

# Proceso Fenton para lixiviados pretratados biológicamente

Jesús Alberto Bautista Ramírez<sup>1</sup>, Denisse Bartolo Vicente<sup>1</sup>,  
 Florencia Ramos Vaquerizo<sup>1</sup>, Rubén Fernando Gutiérrez Hernández<sup>2</sup> y Hugo Alejandro Nájera Aguilar<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Ingeniería Ambiental. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Ciudad Universitaria, Libramiento Norte Poniente S/N, col. Lajas Maciel, C.P. 29000, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México; Tel: 52 (961)1256033, correo electrónico: hnajera72@hotmail.com. | <sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Química. Instituto Tecnológico de Tapachula. Tapachula, Chiapas

## RESUMEN

Los lixiviados son líquidos altamente contaminados y difíciles de tratar. En este trabajo se presenta la aplicación del proceso Fenton para el tratamiento de lixiviados provenientes del relleno sanitario de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, los cuales fueron previamente tratados por un biorreactor semiaeróbico. Las variables ensayadas para el proceso fueron el pH (2.5, 3.5 y 4.5) y relaciones molares  $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]$  (2, 3 y 4). El mejor tratamiento para una hora de reacción fue obtenido bajo las condiciones de pH 3.5 y relación molar  $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]$  de 2, donde se alcanzaron remociones por arriba del 50% para DQO y más del 90% para color. De acuerdo al análisis estadístico (ANOVA) de los resultados, no se observaron diferencias significativas en una relación molar de 2 y pH de 4.5, siendo este último el más recomendable por requerir un menor consumo de reactivos ante un posible escalamiento.

**Palabras claves:** DQO, Fenton, lixiviados de rellenos sanitarios, procesos avanzados de oxidación.

## ABSTRACT

The landfill leachate is a liquid highly contaminated and difficult to treat. This paper present the application of Fenton process for the treatment of leachate from the landfill in Tuxtla Gutierrez, Chiapas; which they were pretreated for semi-aerobic bioreactor. The process variables were tested for pH (2.5, 3.5 and 4.5) and molar ratios  $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]$  (2, 3 and 4). The best treatment for one hour of reaction was obtained under the conditions of pH 3.5 and molar ratio  $[H_2O_2]/[Fe^{+2}]$  2, where removals were reached above 50% for COD and 90% for color. According to statistical analysis (ANOVA) of the results, no significant differences were observed in a molar ratio of 2 and pH 4.5, the latter being the most recommended by requiring lower consumption of reagents to a possible escalation.

**Keywords:** advanced oxidation processes, COD, Fenton, landfill leachate.

## INTRODUCCIÓN

La creciente generación de residuos sólidos es atribuida al crecimiento industrial y comercial acelerada por la obsolescencia de los productos y una tendencia general de la sociedad por el despilfarro, ha llevado a los municipios tener que gestionar grandes cantidades de residuos sólidos (Renou *et al.*, 2008; Ahmed y Lan, 2012).

En la mayoría de los países los rellenos sanitarios son, actualmente, la forma más común para disponer los residuos sólidos urbanos (RSU) (Xie *et al.*, 2010). Estudios comparativos sobre los diversos medios de eliminación de RSU (depósito en vertederos, incineración, compostaje, etc.) han demostrado que el más barato, en términos de costos de explotación y de capital, es el relleno sanitario (Renou *et al.*, 2008). Dentro de un relleno sanitario se

generan líquidos nocivos como resultado de la percolación del agua de lluvia a través de los residuos sólidos, extrayendo y llevando consigo varios materiales contaminantes, produciendo un agua residual muy compleja, conocida propiamente con el término *lixiviado* (Fernandes *et al.*, 2015). Varios tipos de contaminantes pueden ser encontrados en estos líquidos, tanto de naturaleza orgánica como inorgánica; algunos de ellos refractarios y tóxicos, como los metales pesados.

