

Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México

Decentralized Sanitation and Sustainable Reuse of Municipal Wastewater in Mexico

*José de Anda Sánchez**

Resumen

A nivel global, 2 400 millones de personas carecen de acceso a servicios básicos de saneamiento, lo cual provoca que más del 80% de las aguas residuales se descarguen en ríos o vayan directo al mar sin ningún tipo de tratamiento. En México, el saneamiento de las aguas residuales municipales alcanzó el 52.72% en el año 2015, cifra que se encuentra por debajo de otros países de América Latina y el Caribe, en donde Argentina y Chile superan el 80% de cobertura del servicio. En 2013, México tenía un total de 2 287 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), de las cuales 548 (23.96%) estaban fuera de operación por ser obsoletas o porque los gobiernos municipales no tienen los recursos para ponerlas en operación. Jalisco, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Tabasco y Campeche son algunos de los estados con más del 50% de sus plantas de tratamiento fuera de operación en el país. Las razones por las cuales los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales no están teniendo éxito en los países en desarrollo son las altas inversiones que se requieren para su instalación, los elevados consumos de energía, así como los altos costos de mantenimiento y operación. Por lo tanto, este tipo de sistemas de tratamiento de aguas no son sostenibles para comunidades de bajo nivel de ingresos, porque en el proceso de selección de los mismos no se consideró la conveniencia de la tecnología para la cultura de la comunidad, el clima local y la capacidad económica del municipio. Nuevas tecnologías basadas en procesos naturales de depuración de las aguas sanitarias y la reutilización de las mismas pueden ofrecer una perspectiva sustentable para el saneamiento de las aguas residuales en diversas comunidades y sectores económicos del país.

* Doctorado en Ciencias de la Tierra por la Universidad Nacional Autónoma de México, México. Investigador en la Unidad de Tecnología Ambiental del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), México. Líneas de interés: manejo sustentable de recursos hídricos, limnología, modelación de sistemas fluviales y presas, producción sustentable de alimentos, tratamiento de aguas residuales mediante procesos naturales. Correo electrónico: janda@ciatej.mx

Palabras clave: tratamiento de aguas residuales; tecnologías sustentables; métodos naturales; reutilización de las aguas tratadas

Abstract

Worldwide, 2.4 billion people lack access to basic sanitation, meaning that over 80% of the wastewater resulting from human activities is discharged into rivers or directly into the sea without any type of treatment. In Mexico, municipal wastewater treatment stood at 52.72% in 2015, lower than the figure for other countries in Latin American and Caribbean region, where Argentina and Chile have achieved over 80% of wastewater treatment. In 2013, Mexico had a total of 2 287 Wastewater Treatment Plants (WTP), 548 of which were out of operation, accounting for 23.96% of the total number of facilities, because they were obsolete or municipal governments lacked the resources to run them. Jalisco, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Tabasco and Campeche are some of the states with over 50% treatment plants out of operation. The reasons why conventional wastewater treatment systems are failing in developing countries are the high investments required for their installation, high energy consumption, as well as high maintenance and operating costs. These types of water treatment systems are therefore not sustainable for communities with low income levels because the selection process failed to consider the suitability of the technology for the community's culture, the local climate or the municipality's economic capacity. New technologies based on natural processes for wastewater treatment and its reuse can offer a sustainable perspective for wastewater treatment in various communities and economic sectors throughout the country.

Keywords: wastewater treatment; sustainable technologies; natural methods; reuse of treated water

Introducción

Las cifras globales que describen la falta de servicios de agua y saneamiento son alarmantes. Desde 1990, aproximadamente 2 600 millones de personas han obtenido acceso a fuentes mejoradas de agua potable, pero 663 millones aún no tienen acceso a este servicio; por lo menos 1 800 millones de personas en todo el mundo utilizan una fuente de agua potable que está contaminada fecalmente. Entre 1990 y 2015, la proporción de la población mundial que utiliza una fuente mejorada de agua potable ha aumentado de 76% a 91%, pero la escasez de agua afecta a más del 40% de la población

mundial y se prevé que la cifra aumente. Por otra parte, más de 1 700 millones de personas viven actualmente en cuencas hidrográficas donde el uso del agua supera la recarga, y aproximadamente el 70% de toda el agua extraída de ríos, lagos y acuíferos se utiliza para riego agrícola. En relación a los servicios de saneamiento, 2 400 millones de personas carecen de acceso a servicios básicos de saneamiento, tales como baños o letrinas, lo que provoca que más del 80% de las aguas residuales de actividades humanas se descarguen en ríos o vayan directo al mar sin ningún tratamiento. Debido a ello, cada día, cerca de 1 000 niños mueren por enfermedades relacionadas con la diarrea (UN, 2016).

Contar con un mejor acceso al agua y al saneamiento no necesariamente significa que los servicios de suministro cumplan con las normas internacionales de ingeniería y salud, tal como lo establecen las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la calidad del agua potable (Montgomery y Elimelech, 2007). El término “acceso a fuentes mejoradas” suele representar hogares que obtienen agua de fuentes que son técnicamente mejores a las tradicionales, las cuales no aseguran que sean realmente potables. Las fuentes que cumplen con la definición de acceso a fuentes mejoradas de agua incluyen una conexión doméstica, extracción de agua de noria, de un pozo profundo, manantiales protegidos o un sistema de recolección de agua de lluvia (Montgomery y Elimelech, 2007). En el caso de las aguas residuales sanitarias, la conexión a un sistema de alcantarillado público o a un sistema séptico o el uso de letrinas de pozo ventilado o de pozo simples, califican dentro del concepto de saneamiento mejorado (Montgomery y Elimelech, 2007; IOM, 2009).

Este trabajo tiene por objetivo discutir de forma general la cobertura de saneamiento de las aguas residuales municipales en México, conocer específicamente la situación de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTARM) que se encuentran en estado de abandono o fuera de operación, y las causas por las que una parte importante de la inversión realizada por los tres órdenes de gobierno no se logró traducir en un beneficio para la sociedad. En el conocimiento de las causas de la problemática por la que atraviesan algunas de las PTARM en México, se analizan algunas alternativas tecnológicas que pueden ser consideradas para incrementar, de forma sustentable, la cobertura de saneamiento de las aguas residuales en el país y de esta forma avanzar en el compromiso nacional en relación al objetivo seis del desarrollo sostenible: “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos” (ONU, 2017).

