosidad del material filtrante fue del 50 %. Las celdas con vegetación en policultivo de baja densidad de plantas incluyeron dos celdas sembradas con 2 plántulas de *Canna hybrid* más 2 plántulas de *Alpinia purpurata*. Otras dos

de 1100 L, el cual a la vez funcionó como sedimentador (tratamiento primario) y posteriormente se hacía llevar por gravedad mediante tuberías a las celdas del HC como tratamiento secundario, manteniendo un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 3 días y un flujo longitudinal de 20 mL/min.

2.3 Análisis de agua

Durante 5 meses se analizó mensualmente la funcionalidad de las celdas del HC de acuerdo a parámetros físico-químicos, tomando 250 mL de muestra a la entrada y salida de las celdas. Se analizó en laboratorio la cantidad de materia orgánica presente, medida como demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno

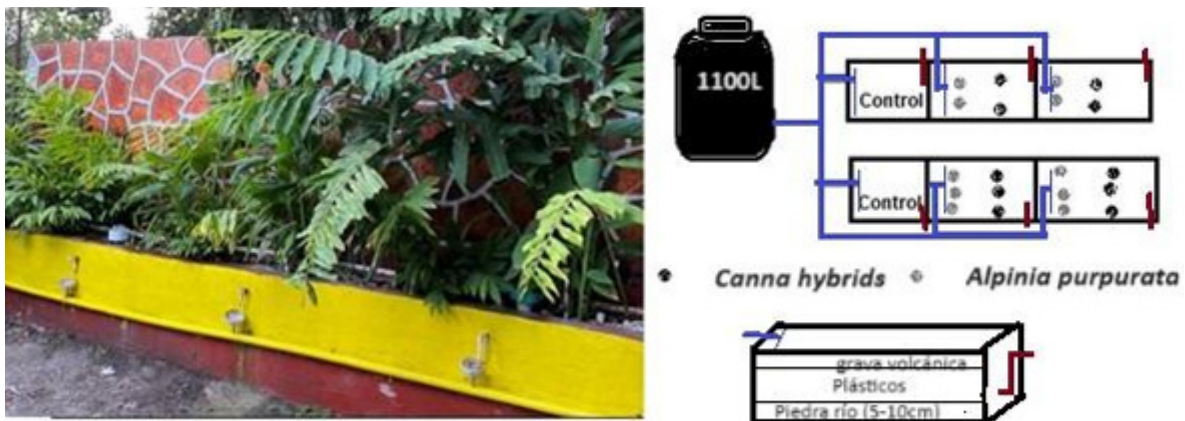


Figura 1. Esquema de los humedales en estudio. Fuente: elaboración propia. Las líneas azules gruesas son de distribución del agua a tratar, las líneas delgadas son los difusores del agua de entrada y las líneas cafés son la tubería de salida del agua tratada.

celdas, pero con alta densidad de plantas, fueron con 3 plántulas de *Canna hybrid* más 3 plántulas de *Alpinia purpurata*. Las últimas 2 celdas permanecieron como controles, sin presencia de vegetación.

El agua de tratamiento fue colectada de la descarga industrial de la industria quesera de Naolinco, Veracruz, México y se almacenaba en un tanque colector

(DBO_5) en cada una de las muestras. Los análisis de DQO y DBO_5 se realizaron mediante espectrofotometría (HANNA meter). En el caso de los parámetros físico-químicos como pH, conductividad eléctrica (CE) y oxígeno disuelto, se analizaron mediante un medidor multiparamétrico portátil marca HANNA. Para conocer el porcentaje de remoción de DQO de los humedales, se comparó la concentración

de estos en el agua antes de entrar a los HC (Q1) y analizando su concentración en el agua una vez saliendo de las celdas (Q2) de tratamiento. Con tales datos, se utilizó la siguiente fórmula: % remoción = $((Q1 - Q2) / Q1) * 100$.