En general, como se muestra en la tabla 1, los lixiviados pueden ser clasificados como: jóvenes (menor a 5 años), intermedios (entre 5 y 10 años) y estabilizados o maduros (mayor a 10 años) (Foo y Hameed, 2009). Aunque el contenido orgánico declina dramáticamente con el tiempo, la mayor fracción orgánica en un lixiviado maduro se vuelve gradualmente refractaria (Deng y

Ezyske, 2011). Definitivamente la tecnología utilizada para el tratamiento dependerá de la biodegradabilidad y el volumen de los lixiviados, así, para materia orgánica que se degrade fácilmente, como ácidos grasos volátiles, podrían eliminarse de manera eficiente por los procesos de tratamiento biológico tradicionales, sin embargo, presenta algunos inconvenientes operacionales como la formación de espuma, la toxicidad de metales, la deficiencia de nutrientes y sedimentación de lodos (Oulego *et al.*, 2016), pero esto no impide que deje de ser la mejor opción de tratamiento para lixiviados jóvenes.

En lo que respecta a lixiviados maduros, los procesos fisicoquímicos son la mejor opción de tratamiento como primera etapa, o como una etapa de refinamiento para un lixiviado tratado biológicamente (Kurniawan *et al.*, 2006). Dentro de esta gama de procesos se encuentran los de oxidación avanzada, los cuales implican la generación del radical hidroxilo, uno de los radicales libres más reactivos y con alto potencial de oxidación ( $\text{HO}\cdot + \text{H}^+ + e^- \square \text{H}_2\text{O}$ ;  $E^0 = 2.33 \text{ mV}$ ) (López *et al.*, 2004), con capacidad para oxidar casi todos los contaminantes orgánicos, muchos de ellos hasta su mineralización.

Los procesos avanzados de oxidación (PAO) generalmente se aplican acompañados de otros procesos, bien sean biológicos o fisicoquímicos, dado que si se aplican como único proceso de tratamiento, podría resultar costoso en términos económicos (Morais y Zamora, 2005) y en muchos casos no cumplir con los límites máximos permisibles de contaminantes. Muchos sistemas se pueden clasificar como PAO y la mayoría de ellos utilizan una combinación de: dos oxidantes ( $\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ ); catalizador más oxidante ( $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2$ ); oxidante más irradiación ( $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{UV}$ ); oxidante más foto-catalizador ( $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{TiO}_2$  más *hv*); oxidante más ultrasonido ( $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{ultrasonido}$ ), siendo una característica común de estos sistemas la gran demanda de energía eléctrica, especialmente en dispositivos como ozonizadores, lámparas UV, ultrasonido, lo que se traduce en mayores costos de tratamiento (López *et al.*, 2004), a excepción del proceso Fenton, que no demanda energía eléctrica para su funcionamiento, más que solo la necesaria para la agitación del medio.

El proceso Fenton típico incluye cinco etapas: acidificación, oxidación, neutralización, coagulación/ floculación y separación del sobrenadante (Gogate y Pandit, 2004). Este proceso ofrece ventajas como: (I) el bajo costo y la nula toxicidad del hierro y el peróxido de hidrógeno, (II) no hay ninguna limitación de transferencia de masa debido a su naturaleza catalítica homogénea, (III) no se utiliza una fuente de energía como catalizador, (IV)

el proceso es tecnológicamente sencillo (López *et al.*, 2004). En la actualidad, la capacidad de tratamiento de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios, sin ningún tipo de tratamiento previo, por el proceso Fenton ha sido ampliamente investigado (Deng, 2007; Hermosilla *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2009; Singh y Tang, 2013; Singh *et al.*, 2013). En relación con lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la efectividad del proceso Fenton en la remoción de contaminantes orgánicos de lixiviados pretratados, provenientes de un biorreactor semiaerobico empacado con residuos sólidos de edad avanzada.