Situación del saneamiento de las aguas residuales en América Latina

En los países de América Latina y el Caribe, se han hecho grandes esfuerzos para mejorar el acceso de su población a los servicios de suministro de agua potable y saneamiento. Aunque la situa-

ción varía considerablemente entre los países, los niveles de cobertura generalmente se pueden considerar razonables, con la posible excepción del tratamiento de aguas residuales (IOM, 2009). Aproximadamente 91% de la población de la región tiene acceso a servicios de suministro de agua potable, ya sea a través de conexiones domiciliarias o a través del fácil acceso a una fuente pública. Respecto a los servicios de saneamiento, sólo 51% de la población regional está conectada a sistemas convencionales de alcantarillado y otro 26% utiliza sistemas de saneamiento *in situ*. Como resultado, unos 50 millones de personas en la región carecen de acceso a los servicios de suministro de agua potable y aproximadamente 130 millones no tienen acceso al saneamiento. La mayoría de los que no tienen acceso a los servicios son pobres y viven en zonas rurales (IOM, 2009). Por otro lado, el saneamiento, ya sea por alcantarillado o en el sitio, en la mayor parte de los casos, no está asociado con la infraestructura para su tratamiento antes de su descarga al medio receptor. No existen estimaciones confiables del nivel de cobertura de tratamiento para las aguas residuales municipales en la región, pero se estima que no más del 20% del agua generada entra realmente a una planta de tratamiento (Noyola *et al.*, 2013).

En la región, son muchos los ejemplos de plantas de tratamiento de aguas que están abandonadas o trabajando en condiciones precarias. El hecho de que los periodos de la administración municipal en varios países sean relativamente cortos, hace que los sistemas de agua y saneamiento enfrenten la periódica pérdida de conocimiento y experiencia, además de repetir la negociación de sus presupuestos anuales. Tal situación se ve agravada por la frecuente ausencia de planeación a mediano y largo plazo en el ámbito de los gobiernos municipales (Noyola *et al.*, 2013).

Tratamiento de las aguas residuales en México

De acuerdo con el inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), al cierre de 2015, el registro de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTARM) fue de 2 477 instalaciones en operación, con una capacidad instalada de 177 973.6 ls^{-1} y un caudal tratado de 120 902.2 ls^{-1} , lo cual permitió alcanzar una cobertura nacional en el saneamiento de las aguas residuales municipales del 52.72% (Conagua, 2015). Esta cifra se encuentra por debajo de la media nacional alcanzada por otros países en América Latina en el tema de saneamiento, en donde Argentina y Chile han logrado una cobertura mayor al 80% (Noyola *et al.*, 2013).

En México, como en la mayoría de los países de América Latina, se hacen grandes esfuerzos de gestión para obtener el financiamiento que requiere la construcción de instalaciones para el tratamiento de las aguas residuales municipales, además de adquirir las capacidades para ad-

ministrarlas y mantenerlas en operación (Noyola *et al.*, 2013). Sin embargo, cuando se logra el objetivo de instalación, después de algún tiempo de constatar que los recursos municipales son insuficientes para operarlas, se decide cancelar el suministro de los recursos, dejan de operar y con el tiempo terminan siendo abandonadas (De la Peña *et al.*, 2013). En el mejor de los casos, las aguas residuales que dejan de tratarse terminan siendo reutilizadas directamente para el riego agrícola, lo cual implica diversos riesgos para el medio ambiente, la salud de la población y disminuye la calidad de vida de las personas (Toze, 2006; De la Peña *et al.*, 2013).

De acuerdo con Conagua (2014), en el año 2013 había un total de 2 287 PTARM instaladas en el país, con una capacidad de 152 171.88 ls⁻¹. Durante ese mismo año, el registro de PTARM fuera de operación aumentó a 548 (23.96%), con una capacidad instalada de 9 555.24 ls⁻¹ (6.28%). En el reporte de Conagua (2014: 16) se menciona que “a partir del año 2006 la diferencia entre la capacidad de tratamiento construida y el caudal de agua tratada se ha ido incrementando de forma consistente. Esta situación representa una problemática que limita el cumplimiento de las metas de saneamiento de los cuerpos de agua del país”. Recientemente, se localizaron reportes oficiales y notas periodísticas que señalan algunos de los estados con más de 50% de PTARM fuera de operación, como el caso de Jalisco (CEA, 2015), Guerrero (El Sur, Periódico de Guerrero, 2016), Oaxaca (NVI Noticias, 2017), Chiapas (Cuarto Poder de Chiapas, 2017), Tabasco (Tabasco Hoy, 2015) y Campeche (La Jornada Maya, 2016).

Las plantas de tratamiento de las aguas residuales en Jalisco

Para ejemplificar lo comentado en la sección anterior, en el año 2014, el estado de Jalisco tenía una capacidad de saneamiento instalada de 15 391.9 ls⁻¹, tratando un caudal real de 12 094.8 ls⁻¹ con 149 plantas en operación, con lo que se cubría el 50.5% de las necesidades de saneamiento de agua del estado (Conagua, 2014). Por otra parte, la Comisión Estatal del Agua de Jalisco informó que en 2013 había un total de 273 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, de las cuales 50 estaban fuera de operación, 22 habían sido abandonadas y 63 estaban en proceso de baja (CEA, 2015). Las entrevistas con funcionarios y operadores de los servicios de agua y alcantarillado en algunos de los municipios del estado de Jalisco, donde se tiene el problema de plantas fuera de operación, indican que la razón principal por la que el 50% de las plantas de tratamiento dejaron de operar, se debe a los elevados consumos de energía y a los altos costos de mantenimiento y operación (De Anda y Shear, 2017). Por otra parte, en algunos de los municipios del estado que cuentan con una PTARM centralizada, adicionales a los costos de mantenimiento y operación, cuentan con pasivos importantes derivados de la deuda adquirida para la construcción de la misma (De Anda y Shear, 2017).

La sustentabilidad en los procesos de tratamiento de aguas residuales

La ingeniería sanitaria es la rama de la ingeniería ambiental que aplica los principios básicos de la ciencia y de la ingeniería a los problemas de control de las aguas contaminadas. El objetivo final —gestión del agua residual— es la protección del medio ambiente empleando medidas conforme a las posibilidades e inquietudes económicas, sociales y políticas (Metcalf y Eddy, 1996). Desde finales de los años noventa, la ingeniería sanitaria ha ido evolucionado de tal forma que hoy en día esta disciplina se circunscribe al contexto del desarrollo sustentable considerando en los proyectos de saneamiento los aspectos ambientales, económicos y sociales, tanto para las generaciones futuras como para las actuales (Lettinga *et al.*, 2001; Grönlund, 2014).

De esta forma, nuevas disciplinas en el campo de la ingeniería, como la ingeniería ecológica, definida como el diseño de ecosistemas sostenibles que integran la sociedad humana con su entorno natural en beneficio de ambos, se han desarrollado durante los últimos 30 años y rápidamente en los últimos 10 años (Mitch, 2012). Para la ingeniería de procesos ecológicos (IPE), un proceso debe definirse teniendo en cuenta toda la cadena, desde la generación de la materia prima, la producción y la distribución, hasta el cuidado de los productos (que proporcionan el servicio deseado) después de su uso y de los subproductos (que no son deseados, sino que se han originado en el proceso). Al definir un proceso más ampliamente, la IPE puede tratar el diseño y la optimización de procesos mucho más consistentemente con respecto a los problemas ecológicos, aunque a costa de una mayor complejidad metodológica.

