

## **El tratamiento descentralizado del agua residual de pequeñas localidades rurales y suburbanas: los humedales construidos, una tecnología a considerar**

Decentralized treatment of suburban and small rural communities: artificial or constructed wetlands, a technology to consider

Dr.C Amado Enrique Navarro-Frómeta<sup>1\*</sup>

Dr. C María del Carmen Durán-Domínguez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, México.

<sup>2</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, México.

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

### **RESUMEN**

Una de las opciones amigables con el entorno, de tratamiento descentralizado del agua residual de comunidades con menos de 2000 habitantes, son los humedales construidos (HC). Son semi-terrestres. Tienen una humedad elevada y vegetación con potencial auto-depurador. Mimetizan los procesos de los humedales naturales, con consumos mínimos o nulos de energía. Pueden considerarse como bio-reactores con aireación natural, donde las plantas emergentes transportan oxígeno del aire hacia sus rizomas, creando un mosaico de zonas aerobias y anaerobias que favorecen la sedimentación y filtración de los sólidos suspendidos, la degradación microbiana de la materia orgánica, la nitrificación y desnitrificación, la precipitación de fosfatos y la muerte de patógenos mediante la fito-remediación. Tienen bajos costos de construcción, operación y mantenimiento. Su desventaja es el área necesaria. Por ello,

aquí se abordan tres estudios de caso con humedales de flujo sub-superficial horizontal, vertical e híbridos mostrando remoción eficiente de contaminantes.

**Palabras clave:** tratamiento descentralizado, agua residual, pequeñas localidades rurales y suburbanas, humedales construidos.

## **ABSTRACT**

One of the environmentally friendly options for decentralized treatment of wastewaters from communities with less than 2000 inhabitants is the constructed wetlands (CW). These are semi-terrestrial systems with high moisture contents and vegetation with auto-depuration potential. Natural wetlands are mimicked by CW with minimum or even null energy consumption. They can be considered as bio-reactors with natural aeration where emerging plants transport oxygen from air to its rhizomes creating a mosaic of aerobic and anaerobic zones favoring settling and filtration of suspended solids, microbial degradation of organic matter, nitrification and denitrification, phosphates precipitation, and pathogens death by phyto-remediation. They have low construction, operation, and maintenance costs. Its disadvantage is the required area. Thus, three study cases are presented for horizontal, vertical, and hybrid subsuperficial flow constructed wetlands showing efficient removal of pollutants.

**Keywords:** decentralized treatment; wastewaters; small suburban and rural communities; constructed wetlands.

Recibido: 22/7/2018

Aprobado: 22/1/2019

## Introducción

Uno de los problemas más graves que enfrentan las pequeñas comunidades tanto rurales como suburbanas de México y Cuba y naturalmente de casi todo el mundo, es la falta de saneamiento. Hace un par de años se hizo un estudio y se planteó como propuesta de solución el uso de los humedales artificiales o construidos, como se les conoce en la mayoría de las publicaciones internacionales.<sup>(1)</sup>

¿Qué son los humedales artificiales o construidos? Son sistemas que mimetizan el comportamiento de los humedales naturales, conocidos con muchos nombres: aguadas, carrizales, cenagales, ciénagas, esteros, lagunas costeras, marismas, pantanos, petenes, popales, rías, sabanas, selvas bajas inundables, tasistales, tintales, tulares y otros más. Se les considera que son los “riñones” del planeta, ya que depuran el agua y proporcionan nutrientes a sistemas megadiversos. Cada año, el 2 de febrero, se celebra el Día Mundial de los Humedales

A los humedales naturales se les ha considerado tradicionalmente sitios carentes en absoluto de valor, meros obstáculos para la construcción de caminos, la agricultura o la urbanización. Sin embargo, constituyen uno de los más valiosos recursos naturales y hay que tomar medidas para protegerlos y conservarlos, porque su destrucción puede tener serias consecuencias para la pesca, el turismo y otras actividades.

Algunos humedales en el interior de México, por ejemplo, las milenarias pozas de Cuatro Ciénegas en el estado nortero de Coahuila, son de gran importancia ecológica, por la singularidad de su biodiversidad. Igualmente es de gran valor el humedal que constituye la Ciénaga de Zapata en Cuba. Lo aislado y estable de estos humedales complejos ha ocasionado la evolución de especies únicas en el lugar, entre las que pueden mencionarse peces, caracoles, algas y tortugas.<sup>(2)</sup>

En general, los humedales tienen una alta producción pesquera, son refugio de flora y fauna silvestres y brindan una gran variedad de bienes, servicios y funciones de gran valor. Son fuente de agua para uso humano, recargan los mantos acuíferos, filtran el agua y mejoran su calidad, pueden ser utilizados como fuente de energía, barreras contra huracanes, vías de comunicación, etc. Ayudan a controlar las inundaciones y erosiones, y protegen las costas.

Actualmente la importancia de estos ecosistemas es reconocida y diferentes organizaciones nacionales e internacionales trabajan para su protección y recuperación. Debido a que los humedales naturales constantemente sufren el ataque de los seres humanos, se constituyó en 1971 en la ciudad de Ramsar, Irán, un convenio internacional para protegerlos, que entró en vigor en 1975, siendo ratificado originalmente por siete países.<sup>(3)</sup>

Tomando estas bondades de los humedales naturales, en los artificiales o construidos, se ha buscado diseñarlos y construirlos para que operen eficientemente y depuren aguas residuales, incluyendo las industriales, por ejemplo los efluentes de los ingenios azucareros, de actividades agropecuarias, como la de los estanques acuícolas, de tanta importancia en Cuba y México <sup>(4-9)</sup>, que pueden contener materia orgánica biodegradable, microcontaminantes orgánicos (entre ellos los fármacos), metales pesados, compuestos recalcitrantes, microorganismos, etc., dependiendo de su origen.<sup>(10-14)</sup>

Las plantas acuáticas juegan un rol preponderante gracias a que realizan fotosíntesis durante el día, consumiendo CO<sub>2</sub> y produciendo dióxígeno <sup>(15-16)</sup>, pueden remover nitrógeno <sup>(17-19)</sup>, mientras que en otras zonas tienen condiciones de anaerobiosis si están alejadas de la zona radicular o de rizomas o durante la noche, ya que la difusión del oxígeno del aire a través de sus aerénquimas es lenta.