Parámetro	Joven	Intermedio	Maduro
Edad (Años)	< 5	5-10	> 10
pH	< 6.5	6.5-7.5	> 7.5
DBO/ DQO	0.5-1	0.1-0.5	< 0.1
DQO mg/ L	> 10,000	4,000-10,000	< 4,000
NH <sub>3</sub> -N mg/ L	< 400	N.A.	> 400
Metales pesados	Baja-medio	Baja	Baja
Biodegradabilidad	Alta	Media	Baja

N.A.–No aplicable

TABLA 1

Clasificación y composición típica de los lixiviados de relleno sanitario (Adaptado de Foo y Hameed, 2009)

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Caracterización del lixiviado pretratado

Las muestras de lixiviado crudo fueron recolectadas del relleno sanitario del municipio de Tuxtla Gutiérrez, ubicado en el predio San Francisco Tucutzano en las coordenadas geográficas 16°40'7.57" de latitud norte y 93°11'47.36" de longitud Oeste. El lixiviado crudo fue tratado inicialmente por un proceso biológico, cuyo efluente fue caracterizado con los parámetros y las técnicas señaladas en las normas mexicanas, mostrados en la tabla 2.

### Procedimiento experimental

Considerando lo señalado por diversos autores (López *et al.*, 2004; Deng, 2007; Méndez *et al.*, 2010; Xie *et al.*, 2010; Mohammad *et al.*, 2012) se establecieron las relaciones molares  $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{+2}]$  y los valores de pH, bajo un diseño experimental de 3<sup>2</sup> con un total de nueve tratamientos y tres repeticiones en cada uno de ellos tal y como se muestra en la tabla 3.

Durante todos los ensayos se fijó la concentración del catalizador ( $Fe^{+2}$ ) a 700 mg/L. Los reactivos utilizados en el tratamiento fueron  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  como catalizador y  $H_2O_2$  al 30% como agente oxidante. Todos los productos químicos fueron grado analítico (Reactivos J. T. Baker). Para determinar el tiempo de reacción, se realizaron dos ensayos a diferentes tiempos: 1 y 1.5 horas.

Parámetros	Normatividad aplicada
Demanda química de oxígeno (mg/L)	NMX-AA-030/2-SCFI-2011
Alcalinidad (mg $CaCO_3$ /L)	NMX-AA-036-SCFI-2001
Color (Pt/Co)	NMX-AA-017-1980
pH	NMX-AA-008-SCFI-2011
Conductividad ( $\mu S$ )	NMX-AA-093-SCFI-2000

TABLA 2 Parámetros medidos y normas aplicadas

Variables	pH		
Relación molar $[H_2O_2]/[Fe^{++}]$	2.5	3.5	4.5
2	T1	T2	T3
3	T4	T5	T6
4	T7	T8	T9

TABLA 3 Diseño experimental  $3^2$  para el proceso Fenton

**Tratamiento Fenton**

El tratamiento Fenton para el lixiviado pretratado se corrió a temperatura ambiente acorde a las siguientes etapas:

Acidificación. El lixiviado fue acidificado con  $H_2SO_4$  al 10%. (2) Oxidación. Los ensayos se realizaron en una prueba de jarras (Phipps y Bird modelo PB-700) con un volumen de 150 ml por cada repetición. Se adicionó el catalizador, seguido del agente oxidante. La etapa de oxidación se llevó a cabo a 120 rpm por 1 hora. (3) Neutralización. La neutralización de la muestra se realizó con NaOH 1.5 M. (4) Coagulación/ Floculación. Se realizó por un tiempo de 20 min a 30 rpm. (5) Sedimentación. Se dejó reposar la muestra por una hora para permitir la sedimentación de los flóculos formados y se decantó para separar el sobrenadante.

Se obtuvieron las eficiencias de remoción de color y DQO considerando la ecuación 1. La determinación de la DQO se llevó a cabo con el método de tubo sellado con espectrofotometría (HACH DR600) de acuerdo a la nor-

matividad mexicana (NMX-AA-030/2-SCFI-2011). El color fue determinado mediante el método estándar platino cobalto con un colorímetro marca HACH DR/890.

Ecuación 1

$\eta$ = Eficiencia  
 $V_0$ = Valor inicial

**Análisis estadístico**

Los resultados obtenidos en los ensayos para determinar el tiempo de reacción óptimo fueron analizados estadísticamente con apoyo del Software Rstudio versión 3.2.1 y los obtenidos con el proceso Fenton en el programa Statistica versión 7.0, en ambos se realizaron pruebas de normalidad, posterior análisis ANOVA con un valor de significancia de  $p < 0.05$  y con la prueba de Turkey para el software Statistica y la prueba Shapiro Wilk y T-student en Rstudio. De igual manera se realizaron gráficas bifactoriales en el Software Sigma Plot para evaluar la influencia de los factores de estudio sobre las variables de respuesta.

