

Desempeño de humedales construidos de flujo vertical en el tratamiento de aguas residuales municipales

Performance of vertical flow constructed wetlands in the treatment of municipal wastewaters

DrC. Amado Enrique Navarro-Frómata ^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-4827-0670>

Ing. Federico Beissos² <https://orcid.org/0000-0002-9146-8631>

Ing. Jean Marc-Bec³ <https://orcid.org/0000-0001-9273-5327>

Thomas Jaumejoan³ <https://orcid.org/0000-0002-2768-1630>

¹Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, Puebla, México

²Association Partage de Connaissances, Francia

³ Servicio de Asistencia Técnica a Responsables de Estaciones de Depuración (SATESE 81), Francia

*Autor para la correspondencia. correo electrónico: navarro4899@gmail.com

RESUMEN

Se evaluó el desempeño de humedales construidos de flujo vertical tipo francés de diferentes configuraciones, para el tratamiento de agua residual doméstica en el Departamento del Tarn en Francia. Asimismo, se evalúa el funcionamiento de estos sistemas, a nivel de mesocosmos, para la remoción de contaminantes emergentes en el tratamiento terciario del efluente de una planta municipal en México, comparando dos especies de macrófitas, *Phragmites australis* y *Typha latifolia*. Los resultados obtenidos en el Tarn muestran que estos sistemas logran altas tasas de remoción de la materia orgánica y el nitrógeno, con un funcionamiento estable en el tiempo. En Izúcar de Matamoros, al comparar las dos macrófitas, se observaron resultados de remoción de la carga orgánica y de algunos microcontaminantes orgánicos, ligeramente mejores para la *Typha latifolia*, con valores de turbiedad que se acercan al valor establecido para agua de uso público urbano según la normatividad de México.

Palabras clave: humedales construidos; flujo vertical; agua residual municipal; Francia; México.

ABSTRACT

It was evaluated the performance of French vertical flow constructed wetlands of different configurations, for the treatment of domestic residual water in the Tarn Department in France. Likewise, the functioning of these systems, at the mesocosmos level, for the removal of emerging contaminants in the tertiary treatment of the effluent of a municipal plant in Izúcar de Matamoros, Mexico was evaluated, comparing two species of macrophytes, *Phragmites australis* and *Typha latifolia*. The results obtained in the Tarn show that these systems achieve high removal rates of organic matter and nitrogen, with a stable operation over time. In Izúcar de Matamoros, when comparing the two macrophytes, were observed slightly better results of organic load and some organic micropollutants removal for *Typha latifolia*, with turbidity values that approach the value established for urban public use water accordingly to Mexican regulations.

Keywords: constructed wetlands; vertical flow; municipal wastewater; France; México.

Recibido: 12/7/2020

Aprobado: 11/9/2020

Introducción

Solo un 22 % de la población de América Latina y el Caribe tiene acceso a los servicios de saneamiento, situación que se agrava en el medio rural.⁽¹⁾ Los elevados costos de inversión, operación y mantenimiento del saneamiento convencional, poco atractivos y muchas veces inalcanzables, especialmente para las comunidades de bajos ingresos, obliga a volver la mirada a la descentralización del tratamiento utilizando las tecnologías basadas en la naturaleza, entre las que se encuentran los humedales artificiales o construidos.⁽²⁻⁴⁾ Entre los diferentes tipos de humedales construidos, los de flujo vertical (HV), especialmente de tipo francés, son atractivos debido a su capacidad de tratar aguas municipales crudas sin una sedimentación primaria.⁽⁵⁻⁶⁾ Además, la reutilización del agua puede convertirse en una fuente de agua para otros usos. Esto a nivel local precisa, inexorablemente, del tratamiento descentralizado en ese nivel, lográndose por ejemplo con HV el cumplimiento de normas de descarga del nitrógeno.⁽⁷⁾

Las principales características de los humedales de flujo vertical (HV), están bien descritas en la literatura.⁽⁸⁾ Los HV son aplicados para remover con eficiencia la materia orgánica y promover los procesos de nitrificación. Esto se logra por el alto suministro de oxígeno que se alcanza con la alimentación intermitente de los sistemas y el control de la carga hidráulica. Debido a la intermitencia en la alimentación se suceden períodos de saturación

e insaturación del medio soporte con agua, estimulando la entrada de aire al sistema, lo que crea condiciones más óxicas que en los sistemas de flujo horizontal y estimula los procesos oxidativos. La transferencia de oxígeno, que ocurre sin necesidad de fuentes externas de energía, se debe a los procesos de reaeración atmosférica, convección y difusión con un aporte secundario de las plantas, observándose que la tasa de transferencia del oxígeno, supera a la de su consumo.⁽⁹⁻¹⁰⁾ Aunque con mayor frecuencia son alimentados como se mencionó, pueden trabajar en modo continuo (eventualmente) o semicontinuo y con recirculación.⁽¹¹⁻¹³⁾ Aunque se ha señalado que son más susceptibles a la colmatación que los de flujo horizontal, la deposición de los sólidos del agua cruda conduce a la formación de una capa superior de sólidos que no afecta la infiltración del agua residual, aunque cuando alcanza un espesor considerable debe ser removida, además una elección adecuada del medio soporte contrarresta esto.⁽¹⁴⁻¹⁶⁾

