

Revisión de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales incluyendo algunos fármacos

¹ Miceli-Montesinos Auzania Susi, Nájera Aguilar Hugo Alejandro

² Rojas Valencia María Neftalí, Luz Idalia Quintero López

³ Orantes García Carolina

Nota sobre los autores

¹ Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Escuela de Ingeniería Ambiental. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Libramiento norte poniente No. 1150, CP. 29039, Ciudad universitaria, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. E-mail: perla02mx@yahoo.com.mx; hnajera72@hotmail.com

² Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería de la UNAM, Coordinación de Ingeniería Ambiental Edificio 5, cubículo 212. Avenida Universidad # 3000. Colonia Coyoacán, Distrito Federal, México. Tel. 55 52-56-23-36- 00 ext. 8663. E-mail: nrov@pumas.iingen.unam.mx; lucyloqui54@hotmail.com

³ Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Libramiento Norte Poniente N°1155, Colonia Lajas Maciel, Código Postal 29039, Chiapas, México. carolina.orantes@unicach.mx

Para citar este artículo:

Miceli-Montesinos S., Nájera, H., Orantes, C., Quintero, L. y Rojas, M. (2014) Revisión de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales incluyendo algunos fármacos. *Espacio I+D Innovación más Desarrollo*, 3 (5), 73-96. doi: 10.31644/IMASD.5.2014.a04

Resumen

En las últimas dos décadas se han encontrado fármacos de uso común dispersos en cuerpos de agua que se han vuelto dañinos para los diferentes ecosistemas. Estas sustancias no se han considerado como un peligro para el ambiente, por lo que no han sido legislados. Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARs) no han sido diseñadas para tratar esta clase de contaminantes, por lo que su eficiencia es baja. Por eso en este artículo se hace un estudio técnico-económico acerca de las tecnologías más apropiadas existentes para el tratamiento de los contaminantes fármacos. Se analizaron los procesos de tratamientos de aguas residuales fisicoquímicos, biológicos, de tecnologías avanzadas y combinadas, siendo este último el más eficiente, pero el de mayor costo. La tecnología por humedal de flujo subsuperficial resulta ser una tecnología atractiva ya que tiene altos porcentajes de remoción y es un 77% más económico que el proceso convencional de tratamiento de aguas residuales.

Palabras clave: Contaminantes fármacos, humedales, procesos convencionales, avanzados y combinados, tratamiento de aguas.

Abstract

In the past twenty years, residues of commonly used pharmaceutical products have been found in water bodies and have become harmful for a variety of ecosystems. These contaminating pharmaceuticals have not been considered an environmental hazard and therefore no legislation has been enacted to control them. Since wastewater treatment plants (WWTP) have not been designed to treat this class of contaminants their efficacy is low. This study focuses on the technical and economical aspects of the most appropriate existing technologies to treat pharmaceutical contaminants. A series of wastewater treatment procedures including physical-chemical, biological, advanced and combined technologies have been analyzed. The combined wastewater treatment procedure is the most efficient but also the most expensive. The use of subsurface flow wetland turned out to be an attractive technology offering high removal percentages and being 77% more economical than the conventional wastewater treatment process.

Keywords: Drug contaminants, advanced, conventional and combined processes, wastewaters treatment, wetlands.

Introducción

Las actividades antropogénicas han aumentado en las últimas décadas, y como consecuencia la gama de contaminantes presentes en las aguas residuales, como los productos de cuidado personal, entre otros. Estos contaminantes han sido denominados Contaminantes Emergentes (CE) o Productos Farmacéuticos y de Higiene Personal o PPCPs, por sus siglas en inglés. Se caracterizan por ser compuestos de estructuras químicas complejas.

Dentro de los CE se encuentran los residuos de fármacos a pesar de que sus concentraciones en cuerpos de agua son relativamente bajas, estudios recientes demuestran que su presencia y contacto con especies acuáticas pueden causar toxicidad (tabla 1).

Sustancia	Extremadamente tóxico $CE_{50} < 0.1 \text{ mg/l}$	Muy tóxico $CE_{50} 0.1-1 \text{ mg/l}$	Tóxico $CE_{50} 1-10 \text{ mg/l}$	Dañino $CE_{50} 10-100 > \text{mg/l}$	No tóxico $CE_{50} > 100 \text{ mg/l}$
Analgésicos			D	D,E	
Antibióticos	A	B			
Antidepresivos		D			
Antiepilépticos			C		D,E
Cardio-vasculares		D			
Citostáticos		A		D,E	

Donde: A- microorganismo; B-alga; C- Cnidarias; D.-crustáceos; E- peces (Valdés, 2009).

Tabla 1. Clasificación de la toxicidad de productos farmacéuticos en el ambiente acuático

Los productos farmacéuticos, una vez ingeridos por los individuos, se metabolizan y los residuos se excretan, para ser vertidos en los drenajes que llegan a plantas de tratamiento de aguas residuales o a otros cuerpos receptores de agua directa o indirectamente. Para Santos (2006), esto es debido a la amplia descarga de residuos, las Plantas de Tratamiento de

Aguas Residuales (PTARs), constituyen la principal fuente de aporte de este tipo de contaminantes al medio ambiente.

Otra fuente es la inadecuada disposición final de los sobrantes que fueron prescritos y que el paciente no aprovechó totalmente en el cuidado de su salud. En México se tiran aproximadamente 10% de residuos de fármacos al ambiente, el paracetamol es uno de los fármacos presentes en aguas residuales (Ayala y Fernández: 2010).

Los productos farmacéuticos y sus subproductos (metabolitos), como CE, contenidos en aguas residuales, no se encuentran regulados por ninguna normatividad, los efectos sobre el medio ambiente en general (seres humanos y biota) aún no son suficientemente conocidos, ya que el estudio de su presencia empezó a partir de los 90 (Henríquez: 2012).