2.4 Análisis estadístico

Para la comparación estadística entre los valores de remoción de DQO y DBO₅, se utilizó el programa SPSS versión 20 para Windows. Un ANOVA de una vía fue utilizado para la prueba con un análisis post-hoc de Tukey considerando un valor de $p = 0.05$ para revelar la significancia estadística de las estimaciones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Parámetros físico-químicos

En los sistemas en estudio, se detectó una temperatura ambiental en un rango entre los 26-35 °C, típico de zonas tropicales. Respecto al pH detectado en las muestras de agua, se observó un promedio en las entradas de los sistemas control y en los tratamientos con baja y alta densidades de plantas de 5.46 (Tabla 1) igual, dado que era la misma agua en el tanque contenedor que alimentaba a todas las celdas. Mientras que, a la salida de las celdas, los valores promedio tuvieron un ligero incremento de 6.24 a 6.38, observado en los sistemas con presencia de vegetación, probablemente debido a la oxidación biológica originada por la liberación de oxígeno que realizan las plantas a través de las raíces (Sánchez-Olivares et al. 2019).

En cuanto a la conductividad eléctrica (CE) del agua (Tabla 1), que es definida como una medida de la capacidad de esta para

transportar la corriente eléctrica y está relacionada con la concentración de las sales y iones en disolución (Solís-Castro et al. 2018), se encontró un valor promedio a la entrada de 886 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Mientras que a la salida de las celdas de los humedales control, con baja y alta densidades de plantas, los valores promedio detectados fueron de 1646, 1850 y 1715 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Tal incremento detectado alude a la posible presencia de sales en el agua y que se sedimenta entre el material de filtro (Carvalho et al., 2013). Así mismo, ha sido reportado que las plantas tienen la capacidad de absorber y transportar agua y sales minerales desde la raíz hasta el xilema, pudiendo realizar funciones de nutrición y favoreciendo cambios de conductividad (González et al. 2015).

Otro de los parámetros analizados fue la concentración de oxígeno disuelto (Tabla 1), de la cual no se observaron variaciones extremas entre las entradas y salidas de las celdas de los controles (0.2 mg/L mayor), mientras que en las celdas con plantas la variación fue mayor (0.34-0.46 veces más alto), lo cual está relacionado con la adición natural de oxígeno por parte de la vegetación. La respiración en las plantas es un proceso oxidativo controlado por diferentes vías metabólicas, con el fin de evitar situaciones de baja disponibilidad de energía aún en situaciones de bajas concentraciones de oxígeno como sucede en los humedales al estar las celdas saturadas de agua. A través del tejido epidérmico se posibilita la difusión del oxígeno al interior de la vegetación, para que ocurra la respiración celular y lo cual ayuda a llevar el oxígeno hasta la zona de

sustrato adyacente entre la raíz y el sustrato constante de estas concentraciones puede ser una amenaza permanente. (rizósfera) (Moreno et al. 2020).

Tabla 1. Parámetros físico-químicos en los humedales.

Parámetro	Tipo de datos	HC control		HC densidad baja de plantas		HC densidad alta de plantas	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
pH	Promedio	5.46±0.95	6.38±1.1	5.46±1.2	6.24±1.5	5.46±1.1	6.26±1.5
	Máximo	7.42	6.91	5.92	6.85	7.21	7.42
	Mínimo	4.85	4.52	3.52	5.42	4.92	6.11
Conductividad eléctrica (µS/cm)	Promedio	886±246	1646±321	886±231	1850±329	886±198	1715±254
	Máximo	1056	1824	1246	2245	1243	2424
	Mínimo	625	985	801	1105	746	1237
Oxígeno disuelto (mg/L)	Promedio	4.620.28±	4.64±0.22	4.62±0.91	4.96±1.0	4.62±0.98	5.08±1.3
	Máximo	4.99	5.2	5.16	5.39	5.02	5.64
	Mínimo	3.21	3.99	3.12	4.18	2.99	4.26