Un aspecto importante para considerar el empleo de los humedales construidos, dada la universalidad del uso de productos de cuidado personal, fármacos, etc., que al final terminan en los ecosistemas acuáticos como microcontaminantes orgánicos (MCO), es la capacidad de estos sistemas de removerlos, cosa que no se logra eficientemente en los sistemas convencionales de tratamiento como los de lodos activados, filtros percoladores, entre otros.⁽¹⁷⁻¹⁸⁾

Los HV han sido utilizados con éxito en diferentes regiones climáticas incluyendo el clima tropical y el de regiones áridas o semiáridas⁽¹⁹⁻²⁰⁾, así mismo es insuficiente el estudio y aplicación en América Latina de los humedales construidos en general y de estos sistemas en particular.⁽²¹⁾ Por lo anterior, para evaluar el desempeño de los HV en dos condiciones climáticas y con objetivos distintos al tratar agua residual municipal, en el presente trabajo se muestran los resultados de la remoción de la carga orgánica en sistemas a escala completa, durante 9 años en la región del Tarn en Francia y de microcontaminantes orgánicos, a nivel experimental en mesocosmos, en Izúcar de Matamoros, Puebla, México.

Materiales y métodos

Humedales en el Tarn

El Tarn es un departamento esencialmente rural, con clima oceánico templado de 390.000 habitantes en tres ciudades medianas (Albi con 60.000, Castres con 45.000 y Gaillac con 20.000 habitantes). Un sector industrial modesto que cuenta con una red de humedales construidos de tipo rústico, fundamentalmente para pequeñas aglomeraciones urbanas. La evaluación en esta región de la eficiencia de estos sistemas para remover la contaminación de las aguas residuales municipales es una experiencia útil, salvando las diferencias climáticas y socio-económicas, para muchas regiones de América Latina.

Se utilizaron los datos recopilados por el SATESE 81 (Servicio de Asistencia Técnica a Responsables de Estaciones de Depuración del departamento del Tarn), correspondientes a los análisis de influentes y efluentes, en los laboratorios acreditados ante las autoridades,

de 67 plantas de tratamiento con humedales plantados con carrizos, de 1, 2 etapas (2 HV en serie) o con recirculación, que atienden de 70 a 200, 200 a 1000 o 1000 a 3000 habitantes-equivalentes (HE) (tabla 1).

Tabla 1- Humedales evaluados en el estudio

Tipo	Tamaño, HE		
	<200	220-850	1000-3000
1 etapa	28	13	3
2 etapas	3	7	2
Con recirculación	-	3	2

Las variables evaluadas fueron los porcentajes de remoción (con base en el flujo de entrada, kg d^{-1}), de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno total (Ntot) y fósforo total (Ptot), obtenidos entre 2009 y 2018, de acuerdo con los métodos establecidos en la legislación francesa. El sistema francés de HV está bien descrito en la literatura.⁽²²⁾ Estos sistemas constan por lo general de tres trenes de tratamiento, que trabajan en un régimen de un período de suministro por pulsos de agua residual por dos de descanso (comúnmente el período es de una semana).

Como parte de la evaluación del trabajo de los sistemas, se entrevistó a los encargados de la operación de los sistemas de 3 comunidades.

Humedales en Izúcar de Matamoros, México

Izúcar de Matamoros es un municipio con un clima cálido subhúmedo con una población cercana a 70,000 habitantes. La cabecera municipal es la ciudad del mismo nombre y en su periferia se encuentra la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Izúcar de Matamoros (PTAR-IM), lugar en que se realizaron los experimentos. Siguiendo las recomendaciones generales para el diseño de estos sistemas ⁽¹⁴⁾, se construyeron dos sistemas de 1 m^2 de superficie y se empaquetaron ambos tanques con grava de diferentes diámetros (de abajo hacia arriba: diámetro en cm, espesor de la capa, en cm): 8 -10, 10; 2 – 4, 15; 0,5 – 2, 10; 0,2 -0,8, 15 y arena gruesa (diámetro<0,2 cm), como capa más externa.

Un sistema fue plantado con *Phragmites australis* (Phr, carrizo) y el otro con *Typha latifolia* (Ty, espadaña o tule), macrófitas colectadas en la región, ampliamente utilizadas en los humedales construidos.⁽⁴⁾ Los sistemas fueron adaptados durante 3 meses con el agua efluente del segundo sedimentador de la PTAR-IM. Posteriormente se comenzó la operación diaria de los sistemas con 4 pulsos de 50 L cada 2 h y 16 h de descanso para cada sistema. Este régimen de pulsos fue escogido para evaluar la eficiencia de los sistemas en el trabajo durante un turno de 8 h, jornada laboral típica y garantizar así la atención del humedal por personal que desempeña otras actividades en una instalación de tratamiento.