Para calcular el potencial de impacto ecológico de procesos específicos, es indispensable agregar el componente ambiental en el análisis del ciclo de vida con base en los flujos de masa y energía (Heijungs *et al.*, 2010). Con esta medida, la evaluación en términos de la IPE se basa en una nueva componente económica: el principio de la sustentabilidad (Krotscheck y Narodslawsky, 1996; Odum y Odum, 2003). Adicionalmente a los involucrados con el proceso, es necesario considerar cinco factores más que afectan directamente en el desarrollo sustentable de un proyecto de abastecimiento de agua potable o saneamiento de las aguas residuales (McConville y Mihelcic, 2007): (1) el respeto sociocultural, (2) la participación comunitaria, (3) la cohesión política, (4) la sustentabilidad económica y (5) la sustentabilidad ambiental.

La descentralización de los servicios de tratamiento de las aguas residuales

Frente al reto de lograr para el año 2030 el acceso a un saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos y poner fin a la defecación abierta, prestando especial atención a las necesidades

de las mujeres, las niñas y de las personas en situación de vulnerabilidad, es imperativo desarrollar e implantar soluciones sustentables al eterno déficit en infraestructura para el manejo del agua residual, así como para ampliar y mejorar los sistemas de abastecimiento de agua (UN, 2016). Los nuevos sistemas administrativos, sociales y tecnológicos deberán considerar las limitaciones y posibilidades propias de cada región, con una alta dosis de innovación y adaptación, deslindándose en muchos casos de las soluciones convencionales (Noyola *et al.*, 2013).

Hasta ahora, las opciones centralizadas de saneamiento en México han sido la solución general para las grandes ciudades. No obstante, los costos de operación y electricidad van en aumento, y al presentarse alguna falla en el sistema, se puede impactar de gran forma sobre la sociedad, provocando inundaciones de aguas residuales en zonas conurbadas, descarga directa a cuerpos de agua y riego de cultivos que ponen en riesgo la seguridad alimentaria de las personas. Por esta razón, los sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales deben considerarse como una forma alternativa y a la vez integral para superar estos problemas (De la Peña *et al.*, 2013).

Efectivamente, la mayoría de las tecnologías implementadas en los municipios del país para el tratamiento de las aguas residuales sanitarias, se basan en sistemas centralizados, en donde se utilizan tecnologías complejas en el proceso de tratamiento, las cuales demandan elevados consumos energéticos y en donde es ineludible sufragar mensualmente altos costos de mantenimiento y operación (Conagua, 2014). Proporcionar servicios de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales de forma confiable y asequible en zonas urbanas, periurbanas y rurales es un reto cada vez mayor en muchas partes del mundo y particularmente en los países en desarrollo (Massoud *et al.*, 2009).

Los sistemas convencionales o centralizados de tratamiento de aguas residuales implican procesos avanzados de recolección, tratamiento y descarga de grandes volúmenes de efluentes, en donde por lo general, se suma la necesidad de separar igualmente grandes cantidades de lodos biológicos, los cuales requieren de tratamiento antes de su disposición (Tchobanoglous *et al.* 1993; Wang y Smith, 1994; Metcalf y Eddy, 1996). Por ejemplo, la planta de tratamiento El Ahogado, construida en 2012, con capacidad de 2 250 ls^{-1} , trata las aguas sanitarias que generan 820 mil habitantes de la ciudad de Guadalajara, Jalisco. En esta obra se invirtieron 860 millones de pesos y en la actualidad tiene costos de operación del orden de 34 millones de pesos mensuales (Presidencia de la República, 2012; Mural, 2017) (Figura 1). De esta forma, la inversión en la construcción de sistemas de tratamiento centralizado con altos costos de mantenimiento y operación para dar servicio a pequeñas comunidades rurales o áreas periurbanas en países de bajos ingresos, resultará en una carga financiera de largo plazo que no será sostenible por la población (Mara, 2003: 6-7; Massoud *et al.*, 2009).

Figura 1. Planta de tratamiento de aguas residuales El Ahogado, con capacidad de tratamiento de 2 250 litros por segundo, localizada en Guadalajara, Jalisco



Foto: MAV, 2012.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales descentralizadas o en redes comunitarias están diseñados para operar a pequeña escala. No sólo reducen los efectos sobre el medio ambiente y la salud pública local, sino que también aumentan las posibilidades de reutilización final de las aguas residuales, dependiendo del tipo de comunidad, las opciones técnicas y los entornos locales. Cuando los sistemas descentralizados se utilizan de forma efectiva, promueven el retorno de las aguas residuales tratadas dentro de la cuenca de origen. Además, los sistemas descentralizados se adecúan a las condiciones particulares del sitio; de esta forma, se evita la costosa implementación de sistemas de tratamiento centralizados en donde se tienen mayores requisitos para su construcción e instalación. A diferencia de los sistemas centralizados de tratamiento de aguas residuales, los sistemas descentralizados, por lo general, son los más indicados para las comunidades en donde hay baja densificación urbana, tales como las zonas rurales o las zonas periurbanas (Wang y Smith, 1994; Massoud *et al.*, 2009; Singh *et al.*, 2015).

El enfoque descentralizado de tratamiento de aguas residuales que emplea una combinación de sistemas *in situ* o en grupos de pequeñas comunidades, está ganando cada vez más atención (Wang y Smith, 1994; Wilderer y Schreff, 2000; Massoud *et al.*, 2009; Avendaño-Leadem, 2016). Este nuevo enfoque permite, entre otras ventajas, la reutilización local de las aguas residuales para diversos usos (Wilderer y Schreff, 2000).

Reutilización de las aguas tratadas

Aunque la recuperación y reutilización de agua tratada se practica en muchos países de todo el mundo, los niveles actuales de reutilización constituyen una pequeña fracción del volumen total

de efluentes municipales e industriales generados. Además, para satisfacer sus crecientes necesidades de abastecimiento del vital líquido, las comunidades están considerando otras fuentes no tradicionales, como flujos de retorno agrícola, las aguas residuales tratadas, agua de lluvia, agua coproducida de las industrias de energía y minería, la desalinización del agua de mar y de las aguas subterráneas salobres (Miller, 2006).

La reutilización del agua tratada ofrece una amplia gama de beneficios para las comunidades, lo que se traduce en crear un inmenso valor para el público y el medio ambiente. Sin embargo, los beneficios de la reutilización del agua tratada pueden ser difíciles de cuantificar y, a menudo, no se reconocen. Uno de los más significativos es el valor creado por la inclusión de la reutilización del agua en la planificación integrada de los recursos hídricos y otros aspectos de la política del agua, así como en la implementación de proyectos, lo cual resulta en la sustentabilidad a largo plazo de nuestros recursos hídricos (Miller, 2006).

Estos conceptos integrados, que implican la convergencia de diversas áreas como la gobernabilidad, los riesgos para la salud, la regulación y la percepción pública, también representan un desafío significativo para la reutilización del agua. Estas conexiones complejas pueden generar igual influencia tanto en los beneficios como en los retos asociados. Al abordar estas complejas cuestiones integradas, surgen una serie de obstáculos importantes para la aplicación generalizada de los proyectos de reutilización del agua tratada. Existen numerosos ejemplos de barreras experimentadas por los proyectos actuales de reutilización de agua tratada en todo el mundo, incluyendo la necesidad de tecnologías innovadoras, transferencia de tecnología y nuevas aplicaciones; la necesidad de educación pública y una mayor aceptación pública; mejor documentación de los beneficios de la reutilización del agua tratada; la falta de fondos disponibles para proyectos de reutilización del agua tratada; trabajar con los medios de comunicación, y la necesidad de apoyo por los legisladores y los políticos (Miller, 2006).