3.2 Remociones de DQO y DBO₅

Por otro lado, durante el análisis de las muestras de entrada del agua, se detectó un contenido de materia orgánica medida como DQO que osciló entre 1292 hasta 1800 mg/l, indicando un problema extremo de contaminación si tales aguas fueran descargadas a otras fuentes, alterando las condiciones de vida de los ecosistemas y siendo un foco de posibles infecciones para humanos y animales, de acuerdo con valores de calidad para tal parámetro propuestos por la Comisión Nacional del Agua. La prueba de DQO analiza materia orgánica tanto biodegradable como no biodegradable que se encuentra en el agua. Un valor de DQO arriba de 200 mg/L ya es un indicador de fuerte contaminación, y en este caso hay valores hasta casi 15 veces superiores, que demuestran que la descarga

Una vez detectado eso, se prosiguió con la evaluación del tratamiento con los HC. Los resultados mostraron 2772 mg/L de DQO en la combinación de aguas entrantes al sistema y valores de 460-550 mg/L en la salida de las celdas, que conllevaron a remociones de DQO de 80 y 84 % en los sistemas con diferente densidad de plantas (Figuras 2ab), sin observarse diferencias estadísticas entre tales sistemas. Para el caso de las celdas control, las remociones solo fueron cerca del 50 %, hasta 34% menos que con los sistemas con presencia de plantas, demostrando un efecto de la fitorremediación, y demostrando como los policultivos de plantas en estudio favorecen mejores remociones de contaminantes, lo cual sugiere el uso de los humedales como una solución basada en la naturaleza para remover materia orgánica de aguas

residuales de este tipo, sistemas que son de bajo costo de operación y mantenimiento.

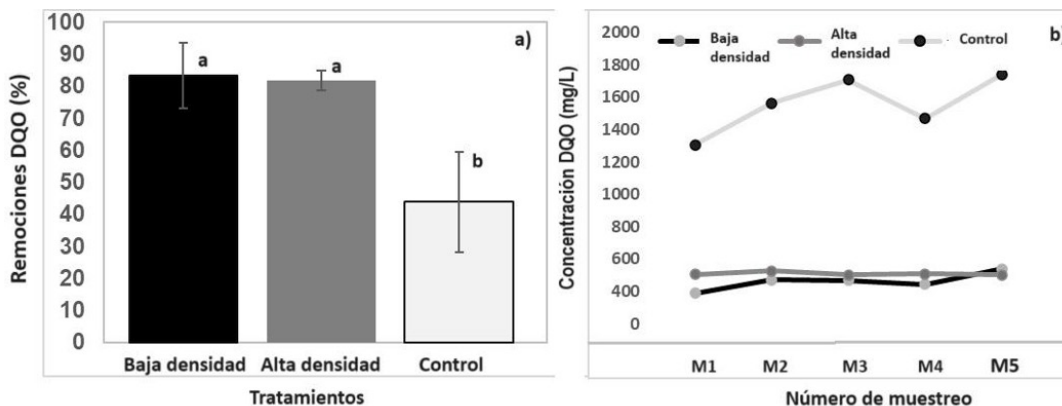
Cabe mencionar que de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-2021, que es una disposición legal emitida por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) de México, para proteger y conservar la calidad del agua, el límite máximo permisible de promedio mensual de DQO descargado a lagos y ríos no debe ser mayor a 100 y 150 mg/L, respectivamente. Considerando tal norma, y aunque las remociones superiores a 80 % son muy relevantes, las concentraciones detectadas (460-550 mg/L) siguen estando fuera de la norma para ser descargadas a ríos y lagos, por lo que se sugiere el uso de humedales híbridos, para mejorar la calidad del agua y con ello no rebasar los límites de las normas. Considerando que en este estudio se utilizaron sistemas subsuperficiales de flujo horizontal, se sugiere que posterior al mismo se integre un sistema de humedales de flujo superficial para pulimento. Rodríguez-González y otros (2013) señalan que utilizando lirios en sistemas superficiales se mejora, en al menos 10

puntos porcentuales, la eliminación de materia orgánica medida como DQO.