Después de 3 meses de trabajo se realizaron 5 muestreos semanales, analizándose pH, conductividad (CE, $\mu\text{S cm}^{-1}$), turbiedad (TUR, unidades de turbiedad nefelométricas – UTN),

potencial redox (Eh, mV) y oxígeno disuelto (Od, mg L⁻¹), así como la concentración de las especies nitrogenadas NH₄⁺, NO₂⁻ y NO₃⁻ en mg L⁻¹, en el influente y el efluente de cada mesocosmos. Se analizaron, a la entrada y la salida de los dos HV, por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, según se reporta en ⁽²³⁾, las concentraciones en µg L⁻¹, los siguientes MCO: cafeína (CAF), galaxolide (GAL), tonalide (TON), Parsol MCX (PAR), Sunscreen UV-15 (SCR), naproxeno (NAP), metildihidrojasmonato (MDJH), alquifenoles (AP), triclosán (TRI) y los alquifenoles mono- y dietoxilados (APMEO y APDEO). Para todos los compuestos estudiados se determinaron sus cargas en µg m⁻³ d⁻¹.

Análisis estadístico

Para el análisis gráfico-estadístico se utilizó el paquete Statistica v. 13.3 (TIBCO Software Inc., USA). En todos los casos para establecer diferencias significativas se utilizó el criterio de p<0.05.

Resultados y su discusión

Humedales en el Tarn

El análisis de las cargas orgánicas en el influente de los sistemas mostró una relativa estabilidad durante los años evaluados (figura 1A). Esto se debe, de acuerdo con lo expresado en las entrevistas por las autoridades encargadas de los sistemas, a la disciplina de la población con respecto a lo que arrojan a sus aguas residuales domésticas, fruto a su vez de las campañas de educación y de las medidas que se toman con los infractores. Este aspecto puede ser un factor que influye en que los sistemas estudiados mostraron una buena estabilidad en la remoción de la carga orgánica. Dicha estabilidad se ejemplifica en la (figura 1B), que muestra los valores medios del porcentaje de remoción (%R) de la DBO. Se alcanzan valores de porcentajes de remoción muy cercanos a los reportados en un estudio de similar envergadura ⁽⁶⁾, (etapas, %R DBO, %R DQO, %R SST, %R Ntot, %R P tot): 2, 98, 93, 96, 93, 30; 1, 94, 86, 91, 81, 12.

En la figura 2 se muestran los valores medios de los porcentajes de remoción obtenidos en los diferentes sistemas de humedales del Tarn.

Como se puede observar, los sistemas de dos etapas presentan los mejores resultados, excepto para la remoción del Ptot en poblaciones pequeñas o grandes. El análisis de varianza de Kruskal-Wallis confirmó lo observado, mostrando diferencias significativas entre los sistemas de dos etapas y los otros dos tipos de sistemas, para la DBO, DQO, SST y Ntot pero no para el Ptot (tabla 2).