Los CE no son compuestos persistentes, pero el constante uso y los vertimientos a cuerpos de agua, han llegado hasta las PTARs convencionales; las cuales no están diseñadas para eliminarlos y hacen que su concentración aumente en el ecosistema (Henríquez: 2012). En agua para consumo humano, los estudios son menos numerosos, pero no por ello deja la posibilidad de la presencia de los CE.

Por lo anterior, la presencia de compuestos farmacéuticamente activos ha sido un problema de preocupación creciente (por la posible bioacumulación en la biota) y de atención durante los últimos 20 años (desde que fueron descubiertos en suelos, aguas residuales, superficiales y potables). Si bien la naturaleza tiene una capacidad de biodegradación, también se debe de considerar que el aumento de estas descargas de CE, hace más difícil este proceso natural.

Repercusiones ecológicas de contaminantes fármacos

Los efectos adversos de los contaminantes fármacos en la vida acuática y humana han sido reportados en diversas investigaciones, se ha constatado que el uso veterinario (aplicado en la ganadería) de diclofenaco, ha llevado a un decrecimiento importante en la población de buitres de 95% en ciertas áreas del subcontinente indio, también se ha visto un riesgo potencial para otras aves carroñeras (Oaks y Meteyer: 2012). El mecanismo de la muerte es probablemente la insuficiencia renal, un conocido efecto secundario del diclofenaco. Los buitres comen restos de animales domésticos tratados

veterinariamente con diclofenaco, y se envenenan debido al compuesto químico acumulado (Meteyer, et al.: 2005); otro efecto causado por el diclofenaco es que afecta a los tejidos de las branquias y riñones de peces de agua dulce, lo que provoca un posible riesgo para estas poblaciones (Hoeger, et al.: 2005).

Existe evidencia de que dichos contaminantes producen impactos como mortalidad, errores en la muda, eclosión, deformidades anatómicas, cambios subletales en el crecimiento de las plantas, cambios en la proporción sexual de los organismos superiores, modificaciones en los ciclos biogeoquímicos y transmisión de genes de resistencia a antibióticos, daño a las comunidades microbianas por desinfectantes, variación en el ritmo de vida, en las relaciones tróficas por los anestésicos, reducción en la fertilidad, cambio de la condición sexual por hormonas y efectos tóxicos-reproductivos por drogas citostáticas (Stuart et al.: 2012).

En la tabla 2 se muestran las propiedades fisicoquímicas del diclofenaco, se puede observar que hay reportes que indican que se presenta riesgo de bioacumulación y toxicidad (Tablas 2 y 3).

Propiedades	
Constante de Henry	4.73×10^{-12} (atm·m ³ /mol)
Solubilidad en agua	2.43 (g/L)
Presión de vapor	6.14×10^{-8} (mmHg)
Log coeficiente de adsorción de carbono orgánico	830 (-)
Log coeficiente de partición octanol-agua	4.51 (-)
Constante de disociación ácida	4.15 (-)
Persistencia, bioacumulación y toxicidad	7 (-)
Factor de bioconcentración	3 (-)

Fuente: Lobo et al., (2012)

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del diclofenaco

En la tabla 3 se enlistan las especies de organismos que han mostrado reacciones de toxicidad aguda y crónica, se puede ver que el daño dependiendo de la especie se puede presentar en minutos, horas o días.

Organismo	Parámetro	Concentración de diclofenaco ($\mu\text{g/L}$)
Toxicidad aguda		
V. fisheri 30 min	EC ₅₀	11.454
D. magna 48 h	EC ₅₀	224.30
C. dubia 48 h	EC ₅₀	22.704
Toxicidad crónica		
P. subcapitata 96 h	CPE	10
	CMEO	20000
B. calyciflorus 48 h	CPE	25
	CMEO	12500
C. cubia 7 d	CPE	1000
	CMEO	2000
D. rerio (ELS) 10 d	CPE	4000
	CMEO	8000

CPE: Concentraciones previstas sin efecto, CMEO: concentración mínima con efecto observado, EC50: concentración que causa el 50% del efecto. Fuente: Ferrari et al., (2003).

Tabla 3. Concentraciones de diclofenaco a las que se presenta toxicidad aguda y crónica

Los valores reportados de toxicidad indican que una pequeña dosis genera efectos adversos en organismos vivos, por lo cual es importante

que las descargas de agua que se hagan al ambiente tengan un control en la concentración de diclofenaco.

Tecnologías para la remoción de contaminantes fármacos

Los tratamientos de PTARs para la remoción de contaminantes en general, se pueden clasificar en tecnologías fisicoquímicas, biológicas, avanzadas y combinadas. A continuación se presenta un resumen de las diferentes tecnologías que operan actualmente.

Es conveniente señalar que a la fecha no hay PTARs, específicas para eliminar determinados CE.

Tecnologías fisicoquímicas

Las tecnologías fisicoquímicas incluyen la adsorción por carbón activado, procesos de oxidación (ozono y peróxido de hidrógeno), coagulación/flotación, y cloración. Los procesos por medio de carbón activado y membranales han demostrado ser los más eficientes.

En un estudio realizado a nivel laboratorio, utilizando diversos tratamientos (coagulación/flotación, suavización con cal, ozonación, cloración y adsorción con carbón activado granular) se analizó la eliminación de treinta diferentes compuestos farmacéuticos, sin obtener una remoción significativa (<20%) con los procesos de coagulación/flotación, ni suavización con cal, pero sí un buen resultado con carbón activado granular y oxidación por ozono y cloración (>90%) (Westerhoff et al., 2005). Estos resultados concuerdan con Adams et al. (2002), donde compuestos farmacéuticos (carbadox, sulfadimetoxina, trimetoprim) no fueron removidos utilizando coagulantes como sulfato de aluminio y sulfato férrico. De igual manera, en otros estudios, la coagulación resultó ineficiente para la eliminación de diclofenaco, carbamazepina, ibuprofeno y ketoprofeno (Petrovic et al., 2003; Vieno et al., 2006).