Respecto a la DBO_5 , se detectaron concentraciones que oscilaron de los 700 a 980 mg/L antes de ser tratada, mientras que a la salida las concentraciones estuvieron en rangos de 280-420 mg/L, con las que se graficaron las remociones respectivas de acuerdo al tipo de tratamiento (Figuras 3a y 3b). Se detectó que los sistemas sin presencia de vegetación tuvieron remociones menores al 45 %, tales remociones aluden a la acción biológica de los microorganismos presentes en el medio filtrante en conjunto con la acción de filtro que realizan las capas de sustratos. La remoción de los controles fue significativamente inferior a las remociones observadas en los sistemas con policultivos de plantas ornamentales tanto con baja (83.3 %; $p= 0.225$) como alta (81.9 %; $p= 0.126$) densidad de plantas.

Las remociones observadas como efecto de la fitorremediación, indican que la vegetación ornamental utilizada en este estudio resulta pertinente para eliminar

Figura 2. Porcentajes de remoción (a) y concentraciones de DQO en la entrada y salida (b) de los humedales construidos. Fuente: elaboración propia.

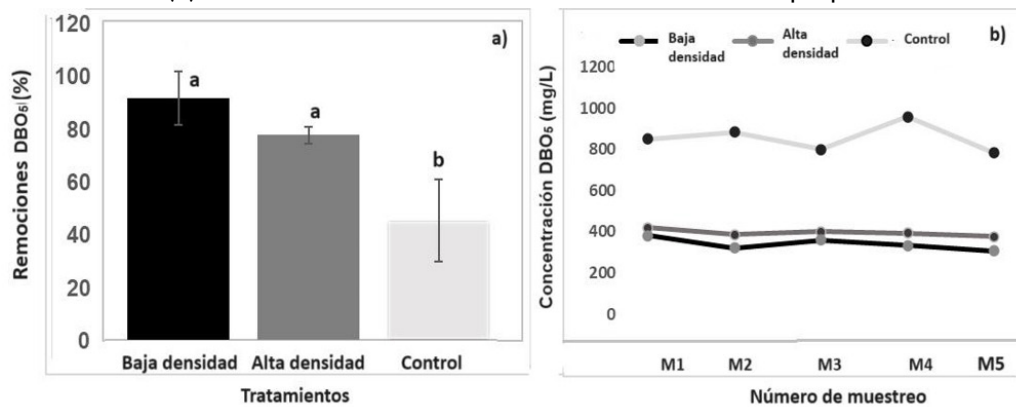


materia orgánica. El detectar que la alta densidad de plantas no afectará las remociones demuestra que con más plantas se pueden obtener sistemas más estéticos y que pueden utilizarse como jardinerías florales a la par de tratar las aguas o colocar a orillas de ríos o como sistemas finales de tratamiento en las industrias queseras. Sumado a lo anterior, Hernández y otros. (2020) mencionan que la alta densidad de especies, además de favorecer remociones



Figura 4. Cambio de coloración de las muestras de entrada y salida del agua en los humedales construidos estudiados

Figura 3. Porcentajes de remoción (a) y concentraciones de DBO₅ en la entrada y salida (b) de los humedales construidos. Fuente: elaboración propia.



no afecta en la emisión de gases de efecto invernadero.

Después de describir las remociones químicas observadas en las muestras de lactosuero, tales remociones también pueden visualizarse a través del cambio de color observado entre las muestras de entrada y salida en el sistema, como lo muestra la Figura 4.

La normativa vigente para aguas no incluye la DBO₅; sin embargo, considerando la NOM-001-SEMARNAT-1996, en esta se reportaba que para descarga a ríos y lagos las concentraciones no debían ser superiores a 150 mg/L, por lo que las

concentraciones detectadas a la salida (280-420 mg/L) son relevantes como depuración, pero aún siguen sin cumplir la norma, por lo que el sistema superficial posterior al subsuperficial también puede ser importante para pulimiento, sobre todo considerando que con otro 50 % de remoción a las concentraciones mínimas observadas se cumpliría lo descrito.

Cabe destacar que, al ser tratadas las aguas de lactosuero en los HC, estas pueden ser reutilizadas para irrigación de cultivos, jardinería y otras actividades; además, existen otros beneficios a aprovechar como el uso de fibras, flores y plantas para elaboración de artesanías y generar

ingresos económicos de aquellos que se hagan cargo del cuidado y mantenimiento de la tecnología. Por ejemplo, en Pinoltepec, Veracruz, el sistema ha sido operado por un grupo de mujeres que producen las plantas ornamentales en el humedal y las venden por mayoreo (Hernández, 2016).