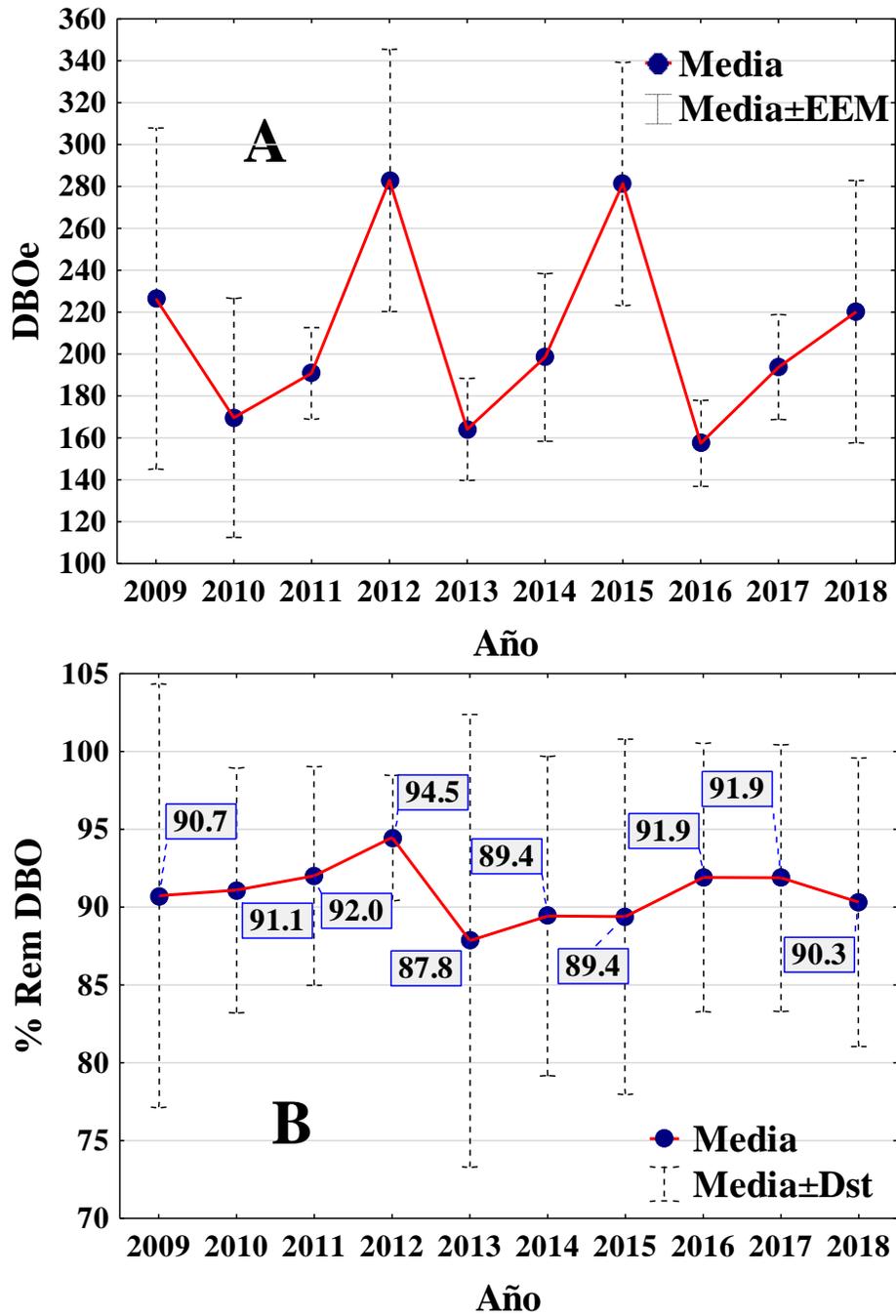
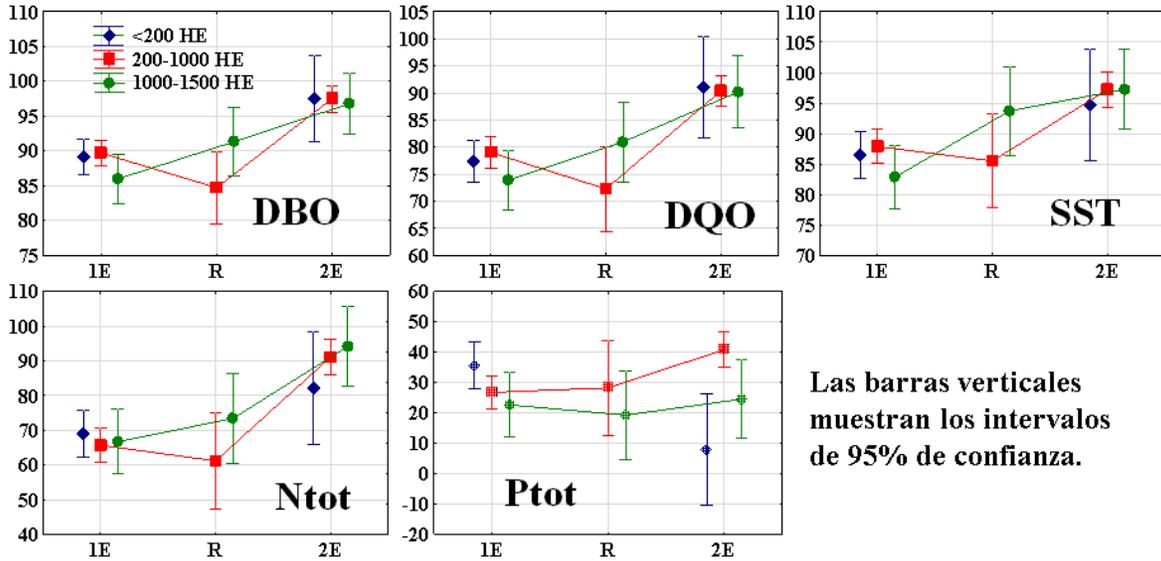


Fig. 1- Valores medios de la DBO (A) y de sus porcentajes de remoción (B) en los sistemas de humedales en el Tarn

Nota: Dst – desviación estándar; EEM – error estándar de la media.



Las barras verticales muestran los intervalos de 95% de confianza.

Fig. 2- Valores medios de la remoción de la contaminación orgánica en los diferentes sistemas de humedales del Tarn

Tabla 2- Valores de p para comparaciones múltiples de 2 colas.