Consecuentemente, se buscan sistemas amigables con el ambiente, de costos bajos tanto de diseño, como de construcción, arranque, operación y mantenimiento, que incluso puedan operar sin un pre-tratamiento como es el caso de los sistemas “verticales franceses”. Aunque esto debe ser cuidadosamente valorado por el riesgo de la colmatación. Estos humedales construidos puedan ser operados por personas de las comunidades, para el saneamiento de sus aguas residuales, contribuyendo así al tratamiento descentralizado, por lo que se proponen como una solución.<sup>(18,20-22)</sup>

El objetivo de esta investigación es mostrar los resultados de tres opciones diferentes de depuración, usando humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal, vertical e híbridos, corroborando sus bondades y debilidades, para poderlos aplicar a pequeñas comunidades de menos de 2000 habitantes, ya sean rurales o suburbanas.

## Materiales y métodos

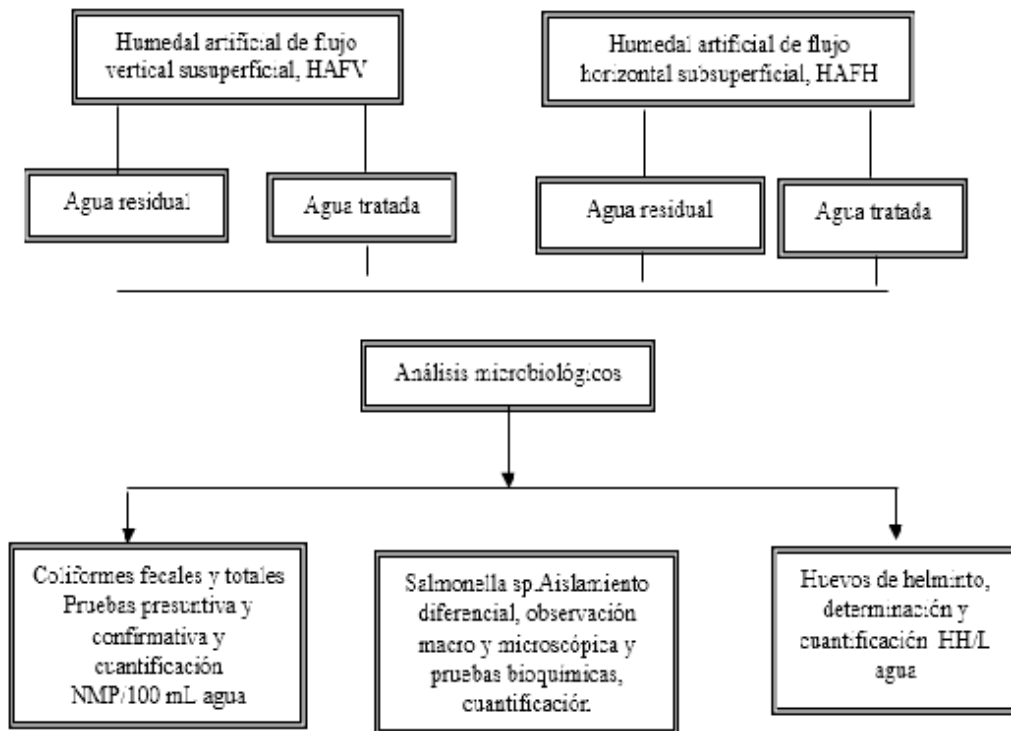
### Tipos de humedales artificiales o construidos estudiados

#### Flujo horizontal

Se realizaron experimentos a nivel de planta piloto en dos sistemas de flujo horizontal subsuperficial.<sup>(7,23)</sup> Ambos HAFH se alimentan con agua residual de tipo mixto. Para el primero, el agua proviene del río Magdalena, el cual nace en la Alcaldía de Magdalena Contreras y atraviesa el suroeste de la Ciudad de México, pasando por los Viveros de Coyoacán donde está ubicado (Alcaldía de Coyoacán). Este humedal tiene dos tipos de hidrofitas (*Phragmites australis* y *Cyperus papyrus*). La descripción detallada del sistema se encuentra en<sup>(7)</sup> y una de la FES-Z.<sup>(24)</sup>

Para los análisis microbiológicos (coliformes fecales y totales y *Salmonella*) se utilizó una metodología que se resume en el esquema presentado en la figura 1. Las muestras fueron tomadas siguiendo la metodología de la Norma Oficial Mexicana NOM-112-SSA1-1994.<sup>(25)</sup> Las placas se incubaron a  $35\pm 2^{\circ}\text{C}$  por 24 horas. Se observó el desarrollo colonial y las características en medios sólidos selectivos. De todas las pruebas los resultados se pueden consultar de acuerdo con las tablas presentadas en la literatura<sup>(7,25-26)</sup> Para la prueba de huevos de helminto, la muestra del agua residual se tomó a la salida del sedimentador primario, es decir, antes de la entrada del humedal en cuestión.

El segundo sistema de flujo horizontal subsuperficial está ubicado en un centro educativo de la UNAM de nivel medio superior, en la zona sur de la Ciudad Universitaria, también en la Alcaldía de Coyoacán de la Ciudad de México. El agua residual mixta proviene de los servicios sanitarios y los laboratorios de biología, química y física. Su descripción completa se encuentra en<sup>(27)</sup>. No se hicieron todos los análisis señalados arriba sino solamente algunos de ellos ya que se consideró que con la caracterización completa del primer sistema era suficiente.



**Fig. 1-** Diagrama de flujo general

### Flujo vertical

Para este sistema se realizaron experimentos a nivel de laboratorio, banco y planta piloto. Para los dos primeros se tiene una descripción completa en la literatura <sup>(23,25)</sup>, así como para el sistema a escala de planta piloto.<sup>(7,28,29)</sup> Para este último sistema se evaluaron el rol de las plantas acuáticas (*Phragmites australis*, *Typha latifolia*, *Thalia geniculata*) en la remoción de contaminantes medidos como demanda química de oxígeno soluble (DQO<sub>soluble</sub>), conductividad eléctrica (EC), nitrógeno (N), así como los potenciales de reducción-oxidación, redox ( $E_h$ ).