Otros estudios han reportado el tratamiento de aguas de lactosuero con sistemas convencionales como reactores anaerobios de flujo ascendente (Gavala et al. 1999) o sistemas de lodos activados (Martins y Quinta-Ferreira, 2010; Rivas et al. 2010), que requieren energía eléctrica para su funcionamiento y resultan más costosos en su construcción y operación, y con remociones similares a lo observado en este estudio con HC (80-85 %), que además produce simultáneamente plantas ornamentales.

4. CONCLUSIONES

La contaminación acuífera es un problema constante a nivel mundial, mas la intervención para disminuirla se ha dado de manera parsimoniosa. Este estudio detectó que aquellos ríos que además de tener descargas de aguas negras tienen descargas de aguas de lactosuero, pueden ser tratados mediante el uso de HC de flujo subsuperficial, y que si se consideran policultivos de plantas ornamentales como *Alpinia purpurata* y *Canna hibryds* funcionarán efectivamente en la eliminación de materia orgánica medida como DQO o DBO₅, en estos casos, la fitorremediación es uno de los procesos más importantes. Sumado a lo anterior, se podrían aprovechar otras ventajas a partir del tejido y flores de la vegetación; es decir,

un aprovechamiento multipropósito. Tal situación puede ser, a su vez, una estrategia de adopción y apropiación de la ecotecnología a la población, para que sean ellos quienes aprendan a operarlos y aprovecharlos; sin embargo, mayores acercamientos debe de haber entre los sectores académicos, sociales y comunitarios. De igual manera, se sugiere que se desarrollen talleres de educación ambiental sobre la temática, para que esta técnica permee de mejor manera en el uso de ecotecnologías o soluciones basadas en la naturaleza.

Se plantea que investigaciones futuras promuevan este tipo de conocimiento sobre humedales y sus funciones en los planes de educación básica, además de que se originen nuevas políticas públicas que consideren el uso de los HC como alternativas de tratamiento de aguas residuales tanto a nivel domiciliario, comunitario, industrial y para parques públicos o fraccionamientos.

Este estudio aporta aspectos importantes en el tratamiento del agua para coadyuvar a su vez al Objetivo 6 de los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible. Conocer los procesos y hallazgos que los HC sembrados con plantas ornamentales como sistemas ecológicos aportan a la depuración de polución con descargas de aguas negras y de lactosuero, resulta en una opción económica y ecológicamente viable.

6. FUENTES DE CONSULTA

- Carvalho, F., Prazeres, A., Rivas, J. (2013). Cheese whey wastewater: characterization and treatment. *Science of the Total Environment*, 445-446, 385-396. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.12.038>
- Comisión Nacional del Agua, CONAGUA (2020). Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-2-22-a.pdf>
- Comisión Nacional del Agua, CONAGUA (2022). Numeragua. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.scribd.com/document/659218871/Numeragua-2022>
- Fernández, L., Zamora-Castro, S., Sandoval-Herazo, L., Herrera-May, A., Salgado-Estrada, R., De la Cruz-Dessavre, D. (2023). Technological innovations in the application of constructed wetlands: a review. *Processes*, 11, 3334. <https://doi.org/10.3390/pr11123334>
- Gavala HN, Kopsinis, H., Skiadas, IV., Stamatelatou, K., Lyberatos, G. (1999). Treatment of dairy wastewater using an upflow anaerobic sludge blanket reactor. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 73(1), 59-63. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0391>
- García-García, P.L., Ruelas-Monjardín, L., Marín-Muñiz, J.L. (2016). Constructed wetlands: A solution to water quality issues in Mexico? *Water Policy*, 18, 654-669. <https://doi.org/10.2166/wp.2015.172>
- González, D. (2015). Remoción de contaminantes en humedales construidos de flujo vertical con *Heliconia psittacorum* y alimentados con diferentes frecuencias. Tesis para obtener el grado de Tecnólogo Químico de la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- Hernández, M.E., Galindo-Zetina, M., Hernández-Hernández, J.C. (2017). Greenhouse gas emissions and pollutant removal in treatment wetlands with ornamental plants under subtropical conditions. *Ecological Engineering*, 2018, 114, 88-95. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.001>
- Hernández, M.E. (2016). Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. *Rinderesu*, 1, 1-12. <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/16>
- INEGI (2010). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Censos nacionales. <http://www.inegi.gob.mx>
- Martins, R.C., Quinta-Ferreira, R.M. (2010). Final remediation of post-biological treated milk whey wastewater by ozone. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 8. <https://doi.org/10.2202/1542-6580.2310>