	DBO			DQO		
	1E	R	2E	1E	R	2E
1E		1,000 000	0,000 000		1,000 000	0,000 000
R	1,000 000		0,000 000	1,000 000		0,000 005
2E	0,000 000	0,000 000		0,000 000	0,000 005	
	SST			Ntot		
	1E	R	2E	1E	R	2E
1E		0,687 294	0,000 000		1,000 000	0,000 000
R	0,687 294		0,000 412	1,000 000		0,000 099
2E	0,000 000	0,000 412		0,000 000	0,000 099	
	Ptot					
	1E	R	2E	1E	R	2E
1E		0,821 941	0,099 690			
R	0,821 941		0,074 592			
2E	0,099 690	0,074 592				

Según estudios realizados en el SATESE 81, que constan en la documentación de dicha entidad, entre 2009 y 2011, considerando 19 instalaciones, la supresión de una segunda etapa conlleva un ahorro económico que se sitúa entre el 20 y el 30 % de la inversión total. Por otra parte, un estudio publicado en 2011 por el Observatorio del Agua del departamento Seine et Marne sobre los costos de inversión para humedales de dos etapas (22 instalaciones) ⁽²⁴⁾, concluye que el costo de inversión promedio para HV con capacidades comprendidas entre 500 y 1000 HE es de 624 €/HE. En el caso de capacidades comprendidas

entre 1000 y 2000 HE, el costo de inversión disminuye a 542 €/HE. Los costos de explotación se sitúan alrededor de 9 euros/HE/año. Considerando un 25 % de economía, para 500-1000 HE y los valores de las cargas de entrada/salida para los sistemas de 1 (HV1) y 2 etapas (HV2), en g DBO d⁻¹ HE⁻¹ m⁻², 13,30/1,07 y 25,42/0,60 respectivamente, el costo de inversión por gramo de DBO removida por día, m² y HE para los HV1 y HV2 es de 59,6 y 51,7 € respectivamente. Aunque esto confiere cierta ventaja a los HV2, el hecho de que los HV1 requieren 1,5 m² HE⁻¹ y los HV2 2 m² HE⁻¹, puede ser el factor más importante para decidir por los HV1 en condiciones de limitación de terreno para la instalación de los HV.

Humedales en Izúcar de Matamoros, México

En la tabla 3 se muestran los resultados del análisis de los índices fisicoquímicos del agua influente y efluente de los mesocosmos ubicados en la PTAR-IM. Se observa una disminución drástica de la turbiedad, un incremento del potencial redox y del contenido de oxígeno disuelto, que evidencian un ambiente óxico característico de estos sistemas, un cambio en los valores de pH hacia valores más cercanos a la neutralidad y una ligera disminución de la conductividad eléctrica. En correspondencia con el ambiente óxico, hay una remoción de amonio y un incremento de los nitritos y nitratos por el decursar de los procesos de nitrificación. Estos cambios en los índices fisicoquímicos se corresponden plenamente con los valores reportados para los HV en Alemania y España.⁽²⁵⁻²⁶⁾ Las diferencias entre los resultados obtenidos con Phr y Ty, evidencian un ambiente más óxico en los sistemas plantados con Ty. Es de destacar, que la turbiedad, después del tratamiento en el HV plantado con Ty, alcanza ya un valor muy cercano a lo estipulado en la Ley Federal de Derechos (última modificación de 2018), para agua de uso público urbano de 10 UTN.⁽²⁷⁾ Utilizando sistemas de dos etapas (datos que no se muestran), se alcanzan valores inferiores a lo normado.

Tabla 3- Valores de los índices físico-químicos (las unidades se expresan en el texto).

	Entrada	Phr	Ty
TUR	67,0±5,6	15,7±3,0	11,3±3,6
Eh	-276,0±7,3	17,8±1,3	19,6±1,1
Od	0,00±0,00	0,98±0,96	1,26±0,85
CE	2024±436	1945±366	1820±387
pH	7,59±0,53	7,31±0,31	7,20±0,59
NO ₂ ⁻	0,92±0,43	4,40±2,95	1,15±0,88
NH ₄ ⁺	8,23±2,55	2,47±0,95	0,94±0,41
NO ₃ ⁻	3,29±1,53	5,57±2,65	7,29±2,19

En lo concerniente a la remoción de los MCO, en la tabla 4 se muestran los valores medios y desviaciones estándar de las concentraciones a la entrada y la salida de los sistemas, así como los porcentajes de remoción de sus cargas.

Estos resultados, aunque corresponden a humedales jóvenes en los que las poblaciones microbianas aún no han madurado completamente, muestran la eficacia de los HV para remover los MCO. Los valores de remoción del NAP, TON, TRI y CAF son comparables con los reportados para sistemas de similar diseño como se muestra en la figura 3. Los altos valores de remoción de la CAF son congruentes con la alta degradabilidad de este compuesto en estos sistemas.⁽²⁶⁾

Tabla 4. Concentraciones (C, $\mu\text{g L}^{-1}$, media \pm desviación estándar) y porcentajes de remoción (%R) de las cargas de los MCO en los HV en Izúcar de Matamoros.

