



Alternativas actuales del manejo de lixiviados

A.G. Martínez-Lopez*, W. Padrón-Hernández, O. F. Rodríguez-Bernal, O. Chiquito-Coyotl, M. A. Escarola-Rosas, J.M. Hernández-Lara, E. A. Elvira-Hernández, G. A. Méndez, J.C. Tinoco-Magaña, J. Martínez-Castillo

Universidad Veracruzana, Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología
Calzada Ruiz Cortines 455, C.P. 94294 Boca del Río, Veracruz-Llave

(*) andmartinez@uv.mx

Recibido: 01/01/2014

Revisado: 11/04/2014

Aceptado: 24/04/2014

Resumen

El crecimiento vertiginoso de la población ha provocado un aumento desmedido en la generación de desperdicios, convirtiéndose estos en un fuerte problema a nivel regional y mundial. La combinación de los residuos, genera una mezcla entre componentes orgánicos e inorgánicos, la cual se denomina *lixiviados*. Se han desarrollado diversos métodos para el manejo de los lixiviados, y en la presente contribución, se realiza una revisión de los principales métodos utilizados en el manejo de los lixiviados, indicando sus principales características, así como sus principales ventajas y desventajas.

Palabras claves: lixiviados; RSU; separación de desechos

Abstract

The rapid population growth has led to an excessive increase in waste generation, becoming in a strong problem at regional and global levels. The combination of waste creates a mixture between inorganic and organic components, which is called *lixiviates*. Several methods have been developed for managing *lixiviates*. In the present contribution, a review of the main of these methods, indicating their principal characteristics as well as their principal advantages and disadvantages is carried out.

Keywords: Lixiviates; SUW; Waste Separation

Introducción

A medida que la sociedad ha crecido en número, ha cambiado sus costumbres y se ha tornado hacia la urbanización, de tal manera que han incrementado notablemente las necesidades de consumo de la humanidad. Debido a esto ha aumentado el uso irracional de diversos materiales, los cuales se convierten a corto plazo, en desechos que en unas cuantas décadas han generado una serie de dificultades a resolver.

Desde el momento en que se acumula en casa la basura sin ser clasificada, se mezclan los diferentes residuos emanados de la misma (sobrantes de detergentes, materia orgánica en descomposición, productos de la oxidación de metales humedecidos, entre otros). Uno de los subproductos generados de dicha mezcla de basura se convierte en un fluido que se denomina: lixiviado, el cual se clasifica de acuerdo al tiempo de vida del mismo, y cuya composición es difícil de establecer como tal, pues esta dependerá de la combinación de las cantidades de uno u otro residuo contenidos en determinado lote de desechos.

Debemos resaltar, que resulta prometedor apostar en la clasificación de residuos desde el hogar, oficinas, negocios

diversos y empresas, pues de esta manera se reduciría de forma decisiva el contenido de contaminantes tóxicos en la composición de los lixiviados, pues no debemos perder de vista que en los grandes tiraderos urbanos, estos terminan filtrándose en los mantos freáticos, o bien, al evaporarse el contenido acuoso, los restos sólidos generarán polución en el aire.

Por estas razones, entre otras más, es necesario considerar el tratamiento de los lixiviados, de tal manera que se amortigüe su impacto contra el ambiente y la salud del hombre.

En la Universidad Veracruzana existen diferentes esfuerzos al respecto, y de manera reciente, un grupo de estudiantes, egresados e investigadores del Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología (MICRONA) en colaboración con la Empresa RECYCLED INNOVATION AND TECHNOLOGY S. A. de C. V. (REINTECH), ambas en el estado de Veracruz, han trabajado en un proyecto auspiciado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), el cual fue denominado como “Célula de Trabajo para el Reconocimiento y Clasificación Autónoma de Residuos Sólidos Urbanos Inorgánicos (RSU)”, la cual se

esquematiza en la figura 1. En dicho trabajo fue necesario el tener en consideración las implicaciones debidas a la presencia de estos residuos, razón por la cual en el presente trabajo, se presenta una breve reseña de la información revisada, lo que puede resultar de apoyo y referencia para todos aquellos que tienen la inquietud de iniciarse en el conocimiento de estas disciplinas.



