



Tratamiento híbrido (Biorreactor Anaerobio-Humedal Construido) para el manejo sustentable de aguas residuales de la industria azucarera

Hybrid treatment (Anaerobic Bioreactor-Constructed Wetland) for the sustainable management of wastewater from the sugar industry

Francisco Orduña-Gaytán^{1*}, Alejandro Alvarado-Lassman¹, Norma A. Vallejo-Cantú¹, Andrea Alvarado-Vallejo²,

³Luis C. Sandoval-Herazo,

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Oriente 9 Núm. 852 Col.

Emiliano Zapata, Orizaba, Veracruz, C.P. 94300, México. fcoorduna@hotmail.com

² Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey- Campus GDL. Av. General Ramón Corona #2514.

Col. Nuevo México, CP 45138. Zapopan, Jal. México.

³ Tecnológico Nacional de México/Tecnológico Superior de Misantla. Km 1.8 Carretera Lomas del Cojolite, 93821

Misantla, Ver.

*Autor de correspondencia: fcoorduna@gmail.com

Recibido 19 de mayo de 2020; aceptado 22 de junio de 2020

RESUMEN

El tratamiento ecológico de las aguas residuales producto del procesamiento de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en ingenios azucareros de México dentro de sistemas híbridos constituidos por un Biorreactor de Biopelícula Anaerobio (RBA) y un Humedal Construido (HC) puede ser una alternativa sustentable para la mitigación del impacto

ambiental en regiones donde se encuentran establecidas estas industrias. Esto es gracias a la naturaleza del sistema, puesto que, la primera parte del proceso degrada la materia orgánica disuelta del residuo dentro del biorreactor, por acción del consorcio bacteriano y subsecuentemente se complementa la depuración del efluente en el Humedal Construido, por la interacción intrínseca de las bacterias y plantas adaptadas bajo estas condiciones para su supervivencia degradando o absorbiendo los contaminantes, resultando en un efluente limpio.

Se presenta la construcción y operación de un sistema de tratamiento a nivel laboratorio y su posterior escalamiento piloto para este tipo de sustratos con altas cargas orgánicas, donde se evalúan las eficiencias de eliminación de material orgánico disuelto, patógenos y nutrientes (NPK). El agua residual fue colectada en diferentes ingenios azucareros de la Región de las Altas Montañas en el estado de Veracruz, México, durante la temporada de zafra. La alimentación en la primera etapa del sistema se realiza mediante la dosificación del efluente contaminado al RBA, a una concentración de 15.0 gDQO/L con una carga volumétrica aplicada de 11.2 gDQO/L*d y TRH= 24h con pH= 5.5-6.5 alcanzando remociones del 46 al 60% correspondientes a una concentración de salida promedio de 6-8 gDQO/L. El efluente resultante alimenta a la segunda etapa en el HC plantado con las especies *Canna indica* L., *Spathiphyllum wallisii* y *Alpinia purpurata* adaptadas a condiciones de inundación. En esta etapa se eliminó hasta el 95% equivalente a 0.35-12 gDQO/L a la salida del sistema, descartando *Salmonella* spp, coliformes fecales y huevos de helmintos determinados según normas mexicanas.

PALABRAS CLAVE: Tratamiento híbrido, Biorreactor, Humedal construido, Manejo sustentable, Ingenio azucarero

ABSTRACT

The ecological treatment of wastewater from the processing of sugar cane (*Saccharum officinarum* L.) in sugar mills in Mexico within hybrid systems consisting of an Anaerobic Biofilm Bioreactor (ABR) and a Constructed Wetland (CW) can be a sustainable alternative for the mitigation of environmental impact in regions where these industries are established. This is due to the nature of the system, since, the first part of the process degrades the dissolved organic matter of the waste inside the bioreactor, by the action of the bacterial consortium and subsequently the purification