**RESULTADOS**

**Caracterización del lixiviado**

El lixiviado tratado con un reactor biológico tenía una carga orgánica cercana a los 1000 mg/L de DQO, por lo que fue necesario un tratamiento adicional antes de su descarga o reúso. La carga orgánica y la baja biodegradabilidad del líquido, justificaron la aplicación de un proceso avanzado de oxidación, en este caso, el proceso Fenton (tabla 4).

$V_f$ = Valor final

Propiedad	Valores promedio ( $\pm$ Desviación estándar)
	Lixiviado pretratado biológicamente
Demanda química de oxígeno (mg/L)	918.75 $\pm$ 20.43
Alcalinidad (mg $CaCO_3$ /L)	320.00 $\pm$ 52.92
Color (Pt/Co)	1063.33 $\pm$ 57.74
pH	8.01 $\pm$ 0.24
Conductividad ( $\mu S$ )	274.4 $\pm$ 2.16

TABLA 4 Características fisicoquímicas del lixiviado pretratado biológicamente

### Establecimiento del tiempo de reacción

El tiempo de reacción es una de las variables importantes para la optimización de la prueba Fenton; para determinar este tiempo, se trabajó con el tratamiento 1 por triplicado. La primera prueba se realizó a 1 hora de reacción y para la segunda prueba el tiempo de reacción fue a 1 hora y media. Los resultados se presentan en la tabla 5.

	Tratamiento 1 1 hora		Tratamiento 1 1:30 hora	
	[DQO] mg/L	Eficiencia de remoción	[DQO] mg/L	Eficiencia de remoción
A	412.5	55.10%	401.5625	56.29%
B	419.53125	54.34%	412.5	55.10%
C	423.4375	53.91%	420.3125	54.25%
Promedio	418.489583	54.45%	411.458333	55.22%

TABLA 5

Pruebas a diferentes tiempos de reacción

Los resultados obtenidos se analizaron estadísticamente en Rstudio y no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ambos tratamientos ( $p=0.3409$ ), por lo que el tiempo establecido para la realización de las pruebas fue de 1 hora. Desde un punto de vista económico, se ha demostrado que operar con altos tiempos de residencia no es viable (Muñoz *et al.*, 2005); de hecho, con bajos períodos de reacción se consiguen buenos niveles de degradación de contaminantes en comparación con otros procesos de oxidación química (Esplugas *et al.*, 2002; Burbano *et al.*, 2008).

### Proceso Fenton

El pH es una de las variables más significativas en el proceso Fenton. Para el caso del estudio, las mayores remociones se tuvieron a valores de pH 3.5 (figura 1), coincidiendo con el rango reportado (2.4-4) por diversos autores (Durán-Moreno *et al.*, 2011; Pignatello *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2004, Zazouli *et al.*, 2012).

La relación molar  $H_2O_2/Fe^{2+}$  depende del tipo de contaminante que se pretenda remover (Rubio-Clemente *et al.*, 2014). Para este estudio las relaciones molares de 2 y 3 presentes en los tratamiento 2, 3 y 4 presenta la mayor eficiencia de remoción de DQO (figura 3), pero entre las relaciones molares de 2 y 3 no existen diferencias estadísticamente significativas (figura 2). Es de esperar que la velocidad de degradación de las moléculas orgánicas sea mayor a medida que aumenta la concentración del oxidante y del catalizador; sin embargo, grandes cantidades

de  $H_2O_2$  y de  $Fe^{2+}$  limitan el porcentaje de degradación del contaminante, ya que se favorecen las reacciones secundarias (Rubio-Clemente *et al.*, 2014).

Respecto al tiempo de sedimentación en el proceso, este tuvo que ser modificado de 1 hora a 24 horas, debido a que los lodos obtenidos eran poco densos y por consiguiente difíciles de remover por acción de la gravedad (Méndez *et al.*, 2010).