MCO	CAF	GAL	TON	PAR	SCR	NAP
Entrada, C	2,39 \pm 1,34	1,38 \pm 1,19	0,12 \pm 0,10	0,54 \pm 0,44	1,36 \pm 1,06	0,75 \pm 0,47
Phr, C	0,44 \pm 0,24	0,42 \pm 0,36	0,06 \pm 0,05	0,11 \pm 0,13	0,47 \pm 0,31	0,65 \pm 0,52
Phr, %R	81,8	70,0	53,7	80,0	65,3	13,5
Ty, C	0,35 \pm 0,21	0,26 \pm 0,24	0,04 \pm 0,03	0,09 \pm 0,11	0,34 \pm 0,29	0,43 \pm 0,39
Ty, %R	85,2	81,4	68,3	82,7	75,1	42,8
MCO	MDHJ	AP	TRI	APMEO	APDEO	
Entrada, C	4,47 \pm 1,65	38,26 \pm 33,42	2,88 \pm 0,85	11,61 \pm 11,59	3,09 \pm 2,45	
Phr, C	3,04 \pm 1,94	11,60 \pm 6,11	1,46 \pm 1,54	3,50 \pm 3,15	0,78 \pm 0,69	
Phr, %R	32,2	69,7	49,3	69,9	74,9	
Ty, C	1,98 \pm 1,26	8,23 \pm 6,18	0,83 \pm 0,94	1,74 \pm 1,10	0,57 \pm 0,40	
Ty, %R	55,9	78,5	71,3	85,0	81,6	

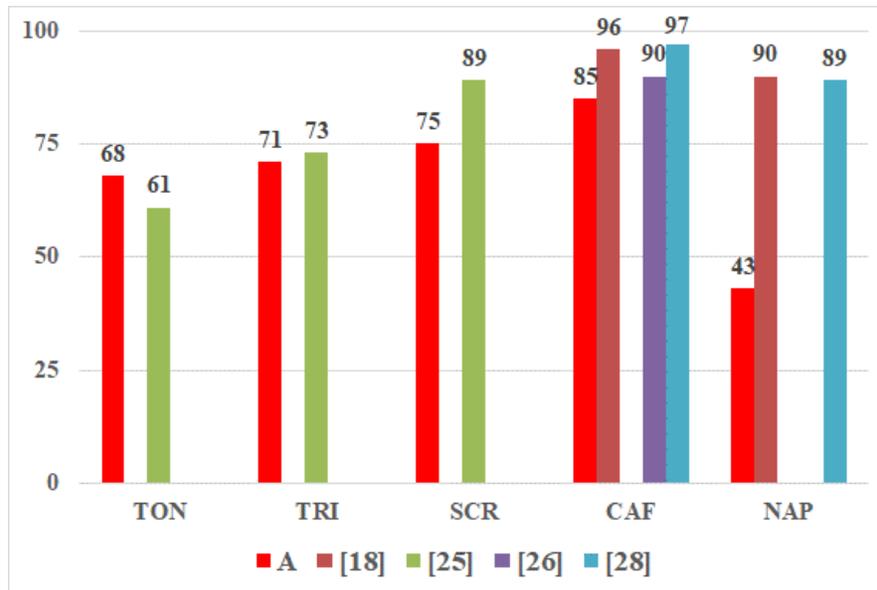


Fig. 3- Comparación de los porcentajes de remoción de algunos MCO

Nota: A – Este trabajo

Debe considerarse que el agua tratada en los HV ya ha recibido un tratamiento secundario. Las aguas residuales de varias poblaciones, localizadas en una amplia zona de la Subcuenca del río Nexapa, en la que se encuentra la ciudad de Izúcar de Matamoros, presentan una variabilidad muy grande de la contaminación orgánica y del contenido de materia flotante y sólidos.⁽²⁸⁻³⁰⁾ Esto implica que con las características que presentan las aguas residuales en muchas regiones de México y Latinoamérica, resulta necesario incluir antes del humedal, además del desbaste grueso normal, un tratamiento como puede ser una fosa séptica, un digestor anaerobio, etc., para homogeneizar el afluente a tratar.