of the effluent in the Constructed Wetland is complemented by the intrinsic interaction between bacteria and plants adapted under these conditions for their survival by degrading or absorbing contaminants, resulting in a clean effluent. The construction and operation of a treatment system at laboratory level and its pilot scale up for this type of substrates with high organic loads is presented, where the efficiencies of dissolved organic material, pathogens and nutrients (NPK) removal are evaluated. The wastewater was collected in different sugar mills in the High Mountains Region in the state of Veracruz, Mexico, during the harvesting season. The feed in the first stage of the system is carried out by dosing the contaminated effluent to the RBA, at a concentration of 15.0 gDQO/L with an Organic Loading Rate (OLR) of 11.2 gDQO/L*d and HRT= 24h with pH= 5.5-6. 5 reaching removals of 46 to 60% corresponding to an average output concentration of 6-8 g COD/L. The resulting effluent feeds the second stage in the planted CW with the *Canna indica* L., *Spathiphyllum wallisii* and *Alpinia purpurata* species adapted to flooding conditions. In this stage up to 95% tantamount to 0.35-12 gDQO/L was eliminated at the exit of the system, discarding *Salmonella* spp, fecal coliforms and helminth eggs determined according to Mexican standards.

KEY WORDS: Hybrid treatment, Bioreactor, Constructed wetland, Sustainable management, Sugar mill

INTRODUCCIÓN

El manejo sustentable de las aguas residuales de la industria azucarera es clave para el desarrollo de tecnologías limpias, que aporten una alternativa viable para la mitigación del impacto ambiental que estas producen al ser vertidas en bienes nacionales. La falta de un sistema de tratamiento de este tipo, genera alteraciones en regiones tropicales por la transformación de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en derivados a nivel industrial (Hernández et al., 2018; Sahu et al., 2015),

principalmente en los países de Brasil, India y México (González et al., 2006; Olguín et al., 2008). En la Tabla 1 se puede observar los sectores industriales más importantes de acuerdo al volumen generado de aguas residuales y la carga orgánica presente, con base en esto, se puede señalar que la industria azucarera es la rama más perjudicial, seguido de la petrolera y la química.

Tabla 1. Generación de agua residual por industria

Origen de descarga	Caudal (m ³ /s)	Carga orgánica (1000 t DBO ₅ /año)
Azucarera	45.9	1884
Petrolera	11.4	1992
Servicios	10.5	77

Química y Farmacéutica	6.9	312
Celulosa y papel	5.5	122

Fuente: Descarga de Aguas Residuales Industriales por Giro (SEMARNAT, 2003).

Actualmente operan 51 ingenios distribuidos en 15 de los 32 estados del país, donde destaca el estado de Veracruz con 18 ingenios, seguido por Jalisco con seis, y San Luis Potosí con cuatro. Para el cierre de producción de azúcar 2018-2019, la cifra alcanzada fue de 55.9 millones de toneladas donde el principal productor fue Veracruz con 37.5% y Jalisco con 13.1%; los cuales en conjunto produjeron el 50.6% del total nacional (SIAP, 2018). Sin embargo, a pesar de la gran importancia de esta industria, las políticas de tratamiento de desechos para mejorar la gestión ambiental no han logrado la estrategia correcta para la prevención, minimización y control de la contaminación, esto debido a que, el sector público y privado intervienen constantemente donde solo consiguen tratar el 20% de las aguas residuales industriales (Domínguez et al., 2014; Cantú, 2012).

En México esta agroindustria no cumple con la legislación vigente, ya que durante el proceso para la producción de azúcar en general se utilizan de 1500-

2000 L de agua y genera aproximadamente 1000 L de aguas residuales (6500 mgDQO/L y 4000 mgDBO₅/L) por tonelada de caña procesada (Donga et al., 2018) excediendo los límites máximos permisibles de descargas a bienes nacionales.