### Remoción de color y DQO

Para el caso de agua residual como los lixiviados de rellenos sanitarios, el color es un parámetro que refleja en buena medida el grado de contaminación por compuestos de naturaleza orgánica y que generalmente se relaciona con las concentraciones de DQO encontradas. Los resultados presentados en las figuras 1 y 3, muestran una eficiencia de remoción en color entre 90-96%.

La DQO representa el grado de contaminación de nuestro influente, es un parámetro importante para determinar la cantidad de contaminación orgánica en el agua (Gibbs, 1979; Boyles, 1997; Hasan *et al.*, 2012) y de gran importancia en el proceso Fenton (Bianco *et al.*, 2011). Los resultados obtenidos indican remociones de DQO por encima del 50%, observando la mayor remoción (78.97%) bajo las condiciones de pH 3.5 y una relación molar  $[H_2O_2]/[Fe^{2+}]$  de 2 (figuras 2 y 3).

En general, las eficiencias obtenidas son altas comparándolo con lo obtenido por Wang *et al.* (2009), quienes reportan una eficiencia en el proceso Fenton del 56% de remoción de DQO con lixiviados pretratados.

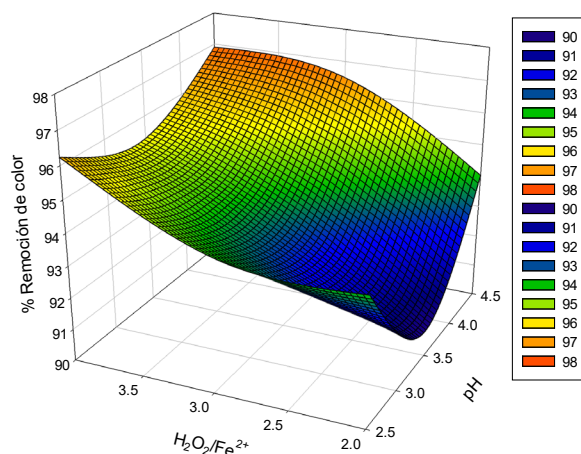


FIGURA 1

Remoción de color.

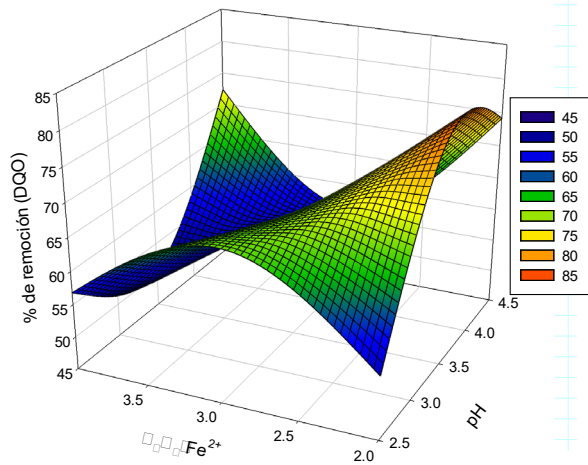


FIGURA 2 Eficiencias de remoción de DQO.

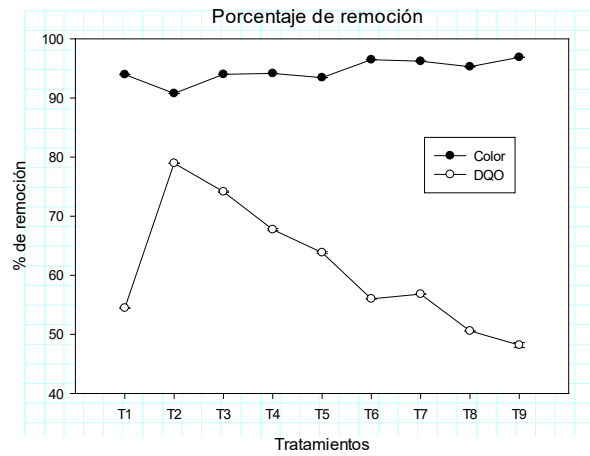


FIGURA 3 Porcentaje de remoción de DQO y color en cada tratamiento.