Se emplearon contenedores de plástico de 25 y 147 litros, poniendo controles sin hidrofitas y usando como medio de soporte piedra volcánica porosa, conocida en México como *tezontle* (palabra náhuatl o azteca que significa piedra ligera como los cabellos, *tetl*=piedra y *tzontli*=cabellos). Los períodos de iluminación y oscuridad fueron de 16-8h usando tubos fluorescentes con características de luz natural. Algunos de los reactores a escala de laboratorio se mantuvieron inundados para minimizar el

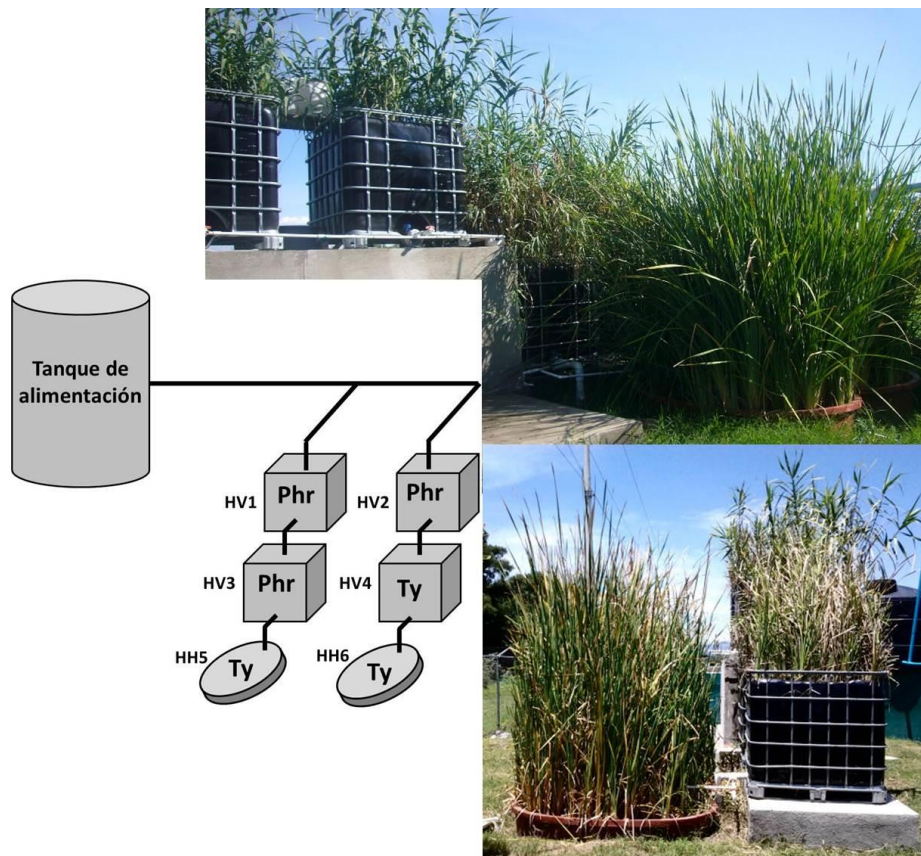
efecto de la transferencia convectiva de oxígeno del aire. Se usó en todos, agua residual sintética preparada con sacarosa,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , y  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  para tener una  $\text{DQO}_{\text{soluble}}$  de 450 mg/L. En los reactores a escala de laboratorio los tiempos de residencia hidráulicos fueron de 0,5 y 1 d y en los de escala de banco de 14,7 y 21 d. Se evaluaron las comunidades microbianas que proliferaban en la zona radicular de los reactores a nivel de laboratorio, usando la metodología ya descrita en la figura 1.

Para el sistema a escala de planta piloto también se tiene su descripción en la literatura.<sup>(29)</sup> Tenía tres tipos de plantas (*Phragmites australis*, *Typha latifolia* y *Scirpus* sp.). La descripción detallada del sistema se encuentra en.<sup>(18,29)</sup> Para el análisis microbiológico de este humedal, la muestra del agua de entrada, fue tomada a la salida del sedimentador primario (que es la entrada del humedal), usando las mismas metodologías ya descritas en la figura 1.

### **Flujo híbrido**

La efectividad de los sistemas híbridos para remover los microcontaminantes orgánicos ha sido descrita previamente.<sup>(30)</sup> Para ilustrar la efectividad de los mismos en la remoción de los microcontaminantes orgánicos de baja masa molecular (MCOBMM), que confieren el olor característico al agua residual municipal, se muestra el estudio de caso del sistema instalado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la ciudad de Izúcar de Matamoros (PTAR-IM). La PTAR-IM, con una capacidad nominal de  $100 \text{ L s}^{-1}$  y que en la actualidad procesa el 50% de ese volumen, se encuentra a la salida de la ciudad, sobre el río Nexapa.

Para el tratamiento terciario del efluente de la PTAR de Izúcar de Matamoros se construyó un prototipo piloto, aprovechando las macrófitas más abundantes en la región, *Phragmites australis* (Phr) y *Typha spp* (Ty). Se construyeron dos líneas en paralelo de humedales híbridos piloto (L1 y L2), con la configuración HFSSV→HFSSV→HFSSH (humedales de flujo subsuperficial vertical→vertical→horizontal). Cada línea cuenta con un arreglo vegetal diferente: L1 – Phr – Phr – Ty; L2 – Phr–Ty – Ty (figura 2).