Es por ello que se plantea el establecimiento de un sistema ecológico híbrido de tratamiento integrado por un Biorreactor de Biopelícula Anaerobio (RBA) y un Humedal Construido (HC) como sistema de depuración para mitigar la contaminación ocasionada por el desfogue de efluentes al medio natural sin tratamientos previos, tomando en cuenta tecnologías de bajo costo, amigables con el medio ambiente y su funcionalidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Todas las unidades experimentales fueron operadas en un invernadero en la planta para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, en la ciudad de Orizaba, Veracruz México (18°51'N 97°06'O), en la Región de las Altas Montañas con altitud de 2351 msnm, con clima templado-húmedo durante todo el año, alcanzando una precipitación anual total de 2237.9 mm con 179.5 días de precipitación ($\geq 0.1\text{mm}$) de acuerdo al

Servicio Meteorológico Nacional, con una temperatura promedio anual de 18.8°C. Debido a la falta de estudios previos, es necesario evaluar el comportamiento del sistema basándose en las características promedio del efluente de dicha industria presentados en la Tabla 2, los cuales se determinaron bajo los métodos descritos en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

Tabla 2. Promedio de la composición fisicoquímica del efluente

Parámetro	Contenido
DQO _t (g/L)	19.092
DQO _s (g/L)	11.2
TVS (g/L)	8.55
VS (g/L)	9.01
Tot-P (mg/L)	135
TKN (mg/L)	100
Temperatura (°C)	24
pH	5.39

El sistema híbrido se puede observar en la Figura 1; Este se diseñó en escala laboratorio para controlar el mayor número de variables posibles y obtener parámetros de operación valiosos para el escalamiento del sistema a escala piloto, con el fin de maximizar el potencial de

depuración de aguas residuales que traten el efluente de la industria azucarera.

Una vez diseñado y construido se procedió a realizar el arranque, operación y monitoreo de este sistema, para posteriormente realizar el escalamiento a nivel piloto, tal y como se describe a continuación.

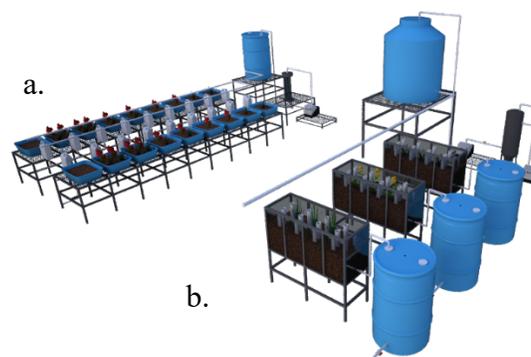


Figura 1. Sistema híbrido de tratamiento., a. Escala Laboratorio y b. Escala Piloto

El RBA_{LAB} inició su operación alimentando con residuos de frutas y verduras a una concentración de 15 gDQO/L con TRH= 24 h, y pH 5.5-6.5, después se realizó un cambio de sustrato de alimentación por agua residual del ingenio azucarero a una Carga Volumétrica Aplicada (Cva) de 11.20 gDQO_T/L*d cumpliendo 10 días de operación continua. En el HC_{LAB} inició con un periodo de adaptación de las especies vegetales (*Canna indica* L., *Spathiphyllum wallisii* y *Alpinia purpurata*) con 3 celdas cada una, sembradas en Grava Volcánica Roja (GVR) y una mezcla 50/50 de GVR+PET, alimentando agua natural por 30 días, posteriormente se utilizó el efluente

del reactor anaerobio, realizando una dilución para alimentar el sistema con una concentración de 1 gDQO/L con TRH= 72 h, aumentando dicha concentración hasta la adaptación completa del sistema sin dosificación.