Fig. 1: Planta de separación de residuos sólidos urbanos diseñada por MICRONA-REINTECH en Veracruz, Ver., México,

Tratamiento de lixiviados

Las alternativas de tratamiento de lixiviados se pueden clasificar de acuerdo a diferentes características como por ejemplo, de acuerdo a los niveles de tratamiento que se logren con cada una de ellas, o por el tipo de contaminación que puedan remover. Los lixiviados contienen todos los mayores grupos de contaminación conocidos como son: la contaminación por patógenos, por materia orgánica, la contaminación por nutrientes, y por sustancias tóxicas. En algunos casos la remoción de uno de los grupos de contaminación se ve impedido por la presencia del otro grupo como es el caso de la remoción de la materia orgánica y los metales pesados.

Existe una extensa literatura sobre las aplicaciones de las diferentes tecnologías para el tratamiento de lixiviados. En las secciones siguientes se hace un resumen de las principales alternativas que se tienen actualmente.

Procesos biológicos

Las alternativas mayormente utilizadas para la remoción de materia orgánica, que como en el caso de los lixiviados, es predominantemente material disuelto, son los procesos biológicos de tratamiento¹. De acuerdo a diversos estudios se ha encontrado que los procesos biológicos son efectivos para lixiviados jóvenes, que generalmente presentan altas concentraciones de ácidos grasos volátiles (AGV) y cuya relación de demanda bioquímica de Oxígeno y demanda química de Oxígeno (DBO_5/DQO) es mayor a 0,4, lo cual indica alta biodegradabilidad²⁻⁴. Dependiendo de las

características del lixiviado y de las necesidades del operador se optará por un tratamiento biológico aerobio o anaerobio.

Tratamiento aerobio: este tipo de tratamiento consiste en la depuración de los compuestos orgánicos presentes en el lixiviado por microorganismos en presencia de oxígeno y agitación, para evitar condiciones de anaerobiosis dentro de los tanques de depuración. Durante esta degradación se forman sólidos decantables que se separan con facilidad de la fracción líquida. Estos sistemas requieren de ciertas condiciones estables de funcionamiento, carga orgánica, concentración de nutrientes, de pH, etc⁴. Se puede llegar a aplicar un tratamiento aerobio mediante el uso de lagunas aireadas, sistemas de lodos activados, sistemas biológicos de discos rotatorios (biodiscos), filtros percoladores, etc. Usualmente los lixiviados tienen valores altos de DBO, por lo que aplicando este tipo de tratamiento se podrán tener porcentajes de remoción arriba del 90%. Sin embargo, la DBO remanente puede ser mayores a 1000 mg/l^{4,5}.

Tratamiento anaerobio: este tratamiento se basa en el mismo principio de depuración vía aerobia, pero esta vez es mediante una población bacteriana en condiciones de ausencia de oxígeno, lo que lo hace ser un proceso más simple que genera menor cantidad de lodos. Sin embargo, se deben tener muchas consideraciones en la operación, como por ejemplo, los altos contenidos de amoníaco y de minerales disueltos pueden generar problemas de toxicidad para los microorganismos, lo que hará necesario una remoción previa del amoníaco, o la aplicación de cargas de trabajo reducidas dado las limitaciones en la actividad microbiana por toxicidad. Otro problema que se ha detectado en la marcha es la acumulación de material inorgánico precipitado dentro de los reactores que termina por formar incrustaciones que limitan el volumen activo del reactor, limitan la actividad de los lodos y taponan los sistemas de conducción de los reactores, lo cual genera un colapso del sistema de tratamiento.

Se han reportado trabajos aplicando este tipo de tratamiento con diversos sistemas, que van desde los más sencillos como lagunas anaerobias, hasta los más sofisticados como sistemas de lecho fluidizado, filtros anaerobios y reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB)¹. Estos sistemas soportan altas velocidades de carga con tiempos de retención bajos, sobrecarga y arranques rápidos tras períodos sin operación, todo ello sin detener las operaciones depuradoras de la flora bacteriana.