La reutilización en agricultura de las aguas residuales tratadas es una opción que se está estudiando y adoptando cada vez más en regiones con escasez de agua. Muchas regiones del mundo están experimentando crecientes problemas de déficits hídricos. Esto se debe al crecimiento implacable de la demanda de agua frente a unos recursos hídricos estáticos o en disminución y a las periódicas sequías debidas a factores climáticos. Además de estas presiones, se estima que un calentamiento global de +2°C, como consecuencia del cambio climático, podría llevar a una situación en la que de uno a dos mil millones de personas no cuenten con agua suficiente para satisfacer sus necesidades de consumo, higiene y alimentarias (FAO, 2013). Los beneficios de la reutilización de aguas residuales tratadas también deben medirse frente al costo de no hacerlo, a nivel económico y medioambiental. Los costos de implementar la reutilización de los desechos orgánicos previamen-

te tratados bajo el concepto de descarga cero en los esquemas de reciclaje agrícola, pueden no ser costosos y podrían, adicionalmente, potenciar la economía local (Abdel-Halim *et al.*, 2008).

La reutilización de las aguas tratadas en México

Recientemente Pulido-Madrigal (2017) analizó las principales características físico-químicas y bacteriológicas del agua residual sin tratamiento o no tratada adecuadamente que se usa para riego en varios estados del país. Su trabajo da a conocer los resultados sobre la capacidad de depuración de contaminantes que tienen los campos agrícolas que usan este tipo de aguas. Este trabajo concluye que cuando se utilizan este tipo de aguas por periodos largos (décadas), se pueden presentar problemas de acumulación de metales pesados en los suelos y la biomovilidad de éstos hacia las partes comestibles de la planta; asimismo, la salinidad de los suelos se incrementa y puede volverlos improductivos. Estas evidencias hacen imprescindible que el agua residual doméstica o municipal se deba tratar a fin de evitar problemas de contaminación en los diferentes compartimentos del ecosistema.

La reutilización del agua residual depurada se basa, esencialmente, en aprovecharla como agua de riego o como agua de recarga, con objeto de incrementar los recursos hídricos de un sistema acuífero. Esta reutilización puede evitar muchos de los problemas que ocasiona el vertido de estas aguas en cauces superficiales o en el mar: riesgos sanitarios, cambios en las características organolépticas, eutrofización, entre otros. Además, se puede conseguir que los recursos hídricos convencionales se dediquen a cubrir aquellas demandas que exigen una calidad más elevada del agua (Esteller, 2002). El interés por esta reutilización se centra en las ventajas que representa, las cuales se pueden resumir en las siguientes:

1. El agua tratada representa una fuente constante y segura de agua aun en los años más secos.
2. Es un aporte continuo de nutrientes para las plantas.
3. El contenido residual de nutrientes del agua residual representa un ahorro en gastos de fertilización.
4. Se contribuye a la conservación de los recursos hídricos.
5. Representa una posible reducción del costo económico del agua destinada a riego, ya que las aguas procedentes de otras fuentes pueden resultar más costosas.

No obstante, hay que tener en cuenta las desventajas, que se centran principalmente en dos apartados: los riesgos sanitarios derivados del uso de aguas residuales y la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, así como de suelos y cultivos (Esteller, 2002; Pulido-Madriral, 2017). Por lo tanto, para reutilizar el agua tratada en la agricultura es indispensable garantizar que el agua tratada cumpla con las condiciones establecidas por las normas oficiales correspondientes (Semarnat, 2012; Escalante *et al.*, 2013).

De acuerdo con las estadísticas del agua en México, en 2015 se trataban $120.9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en 2 477 PTARM, es decir, 57% de los $212 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ recolectados a través de los sistemas de alcantarillado. Conagua (2016) estima que del volumen generado de aguas residuales tratadas en el año 2015 se reusaban directamente (antes de su descarga) $19.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, en tanto que se reusaban indirectamente (después de su descarga) $88.1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. El intercambio de aguas residuales tratadas, en el que sustituyen agua de primer uso, se estimaba en $5.1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Figura 2. Agricultor de Mixquiahuala de Juárez regando sus cultivos con aguas residuales (Valle de Mezquital, estado de Hidalgo, México)



Foto: Janet Jarman / New York Times¹

¹ Recuperada de http://www.nytimes.com/2010/05/05/world/americas/05mexico.html?_r=1

Son escasos los documentos oficiales que cuantifican los volúmenes de aguas tratadas que se reutilizan en México. La mayoría de los estudios realizados por las instituciones de investigación en México se centran principalmente en el caso del Valle de México, por ser la concentración urbana más grande del país, y el Valle de Mezquital, por ser el área de mayor extensión que cuenta con un uso intensivo de las aguas residuales para la agricultura (Jiménez *et al.*, 2004a, 2004b; FAO, 2013) (Figura 2). No obstante, existen otros estudios ampliamente documentados sobre el potencial que tiene la reutilización de las aguas tratadas en las PTARM de Sonora, en donde una buena planificación permitiría irrigar anualmente una extensión agrícola equivalente a 28 mil hectáreas de cultivo en contraste con el escaso uso que actualmente se hace de las aguas residuales (de apenas el 15%) (Conagua, 2015a). Asimismo, se han llevado a cabo iniciativas exitosas a nivel local en el Valle del Yaqui, en donde las aguas generadas por una granja porcina y tratadas en un sistema anaerobio se utilizan para la producción de trigo en una parcela de 50 hectáreas de extensión y para la generación de biogás (Saldívar-Cabrales *et al.*, 2008). Otro caso documentado es el de los agricultores en el sistema de regadío de La Purísima, quienes extraen agua desde un embalse alimentado por agua dulce proveniente del río y por aguas residuales tratadas de la planta de tratamiento de la ciudad de Guanajuato (FAO, 2013).

Los humedales como sistemas naturales de depuración de las aguas contaminadas

Los humedales son áreas donde el agua cubre el suelo o está presente en o cerca de la superficie del suelo durante todo el año o por periodos variables, incluso durante la temporada de cultivo. La saturación de agua determina, en gran medida, cómo se desarrolla el suelo y los tipos de comunidades vegetales y animales que viven en y sobre él. Los humedales pueden apoyar tanto a las especies acuáticas como terrestres. La presencia prolongada de agua crea condiciones que favorecen el crecimiento de plantas especialmente adaptadas (hidrófitas) y promueven el desarrollo de suelos húmedos característicos (EPA, 2016). La Convención Ramsar aplica una definición amplia de los humedales y destaca la importancia de estos sistemas naturales debido a los múltiples beneficios ambientales que éstos ofrecen (Ramsar, 2013).