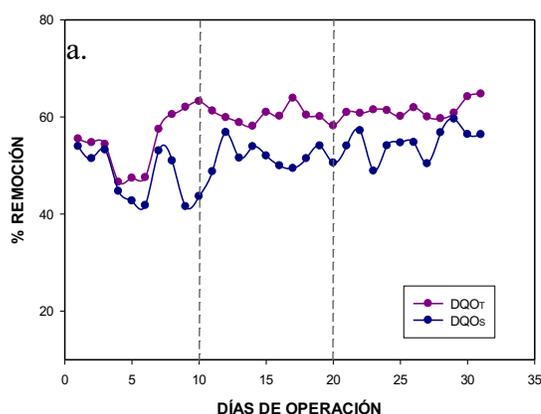
Escala piloto

El RBA_{PILOT} está construido de material de fibra de vidrio, el cual está compuesto en su interior de un panel de fibras de nylon polyester como soporte para favorecer el desarrollo de la biopelícula bacteriana en el material poroso. Para la adaptación del RBA con Volumen útil de 50 L se operó durante 28 días de modo que las bacterias puedan adherirse al soporte interno del reactor. Se inició agregando el 30% de sustrato concentrado del residuo de frutas y verduras, 10% del sustrato de agua residual y el resto de agua corriente durante los primeros 15 días, esta mezcla se mantuvo únicamente en recirculación por tiempos cortos, a partir del día 16 la alimentación se realizó como en el apartado anterior. Para el HC_{PILOT} se operó bajo el criterio a nivel laboratorio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Escala laboratorio

El monitoreo del sistema híbrido se realizó durante 31 días. De acuerdo a la Figura 2a durante este periodo, el sistema presentó variaciones los días 1-5, a causa de la adaptación del RBA_{LAB} en esta concentración de alimentación, los primeros 10 días con el sustrato de frutas y verduras se alcanzaron remociones del 63 % en DQO_T y valores del 53 % en DQO_S. Después de realizar el cambio de sustrato se aprecia que de los días 10-20 se presentó una variación en las remociones, como resultado a la adaptación del nuevo sustrato, y a partir del día 21 se incrementó la remoción a valores del 64 % en DQO_T y 59 % en DQO_S obteniendo como efluente de salida un valor de concentración de carga orgánica de 6 gDQO/L. En la Figura 2b se muestran las remociones de sólidos; en los días 1-10 de 44 % Sólidos Totales (ST) y 46 % Sólidos Totales Volátiles (STV), en cuanto al segundo sustrato se incrementaron los valores en el día 22 correspondientes al 68 % ST y 59 % STV.



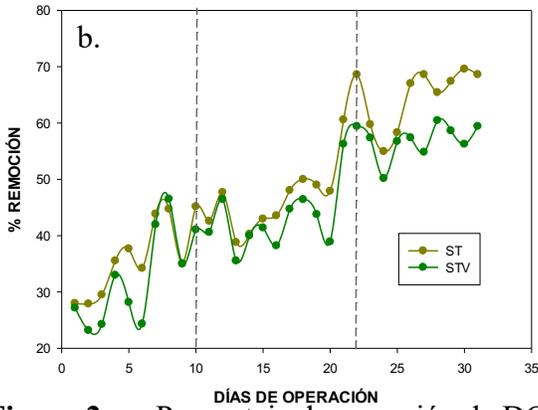


Figura 2., a. Porcentaje de remoción de DQO_T y DQO_S., b. Porcentaje de remoción de ST y STV en el RBA_{LAB}

En la Figura 3a, la remoción inicial de la DQO_T fue del 40 %, a partir del día 25 se observa un incremento en la remoción del 78 %, obteniendo una concentración final de 0.221 g DQO_T/L., por otra parte en 3b se observa el aumento en la remoción de sólidos a partir del día 13.

En la Figura 4, se presenta el porcentaje de remoción de gDQO_T correspondiente a las tres especies vegetales utilizadas, donde, se presentaron mejores resultados utilizando la especie *Canna indica* L., con remociones mayores al 60 % en promedio de las 3 celdas utilizadas.