**Fig. 2-** Esquema e imágenes del sistema de humedales híbridos piloto

La alimentación de los humedales se realizó por una tubería unida al tanque de alimentación, que recoge el agua a la salida del sedimentador secundario de la PTAR-IM. Los experimentos de tratamiento se realizaron mediante la aplicación de 4 pulsos de agua espaciados cada 2 h, con una duración cada uno de 15 minutos, en los que se suministran 50 L del efluente de la planta. Posteriormente el sistema se deja reposar y se repite el ciclo. El suministro de 200 L de agua residual equivale a una carga hidráulica de  $20 \text{ cm d}^{-1}$ . En total se realizaron 3 muestreos de los sistemas, 5 meses después de construidos los mismos. Se tomaron muestras de agua y de cada una de las salidas de los componentes de ambas líneas (figura 2). Las muestras fueron analizadas por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, utilizando la extracción en fase sólida y la sonicación para la extracción de las fases líquida y sólida, procedente de la filtración de las muestras. Se determinaron las concentraciones de los siguientes MCOBMM: cresoles (CRE), éster metílico del ácido bencenoacético (BzAcAME),  $\alpha$ -terpinenol ( $\alpha$ TERP), éster metílico del ácido hidroxicinnámico (HCAME),



vinilguayacol (VG) y metilindoles (IND). Sus concentraciones se determinaron a partir de las curvas de calibración correspondientes y se realizó el aseguramiento de la calidad analítica pertinente.

### **Análisis estadísticos**

Para una mejor interpretación de los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas a las muestras de aguas, tanto residuales como tratadas, se determinó el valor promedio, así como su desviación estándar. Para los gráficos se determinó el logaritmo de los promedios obtenidos. La evaluación gráfica y estadística de los datos se realizó con el paquete Statistica 12 (Statsoft, US). Para la comparación de los porcentajes de remoción en cada celda se evaluó la normalidad de los datos con la prueba Kolmogorov-Smirnov y se realizó un análisis de varianza (ANOVA, en inglés), considerando la celda como predictor y un análisis *post-hoc* con la prueba LSD con  $p < 0,05$  para considerar diferencias significativas.

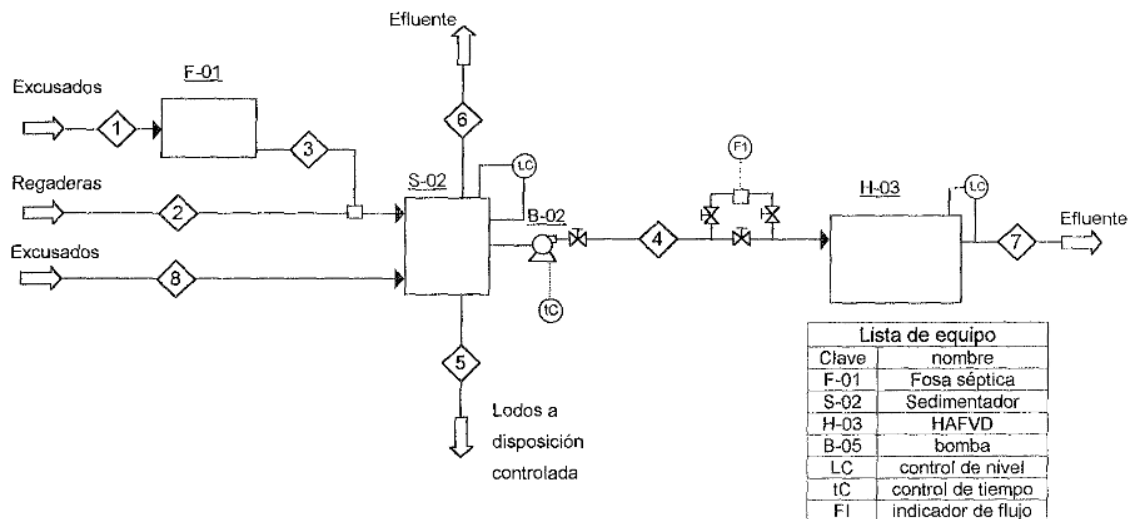
## **Resultados y discusión**

### **Flujos horizontal y vertical**

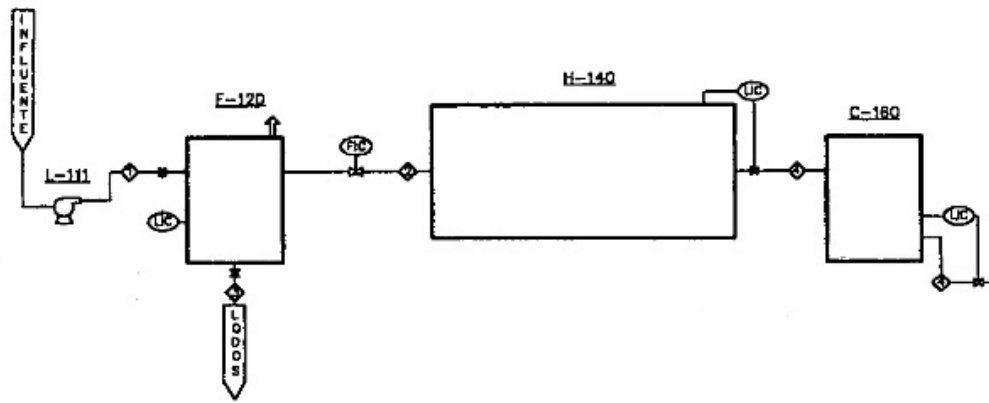
Los resultados obtenidos en los sistemas a escala de laboratorio y de banco permiten señalar que todas las hidrofitas empleadas sí tienen un efecto en la capacidad depurativa de los sistemas en estudio, con tasas de remoción de nitrógeno total entre 80 y 90% y entre 9 y 54 % para la DQO<sub>soluble</sub>. Los resultados de conductividad eléctrica y de pH permitieron corroborar que hay un efecto definitivo de la fotosíntesis, para la eliminación de material contaminante con respecto a la oscuridad y con respecto a los controles sin hidrofitas. Las diferencias fueron estadísticamente significativas ( $P < 0,05$ ). Los valores de remoción de DQO<sub>soluble</sub> y conductividad eléctrica disminuyen conforme se mide en zonas con condiciones anaerobias, mientras que las mayores remociones están en las zonas aerobias. Las comunidades microbianas con bacterias Gram

negativas eran más abundantes en la zona radicular, comparadas con las de los reactores control sin planta.<sup>(16)</sup>

Para el primer sistema a nivel piloto (figura 3), se encontraron diferencias cuando se usaron dos tiempos de residencia hidráulica de 4.8 versus 5.4 días. Para el primero se obtuvieron remociones de 80% COD<sub>total</sub> y para el de 5.4 d fueron en promedio de 73% COD<sub>total</sub>. Otra variable a tomar en cuenta es la lluvia, aunque los análisis estadísticos ( $p < 0,05$ ) no indican diferencias entre los períodos de lluvia y estiaje, pero sí debe tomar en cuenta para que no se rebose el agua en tratamiento en el humedal. En la tabla 1 se presentan algunos de los datos experimentales obtenidos, a manera de ejemplo comparativo de los sistemas horizontal y vertical, a nivel prototipo.