Dentro de la revisión bibliográfica, se encontraron más trabajos de investigación relacionados al tratamiento biológico de lixiviado vía anaerobia que por tratamiento aerobio. Torres *et al.*⁶ encontraron que utilizando un reactor anaerobio tipo UASB a escala laboratorio (5 L) era

posible alcanzar eficiencias de remoción de DQO mayores al 90%, mediante un ajuste de pH (5,75) y la concentración de fósforo en el sustrato. Este sistema se trabajó con una mezcla de inóculos de las lagunas de almacenamiento de lixiviado y con lodo proveniente de un reactor anaerobio de tratamiento de efluentes de un rastro.

También existen investigaciones donde se realizan comparaciones entre el tratamiento de lixiviados vía aerobia, con un sistema de biodiscos y reactor de lodos activados, y vía anaerobia, utilizando reactores UASB^{2,7}, los cuales confirman que existe mejor funcionamiento con el sistema de biodiscos, ya que el sistema presenta gran estabilidad frente a variaciones en la calidad del lixiviado, ausencia de olores desagradables, además se obtienen buenas características de sedimentabilidad de los lodos generados.

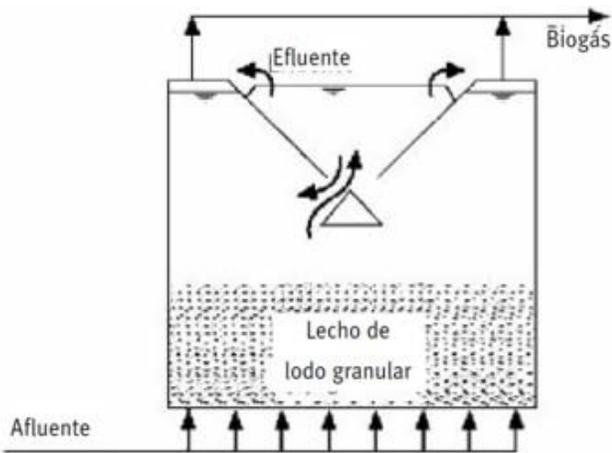


Fig. 2: Esquema básico de reactor UASB.

En el caso del tratamiento con lodos activados se presentan problemas al trabajar con altas cargas de trabajo, pues no es posible separar los sólidos del efluente debido a la mala sedimentabilidad. Por otro lado, los reactores UASB son sistemas que tienen gran sensibilidad en el momento en que se varía la calidad del lixiviado, pues con ligeros cambios de pH decae la eficiencia de remoción de DQO. También el alto contenido de N-amoniaco influye en el comportamiento del tratamiento anaerobio ya que causa la inhibición de bacterias metanogénicas.

En la Tabla 1 se muestran algunas características de los lixiviados estudiados por Borzacconi *et al.*² y Álvarez *et al.*⁷, así como la eficiencia encontrada entre los tratamientos aerobios y anaerobios.

Sistemas naturales

Los sistemas naturales, lagunas y humedales artificiales, se han propuesto como alternativas para el tratamiento de lixiviados. Tienen la ventaja de la simplicidad en su operación, y la posibilidad de lograr diferentes niveles de tratamiento, desde un pre-tratamiento, hasta un tratamiento terciario en caso de necesitarse. La combinación de las lagunas y los humedales pueden manejar adecuadamente muchos de los problemas que en otras tecnologías aparecen como son la acumulación de precipitados, la formación de espumas, la toxicidad a los microorganismos, y las variaciones en cargas hidráulicas y orgánicas. Esto se logra al tener tiempos de retención hidráulica muy altos y volúmenes de procesos igualmente grandes, que permiten acomodar variaciones en caudal, acumulaciones de precipitados, junto con una baja producción de gases y por lo tanto de espumas⁷.

Tabla 1: Resultados de los trabajos que comparan el tratamiento aerobio y anaerobio de lixiviados de vertederos de RSU.