Considerando las necesidades de investigación, para que se extienda la aplicación de los distintos tipos de humedales construidos en América Latina, se requieren más estudios, tanto de su eficiencia en la remoción de la contaminación orgánica en términos generales, como de los microcontaminantes orgánicos en particular.⁽¹⁷⁾ En este sentido la utilización de sistemas híbridos es una opción prometedora.⁽³¹⁻³²⁾ Otro aspecto que necesita de investigación es la modelación de los procesos de remoción de los contaminantes, para lo cual se han diseñado diversas herramientas de software.⁽³³⁾

Conclusiones

Los humedales verticales que se utilizan en el tratamiento de las aguas residuales de pequeñas comunidades en el Tarn remueven la DBO, DQO, SST y Ntot con gran eficiencia. Aunque se obtienen mayores tasas de remoción con los HV de 2 etapas, este incremento en la eficiencia debe ser evaluado considerando el menor requerimiento de área para los

HV de 1 etapa, así como los valores a alcanzar de los índices fisicoquímicos. Los experimentos a nivel de mesocosmos de tratamiento terciario del agua efluente de una planta de tratamiento convencional en México, muestran que se alcanzan valores de turbiedad muy cercanos a los requeridos para agua de uso público urbano, según la legislación mexicana. La remoción de algunos de los MCO estudiados en el tratamiento terciario mencionado, muestra la utilidad de los HV para atenuar la contaminación de las aguas superficiales por estos compuestos, aspecto al cual se le está prestando una creciente atención. Las diferencias climáticas de las dos regiones, del sistema de trabajo de los HV y los distintos aspectos de la contaminación que abordan los sistemas estudiados, muestran la conveniencia de su consideración para el tratamiento de aguas residuales municipales en distintas regiones de América Latina.

Referencias bibliográficas

1. BID “Proceso Regional de las Américas. Foro Mundial del Agua 2018. Informe Regional 2018. América Latina y el Caribe / Resumen Ejecutivo”, Banco Interamericano de Desarrollo, 2018. [En línea]. Disponible: https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/informe_regional_america_latina_y_caribe.pdf. Accedido: 15/05/2020.
2. “Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua.” WWAP (Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos)/ONU-Agua. París, UNESCO. 2018.
3. DE ANDA SÁNCHEZ J. “Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales en México”, *Sociedad y Ambiente*. 2017, **5**(14), 119-143. [En línea]. Disponible:<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=455752575007>. Accedido:15/05/2020.
4. VYMAZAL J. “Constructed Wetlands for Wastewater Treatment”. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Encyclopedia of Ecology, 2nd Edition, 2018. doi:10.1016/b978-0-12-409548-9.11238-2
5. YADAV, A.; CHAZARENC, F.; MUTNURI, S. “Development of the “French system” vertical flow constructed wetland to treat raw domestic wastewater in India”. *Ecol Eng.*, 2018, **113**, 88–93. doi:10.1016/j.ecoleng.2018.01.001.
6. PAING J. *et al.* “Effect of climate, wastewater composition, loading rates, system age and design on performances of French vertical flow constructed wetlands: A survey based on 169 full scale systems”. *Ecol Eng.* 2015, **80**, 46–52, doi:10.1016/j.ecoleng.2014.10.029.
7. NIVALA J. *et al.* “Vertical flow constructed wetlands for decentralized wastewater treatment in Jordan: Optimization of total nitrogen removal”. *Sci. Total Environ*, 2019, **671**, 495–504. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.03.376

8. STEFANAKIS A.; AKRATOS C.S.; TSIHRINTZIS V.A. "Vertical Flow Constructed Wetlands, Ecoengineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment", Elsevier, Boston, 392 pp, 2014.
9. DECEZARO S. T., *et al.* "Influence of hydraulic loading rate and recirculation on oxygen transfer in a vertical flow constructed wetland". *Sci. Total Environ.*, 2019, **668**, 988–995. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.03.057.
10. PELISSARI C. *et al.* "Effects of partially saturated conditions on the metabolically active microbiome and on nitrogen removal in vertical subsurface flow constructed wetlands". *Water Res.* 2018, **141**, 185–195. doi:10.1016/j.watres.2018.05.002.
11. BISONE S. *et al.* "Influence of loading rate and modes on infiltration of treated wastewater in soil-based constructed wetland". *Environ Technol.*, 2016, **38**(2), 163-174. doi:10.1080/09593330.2016.1185165.
12. KUMAR M.; SINGH R. "Performance evaluation of semi continuous vertical flow constructed wetlands (SC-VF-CWs) for municipal wastewater treatment". *Bioresour. Technol.* 2017, **232**, 321-330. doi:10.1016/j.biortech.2017.02.026.
13. WEEDON C.M. "Tertiary sewage treatment by a full-scale compact vertical flow constructed wetland". *Environ Technol.*, 2017, **38**(2), 140-153. doi: 10.1080/09593330.2016.1191548.
14. GARCÍA J.; CORZO A. "Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial". Disponible: <http://hdl.handle.net/2117/2474>.
15. BRUCH I., *et al.* "Influence of soil physical parameters on removal efficiency and hydraulic conductivity of vertical flow constructed wetlands". *Ecol Eng.* 2014, **68**, 124-132. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.03.069
16. MARTINEZ-CARVAJAL G.D., *et al.* "Assessment of X-ray Computed Tomography to characterize filtering media from Vertical Flow Treatment Wetlands at the pore scale". *Sci Total Environ.* 2019, **658**, pp. 178-188. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.119.
17. ILYAS, H., VAN HULLEBUSCH, E. D. "Performance Comparison of Different Constructed Wetlands Designs for the Removal of Personal Care Products". *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(9), 3091. doi:10.3390/ijerph17093091.
18. NIVALA J., *et al.* "Dynamics of emerging organic contaminant removal by conventional and intensified subsurface flow treatment wetland designs". *Sci. Total Environ.* 2019, **649**, 1144-1156. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.339.
19. LOMBARD-LATUNE R., *et al.* "Resilience and reliability of compact vertical-flow treatment wetlands designed for tropical climates". *Sci. Total Environ.* 2018, **642**, 208–215. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.06.036.
20. STEFANAKIS, A. I. "Constructed Wetlands for Sustainable Wastewater Treatment in Hot and Arid Climates: Opportunities, Challenges and Case Studies in the Middle East". *Water*, 2020, **12**(6), 1665. doi:10.3390/w12061665