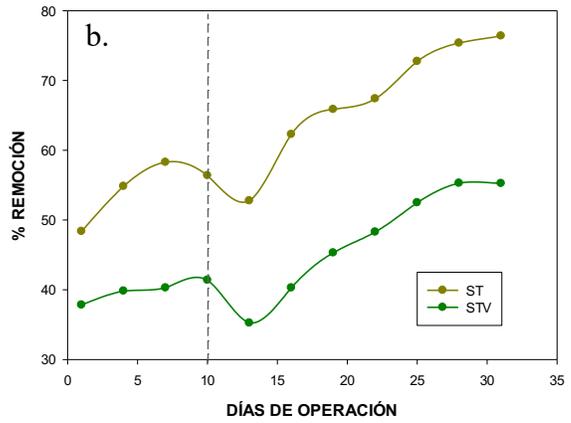
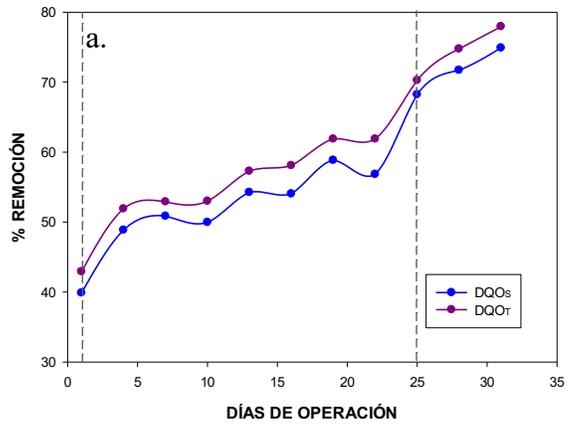


Figura 3., a. Porcentaje de remoción de DQO_T y DQO_S., b. Porcentaje de remoción de ST y STV en el HC_{LAB}

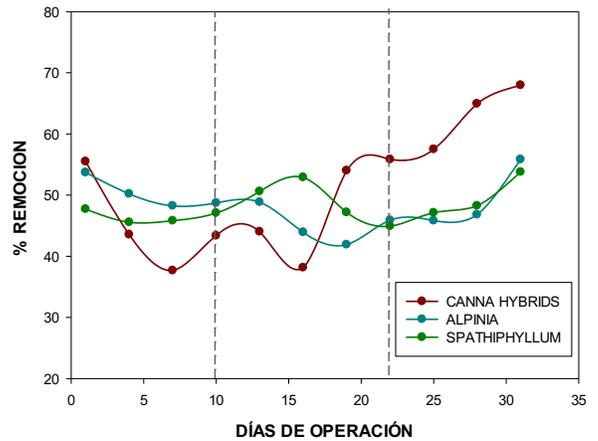


Figura 4. Remoción por especie vegetal en HC_{LAB}

El monitoreo en esta escala se muestra en la Figura 5a, donde a partir del día 29 se inició la alimentación con agua residual del ingenio bajo una concentración de 13 gDQO_T/L aproximadamente, agregando 34.2 L de sustrato (agua residual), durante la operación del RBA_{PILOTO} la concentración interna se mantuvo en 15 gDQO_T/L. A partir del día 30 las remociones presentaron un incremento obteniendo valores del 46 % en DQO_T generando un efluente de salida con valores de 8 g DQO_T/L aproximadamente con valores en la remoción de hasta un 30 % para la DQO_S. En la Figura 5b se muestran la remoción de sólidos; así mismo como se mencionó en el apartado anterior, una vez arrancado el sistema, el biorreactor presentó durante los primeros 28 días un periodo de adaptación, por este motivo los valores de remoción no fueron los esperados, incrementando a partir del día 29. En el caso de los ST se obtuvieron valores del 48 % y en valores de STV se determinaron valores del 20%.

El sustrato de alimentación presentó un pH ácido, debido a este valor es conveniente ajustarlo en un rango de 5.5 a 6.5, en este intervalo se reproducen las bacterias hidrolíticas, esto se observa en la Figura 6; estas

condiciones se mantuvieron con excepción en el día 40 incrementándose el pH a la salida del biorreactor debido a la acción de las comunidades bacterianas en desarrollo bajo estas condiciones y por lo tanto continúan descomponiendo la materia orgánica del agua residual.