Los ecosistemas naturales como los humedales, ríos y lagos han sido utilizados durante siglos como recursos convenientes para el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, este “tratamiento” ha representado a menudo sólo un medio para la disposición no controlada de las aguas residuales y, como resultado, muchos ecosistemas valiosos han sido dañados irreversiblemente (Rozkošný *et al.*, 2014). En México hay más de 142 sitios protegidos bajo la Convención Ramsar, que representan 8 643 millones de hectáreas (Conanp, 2014). No obstante, las normativas que regulan las descargas de aguas residuales tratadas en el país (Semarnat, 2012), muchos de estos

humedales aún siguen recibiendo descargas de aguas residuales de los asentamientos urbanos locales sin tratamiento o con un tratamiento deficiente, pretendiendo que éstos actúen en sí mismos como sistemas de depuración. Esta práctica genera una diversidad de afectaciones ambientales a la vida acuática y terrestre de las especies que habitan estos ecosistemas y constituyen un riesgo para la salud de la población (Chacón-Torres, 1993; Lind y Dávalos-Lind, 2002). Como ejemplo de ello está el lago de Zapotlán, Jalisco, el cual está ubicado en una cuenca endorreica, en donde, desde hace tiempo, dos comunidades de aproximadamente 97 750 y 14 011 habitantes descargan sus aguas residuales con tratamiento parcial. Como resultado de la descarga prolongada de las aguas residuales, hoy en día el lago enfrenta problemas derivados de la eutrofización antropogénica, tales como la drástica disminución de la pesca comercial y la pérdida de sus usos recreativos, como la pesca deportiva y el canotaje (Greenberg *et al.*, 2008) (Figura 3).

Figura 3. Floración de lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) en el lago de Zapotlán, Jalisco, derivado del exceso de nutrientes contenidos en las aguas residuales vertidas en el lago (sitio Ramsar, 1466)



Foto: cortesía del CIATEJ (Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco).

Los humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales

Los sistemas basados en procesos naturales para el tratamiento de diversos tipos de aguas residuales siempre han llamado la atención, debido a los bajos costos de inversión, mantenimiento y operación. Sin embargo, fue sólo durante la segunda mitad del siglo xx, cuando los procesos de depuración que involucran el tratamiento de aguas residuales en ecosistemas naturales fueron utilizados, creando ambientes contruidos de forma artificial. Ahora bien, podemos decir que las tecnologías de tratamiento extensivas, tales como los humedales artificiales, filtros de suelo plantados o las lagunas de estabilización, están usando procesos que ocurren en hábitats naturales, pero lo hacen de manera más controlada (Rozkošný *et al.*, 2014). Aunque este tipo de sistemas son más apropiados para ambientes rurales y periurbanos, debido a la extensión de terrenos que se requiere, igualmente se han aplicado en ambientes urbanos. En la comunidad urbana de Huaxin en Shanghái, China, las aguas residuales descargadas de aguas sanitarias a cielo abierto se transformaron en un pasaje vegetativo que funciona como sistema de fitodepuración (Figuras 4a y 4b).

Figura 4a. Descarga directa de aguas residuales sobre un canal de desagüe pluvial en el barrio de Huaxin en Shanghái, China



Foto: cortesía de Janisch y Schulz.

Figura 4b. Vista del canal de desagüe después de la construcción de un humedal artificial para la depuración de las aguas residuales comunitarias en el barrio de Huaxin en la ciudad de Shanghái, China



Foto: cortesía de Janisch y Schulz.

A diferencia de los métodos convencionales, durante la última década se han desarrollado nuevos sistemas basados en procesos anaerobios avanzados, tales como el reactor anaerobio de flujo ascendente, el filtro anaerobio de flujo ascendente, el lecho fluidizado anaerobio y los reactores aerobios de lecho extendido, con una diferencia significativa entre el tiempo de retención hidráulica y el tiempo de retención de sólidos (Abdel-Halim *et al.*, 2008). Estos sistemas ofrecen buenas oportunidades para el tratamiento de una gran variedad de aguas residuales industriales con contenidos medios y altos de carga orgánica, así como para el tratamiento de las aguas residuales domésticas y municipales de baja carga orgánica (Yu *et al.*, 1997; Mara, 2003: 71-73; Abdel-Halim *et al.*, 2008). De esta forma, los sistemas anaerobios pueden combinarse con sistemas facultativos y aerobios tales como las lagunas de estabilización, biofiltros y humedales artificiales, los cuales son sistemas de bajo costo de instalación, de bajo consumo energético y permiten cumplir con los estándares de calidad a la descarga, además de que generan espacios amigables con el entorno (Gopal, 1999;

Kivaisi, 2001; Mara, 2003: 230-231). En el Centro Público de Investigación CIATEJ se desarrolló un método para tratar aguas residuales basado en procesos anaerobios y humedales artificiales plantados con especies ornamentales (Figura 5). Las aguas residuales tratadas mediante este sistema cumplen ampliamente con los requisitos de las normas oficiales mexicanas (Merino *et al.*, 2014; De Anda-Sánchez y López-López, 2016).

Figura 5. Sistema de tratamiento de aguas residuales sanitarias basado en humedales artificiales localizado en Zapopan, Jalisco, México



Foto: cortesía de CIATEJ (Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco).

Discusión

Considerando lo anterior, podemos decir que los sistemas de tratamiento de aguas residuales en los países en desarrollo no tienen éxito y, por lo tanto, no son sostenibles, porque fueron tomados de los sistemas de tratamiento desarrollados en los países con alto nivel de ingreso per cápita,² sin considerar la conveniencia de la tecnología para la cultura, la tierra y el clima. A menudo, los ingenieros locales capacitados en los programas académicos de los países desarrollados continúan apoyando la elección de sistemas convencionales que después resultan inapropiados. Como resultado, muchas de las instalaciones implementadas han sido abandonadas debido al alto costo de funcionamiento del sistema y de las reparaciones (Abdel-Halim *et al.*, 2008).

En el caso de México, las cifras oficiales muestran datos diferentes en lo referente a las plantas de tratamiento que se encuentran fuera de operación o en estado de abandono (Conagua, 2014, 2015). En el caso de Jalisco, ha sido posible conocer esta cifra gracias a la información publicada por la Comisión Estatal del Agua, que indica que 50% de las PTARM están fuera de operación o se encuentran en estado de abandono (CEA, 2015), lo que significa que una inversión muy importante del estado en este rubro no generó los beneficios esperados por la sociedad. Las aguas residuales no tratadas y vertidas a los cuerpos de agua nacionales han generado una diversidad de problemas ambientales. Esta situación se puede contemplar en la mayoría de los estados del país, en donde los ecosistemas fluviales, lacustres y de aguas subterráneas (acuíferos) han sufrido diversos grados de degradación debido al vertido de aguas sin tratar o parcialmente tratadas en cuerpos de aguas superficiales o a su infiltración al subsuelo.