Se ha usado el sistema Foto-Fenton y Sono-Fenton heterogéneos para la eliminación de un conjunto de ocho fármacos de distinta naturaleza, que comúnmente aparecen en los efluentes de depuradora. Estas técnicas consisten en la aplicación combinada de radiación UV-

visible o ultrasonidos con H_2O_2 y un catalizador heterogéneo de hierro soportado sobre una sílice mesoporosa tipo SBA-15. La utilización de catalizadores heterogéneos implica una serie de ventajas, entre las que cabe destacar su fácil recuperación por filtración y una menor contaminación del medio de reacción por disolución de hierro. Los ensayos se llevaron a cabo sobre dos matrices acuosas diferentes, disolviendo en ellas una cierta concentración de los fármacos seleccionados (10 mg/L), pudiendo así evaluar la influencia de la matriz en la degradación. Sobre una matriz de agua ultrapura Milli-Q se han realizado un conjunto de experimentos para evaluar la influencia de los diferentes modos de reacción (H_2O_2 , catalizador y luz o ultrasonidos) sobre la degradación, además de otros ensayos con concentraciones crecientes de peróxido de hidrógeno para evaluar el grado de degradación que experimentan los fármacos estudiados, según la cantidad de este agente oxidante.

En cuanto a los resultados obtenidos tras la experimentación, se observa cómo ambas técnicas de oxidación avanzada presentan una elevada eficacia para degradar los contaminantes estudiados. El sistema Sono-Fenton presenta un bajo aprovechamiento del peróxido de hidrógeno a concentraciones elevadas y una baja efectividad de degradación cuando se redujo la concentración inicial de oxidante, mientras el sistema Foto-Fenton presenta una elevada eficacia para cualquier concentración inicial de oxidante, además de un consumo mayoritario del mismo. Por este motivo, esta técnica parece ser más favorable para este tipo de ensayos.

La concentración óptima de H_2O_2 se considera que es 450 mg/L cuando se aplica Foto-Fenton y 100 mg/L cuando se aplica Sono-Fenton por ello el sistema Foto-Fenton sigue siendo el más efectivo en la degradación de los fármacos. Los resultados arrojaron una relación existente entre el efecto matriz y la degradación en sistemas Foto-Fenton, mientras que en sistemas Sono-Fenton no parece que exista un efecto matriz a considerar. Además, se ha comprobado que sistemas más sencillos de oxidación (como sonicación por ultrasonidos sin catalizador ni H_2O_2) proporcionan una degradación bastante significativa de los contaminantes tratados respecto a los sistemas Sono-Fenton, mientras que para el sistema Foto-Fenton, la eficacia de la degradación es mucho mayor si se aplica esta técnica y no sistemas más sencillos, como la aplicación exclusiva de radiación UV-visible, o combinaciones de radiación UV, catalizador o radiación UV y peróxido de hidrógeno (Manzano: 2008).

Tecnologías biológicas

Tratamientos convencionales como sistemas de lodos activados o filtros biológicos percoladores pueden rápidamente convertir diversos compuestos orgánicos en biomasa que posteriormente pueden ser separados, por medio de clarificadores. En una planta tratadora de agua residual en Suiza se encontraron compuestos como diclofenaco, naproxeno y carbamazepina, con una eficiencia de remoción de un 69, 45 y 7% respectivamente (Tixier et al., 2003).

Otra tecnología biológica es por humedales, se ha empleado la planta acuática *Typha angustifolia* para eliminar compuestos farmacéuticos: carbamazepina (de 26.7 a 28.4 %; resulta ser más recalcitrante de los fármacos), ibuprofeno (80%), naproxeno (91%), fenopreno (25%) y ciclofosfamida (82.2%), con un tiempo de residencia de 2 a 4 días; un papel importante de esta planta es la oxidación que se encuentra en la rizósfera y la aireación (Qing et al.: 2011).

Los humedales pueden promover la eliminación de los compuestos farmacéuticos a través de varios mecanismos que incluyen: la fotólisis, la absorción de las plantas, la degradación microbiana y la adsorción del suelo. Existen pocos estudios sobre la tasa de extracción/eliminación de fármacos por humedales. Esto ha generado la necesidad de investigar para documentar el grado en que diversos compuestos farmacéuticos se eliminarían en tratamiento a gran escala (White et al.: 2006).

Tecnologías avanzadas

En los últimos años se han estudiado tecnologías como la ósmosis inversa, ultrafiltración, nanofiltración y procesos de oxidación avanzada; estos sistemas son considerados como los más apropiados para remover concentraciones traza de contaminantes fármacos.

Por otro lado, se han utilizado Procesos de Oxidación Avanzados (POA) como ozono con peróxido de hidrogeno (O_3/H_2O_2) para tratar ibuprofeno y diclofenaco, donde se logró la eliminación del 90% de estos compuestos (Zwiener et al.: 2000).

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) son tecnologías que se basan en la generación *in situ* de especies transitorias altamente reactivas (H_2O_2 , $\cdot OH$, $O_2^{\cdot -}$, O_3), para la mineralización de compuestos orgánicos refractarios y eliminación de agentes patógenos (Chong et al., 2010). Los

POA han sido ampliamente estudiados, siendo la fotocatalisis heterogénea con semiconductores como el TiO_2 y la reacción de Fenton (metal de transición más peróxido de hidrógeno) las dos técnicas de mayor aplicación ambiental reportadas en las últimas dos décadas.

Usando un reactor a nivel laboratorio se evaluó la eficiencia de un tratamiento con ozono en la degradación de metabolitos nonilfenol etoxilado (NPEO) donde el ácido acético nonilfenol (NPE_1C) fue completamente mineralizado, el nonilfenol (NP) en un 80% y en un 50% el nonilfenol etoxilado lipofílico (NP_1EO) en 6 minutos de tratamiento en todos los casos (Ike et al.: 2003).