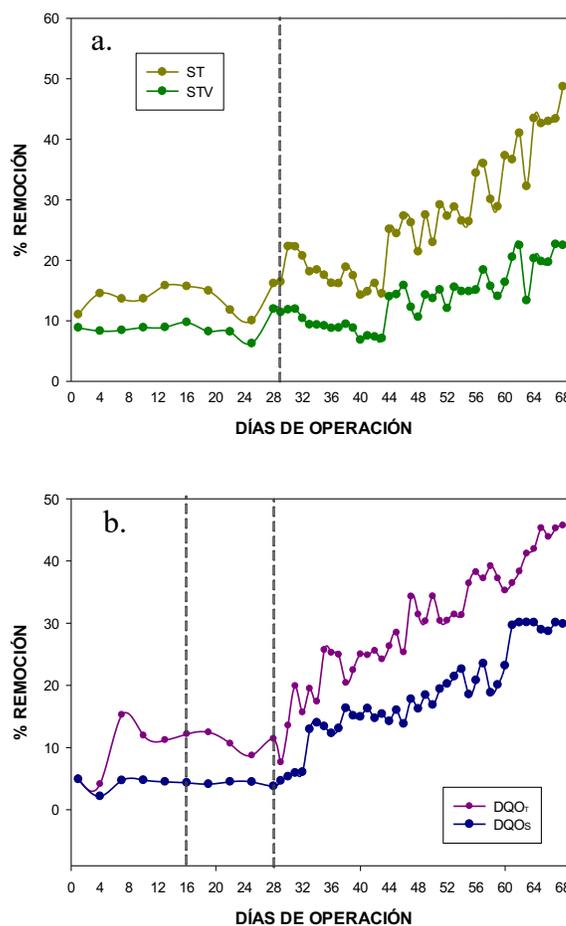


Figura 5., a. Porcentaje de remoción de DQO_T y DQO_S., b. Porcentaje de remoción de ST y STV en el RBA_{PILOTO}

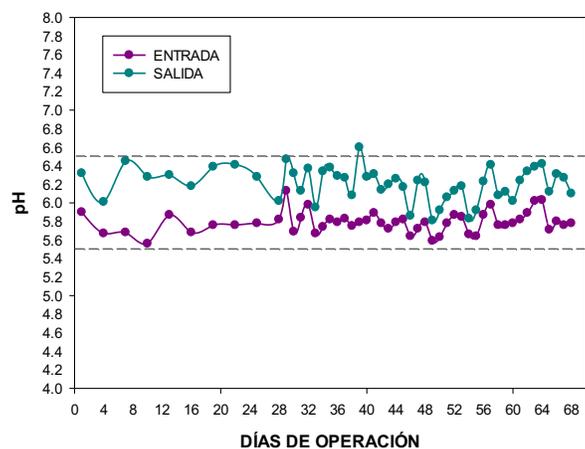


Figura 6. Monitoreo del pH en el RBA_{PILOTO}

Para el HC_{PILOTO} al igual que en la escala laboratorio, se alimentó utilizando el efluente del RBA de su escala; fue necesaria una dilución del efluente de salida del RBA debido que se obtuvieron valores de concentración de 8 g DQO_T/L. En estas tres celdas del humedal se sembraron las especies *Canna indica* L., y *Spathiphyllum wallisii* sustituyendo a la especie *Alpinia purpurata* por *Typha latifolia* L. para mejorar el desempeño del sistema. Las plantas se adaptaron a condiciones de inundación con agua natural antes de iniciar el tratamiento y después se acondicionaron a una concentración de 1 g DQO_T/L en el HC_{LAB}, después de adaptarlas se trasplantaron al HC_{PILOTO} donde se incrementó la concentración a 3 g DQO/L. La capacidad en volumen de este HC por las tres celdas es de 270 L, y se empleó un TRH de 3 días.

En la Figura 7a se observan los valores obtenidos durante los 37 días de tratamiento en el Humedal debido a que los soportes utilizados en este sistema eran de un material poroso los resultados desde el inicio eran favorables, ya que se comenzó con remociones del 38 al 42 %.