**Fig. 3-** Diagrama esquemático del humedal artificial de flujo vertical, instalado en la zona cultural de la Ciudad Universitaria en la Ciudad de México (Alcaldía de Coyoacán).<sup>(28)</sup>



CORRIENTE	1	2	3	4
SERVICIO	Influente	Influente	Lodos	Efluente
FLUJO[m <sup>3</sup> /d]	5.80	5.80	0.22	0.38
DBO[mg/l]	350	287	53	20
STT [mg/l]	430	184	236	35

#### LISTA DE EQUIPO

CLAVE	NOMBRE
L-111	Bomba de alimentación
F-120	Fosa-séptica
H-140	Humedal artificial
C-160	Cisterna

HUMEDAL ARTIFICIAL	
Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental	
Diagrama de flujo de proceso	
Elaboró :	Paul Schöler Héctor Ramírez
Revisó :	V. M. L. P.
Aprobó :	C. D. B.

Fig. 4- Diagrama esquemático del humedal artificial de flujo horizontal instalado en el Vivero Forestal de Coyoacán, de la Ciudad de México (Alcaldía de Coyoacán).<sup>(24)</sup>

El sistema de humedales, tanto el vertical como el horizontal (figura 4), resultan eficaces para la eliminación de organismos potencialmente patógenos, durante la depuración de aguas residuales mixtas municipales y de una institución educativa. El porcentaje de remoción de microorganismos en las aguas residuales fue muy alto (de 99.87-99.98% para coliformes fecales), para *Salmonella* quedan todavía organismos (99.93 a 99.98%) y huevos de helminto (1 HH/L) también.

Tabla 1-Comparación de organismos entre los HAFH y HAFV a nivel de planta piloto

Humedal artificial de flujo vertical		Humedal artificial de flujo horizontal	
Agua residual (Entrada) NMP coliformes /100mL agua	Agua tratada (Salida) NMP coliformes /100mL agua	Agua residual (Entrada) NMP coliformes /100mL agua	Agua tratada (Salida) NMP coliformes /100mL agua
$1,01 \times 10^5$	$2,006 \times 10^1 = 20$	$0,51 \times 10^5$	$6,63 \times 10^1 = 66$
UFC <i>Salmonella sp.</i> /mL	UFC <i>Salmonella sp.</i> /mL	UFC <i>Salmonella sp.</i> /mL	UFC <i>Salmonella sp.</i> /mL

agua residual dil. $10^{-2}$	agua tratada dil. $10^{-1}$	agua residual dil. $10^{-2}$	agua tratada dil. $10^{-1}$
$167 \times 10^3$	33,3	$62,6 \times 10^3$	46,6
HH/L agua residual	HH/L agua tratada	HH/L agua residual	HH/L agua tratada
6	1	11	1

Leyenda: NMP, número más probable; UFC, unidades formadoras de colonias; HH, huevos de helminto. NOM-003-SEMARNAT-1997: Contacto directo de servicios al público, el límite es de 240 NMP/100mL y para contacto indirecto es de 1000 NMP/100mL; *Salmonella* sp. es de cero y HH es de 1/L agua tratada.<sup>(31)</sup>

Se observó mayor eficiencia de remoción en el humedal de flujo vertical que en el de flujo horizontal, aún cuando la carga microbiana era mayor. Esto obedece probablemente a la presencia de sustancias tóxicas en el agua residual mixta, que contamina al río Magdalena y hace más difícil la sobrevivencia de los organismos depuradores y las condiciones de depuración en el sistema.

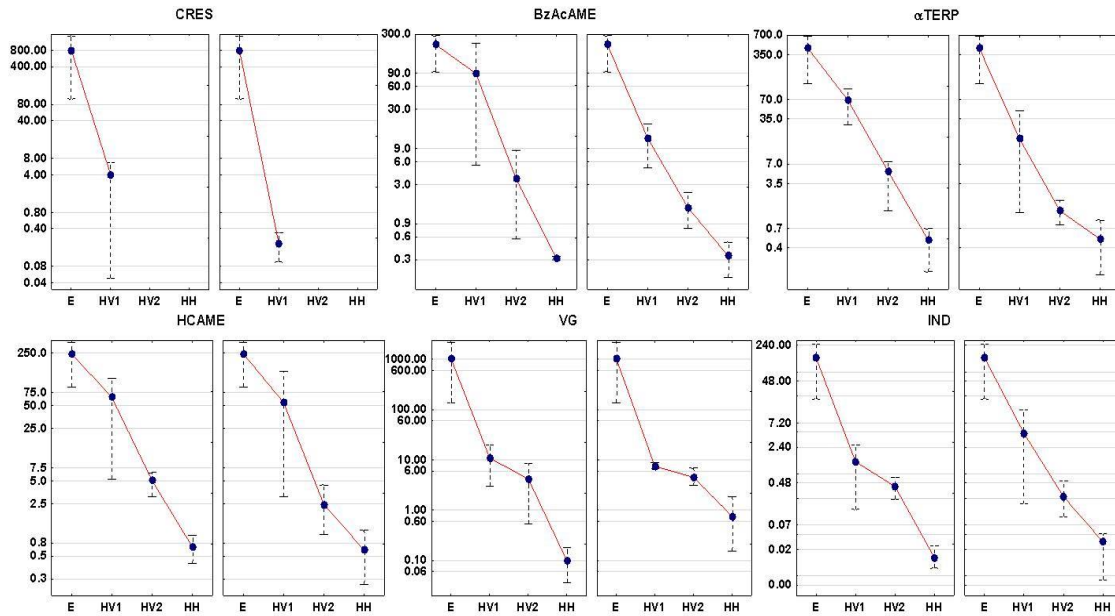
### Flujo híbrido

Los análisis realizados mostraron una remoción muy elevada de los MCOBMM estudiados: El cresol es removido completamente en la segunda etapa vertical y se alcanzan remociones totales entre 99,6 y 100% para el resto de los MCOBMM. Esto puede estar relacionado con una mayor participación de la volatilización y la fitovolatilización, que deben incrementarse en los compuestos de menor masa molecular y por consiguiente, más volátiles. En la figura 5 se muestran los valores medios, máximos y mínimos de la concentración de los MCOBMM estudiados en los diferentes puntos de muestreo.