Empleando la tecnología de biorreactor de membrana (MBR) se evaluó la eliminación de varios fármacos, abarcando un amplio espectro de compuestos farmacéuticos, medicamentos psiquiátricos, antibióticos, macrólidos, antiinflamatorios, etc. La tecnología MBR combina la degradación biológica de los contaminantes con una separación física del agua tratada mediante filtración por membranas incorporada en el mismo biorreactor. Si se acopla el sistema MBR a un sistema de filtración por ósmosis inversa (RO) posterior, se consigue una filtración del efluente, más exhaustiva por el tamaño más pequeño de poro en la RO.

La combinación de tratamiento MBR y RO ha permitido eliminar más del 99% de fármacos (Liberti: 1999). Esta elevada eliminación de los contaminantes contrasta con las tecnologías de depuración convencionales utilizadas de una manera más extendida para el tratamiento de aguas residuales urbanas, como es el caso del tratamiento secundario o biológico mediante el sistema de fangos activos, en el que la eliminación de fármacos es incompleta.

El proceso sol-gel convencional basado en la formación de puentes oxo (arreglo molecular) por hidrólisis y policondensación de los precursores moleculares (normalmente silicio o alcóxidos de metales) ha tenido éxito en la preparación y la comprensión de óxido y materiales catalíticos de óxidos mixtos, una ventaja importante de este proceso de sol-gel es su versatilidad, que permite, el control de la composición, morfología, textura, y la estructura de los materiales finales, mediante el ajuste de las velocidades relativas de hidrólisis y reacciones de condensación (Debecker et al.: 2013).

Tecnologías combinadas

Se han reportado diversas investigaciones que contemplan la combinación de procesos de oxidación con procesos biológicos, resaltando su gran

potencial ante el problema del tratamiento de aguas contaminadas con PPCPs, o CE; difíciles de eliminar por procesos convencionales, estos pueden ser fisicoquímicos/biológicos y con la ventaja de reutilizar esa agua y contribuir con el cuidado medioambiental (Gogate y Pandit, 2004; Mantzavinos y Psillakis, 2004).

Para el tratamiento de penicilina se ha implementado la ozonación y perozonación ($O_3+H_2O_2$) a diferentes concentraciones, antes de someter un efluente a un tratamiento biológico de lodos activados. El resultado de dicha investigación fue la remoción de 83% de demanda química de oxígeno (DQO) no biodegradable (Arslan et al.: 2004). De igual manera se realizó un tratamiento satisfactorio de sustancias estrógenas en un proceso combinado de ozonación y reactor de lecho móvil después de haberse sometido a un tratamiento convencional de lodos activados (Gunnarsson et al.: 2009). Para el tratamiento de un común precursor farmacéutico como es el α -metilfenilglicina se ha utilizado un proceso de foto-fenton adicionado con H_2O_2 como pre-tratamiento a un reactor de biomasa inmovilizada (IBR) lográndose eliminar hasta 95% del carbono orgánico total (COT) del cual 33% corresponde al sistema de oxidación avanzada y 62% al tratamiento biológico. En este mismo sistema combinado también se estudió la remoción de ácido nalidíxico (perteneciente al grupo de los Quinolonas), lográndolo remover en sólo 190 minutos (Sirtori et al.: 2009).

Finalmente, destacan los humedales artificiales y las plantas vegetales que son la base del proceso ya que degradan, absorben y asimilan en sus tejidos los contaminantes, pero también proporcionan una extensa superficie donde se favorece el crecimiento bacteriano y se retienen los elementos sólidos en suspensión (Estrada: 2010). Una combinación de métodos de tratamiento, es recomendable, para aguas residuales con contenido de fármacos.

Costos de las diferentes tecnologías para la remoción de contaminantes fármacos

En la tabla 4 se presentan los costos para el tratamiento de aguas residuales. Es importante aclarar que los costos que se presentan, corresponden al costo de tratamiento y son promedios obtenidos de la aplicación de cada tecnología, su valor es solo una aproximación a precios actuales, ya que muchos de estos costos dependen del fabricante, la ubicación y características del agua a tratar.

Tipo de tecnología	Costos (USD/m3)	Costos (MXN/m3)	Costos promedio (USD/m3)
Tratamientos fisicoquímicos			
Ozono	0.04400	0.5663	0.04020
Peróxido	0.04500	0.5792	
Cloración	0.04120	0.5302	
Adsorción por carbón activado	0.05300	0.6821	
Luz ultravioleta/ Ozono	0.04300	0.5534	
Tratamientos biológicos			
Lodos activados o filtros biológicos	0.03700	0.4762	0.03667
Humedales	0.03200	0.4118	
Filtros biológicos	0.04100	0.5277	
Tratamientos avanzados			
Osmosis inversa	0.15000	1.93050	0.26100
Ultrafiltración	0.42000	5.40540	
Nano filtración	0.45000	5.79150	
Oxidación avanzada	0.14000	1.80180	
Biorreactor de membrana	0.14500	1.86615	
Tecnologías combinadas			
Fisicoquímica/ Biológico	0.16	2.0592	0.1600

Fuente: IPES, 2007.

Fuente: Liberti y Notarnicola, (1999)

El valor actual del dólar estadounidense con respecto al peso mexicano es de 12.932 (actualizado el 27/10/13)

Tabla 4. Costos aproximados y promedios de tratamiento de remoción de contaminantes fármacos de distintas tecnologías.

Por otra parte la Environmental Protection Agency, EPA, reportó que:

Los principales elementos que se incluyen en los costos de inversión de los humedales FS son similares a muchos de los requeridos para los sistemas de lagunas. Estos incluyen el costo del terreno, la evaluación del sitio, la limpieza del sitio, la movilización de suelos, el recubrimiento, el medio de grava, las plantas, las estructuras de entrada y descarga, las cercas, tuberías misceláneas, la ingeniería, los costos legales, las contingencias, los gastos fijos y ganancias del contratista, (EPA,2000).