En este sentido, es necesario considerar que los procesos de tratamiento de aguas residuales son diferentes en cada caso debido a sus diferencias de origen —efluentes de drenes agrícolas, descargas municipales o industriales— por lo que se deben identificar claramente las tecnologías más convenientes después de haber realizado una cuidadosa cuantificación de los volúmenes de descarga y de las características físicas, químicas y biológicas del agua a tratar. Particularmente en el caso de las aguas residuales municipales, su selección y diseño debe comprenderse desde el punto de vista de la IPE, toda vez que reciben como materia prima los residuos propios de una concentración urbana, de un centro laboral o de una comunidad, los cuales deben ser transformados de forma sustentable en un producto que pueda reutilizarse o reincorporarse a su medio ambiente. En este sentido, para que un proceso de tratamiento de aguas residuales sea sustentable en un país como México, no solamente debe dar cumplimiento a las normas oficiales relacionadas con las descargas de aguas residuales tratadas (Semarnat, 2012), sino que igualmente deberían considerarse otros criterios tales como:

² Por ejemplo, los países de Europa Occidental, Estados Unidos, Canadá, Australia y Nueva Zelanda.

- a. Contar con estimaciones de los costos de inversión, mantenimiento y operación comparados con los beneficios reales obtenidos en el corto y mediano plazo, tales como el cuidado de la salud pública, la protección de los recursos naturales, el impulso de la economía local, entre otros (Christ, 2003).
- b. Cumplir con la condición de que el balance de materia y energía de materias primas, productos y subproductos dé como resultado un beneficio económico, social y ambiental sin comprometer los recursos actuales y futuros de la comunidad (Heijungs *et al.*, 2010).
- c. Evaluar la capacidad real de inversión con la que cuenta la comunidad y asegurar los recursos necesarios para su mantenimiento y operación (McConville y Mihelcic, 2007).
- d. Considerar que los costos energéticos, de mantenimiento y operación se incrementarán con el tiempo (McConville y Mihelcic, 2007).
- e. Tratar las aguas residuales por separado, distinguiendo las aguas sanitarias de las aguas grises y de las aguas pluviales, ya que al juntarlas aumentan las demandas de capacidad de tratamiento y, por lo tanto, los costos de inversión, mantenimiento y operación (Christ, 2003).
- f. Resolver desde la planificación, la utilización que tendrán las aguas residuales tratadas y buscar con ello un beneficio para la comunidad en lugar de optar por la descarga directa a cuerpos de agua superficiales o infiltración al subsuelo (Christ, 2003).
- g. Asumir una responsabilidad comunitaria con el buen funcionamiento de la planta de tratamiento en lugar de mantener una postura indiferente al descargar el agua residual a una red sanitaria municipal (Christ, 2003).
- h. Controlar que la calidad del agua tratada cumpla consistentemente con las regulaciones ambientales (Christ, 2003).
- i. Asegurar que los sólidos biológicos generados tengan tratamiento para su aprovechamiento como fertilizante (compost), en lugar de su disposición en tiraderos que no cumplen con regulaciones ambientales (Christ, 2003).
- j. Que el resultado del análisis del ciclo de vida de los componentes de los productos, materiales y de la tecnología de tratamiento en su conjunto que se implemente, no genere pasivos ambientales para la sociedad (Heijungs *et al.*, 2010).

Particularmente, el tema de la reutilización del agua tratada en México es un área de oportunidad, en donde se deben hacer esfuerzos importantes para su gestión y aprovechamiento. De acuerdo con Conagua (2016), 16.4% del agua residual sin tratamiento se usa de forma directa en riego agrícola; 72.9% del agua residual tratada se vierte en cuerpos de agua, los cuales posteriormente se reutilizan en riego agrícola, y apenas 4.2% del agua residual tratada se usa de forma directa en la agricultura o en otros servicios. El agua residual tratada que sustituye el agua de primer uso es apenas el 0.004%. Esto demuestra que, hasta ahora, las obras de saneamiento de las aguas residuales municipales no han considerado, desde el origen de su planeación, la forma en la cual se dará uso a un producto importante, resultado de un proceso de por sí altamente costoso, perdiendo con ello oportunidades de recuperación de la inversión a través del uso productivo del agua residual tratada, ya sea en la agricultura, la industria, servicios municipales, o bien en desarrollos privados de vivienda o para la recreación (campos deportivos, campos de golf, entre otros).

Conclusiones

Dadas las nuevas tendencias tecnológicas en el campo de la recuperación y reutilización del agua basadas en sistemas descentralizados, hay una serie de necesidades de investigación asociadas con estos temas. Particularmente, en México se necesita impulsar un mayor número de proyectos de investigación para desarrollar y transferir a la sociedad tecnologías innovadoras adaptables a las diferentes condiciones geográficas, culturales, sociales y políticas del país, así como herramientas organizacionales y otras formas de asistencia a las comunidades y a los organismos operadores de los municipios para implementar proyectos exitosos de recuperación y reutilización del agua residual tratada a nivel local.

Los innumerables ejemplos exitosos mostrados en la literatura relacionada con los sistemas de tratamiento de aguas residuales que emplean métodos naturales tales como aquellos en donde se usan sistemas anaerobios seguidos de lagunas de oxidación, lagunas aireadas o humedales artificiales, demuestran que el estado de la técnica ya es suficientemente confiable como para implementar en México proyectos de saneamiento descentralizados basados en métodos naturales de depuración (Brix y Arias, 2005; Anda *et al.*, 2010; De Anda-Sánchez y López-López, 2016). Igualmente, incorporar en la planificación de las obras de saneamiento la reutilización del agua tratada a nivel comunitario, ofrece posibilidades de reducción de los consumos de agua y abre oportunidades para la generación de proyectos para la producción de alimentos, forrajes, energía o materiales para el acondicionamiento de suelos que contribuyan a elevar la calidad de vida de la comunidad.

Agradecimientos

Se agradece al CIATEJ su contribución con las fotografías de la planta de tratamiento en Jalisco basada en humedales artificiales, así como a la empresa Janisch & Schulz las fotografías de humedales artificiales en Shanghái, China.