Se puede apreciar que se alcanza una disminución de sus concentraciones correspondientes a 3-4 órdenes de magnitud, lo que conlleva su disminución del orden de las ppb a trazas. Aunque los porcentajes de remoción son más elevados en las primeras celdas, no es despreciable el papel de la segunda celda y del HFSSH, pues en órdenes de magnitud siguen siendo importantes.

Las variaciones significativas en las concentraciones iniciales de los MCOBMM estudiados y los recorridos relativamente estrechos de sus concentraciones finales,

muestran que el sistema es capaz de recibir cargas variables, lo que indica que es robusto.



**Fig. 5-** Concentraciones ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) de los diferentes microcontaminantes orgánicos de baja masa molecular, MCOBMM.

Leyenda: [cresoles (CRE), éster metílico del ácido bencenoacético (BzAcAME),  $\alpha$ -terpinenol ( $\alpha$ TERP), éster metílico del ácido hidroxicinnámico (HCAME), vinilguayacol (VG) y metilindoles (IND)] en cada línea (izquierda L1, derecha L2); valores medios indicados con puntos y los máximos y mínimos con las líneas punteadas).

En la tabla 2 se muestran los valores medios de los porcentajes de remoción en cada celda y el análisis de las diferencias entre ellos. Se puede observar que, a excepción del VG, tanto la Ty (*Typha*) como el Phr (*Phragmites*) no mostraron diferencias en su efectividad de remoción en la celda vertical 2 de cada línea. Esto permite considerar a ambas especies a la hora de diseñar el sistema HFSSV $\rightarrow$ HFSSV $\rightarrow$ HFSSH (vertical $\rightarrow$ vertical $\rightarrow$ horizontal).

**Tabla 2**-Valores medios de los porcentajes de remoción en cada celda de microcontaminantes orgánicos de baja masa molecular, MCOBMM.

Celda	BzAcAME	$\alpha$ Terp	HCAME	VG	Indol
HV1	67,0	82,1 <sup>a,b</sup>	78,2	96,7 <sup>a</sup>	99,2 <sup>a</sup>
HV3	88,6	87,8 <sup>a,b</sup>	76,0	67,7 <sup>a,b</sup>	45,5 <sup>a,b</sup>
HH5	73,0	82,8 <sup>a,b</sup>	85,4	94,1 <sup>a</sup>	94,8 <sup>a</sup>
HV2	94,4	96,5 <sup>b</sup>	81,1	97,9 <sup>a</sup>	97,9 <sup>a</sup>
HV4	86,6	61,8 <sup>a</sup>	84,7	40,8 <sup>c</sup>	59,4 <sup>a,b</sup>
HH6	74,7	68,4 <sup>a,b</sup>	75,8	79,2 <sup>a,b</sup>	74,0 <sup>a,b</sup>

Nota: Valores con letras diferentes son significativamente distintos ( $p < 0,05$ )

Leyenda: éster metílico del ácido bencenoacético (BzAcAME),  $\alpha$ -terpinenol ( $\alpha$ TERP), éster metílico del ácido hidroxicinnámico (HCAME), vinilguayacol (VG) y metilindoles (IND).

## Conclusiones

El sistema de humedales artificiales es un método eficaz en la eliminación de organismos potencialmente patógenos presentes en aguas residuales. En la eliminación de coliformes fecales resulta realmente eficiente ya que cumple con los niveles máximos permisibles por la norma ambiental mexicana obligatoria <sup>(31)</sup> para poder ser usada como agua de riego (240 versus 20 y 70 NMP/100mL. Sin embargo, tanto para el caso de *Salmonella* como para el de los huevos de helminto no es suficiente una disminución de su presencia, pues por ser microorganismos patógenos deben ser eliminados por completo. Resulta importante correlacionar los resultados microbiológicos con los análisis fisicoquímicos de las aguas residuales y tratadas, así como con las condiciones de operación durante el tratamiento, para lograr la completa eliminación de los microorganismos indeseables. El sistema de humedales híbridos como tratamiento del efluente de la PTAR-IM, mostró remociones de los microcontaminantes orgánicos de baja masa molecular microcontaminantes orgánicos de baja masa molecular MCOBMM superiores al 99.6% y la consiguiente remoción de

olores. Esto implica que pueden emplearse ya sean los humedales artificiales tradicionales de flujo subsuperficial horizontal o vertical o los nuevos sistemas híbridos para apoyar a las comunidades de 2,000 personas o menos ya sea en zonas rurales o en zonas suburbanas para crear y/o mejorar sus sistemas de saneamiento.

## **Agradecimientos**

Los autores reconocen el apoyo financiero y logístico de las siguientes entidades: Apoyo de los proyectos del CONACYT Clave 3302P-B (1997-1999), CONACYT SIGOLFO Clave 00-06-016-V (2000-2002), Conacyt Proyecto 2+2 (CEAL+H, U Nord, PIQAYQA, Incam), UNAM, Centro de Estudios Ambientales de Leipzig-Halle, BMFT de Alemania y UAdY y UJAT de México (2000-2003). Para los experimentos, la Universidad BOKU de Viena, Austria, la UNAM a través de su dirección General de Intercambio Académico, la Embajada de Austria en México y de la Agencia Alemana para la Cooperación Técnica, *GTZ* (en alemán). La Dirección General de Cooperación e Internacionalización de la UNAM apoyó la creación de la Red, sobre el Uso de Humedales Artificiales para Reducir la Vulnerabilidad de las Comunidades con Escasez de Agua (2015-2016). Se agradece el apoyo financiero de la Agencia Española para la Cooperación Internacional para el Desarrollo y de la Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros (Proyecto 11CAP2-1756), así como el apoyo material del Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Izúcar de Matamoros, para la construcción y experimentación con el sistema de humedales híbridos. También agradecen el apoyo del Sr. David Navarrete, del Ayuntamiento de Izúcar de Matamoros, Puebla, México (2015-2016).