Elemento de costo	Proceso humedal	Proceso convencional: reactor secuencial por tandas, SBR.	% más económico el humedal
	(valor del costo en dólares)		
Costo de inversión	\$ 6,278.05	\$ 14,857.74	58
Costo de O/M	\$ 80,712.00	\$ 1,433,983.20	77
Costo total a * VP	\$ 7,133,595.60	\$ 30,043,696.80	77
Costo por 378,500 L. de agua tratada	\$ 9.82	\$ 41.17	77

* El factor de VP (valor presente) es de 10.594 con base en un periodo de 20 años y 7 por ciento de interés (costos de junio de 1999 con un índice ENR de construcción = 6039).

** El caudal diario para 365 días por año por 20 años, dividido por 1000 galones.

Fuente: EPA 832-F-00-023

EnvironmentalProtection Agency Washington, D.C. Septiembre de 2000

Tabla 5. Comparación de costos de un humedal de flujo subsuperficial y un sistema convencional de tratamiento de agua residual

En la **figura 1** se hace referencia a los costos que se reportan para diferentes tratamientos, los cuales se han agrupado en cuatro categorías: energía, personal, reactivos-mantenimiento y residuos-varios. La media ponderada se obtuvo de 43 plantas objeto de estudio, con la finalidad de obtener un estudio de viabilidad económica en este ámbito.

Las **figuras 2, 3 y 4** fueron elaboradas a partir de los datos de la Tabla 3, considerando un promedio en cuanto a los costos según el método que se pretende realizar. La mezcla de farmacéuticos impide que una sola tecnología en el tratamiento sea suficiente para eliminar a todos

los compuestos. Las mismas figuras representan los valores en cuanto a costos para el tratamiento, haciendo comparación entre las distintas alternativas de un mismo método.

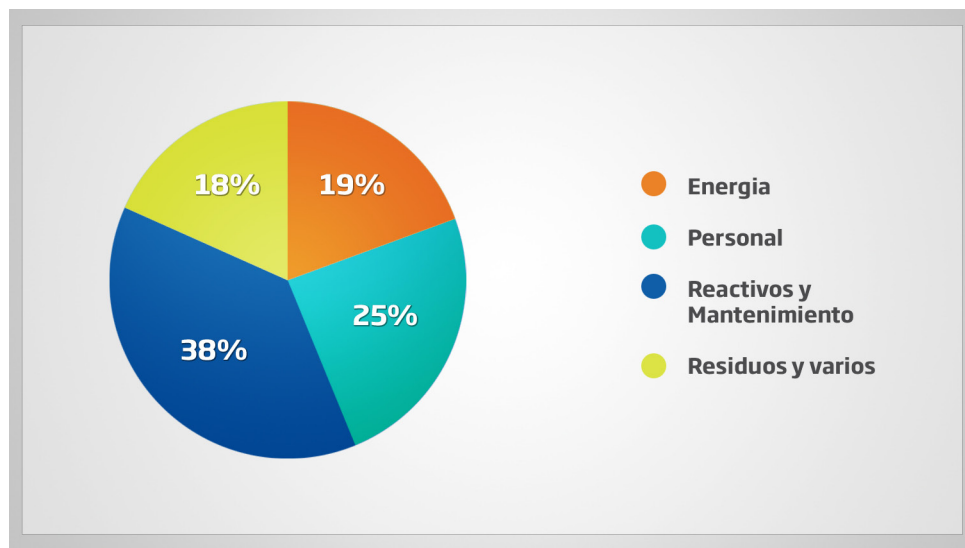


Figura 1. Costos aproximados y promedios de tratamiento de remoción de contaminantes fármacos de distintas tecnologías.

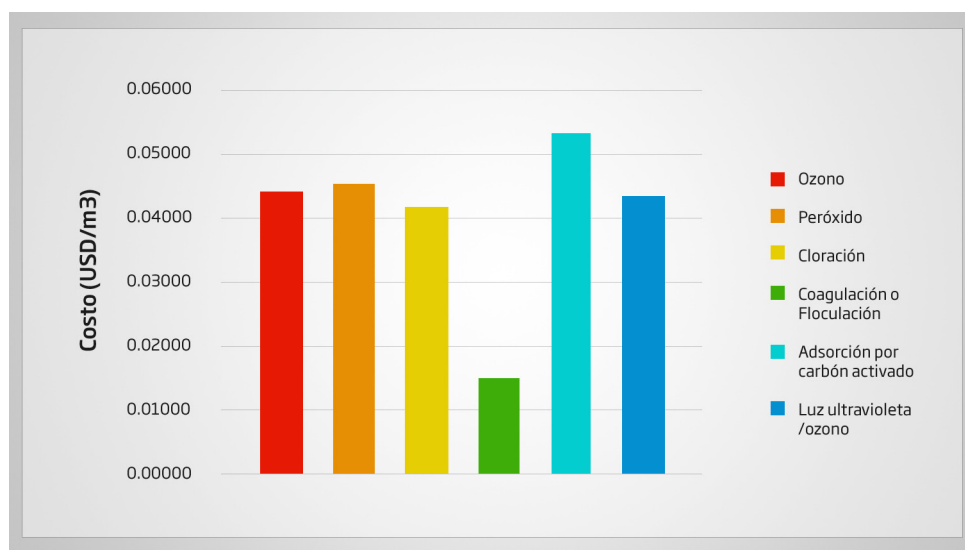


Figura 2. Comparación de costos de tratamiento de agua con tecnologías fisicoquímicas.