Referencias

- Abdel-Halim, Walid; Weichgrebe, Dirk; Rosenwinkel, K. H., y Verink, Johan (2008). "Sustainable Sewage Treatment and Re-Use in Developing Countries". *Twelfth International Water Technology Conference, IWTC12 2008*. Alejandría, Egipto, pp. 1397-1409. Recuperado de http://www.iwtc.info/2008_pdf/15-2.PDF
- Anda, Martin; Mohamed, Radin Maya Saphira Radin; Mathew, Kuruvilla; Dallas, K. S., y Ho, Goen (2010). "Decentralised Wastewater Treatment and Recycling in Urban Villages". *Water Practice and Technology*, 5(3).
- Avendaño-Leadem, Daniel Francisco (2016). "Identificación de tipologías de asentamiento para el diseño de tratamiento descentralizado de aguas residuales. Caso de estudio: San Isidro de Heredia-Costa Rica". *Revista Geográfica de América Central*, 1(56), pp. 183-207. doi: <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.1-56.8>
- Brix, Hans y Arias, Carlos A. (2005). "The Use of Vertical Flow Constructed Wetlands for On-Site Treatment of Domestic Wastewater: New Danish Guidelines". *Ecological Engineering*, 25(5), pp. 491-500.
- CEA (2015). *Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Comisión Estatal del Agua*. Gobierno del Estado de Jalisco. México. Recuperado de http://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/plantas_tratamiento/
- Conagua (2014). *Diagnóstico del programa U031 operación y mantenimiento en plantas de tratamiento de aguas residuales 2014*. México: Comisión Nacional del Agua / Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento / Gerencia de Potabilización y Saneamiento. Recuperado de http://www.coneval.org.mx/Informes/Evaluacion/Diagnostico/Diagnostico_2014/Diagnostico_2014_SEMARNAT_U031.pdf
- Conagua (2015). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Diciembre 2015*. México: Comisión Nacional del Agua/Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 308 pp. Recuperado de http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/197610/Inventario_2015.pdf
- Conagua (2015a). *Reutilización de aguas residuales en México: Caso Sonora. Informe técnico elaborado por Ariel Cohen, Hadas Mamane, Yaal Lester*. Israel: TAU Water Research Center/ Tel Aviv University. Recuperado de <http://files.conagua.gob.mx/transparencia/REUTILIZACION%20C3%93N-AR-SON.pdf>

- Conagua (2016). *Estadísticas Agua en México. Edición 2016*. Comisión Nacional del Agua. Recuperado de http://201.116.60.25/publicaciones/EAM_2016.pdf
- Conanp (2014). *Humedales de México*. Recuperado de http://ramsar.conanp.gob.mx/la_conanp_y_los_humedales.php
- Cuarto Poder de Chiapas (2017). “Permiten desechos aguas negras a los ríos de Chiapas”. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Recuperado de <http://www.cuartopoder.mx/permitendesecharaguasnegrasalosriosdechiapas-200988.html>
- Chacón-Torres, Arturo (1993). “Lake Patzcuaro, Mexico: Watershed and Water Quality Deterioration in a Tropical High-Altitude Latin American Lake”. *Lake and Reservoir Management*, 8(1), pp. 37-47.
- Christ, Oliver (2003). “Decentralized Waste Water Treatment Systems”. En Peter A. Wilderer, Jianrong Zhu y Norbert Schwarzenbeck (eds.), *Water in China. Water & Environmental Management S. (Wems)*. Londres: IWA Publishing, pp. 187-196.
- De Anda, José y Shear, Harvey (2017). “Searching a Sustainable Model to Manage and Treat Wastewater in Jalisco, Mexico”. *International Journal of Development and Sustainability*, 5(6), pp. 278-294.
- De Anda-Sánchez, José y López-López, Alberto (2016). *Patente: MX/2016/037236. Sistema y proceso para el tratamiento pasivo de aguas residuales domésticas*. México: Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.
- De la Peña, María Eugenia; Ducci, Jorge, y Zamora, Viridiana (2013). *Tratamiento de aguas residuales en México*. Banco Interamericano de Desarrollo-Sector de Infraestructura y Medio Ambiente. Nota Técnica # IDB-TN-521, 42 pp. Recuperado de <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/5931/Tratamiento20de20aguas20residuales20en20MC3A9xico.pdf?sequence=4>
- El Sur, Periódico de Guerrero (2016). “La mitad de las plantas de tratamiento para aguas residuales están paradas por los ayuntamientos, señala CAPASEG”. Recuperado de <http://suracapulo.mx/2/la-mitad-de-las-plantas-para-aguas-residuales-estan-paradas-por-los-ayuntamientos-senala-la-capaseg/>
- Escalante, V.; Cardoso, L.; Moeller, G.; Mantilla, G.; Montecillos, J.; Servín, C., y Villavicencio, F. (2013). “El reúso del agua residual tratada en México”. En *Seminario internacional sobre sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales*. Recuperado de http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-09-28_11-00-54111051.pdf
- Esteller, María Vicenta (2002). “Vulnerabilidad de acuíferos frente al uso de aguas residuales y lodos en agricultura”. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 2, pp. 103-113.
- EPA (2016). *What is a Wetland?* Recuperado de <https://www.epa.gov/wetlands/what-wetland>
- FAO (2013). *Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?* Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma 2013, 144 pp. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/017/i1629s/i1629s.pdf>

- Glavič, Peter y Lukman, Rebeka (2007). “Review of Sustainability Terms and their Definitions”. *Journal of Cleaner Production*, 15, pp. 1875-1885.
- Gopal, Brij (1999). “Natural and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Potentials and Problems”. *Water Science and Technology*, 40(3), pp. 27-35. doi:10.1016/S0273-1223(99)00468-0.
- Greenberg, Tracie; Shear, Harvey; de Anda, José, y Ortiz-Jiménez, Mario Alberto (2008). *Preliminary Analysis of Water Pollution in a Small Lake in Western Mexico*. En C. A. Brebbia, D. Prats Rico y Y. Villacampa Esteve (eds.), *Water Pollution IX*. Southampton, Boston, Reino Unido: WIT Press, pp. 13-21.
- Grönlund, Erik (2014). Sustainable Wastewater Treatment. En S. Eslamian (ed.) *Handbook of Engineering Hydrology: Environmental Hydrology and Water Management*. Boca Ratón, Londres, Nueva York: CRC Press, pp. 387–400.
- Heijungs, Reinout; Huppes, Gjalt, y Guinée, Jeroen B. (2010). “Life Cycle Assessment and Sustainability Analysis of Products, Materials and Technologies. Toward a Scientific Framework for Sustainability Life Cycle Analysis”. *Polymer Degradation and Stability*, 95(3), pp. 422-428.
- 10M (Institute of Medicine) (2009). *Global Environmental Health: Research Gaps and Barriers for Providing Sustainable Water, Sanitation, and Hygiene Services*. Washington, D. C.: The National Academies Press, 140 pp.
- Jiménez Cisneros, Blanca Elena; Mazari Hiriart, Marisa; Domínguez Mora, Ramón, y Cifuentes García, Enrique (2004a). “El agua en el Valle de México”. En Blanca Jiménez y Luis Marín (eds.), *El agua en México vista desde la academia*. México: Academia Mexicana de Ciencias, pp. 15-32.
- Jiménez Cisneros, Blanca Elena; Siebe Grabach, Christina, y Cifuentes García, Enrique (2004b). “El reúso intencional y no intencional del agua en el Valle de Tula”. En Blanca Jiménez y Luis Marín (eds.), *El agua en México vista desde la academia*. México: Academia Mexicana de Ciencias, pp. 33-55.
- Kivaisi, Amelia K. (2001). “The Potential for Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Reuse in Developing Countries: a Review”. *Ecological Engineering*, 16(4), pp. 545-560.
- Krotscheck, Christian y Narodoslowsky, Michael (1996). “The Sustainable Process Index, a New Dimension in Ecological Evaluation”. *Ecological Engineering*, 6, pp. 241-258.
- La Jornada Maya (2016). “Plantas de tratamiento, fuera de servicio”. San Francisco de Campeche, Campeche. Recuperado de <https://www.lajornadamaya.mx/2016-11-25/Plantas-de-tratamiento--fuera-de-servicio>
- Lettinga, Gatze; Lens, Piet, y Zeeman, Grietje (2001). “Environmental Protection Technologies for Sustainable Development”. En P. Lens, G. Zeeman y G. Lettinga (eds.), *Decentralised Sanitation and Reuse. Concepts, Systems and Implementation*. Reino Unido: IWA Publishing, pp. 3-10.
- Lind, Owen T. y Dávalos-Lind, Laura (2002). “Interaction of Water Quantity with Water Quality: the Lake Chapala Example”. *Hydrobiologia*, 467(1), pp. 159-167.