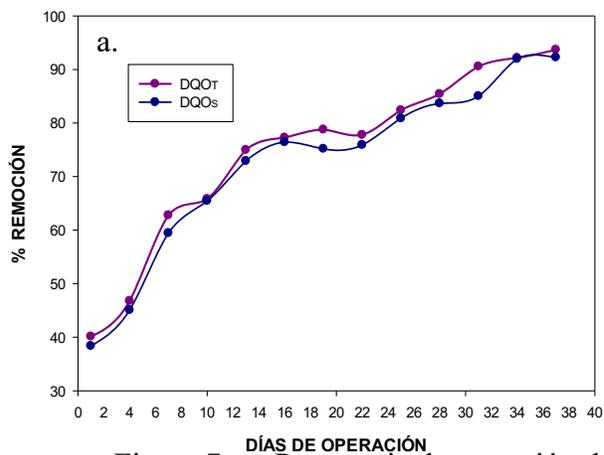


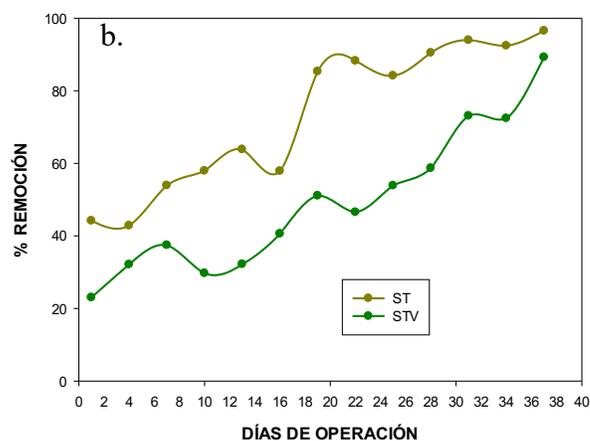
Figura 7., a. Porcentaje de remoción de

DQO_T y DQO_S.,

Por último la Figura 8, muestra los porcentajes de remoción que se obtuvieron por cada una de las celdas del humedal, por una parte en el caso de las especies sembradas durante los primeros 4 días presentaron variaciones entre las tres especies, esto se debe a la clara adaptación al agua residual como sustrato de alimentación durante los 37 días del tratamiento. Por otro lado se logra apreciar que la especie con mejores resultados y mayor cantidad de materia orgánica removida fue la *Canna indica* L., alcanzando casi el 95 % de remoción, en cambio la *Spathiphyllum wallisii* obtuvo menores

remociones del día 1-10, después de esto a partir del día 28 las 3 especies incrementaron su remoción.

Los resultados se mantuvieron estables con ligeras variaciones, logrando obtener remociones de hasta el 95 % en DQO_T lo cual corresponde a una concentración de salida igual a 0.35 g DQO_T/L aproximadamente. En cuanto a los valores de DQO_s se obtuvieron remociones de 93 %, respecto a esto no existe mucha variación entre los resultados, teniendo en cuenta que el Humedal logró retener la mayor cantidad de sólidos. Por otra parte, en 7b se muestran los valores obtenidos en remociones de ST y STV, como se mencionó en el apartado anterior los valores iniciales fueron favorables y debido a la porosidad del material de soporte como es la GVR los sólidos con componentes orgánicos pudieron ser retenidos en el soporte y así ser aprovechados de una manera fácil para las plantas. En esta etapa del proceso se alcanzaron valores de remoción de hasta el 90 % en ST, y en STV se lograron remociones del 60 %