**Análisis estadístico**

Realizando un análisis ANOVA, se encontró que los tratamientos con mejores remociones (T2, T3 y T4) no tienen diferencias estadísticamente significativas. Por tanto, cualquiera de los tres tratamientos tiene una eficiencia aceptable en la remoción de la carga orgánica para un lixiviado con estas mismas características.

**CONCLUSIONES**

Los resultados indicaron que las mejores eficiencias de remoción en DQO (78.97%) se obtuvieron bajo las condiciones del tratamiento T2, en este caso, relación molar  $[H_2O_2]/[Fe^{2+}]$  de 2 y pH 3.5. Aunque de acuerdo a la prueba ANOVA, no hubo diferencias significativas con el T3,

pudiendo recomendarse este último por demandar menor consumo de reactivos ante un posible escalamiento. Los ensayos realizados con pruebas de color demuestran que no existen diferencias significativas en la remoción de la carga orgánica, y que las eficiencias de remoción obtenidas oscilaron entre el 90-98%. Así, los resultados prueban que el tratamiento Fenton constituye uno de los procesos oxidativos más atractivos en la eliminación de contaminantes de difícil degradación, a partir del uso de pocos reactivos, que son amigables y fáciles de manipular. Por tanto, para un problema poco atendido en el estado de Chiapas, y en general en toda la república mexicana, el proceso Fenton puede ser una alternativa viable y económica como etapa de depuración final en el tratamiento de lixiviados pretratados.

**LITERATURA CITADA**

AHMED F. & C. LAN, 2012. Treatment al landfill leachate using membrane bioreactors: A review. *Desalination* 287: 41-54.

BIANCO B, I. DE MICHELIS, & F. VEGLIÒ, 2011. Fenton treatment of complex industrial wastewater: optimization of process conditions by surface response method. *Journal of hazardous materials*, 186: 1733-1738.

BOYLES W., 1997. The Science of Chemical Oxygen Demand. *Technical Information Series, Booklet No. 9*. Pp. 24.

BURBANO A, D. DIONYSIOU, & M. SUIDAN, 2008. Effect of oxidant-to-substrate ratios on the degradation of MTBE with Fenton reagent. *Water research*, 42: 3225-3239.



- DENG, Y., 2007.** Physical and oxidative removal of organics during Fenton treatment of mature municipal landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, 146: 334-340.
- DENG Y, & C. EZYSKE, 2011.** Sulfate radical-advanced oxidation process (SR-AOP) for simultaneous removal of refractory organic contaminants and ammonia in landfill leachate. *Water Research*, 45: 6189-6194.
- DURÁN-MORENO A, S. GARCÍA-GONZÁLEZ, M. GUTIÉRREZ-LARA, F. RIGAS, & R. RAMÍREZ-ZAMORA, 2011.** Assessment of Fenton's reagent and ozonation as pre-treatments for increasing the biodegradability of aqueous diethanolamine solutions from an oil refinery gas sweetening process. *Journal of Hazardous Materials*, 186: 1652-1659.
- ESPULGAS S, J. GIMENEZ, S. CONTRERAS, E. PASCUAL, & M. RODRÍGUEZ, 2002.** Comparison of different advanced oxidation processes for phenol degradation. *Water Research*, 36: 1034-1042.
- FERNÁNDES A, M. PACHECO, L. CIRÍACO, & A. LOPEZ, 2015.** Review on the electrochemical processes for the treatment of sanitary landfill leachates: Present and future. *Applied Catalysis B: Environmental*, 176-177: 183-200.
- FOO K, & B. HAMEED, 2009.** An overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process. *Journal of Hazardous Materials*, 171: 54-60.
- GIBBS C., 1979.** The Science of Chemical Oxygen Demand. *Technical Information Series, Booklet No. 8. Pp. 17.*
- GOGATE P, & A. PANDIT., 2004.** A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions. *Advances in Environmental Research*, 8: 501-551.
- HASAN S, M. ELEKTOROWICZ, & J. OLESZKIEWICZ., 2012.** Correlations between trans-membrane pressure (TMP) and sludge properties in submerged membrane electro-bioreactor (SMEBR) and conventional membrane bioreactor (MBR). *Bioresource Technology*, 120: 199-205.
- HERMOSILLA D, M. CORTIJO, & C. HUANG., 2009.** Optimizing the treatment of landfill leachate by conventional Fenton and photo-Fenton processes. *Science of the Total Environment*, 407: 3473-3481.
- KURNIAWAN T, W. LO, & G. CHAN., 2006.** Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, B129: 80-100.
- LÓPEZ A., M. PENAGO, A. VOLPE, A. DI PINTO., 2004.** Fenton's pre-treatment of mature landfill leachate. *Chemosphere*, 54: 1005-1010.
- MÉNDEZ R., J. PIETROGIOVANNA, B. SANTOS, M. SAURI, G. GIACOMAN, & E. CASTILLO., 2010.** Determinación de la dosis optima de reactivo Fenton en un tratamiento de lixiviados por Fenton-Absorción. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 26 (3) 211-220.
- MORAIS J, & P. ZAMORA., 2006.** Use of advanced oxidation processes to improve the biodegradability of mature landfill leachates. *Journal of Hazardous Materials*, B123: 181-186.
- MUÑOZ I, J. RIERADEVALL, F. TORRADES, J. PERAL, & X. DOMÈNECH., 2005.** Environmental assessment of different solar driven advanced oxidation processes. *Solar Energy*, 79: 369-375.