- Mara, Duncan (2003). *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*. Estados Unidos, Reino Unido: Earthscan, 310 pp. Recuperado de http://www.pseau.org/outils/ouvrages/earthscan_ltd_domestic_wastewater_treatment_in_developing_countries_2003.pdf
- Massoud, May A.; Tarhini, Akram, y Nasr, Joumana A. (2009). “Decentralized Approaches to Wastewater Treatment and Management: Applicability in Developing Countries”. *Journal of Environmental Management*, 90, pp. 652-659.
- MAV Ingeniería Integral (2012). *Planta de Tratamiento “El Ahogado”*. Recuperado de <http://mav-ingenieria-integral.weebly.com/planta-de-tratamiento-lldquoel-ahogadordquo.html>
- McConville, Jennifer R. y Mihelcic, James R. (2007). “Adapting Life-Cycle Thinking Tools to Evaluate Project Sustainability in International Water and Sanitation Development Work”. *Environmental Engineering Science*, 24(7), pp. 937-948. doi: 10.1089/ees.2006.0225
- Merino, María de la Luz; Villegas, Edgardo; de Anda, José, y López, Alberto (2014). The Effect of the Hydraulic Retention Time on the Performance of an Ecological Wastewater Treatment System: An Anaerobic Filter with a Constructed Wetland. *Water*, 7(3), pp. 1149-1163. doi:10.3390/w7031149
- Metcalf & Eddy (1996). *Ingeniería de las aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. México: McGraw-Hill, 762 pp.
- Miller, G. Wade (2006). “Integrated Concepts in Water Reuse: Managing Global Water Needs”. *Desalination*, 187, pp. 65-75.
- Mitch, William J. (2012). “What is Ecological Engineering?” *Ecological Engineering*, 45, pp. 5-12.
- Montgomery, Maggie A. y Elimelech, Menachem (2007). “Water and Sanitation in Developing Countries: Including Health in the Equation”. *Environmental Science & Technology*, 41(1), pp. 17-24.
- Mural (19 de febrero de 2017). “Daño pestilente”. *Periódico Mural* (Sección Comunidad). Guadalajara, Jalisco, p. 1.
- Noyola, Adalberto; Morgan-Sagastume, Juan Manuel, y Güereca, Leonor Patricia (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. México: Instituto de Ingeniería-UNAM, 140 pp.
- NVI Noticias (2017). “Plantas tratadoras, sólo son “elefantes blancos”; aguas negras inundan municipios de Oaxaca”. Recuperado de <http://www.nvinoticias.com/nota/55117/plantas-tratadoras-de-oaxaca-son-elefantes-blancos>
- Odum, Howard T. y Odum, B. (2003). “Concepts and Methods of Ecological Engineering”. *Ecological Engineering*, 20, pp. 339-361.
- ONU (2017). “Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”. *Organización de las Naciones Unidas. Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado de <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

- Presidencia de la República (17 de marzo de 2012). “Inauguran la planta de tratamiento El Ahogado, en beneficio de 820 mil habitantes de Guadalajara”. Recuperado de <http://calderon.presidencia.gob.mx/2012/03/inauguran-la-planta-de-tratamiento-el-ahogado-en-beneficio-de-820-mil-habitantes-de-guadalajara/>
- Pulido-Madrigal, Leonardo (2017). “Riego con aguas residuales para depuración de contaminantes”. *H₂O Gestión del agua*, 14, pp. 12-17.
- Ramsar (2013). *The Ramsar Convention Manual: A Guide to the Convention on Wetlands* (Ramsar, Irán, 1971). Recuperado de <http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/manual6-2013-e.pdf>
- Rozkošný, Miloš; Křiška, Michal; Šálek, Jan; Bodík, Igor, e Istenič, Darja (2014). *Natural Technologies of Wastewater Treatment. Global Water Partnership Central and Eastern Europe*, 138 pp. Recuperado de http://www.gwp.org/Global/GWP-CEE_Files/Regional/Natural-Treatment.pdf
- Saldívar-Cabrales, Jorge; Álvarez, Luis H.; Berrelleza, Álvaro, y Cervantes, Francisco J. (junio, 2008). “Reúso del agua residual tratada anaeróbicamente proveniente de una granja porcina en un cultivo de trigo”. *VII Congreso Internacional, XIII Congreso Nacional, III Congreso Regional de Ciencias Ambientales*. Ciudad Obregón, Sonora, México. Recuperado de web.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/congresos/.../TECNOLOGIA.../TBA109.doc
- Semarnat (2012). *Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Aguas Residuales*. México. Recuperado de <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/nom-aguas-residuales>
- Singh, Nitin Kumar; Kazami, Absar Ahmad, y Starkl, Markus (2015). “A Review on Full-Scale Decentralized Wastewater Treatment Systems: Techno-Economical Approach”. *Water Science & Technology*, 71(4), pp. 468-474.
- Tabasco Hoy (2015). “58 plantas de aguas residuales están sin operar en Tabasco: Conagua”. Recuperado de <http://www.tabascohoy.com/nota/264605/58-plantas-de-aguas-residuales-estan-sin-operar-en-tabasco-conagua>
- Tchobanoglous, George; Theisen, Hilary, y Vigil, Samuel A. (1993). *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. Nueva York: McGraw-Hill, 978 pp.
- Toze, Simon (2006). “Reuse of Effluent Water-Benefits and Risks”. *Agricultural Water Management*, 80, pp. 147-159.
- UN (2016). *Sustainable Development Goal 6: Ensure Availability and Sustainable Management of Water and Sanitation for All*. Recuperado de <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg6>
- Wang, Ya-Ping y Smith, Robin (1994). “Design of Distributed Effluent Treatment Systems”. *Chemical Engineering Science*, 49(18), pp. 3127-3145.
- Wilderer, Peter A. y Schreff, Dieter (2000). “Decentralized and Centralized Wastewater Management: A Challenge for Technology Developers”. *Water Science & Technology*, 41(1), pp. 1-8.

Yu, Hanging; Tay, Joo-Hwa, y Wilson, Francis (1997). "A Sustainable Municipal Wastewater Treatment Process for Tropical and Subtropical Regions in Developing Countries". *Water Science and Technology*, 35(9), pp. 191-198. doi:10.1016/S0273-1223(97)00197-2

Recibido: 16 enero 2017

Aceptado: 12 julio 2017

Editor asociado: Juan Carlos Pérez Jiménez