21. RODRIGUEZ-DOMINGUEZ, M. A., *et al.* (2020). "Constructed Wetlands in Latin America and the Caribbean: A Review of Experiences During the Last Decade". *Water*, 2020, **12**(6), 1744. doi:10.3390/w12061744
22. MOLLE, P., *et al.* "How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems". *Water Science and Technology* 2005, **51**(9), 11–21.
23. NAVARRO-FRÓMETA A.E., *et al.* "Microcontaminantes orgánicos en los ríos de México: El caso del río Nexapa". En: *Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Handbook T.IV*, M. Ramos y V. Aguilera (eds). Ecorfan-Valle de Santiago, 2014, cap. 7, pp. 49-53. Disponible: https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias%20de%20la%20Ingenieria%20y%20Tecnologia%20T-IV/Articulo_7.pdf
24. "Les coûts des opérations dans le domaine de l'eau en Seine-et-Marne". Observatoire de l'Eau en Seine-et-Marne. 2015. Información suministrada por el SATESE 81.
25. ÁVILA C., *et al.*, "Emerging organic contaminants in vertical subsurface flow constructed wetlands: Influence of media size, loading frequency and use of active aeration". *Sci. Total Environ.* 2014, **494-495**, 211–217. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.06.128.
26. SGROI M. *et al.*, "Removal of organic carbon, nitrogen, emerging contaminants and fluorescing organic matter in different constructed wetland configurations". *Chem Eng. J.*, 2018, **332**, pp. 619–627. doi:10.1016/j.cej.2017.09.122.
27. Ley Federal de Derechos. Última modificación 2018. Recuperada de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/107_281218.pdf.
28. KAHL S., *et al.*, "Effect of design and operational conditions on the performance of subsurface flow treatment wetlands: Emerging organic contaminants as indicators". *Water Res.* 2017, **125**, 490–500. doi:10.1016/j.watres.2017.09.004.
29. NAVARRO-FRÓMETA A. E.; PEÑA-CALVA, A.; TELLEZ V. A. "Estudio de las descargas de la ciudad de Izúcar de Matamoros". *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 2005, **21**(Sup.1), 716-721.
30. CRUZ M. M. L.; ROSAS L. E.; NAVARRO A. E. "Análisis De Descargas Que Contaminan Aguas Superficiales". *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 2005, **21**(Sup.1), 1013-1018.
31. MORALES-MORALES L.; NAVARRO-FRÓMETA A. E.; HERRERA-CÁRDENAS J. A. "Humedales híbridos para el tratamiento terciario de aguas municipales". En Ríos, N. y cols. (Comp.). *Ciencias Ambientales: Tendencias y Aplicaciones Tecnológicas en México*. 2017, (pp. 134-144). México: ITSON.
32. GONZALO, O.G.; RUIZ, I.; SOTO, M. "Effect of different bypass rates and unit area ratio in hybrid constructed wetlands". *Environ Sci Pollut Res* 2020, <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09982-9>
33. YUAN, C., *et al.* "Numerical Models of Subsurface Flow Constructed Wetlands: Review and Future Development". *Sustainability*, 2020, **12**(8), 3498. doi:10.3390/su12083498

Conflicto de interés

Los autores expresan que no hay conflictos de intereses en el manuscrito presentado

Contribución de los autores

Navarro Frómeta Amado Enrique: Diseño y ejecución de la experimentación en México, análisis estadístico, elaboración de manuscrito, participó activamente en la discusión de los resultados, revisión y aprobación de la versión final del trabajo.

Beissos Federico: Recopilación de la información en Francia. Elaboración de manuscrito. Participó activamente en la discusión de los resultados. Revisión y aprobación de la versión final del trabajo.

Bec Jean Marc: Recopilación de la información en Francia. Participó activamente en la discusión de los resultados. Revisión y aprobación de la versión final del trabajo.

Jaumejoan Thomas: Recopilación de la información en Francia. Participó activamente en la discusión de los resultados; Revisión y aprobación de la versión final del trabajo.