b. Porcentaje de remoción de ST y STV en el HC_{PILOTO}

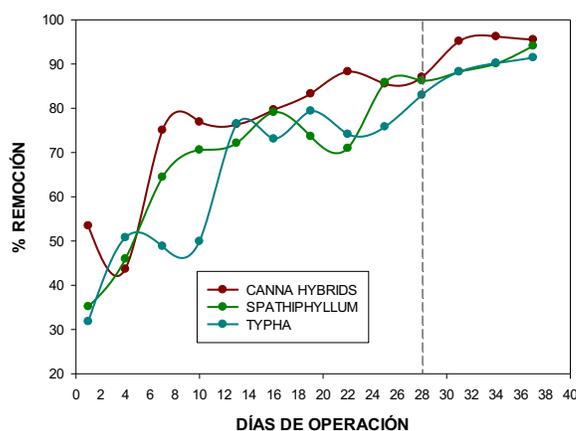


Figura 8. Remoción por especie vegetal en HC_{PILOTO}

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo se deduce que el tratamiento en el sistema híbrido del agua residual de la industria azucarera obtuvo resultados favorables. En el Reactor de Biopelícula Anaerobio se alcanzaron remociones del 64 % en valores de DQO_T durante un periodo de 40 días de operación, así pues en el Humedal Construido se obtuvieron valores de remoción del 95 % en DQO_T , con una remoción general del 91 %

utilizando el sistema completo. Los sistemas combinados con sistemas ecológicos promueven el ahorro energético y se obtiene un beneficio en cuanto a costos al evitar el uso de equipos que utilizan energía.

En el sistema ecológicos híbrido de tratamiento no se generan altos costos de mantenimiento debido a la autodepuración. El panel de soporte en el RBA utilizando las fibras de nylon poliéster permitió retener el material orgánico que se encuentra dentro del biorreactor, de esta manera es de fácil consumo para el consorcio bacteriano fijado en el material. A pesar del corto tiempo de operación se logró una buena adaptación mantenido los TRH= 12 h asegurando la remoción de contaminantes en el agua residual. Así pues en el Humedal Construido se obtuvieron resultados favorables desde los primeros días de alimentación, dado que los soportes utilizados como la GVR que por sus características porosas logra retener la materia orgánica, beneficia a las especies vegetales sembradas, así también la piedra de río y el PET aportaron a la depuración de contaminantes. En específico el PET utilizado como soporte ayuda a reducir el impacto que genera en el medio ambiente. En definitiva el uso de especies vegetales ornamentales es factible, gracias a la adaptación adecuada de estas, y la continua generación

de brotes, los cuales podrían ofertarse en el mercado y presentan un valor mayor en comparación a los pastizales nativos de humedales.

BIBLIOGRAFÍA

- Cantú P. (2012). El conflicto ambiental del agua en los albores del siglo XXI. *Revista de divulgación científica y tecnología de la UANL*, No. 67, ISSN: 2007-1175. 33-41.
- Domínguez-Manjarrez, C. A., Bravo-Álvarez, H., & Sosa-Echeverría, R. (2014). Prevención, minimización y control de la contaminación ambiental en un ingenio azucarero de México. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 15(4), 549-560.
- Gonzalez-Farias, F.A., Hernandez-Garza, M.R., Dimáz-Gonzalez, G., 2006. Organic carbon and pesticide pollution in a tropical coastal lagoon-estuarine system in Northwest Mexico. *Int. J. Environ. Pollut.* 26 (1–2), 234–253.
- Hernández-Salazar, A. B., Moreno-Seceña, J. C., & Sandoval-Herazo, L. C. (2018). Tratamiento de aguas residuales industriales en México: Una aproximación a su situación actual y retos por atender. *RINDERESU*, 2(1-2), 75-87.

Olguín, E. J., Sánchez-Galván, G., González-Portela, R.

E., & López-Vela, M. (2008). Constructed wetland mesocosms for the treatment of diluted sugarcane molasses stillage from ethanol production using *Pontederia sagittata*. *Water research*, 42(14), 3659-3666.

Sahu, O. P., & Chaudhari, P. K. (2015). The characteristics, effects, and treatment of wastewater in sugarcane industry. *Water Quality, Exposure and Health*, 7(3), 435-444.

SEMARNAT. (2003). *Volumen de descarga de aguas residuales industriales y municipales*. Recuperado el 15 de mayo de 2020 de http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AGUA07_10&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NO_MBREANIO=*

SIAP Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2018). *La producción de caña de azúcar supera las 55 millones de toneladas en 2018*. Recuperado el 05 de abril de 2020 de <https://www.gob.mx/siap/articulos/la-produccion-de-cana-de-azucar-supera-las-55-millones-de-toneladas-en-2018?idiom=es>