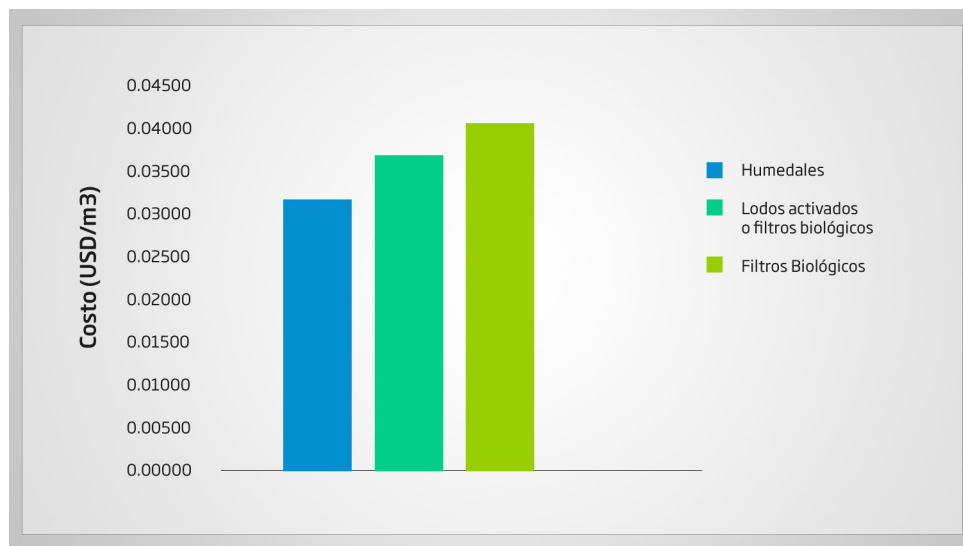


Figura 3. Comparación de costos de tratamiento de agua con tecnologías biológicas.

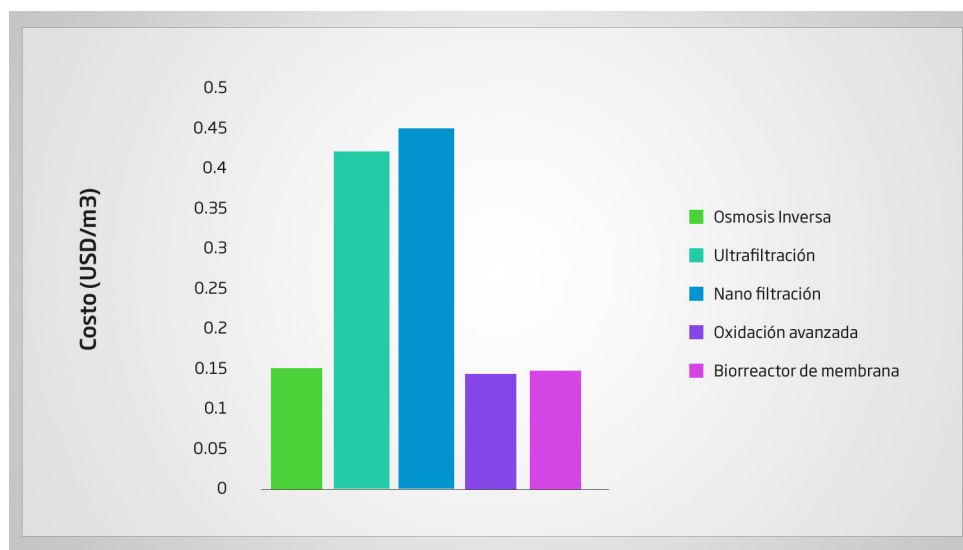


Figura 4. Comparación de costos de tratamiento de agua con tecnologías avanzadas

En la actualidad se han diversificado los contaminantes fármacos que se encuentran en las aguas residuales. Para su depuración es necesario aplicar métodos químicos, fisicoquímicos, biológicos y en la mayoría de los casos no sólo una tecnología de tratamiento sino tecnologías combinadas. Se recomienda considerar como mejor estrategia los métodos combinados "métodos naturales". En la **Figura 5** se muestra una comparación de costos de tratamiento de diferentes tecnologías.

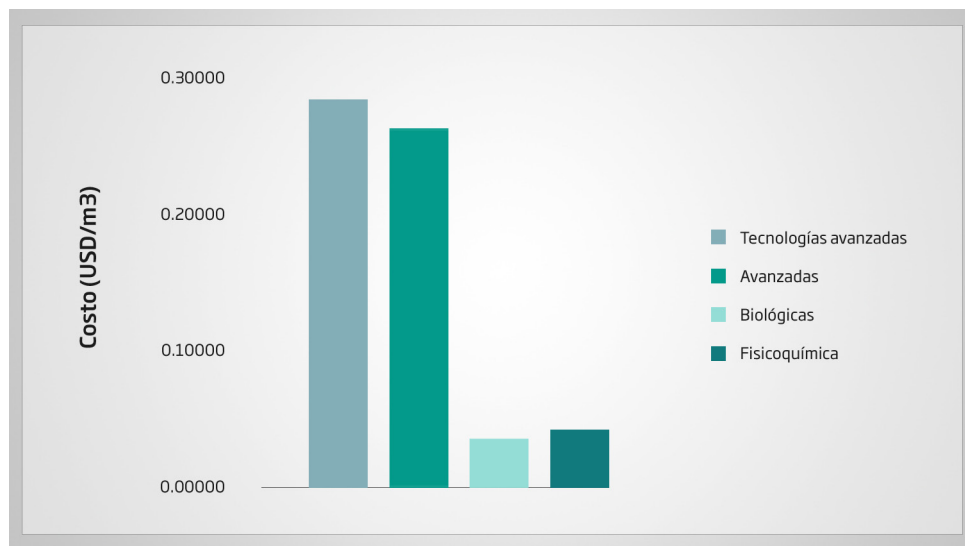


Figura 5. Comparación de costos de tratamiento en los distintos tipos de tecnologías.

En la **Tabla 6** se muestra información relacionada con los costos de inversión, operación y mantenimiento de plantas, esta información se completó con costos presupuestales de proyectos ejecutivos, por lo cual los valores reportados son aproximaciones de lo que se podría tener hoy en día. Con la información relacionada con costos de inversión para la construcción de las plantas, se realizaron varias regresiones para establecer la curva de ajuste que permite estimar la inversión en función de la capacidad de diseño de la planta de aguas residuales en donde se consideraron flujos de 600-800 l/s.