## **Referencias bibliográficas**

1. HERRERA-CÁRDENAS, J.A., NAVARRO-FRÓMETA, A.E. 2018. Constructed Wetlands for the Tertiary Treatment of Municipal Wastewaters: Case studies in Mexico at

Mesocosm Level. En: María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa, Amado Enrique Navarro-Frómeta, Josep M. Bayona (Eds.). *Artificial or constructed wetlands: A suitable technology for sustainable water management*. Florida: CRC, Taylor and Francis. 2018. Capítulo 4, pp. 68-90. ISBN 9781138739185.

2. AMÁBILIS-SOSA, L. E., SIEBE, Ch., MOELLER-CHÁVEZ, G., DURÁN-DOMÍNGUEZ-de-BAZÚA, M. C. "Remoción de mercurio por *Phragmites australis* empleada como barrera biológica en humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes a metales pesados". *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 2016, **32**(1), 47-53. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v28n1/v28n1a2.pdf>.

3. AMÁBILIS-SOSA, L. E., SIEBE, CH., MOELLER-CHÁVEZ, G., DURÁN-DOMÍNGUEZ-de-BAZÚA, M. C. "Accumulation and distribution of lead and chromium in laboratory-scale constructed wetlands inoculated with metal-tolerant bacteria". *International Journal of Phytoremediation*. 2015, **17**(11), 1090-1096. DOI: 10.1080/15226514.2010.483263.

4. BENVENUTI, T., HAMERSKI, F., GIACOBBO, A., BERNARDES, A. M., ZOPPAS-FERREIRA, J., RODRIGUES, M. A. S. "Constructed floating wetland for the treatment of domestic sewage: A real-scale study". *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018. DOI:10.1016/j.jece.2018.08.067.

5. DVOŘÁKOVÁ-BŘEZINOVA, T., VYMAZAL, J., KOŽELUH, M., KULE, L. "Occurrence and removal of ibuprofen and its metabolites in full-scale constructed wetlands treating municipal wastewater". *Ecological Engineering*. 2018, **120**, 1–5. DOI:10.1016/j.ecoleng.2018.05.020.

6. GORITO, A. M., RIBEIRO, A. R., GOMES, C. R., ALMEIDA, C. M. R., SILVA, A. M. T. "Constructed wetland microcosms for the removal of organic micropollutants from freshwater aquaculture effluents". *Science of The Total Environment*. 2018, **644**, 1171–1180. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.371.

7. GUZMÁN-AGUIRRE, S. Evaluación de sistemas de humedales artificiales como depuradores de aguas residuales mediante la eliminación de microorganismos patógenos. Tesis profesional, Química de Alimentos. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México. 2004. Defensa: Noviembre 24. Disponible en: <http://132.248.9.195/ppt2004/0337984/Index.html>.



8. KRZEMINSKI, P., TOMEI, M. C., KARAOLIA, P., LANGENHOFF, A., ALMEIDA, C. M. R., FELIS, E., FATTA-KASSINOS, D. "Performance of secondary wastewater treatment methods for the removal of contaminants of emerging concern implicated in crop uptake and antibiotic resistance spread: A review". *Science of The Total Environment*. 2019, 648, 1052-1081. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.08.130.
9. MARTÍNEZ-LAVANCHY, P. M., CHEN, Z., LÜNSMANN, V., MARIN-CEVADA, V., VILCHEZ-VARGAS, R., PIEPER, D. H., REICHE, N., KAPPELMEYER, U., IMPARATO, V., JUNCA, H., NIJENHUIS, I., MÜLLER, J. A., KUSCHK, P., HEIPIEPER, H. J. "Microbial toluene removal in hypoxic model constructed wetlands occurs predominantly via the ring monooxygenation pathway". *Applied Environmental Microbiology*. 2015, **81**(18), 6241-6252. DOI: 10.1128/AEM.01822-15
10. NAVARRO, A. E., PASTOR, R., MATAMOROS-MERCADAL, V., BAYONA, J. M. Evaluation of treatment wetlands of different configuration for the sugarcane-mill effluent under tropical conditions. En: *Constructed wetlands for industrial wastewater treatment*. Editor: A. Stefanakis. John Wiley & Sons, 2018. ISBN: 9781119268345. Capítulo 6, pp. 127-144.
11. PANIZZA-DE-LEÓN, A., CARRILLO-GONZÁLEZ, R., BERNAL-GONZÁLEZ, M., VACAMIER, M., DURÁN-DOMÍNGUEZ-de-BAZÚA, C. "Exploration of the ability of *Coleus blumei* to accumulate aluminum". *International Journal of Phytoremediation*. 2011, **13**(5), 421-433. DOI: 10.1080/15226514.2010.483263.
12. SALGADO-BERNAL, I., CARBALLO-VALDÉS, M. E., MARTÍNEZ-SARDIÑAS, A., CRUZ-ARIAS, M., DURÁN-DOMÍNGUEZ, C. "Interacción de aislados bacterianos rizosféricos con metales de importancia ambiental". *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*. 2012a, **3**(3), 83-95.
13. SALGADO-BERNAL, I., DURÁN-DOMÍNGUEZ, C., CRUZ-ARIAS, M., CARBALLO-VALDÉS, M. E., MARTÍNEZ-SARDIÑAS, A. "Bacterias rizosféricas con potencialidades fisiológicas para eliminar materia orgánica de aguas residuales". *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 2012b, **28**(1), 17-26. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992009000300004](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992009000300004).