- Marín-Muñiz, J.L., Hernández, M.E., Gallegos-Pérez, M., Amaya-Tejeda, S. (2020). Plant growth and pollutant removal from wastewater in domiciliary constructed wetland microcosms with monoculture and polyculture of tropical ornamental plants. *Ecological Engineering*, 147. 105658. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105658>.
- Marín-Muñiz, J.L., Zitácuaro-Contreras, I., Ortega-Pineda, G., Álvarez-Hernández, L.M., Martínez-Aguilar, K., López-Roldán, A., Zamra, S. (2023b). Bibliometric analysis of constructed wetlands with ornamental flowering plants: the importance of green technology. *Processes*, 11, 1253. <https://doi.org/10.3390/pr11041253>
- Marín-Muñiz, J.L., Sandoval, L.C., López-Méndez, M.C., Sandoval-Herazo, M., Meléndez-Armenta, R.A., González-Moreno, H.R., Zamora, S. (2023b). Treatment wetlands in Mexico for control of wastewater contaminants: a review of experiences during the last twenty-two years. *Processes*, 11, 359. <https://doi.org/10.3390/pr11020359>
- Mitsch, W.J., Gosselink, J., Anderson, C., Fennessy, M. (2023). *Wetlands*. 6th edition. John Wiley and Sons Inc.: New York, NY, USA.
- Moreno, H., Pineda, J., Teresa, C., Sahagún, J. (2020). El oxígeno en la zona radical y su efecto en las plantas. *Revista Mexicana de ciencias agrícolas*. 11(4), 931-943. <https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sciarttext&pid=S2007-09342020000400931>
- PND Presidencia de la República. (2019). Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024. CONAGUA. 2019. Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 171p.
- Rodríguez-González, M.R., Molina-Burgos, J., Jácome-Burgos, A., Suárez-López, J. (2013). Humedal de flujo vertical para tratamiento terciario del efluente físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales domésticas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. 14(2), 223-235.
- Romellón, M., Cocoltzi, E., López, G. (2023). Tratamiento de aguas residuales domésticas de una institución educativa por un sistema de humedales artificiales en serie. *Universita Ciencia*. 11 (30), 147-162. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7843244>
- Sánchez-Olivares, E.; Marín-Muñiz, J.L.; Hernández-Alarcón, M.E. (2019). Liberación de oxígeno radial por las raíces de las plantas nativas de humedales tropicales costeros de Veracruz en respuesta a diferentes condiciones de inundación. *Botanical Science*, 97, 202-210. <https://doi.org/10.17129/botsci.2069>.
- Sandoval, L.C., Marín-Muñiz, J.L., Alvarado-Lassman, A., Zurita, F., Marín-Peña, O., Sandoval-Herazo, M. (2023). Full-scale constructed wetlands planted with ornamental species and pet as a substitute for filter media for

municipal wastewater treatment: an experience in a Mexican community. *Water*. 15, 2280. <https://doi.org/10.3390/w15122280>

Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L.A., Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. 31 (1), 35-46. DOI: 10.18845/tm.v31i1.3495

Sultana, M., Mourt, C., Tatoulis, T., Akrotas, C., Tekerlekopoulou, A., Vayenas, D. (2015). Effect of hydraulic retention time, temperature, and organic load on a horizontal subsurface flow constructed wetland treating cheese whey wastewater. *Journal of Chemistry Technology and Biotechnology*. DOI 10.1002/jctb.4637