Tipo de Tecnología	Costos Aprox. (USD/m ³)	Costos Aprox. (MXN/m ³)	Costos promedio (USD/m ³)
Tratamientos fisicoquímicos			
Ozono	\$420,000.00	\$5,405,400.00	\$373,333.33
Peróxido	\$420,000.00	\$5,405,400.00	
Cloración	\$350,000.00	\$4,504,500.00	
Coagulación o floculación	\$300,000.00	\$3,861,000.00	

Adsorción por carbón activado	\$350,000.00	\$4,504,500.00	
Luz ultravioleta/ Ozono	\$400,000.00	\$5,148,000.00	
Tratamientos biológicos			
Lodos activados o filtros biológicos	\$170,000.00	\$2,187,900.00	
Humedales	\$60,000.00	\$772,200.00	\$90,000.00
Filtros biológicos	\$40,000.00	\$514,800.00	
Tratamientos avanzados			
Osmosis inversa	\$100,000.00	\$1,287,000.00	
Ultrafiltración	\$250,000.00	\$3,217,500.00	
Nano filtración	\$200,000.00	\$2,574,000.00	\$230,000.00
Oxidación avanzada	\$350,000.00	\$4,504,500.00	
Biorreactor de membrana	\$250,000.00	\$3,217,500.00	
Tratamientos combinados			
Fisicoquímica/ biológico	\$500,000.00	\$6,435,000.00	\$500,000.00

Fuente: IPES, 2008.

El valor actual del Dólar estadounidense con respecto al Peso mexicano (Actualizado el 28/10/13)

Tabla 6. Costos aproximados y promedio de inversión de distintas tecnologías para la remoción de contaminantes fármacos.

Conclusiones

Los procesos fisicoquímicos de cloración, oxidación por ozono y carbón activado granular han removido más del 90% de treinta diferentes contaminantes fármacos mientras que con tecnologías de coagulación/flotación y suavización con cal, la remoción es mucho menor.

Los Sistemas Foto-Fenton y Sono-Fenton heterogéneos, presentan una elevada eficacia para degradar los contaminantes estudiados, sin embargo el proceso Foto-Fenton es el más efectivo en la degradación de fármacos.

El medio biológico de tratamiento por humedales resultó una buena alternativa para el tratamiento de compuestos farmacéuticos como la carbamazepina, ibuprofeno, naproxeno, fenopreno y ciclofosfamida con porcentajes de remoción del 28.4, 80, 91, 25 y 82.2% respectivamente.

En cuanto a las tecnologías avanzadas el POA con ozono y peróxido de hidrógeno logró eliminar el 90% de iboprufero y diclofenaco, mientras que el POA solo con O₃ logró mineralizar el ácido acético nonilfenol, el nonilfenol en un 80% y en un 50% el nonilfenol etoxilado lipofílico, todo en 6 minutos de tratamiento.

La combinación de los tratamientos MBR y RO ha permitido eliminar hasta el 99% de amplios espectros de compuestos farmacéuticos.

El uso de tecnologías combinadas demostró tener un 83% de remoción de DQO no biodegradable para la penicilina, implementando la ozonación y perozonación, 95% de remoción del COT para tratar el α -metilfenilglicina con un sistema Foto-fenton adicionado con H₂O₂ como pretratamiento a un reactor de biomasa inmovilizada, y con este mismo proceso la remoción total de ácido nalidíxico.

Comparando los costos de un humedal de flujo subsuperficial y un sistema convencional de tratamiento de aguas residuales da como resultado el ser un 77% más económica la tecnología con humedales que el sistema convencional.

Realizando un resumen de los distintos tipos de tecnologías que se abordaron para el tratamiento de aguas residuales incluyendo fármacos, se encontró que el proceso fisicoquímico por coagulación o floculación, el tratamiento biológico con humedales y la tecnología avanzada de oxidación avanzada son los procesos más económicos. Sin embargo, se recomienda evaluar el uso de nuevas tecnologías, más eficientes y de bajo costo.

Los procesos de tratamiento combinados son los más eficientes para la remoción de contaminantes fármacos pero estos tienen un mayor costo de tratamiento.

Referencias

1. **Adams, C., Wang, Y., Loftin, K., y Meyer, M.** (2002). *Removal of antibiotics from surface and distilled water in conventional water treatment process*. Journal of Environment Engineering, 128(3), 253-260.
2. **Arslan, I., Dogruel, S., Baykal, E., y Gerone, G.** (2004). *Combined chemical and biological oxidation of penicillin formulation effluent*. Journal of Environment Manager, 73(2), 155-163.
3. **Ayala Vergara N., Fernández Villagómez Georgina.** (2010) *“Propuesta para el tratamiento de medicamentos caducos que se acumulan en casa habitación”*. Tesis de maestría. Ingeniería Ambiental, UNAM, México. 151.
4. **Chong, N., Jin, B., Chow C., y Saint, C.** (2010). Review. *Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review*. Water Research, (44), 2997-3027.
5. **Debecker, P., Hulea, V., y Mutin, H.** (2013). *Mesoporous mixed oxide catalysts via non-hydrolytic sol-gel: A review*. Applied Catalysis A: General, 451, 192-206.
6. **Estrada Gallegos I. Y.** (2010). *Monografía Sobre Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales*. Tesis de Licenciatura. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías, Escuela de Química, Pereira.
7. **EPA:** 2000. *“Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial.”* EPA 832-F-00-023 Environmental Protection Washington, D.C.
8. **Ferrari et al.,** (2003). *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 218*. Consultado Noviembre 2013. Obtenido de: http://books.google.com.mx/books?id=8eSKsyxkUYIC&pg=PA24&lpg=PA24&dq=ferrari+et+al+2003&source=bl&ots=4zLu1R6CpC&sig=Q5t2_do6hDZ7EzyYUVUjnWT_6HI&hl=es&sa=X&ei=_vfSUt_OOojlsASLi4HwCw&ved=0CHMQ6AEwCA#v=onepage&q=ferrari%20et%20al%202003&f=false
9. **Gogate, P., y Pandit, A.** (2004). *A review of imperative technologies for wastewater treatment II: hybrid methods*. Advances Environmental Reserch, 8(3-4), 553-97.