14. SCHULTZE-NOBRE, L., WIESSNER, A., WANG, D., BARTSCH, C., KAPPELMEYER, U., PASCHKE, H., MATTUSCH, J., KUSCHK, P. "Removal of dimethylphenols from an artificial wastewater in a laboratory-scale wetland system planted with *Juncus effuses*". *Ecology and Engineering*. 2015, **80**, 151-155. DOI: [org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.030](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.030)
15. GUIDO-ZÁRATE, A., BUITRÓN, G., MIJAYLOVA-NACHEVA, P., DURÁN-de-BAZÚA, C. Behavior of redox potentials in artificial wetlands models: A tool for controlling its efficiency. In *Communicating current research and educational topics and trends in applied microbiology*. Méndez-Vilas. A. (ed.). Formatex Series, 2007. ISBN-13:978-84-611-9421-6. Vol. 2. ISBN-13: 978-84-611-9423-0. Badajoz, Spain, pp. 594-601.
16. SOTO-ESQUIVEL, M. G., GUIDO-ZÁRATE, A., GUZMÁN-AGUIRRE, S., MEJÍA-CHÁVEZ, A. G., GARCÍA-GÓMEZ, R. S., HUANOSTA, T., PADRÓN-LÓPEZ, R. M., RODRÍGUEZ-MONROY, J., MIJAYLOVA-NACHEVA, P., BUITRÓN-MÉNDEZ, G., DURÁN-de-BAZÚA, C. "Algunos aspectos interesantes de sistemas de humedales a escala de laboratorio y de banco en México". *Revista Química Central (Facultad de Ciencias Químicas, Ecuador)*. 2013, **3**(2), 53-65. <http://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/QUIMICA/article/view/1206>.
17. COBAN, O., KUSCHK, P., KAPPELMEYER, U., SPOTT, O., MARTIENSSEN, M., JETTEN, M. S. M., KNOELLER, K. "Nitrogen transforming community in a horizontal subsurface-flow constructed wetland". *Water Research*. 2015, **74**, 203-212. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.018>.
18. DURÁN-de-BAZÚA, C., GUIDO-ZÁRATE, A., HUANOSTA, T., PADRÓN-LÓPEZ, R. M., RODRÍGUEZ-MONROY, J. "Artificial wetlands performance: nitrogen removal". *Water Science and Technology*. 2008, **58**(7), 1357-1360. DOI: [10.2166/wst.2008.350](https://doi.org/10.2166/wst.2008.350).
19. ORDUÑA-BUSTAMANTE, M. A., VACA-MIER, M., ESCALANTE-ESTRADA, J. A., DURÁN-DOMÍNGUEZ-de-BAZÚA, C. "Nitrogen and potassium variation on contaminant removal for a vertical subsurface flow lab scale constructed wetland". *Bioresource Technology*. 2011, **102**, 7745-7754. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.06.005>

20. ALI, M., ROUSSEAU, D. P. L., AHMED, S. "A full-scale comparison of two hybrid constructed wetlands treating domestic wastewater in Pakistan". *Journal of Environmental Management*. 2018, 210, 349-358. doi:10.1016/j.jenvman.2018.01.040
21. LUTTERBECK, C. A., ZERWES, F. V., RADTKE, J. F., KÖHLER, A., KIST, L. T., MACHADO, Ê. L. "Integrated system with constructed wetlands for the treatment of domestic wastewaters generated at a rural property – Evaluation of general parameters ecotoxicity and cytogenetics". *Ecological Engineering*. 2018, 115, 1–8. doi:10.1016/j.ecoleng.2018.01.004
22. YADAV, A., CHAZARENC, F., MUTNURI, S. Development of the "French system" vertical flow constructed wetland to treat raw domestic wastewater in India. *Ecological Engineering*. 2018, 113, 88–93. doi:10.1016/j.ecoleng.2018.01.001
23. ARREGUÍN-ROJAS, A. (Coordinador), DURÁN-DOMÍNGUEZ, M. C., BERNAL-GONZÁLEZ, M., GONZÁLEZ-SANDOVAL, M. R., SÁNCHEZ-TOVAR, S. A. Manual de operación y mantenimiento del humedal artificial del CCH PLANTEL SUR, con actividades didácticas para el BACHILLERATO UNAM. 2013. ISBN 978-607-7807-12-4. Proys. INFOCAB SB201608 y PB201312, 46 pags. 10 ejemplares, 1a. Ed. (2010). Compact disc (e-book), 2nd. Ed. (2013) Pub. CCH-Sur y Facultad de Química, UNAM y AMCATH. México D.F. México.
24. RAMÍREZ-CARRILLO, H.F. Desarrollo de la ingeniería básica para el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales a base de un humedal artificial de flujo horizontal. Tesis profesional. Ingeniería Química. UNAM, Facultad de Estudios Superiores, Zaragoza. México D.F. México, 1998. Disponible en: <http://132.248.9.195/pdbis/263586/Index.html>
25. DOF. Norma Oficial Mexicana NOM-112-SSA1-1994. Determinación de bacterias coliformes. Técnica del número más probable. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México, 1994a.
26. DOF. Norma Oficial Mexicana NOM-114-SSA1-1994. Bienes y Servicios. Método para la determinación de Salmonella en alimentos. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México, 1994b.

27. BORREGO-SARÁCHAGA, N.G. Estudio de la calidad del agua en un sistema de humedales artificiales a nivel prototipo que recibe aguas residuales de un plantel educativo. Tesis profesional, Ingeniera Química. Facultad de Química, UNAM, 2015, Defensa: Agosto 14. Ciudad de México, México. Disponible en: <http://132.248.9.195/ptd2015/agosto/0732926/Index.html>
28. ESPONDA-AGUILAR, P.L. Estudio de los humedales artificiales como reactores de flujo pistón para el tratamiento de aguas residuales. Tesis profesional, Ingeniería Química. UNAM, Facultad de Química. México D.F. México, 2001. Disponible en: <http://132.248.9.195/pd2001/295062/Index.html>
29. FENOGLIO-LIMÓN, F.E. Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedales artificiales de flujo vertical. Tesis profesional, Ingeniería Química. UNAM, Facultad de Química. México D.F. México, 2000. Disponible en: <http://132.248.9.195/pd2000/284987/Index.html>
30. HERRERA-CÁRDENAS, J.A., NAVARRO, A. E., TORRES, E. "Effects of porous media, macrophyte type and hydraulic retention time on the removal of organic load and micropollutants in constructed wetlands". *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2016, **51**(5), 380-388. DOI: 10.1080/10934529.2015.1120512.
31. DOF. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles en las aguas tratadas que se reutilicen en servicios al público. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México, 1997.