- NÁJERA H., J. CASTAÑÓN, J. FIGUEROA, & M. ROJAS-VALENCIA., 2009.** Caracterización y tratamiento físicoquímico de lixiviados maduros producidos en el sitio de disposición final de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. *La Red de Ingenierías en Saneamiento Ambiental*.
- NORMA MEXICANA NMX-AA-030/2-SCFI-2011.** Análisis de Agua– Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas–Método de prueba–Parte 2–Determinación del índice de la Demanda Química de Oxígeno–Método de tubo sellado a pequeña escala. *Diario Oficial de la Federación*, 27 de junio 2013.
- OULEGO P, S. COLLADO, A. LACA, & M. DÍAZ., 2016.** Impact of leachate composition on the advanced oxidation treatment. *Water Research*, 88: 389-402.
- PIGNATELLO J, E. OLIVEROS, & A. MACKAY., 2006.** Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 36: 1-84.
- RENOU S, J. GIVAUDAN, S. POULAIN, F. DIRASSOUYAN, & P. MOULIN. 2008.** Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150: 468-493.
- RUBIO-CLEMENTE A, E. CHICA, & G. PEÑUELA., 2014.** Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. *Ingeniería y Competitividad*, 16: 211-223.
- SINGH S, & W. TANG., 2013.** Statistical analysis of optimum Fenton oxidation conditions for landfill leachate treatment. *Waste Management*, 33: 81-88.
- SINGH S, W. TANG, & G. TACHIEV., 2013.** Fenton treatment of landfill leachate under different COD loading factors. *Waste Management*, 33: 2116-2122.
- WANG X, S. CHEN, X. GU, & K. WANG., 2009.** Pilot study on the advanced treatment of landfill leachate using a combined coagulation, fenton oxidation and biological aerated filter process. *Waste Management* 29(4), 1354-1358.
- XIE B, Z. LV, B. LV, & Y. GU., 2010.** Treatment of mature land fill leachate by biofilters and fenton oxidation. *Waste Management*, 30: 2108-2112.
- XU X, Z. ZHAO, X. Li, & J. GU., 2004.** Chemical oxidative degradation of methyl tert-butyl ether in aqueous solution by Fenton's reagent. *Chemosphere*, 55: 73-79.
- ZAZOULI M, Z. YOUSEFI, A. ESLAMI, & M. ARDEBILIAN., 2012.** Municipal solid waste landfill leachate treatment by fenton, photo-fenton and fenton-like processes: Effect of some variables. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 9: 1.





A cluster of four large, bumpy, orange-red fruits hanging from a tree branch in a forest setting. The fruits are attached to a central stem and have a textured, almost bumpy surface. The background is a dense forest with green leaves and branches, creating a bokeh effect.

ANNONACEAE:  
RELEVANCIA BIOLÓGICA  
DE SUS ATRIBUTOS QUÍMICOS