10. **Gunnarsson, L., Adolfsson, M., Björleinius, B., Rutgersson, C., Förlin, L., y Larsson, D.** (2009). *Comparison of six different sewage treatment processes - reduction of estrogenic substances and effects on gene expression in exposed male fish.* Science Total Environmental, 407(19), 5235-5242.
11. **Henríquez Villa Deyanira.** (2012). Tesis: "Presencia de contaminantes emergentes en aguas y su impacto en el ecosistema. Estudio de caso: Productos farmacéuticos en la cuenca del río Biobío, región del Biobío de Chile." Santiago de Chile.
12. **Hoeger, B., Kollner, B., Dietrich, D., y Hitzfeld, B.** (2005). *Water-borne diclofenac affects kidney and gill integrity and selected immune parameters in brown trout (Salmo trutta f. fario).* Aquatic Toxicology, 75(1), 53-64.
13. **IPES, 2007. Research Department.** Consultado Noviembre 2013. Obtenido de:
<http://www.iadb.org/res/ipes/2007/index.cfm?language=En>
<http://www.iadb.org/res/ipes/2007/?language=Spanish>
14. **IPES, 2008.** Consultado Noviembre 2013. Obtenido de: <http://ncgg.princeton.edu/IPES/program2008.php>
15. **Ike, F., Asano, M., Belkada, F., Tsunoi, S., Tanakas, M., y Fujita, M.** (2002). *Degradation of biotransformation products of nonylphenol ethoxylates by ozonation and UV/TiO₂ treatment.* Water Science and Technology, (46), 127-132.
16. **Liberti L. Notarnicola M.** (1999). *Tratamiento Avanzado y desinfección de las aguas residuales municipales reutilización en la agricultura.* Ciencias del Agua. Technol, 40,235-245.
17. **Lobo, M., Frejo, M., Díaz, J., y García, J.** (2012). *Valoración ecotoxicológica de algunos de los principales grupos terapéuticos encontrados en depósitos SIGRE de oficinas de farmacia.* Revista de Salud Ambiental, 12(2), 137-150.
18. **Mantzavinos, D., y Psillakis, E.** (2004). *Enhancement of biodegradability of industrial wastewaters by chemical oxidation pre-treatment.* Chemical Technology Biotechnology, (79), 431-454.

19. **Manzano, E.** (2008). *Eliminación de fármacos presentes en aguas residuales urbanas mediante procesos tipo fenton heterogéneos*. Consultado el 4 de Noviembre de 2013. Obtenido de <http://ciencia.urjc.es/handle/10115/5568>
20. **Meteyer, U., Rideout, A., Gilbert, M., Shivaprasad, L., y Oaks, L.** (2005). *Pathology and proposed pathophysiology of diclofenac poisoning in free-living and experimentally exposed oriental white-backed vultures (Gyps bengalensis)*. *J. Wildlife Diseases*, 41(4), 707-716.
21. **Oaks, L., y Meteyer, U.** (2012). *Nonsteroidal Anti-inflammatory Drugs in Raptors*. *Fowler's Zoo and Wild Animal Medicine*. Miller E., Fowler M. 349-355.
22. **Petrovic, M., Gonzalez, S., y Barcelo, D.** (2003). *Analysis and removal of emerging contaminants in wastewater and drinking water*. *Trends in Analytical Chemistry*, 22(10), 685-696.
23. **Qing Zhang Dong, Keat tan Soon, Gersberg Richard M., Sadreddini Sara, Zhu Junfei, Anh Tuan Nguyen** (2011). "*Removal of pharmaceutical compounds in tropical constructed wetlands.*" *Ecological Engineering* 37 (2011) 460-464.
24. **Santos Morcillo, J. L.** (2006). *Análisis y distribución de principios activos Farmacológicos en los procesos convencionales de depuración de Aguas Residuales Urbanas*. Tesis doctoral. Instituto Catalán de Investigación del Agua (ICRA), España.
25. **Sirtori, C., Zapata, A., Oller, I., Gernjak, W., Agüera, A., y Malato, S.** (2009). *Decontamination industrial pharmaceutical wastewater by combining solar photo-Fenton and biological treatment*. *Water Reserch*, (43), 661-668.
26. **Stuart M., Lapworth D., Crane E., y Hart A.** (2012). *Review of risk from potential emerging contaminants in UK groundwater*. *Science of the Total Environment*, (416), 1-21.
27. **Tixier, C., Singer, H., Ollers, S., y Muller, S.** (2003). *Occurrence and Fate of Carbamazepine, Clofbric Acid, Diclofenac, Ibuprofen, Ketoprofen, and Naproxen in Surface Waters*. *Environmental Science & Technology*, (37), 1061-1068.

28. **Vieno, N., Tuhkanen, T., y Kronberg, L.** (2006). *Removal of pharmaceuticals in drinking water treatment: effect of chemical coagulation*. *Environmental Technology*, (27), 183-192.
29. **Westerhoff, P., Yoon, Y., Snyder, S., y Wert, E.** (2005). *Fate of endocrine-disrupter, pharmaceuticals and personal care product chemicals during simulated drinking water treatment process*. *Environmental Science & Technology*, (39), 6649-6663.
30. **White, J., Belmont, M., y Metcalfe, C.** (2006). *Pharmaceutical Compounds Wastewater: Wetland Treatment as a Potencial Solution*. *The Scientific Journal*, (6), 1731-1736.
31. **Valdés Alanís Analleli.** (2009). Tesis "Evaluación de la toxicidad producida por diclofenaco sobre *Daphnia Magna*". Escuela Nacional de Ciencias Biológicas- IPN. México.
32. **Zwiener, C., y Frimmel, F.** (2000). *Oxidative treatment of pharmaceuticals in water*. *Water Research*, (34), 1881-1897.