AUTORES	Borzacconi <i>et al.</i> ²		Álvarez <i>et al.</i> ⁷		
	Aerobio	Anaerobio	Aerobio	Anaerobio	
SISTEMA PROBADO	Reactor de lodos activados	Sistema de biodiscos (4 módulos c/12 discos)	Reactor UASB	Sistema de biodiscos (48 discos)	Reactor UASB
CAPACIDAD	10 L	≈ 10 L	11,8 L	60 L	39,1 L
DQO _{influyente}	7,500-20,000 mg/L	7,500-20,000 mg/L	7,500-20,000 mg/L	7,650-28,250 mg/L	7,650-28,250 mg/L
DBO ₅ influyente	3,400-16,800 mg/L	3,400-16,800 mg/L	3,400-16,800 mg/L	5,250-20,890 mg/L	5,250-20,890 mg/L
pH _{influyente}	7,4-8,7	7,4-8,7	7,4-8,7	6,5-8,35	6,5-8,35
ALCALINIDAD TOTAL (mgCaCO ₃ /L)	4,590-14,110 mg/L	4,590-14,110 mg/L	4,590-14,110 mg/L	2,750-9,500 mg/L	2,750-9,500 mg/L
N-amoniaco	525-1,835 mg/L	525-1,835 mg/L	525-1,835 mg/L	577,5-937 mg/L	577,5-937 mg/L
CARGA ORGÁNICA ÓPTIMA APLICADA	-	18-20 gDQO/m ² *día	-	18-20 gDQO/m ² *día	-
MÁXIMO % DE REMOCIÓN DE DQO	75 % (promedio=55%)	90 % (promedio=70%)	80 % (promedio=60%)	91,91 % (promedio=75,88%)	65,45 % (promedio=30%)

Es importante mencionar que los análisis financieros deben tener en cuenta el valor presente de los costos de capital, de operación y mantenimiento de los sistemas. De otra forma se puede llegar a conclusiones erradas con respecto al costo real por volumen de lixiviado tratado en un relleno sanitario. Si bien es cierto que los costos de capital pueden llegar a ser similares en sitios donde el costo del terreno es alto, los bajos costos de operación y mantenimiento logran hacerlo rentable. En aplicaciones en donde el costo de la tierra no es muy alto, o donde las zonas de amortiguamiento del relleno sanitario se pueden usar en el proceso, la tecnología presenta costos de inversión inicial substancialmente menores en comparación con otras alternativas.

La principal desventaja que se tiene con estos sistemas es la cantidad de terreno que requiere para realizar los procesos. Sin embargo, por la naturaleza misma de los diseños de los rellenos sanitarios, en donde hay necesidad de tener áreas de amortiguamiento visual, de ruido y de olores, áreas que usualmente están localizadas en los alrededores del relleno, podrían utilizarse como parte de los sistemas naturales de tratamiento; en especial en el caso de los humedales¹. En el caso de los humedales artificiales, su aplicación al tratamiento de los lixiviados es nueva, y se han puesto en marcha en Estados Unidos y Europa principalmente.

Recirculación de los lixiviados

La recirculación de los lixiviados es una de las técnicas en el manejo de los lixiviados para rellenos sanitarios. Uno de los fines principales de esta técnica es controlar la libre dispersión de estos. Durante la recirculación de lixiviados, estos son retornados al relleno por reinfiltración dentro de los residuos dispuestos. Este método es considerado de control porque los lixiviados están continuamente fluyendo a través del relleno tratándose por medio de procesos biológicos, precipitación y adsorción. Estos procesos son benéficos para los rellenos sanitarios por el aumento del contenido de humedad, el cual incrementa la tasa de degradación biológica en los residuos, la estabilidad biológica y la tasa de recuperación del metano producido en el relleno⁸.

Entre los métodos de recirculación de lixiviados se tienen:

- ✓ Aplicación directa de los lixiviados a los residuos durante su disposición: a estos procesos se le suma en la entrada de los residuos el descargue, depósito y compactación. El problema con este método es la producción de olores, riesgo a la salud debido a la exposición, riesgo por el equipo y la maquinaria, el arrastre de los residuos por migración de los

lixiviados. Este método también requiere facilitar la acumulación de lixiviados por periodos cuando se presenten vientos fuertes, épocas de invierno y cuando la producción de lixiviados se suspenda y estos ya no puedan ser aplicados.

- ✓ Rociado por irrigación en la superficie del relleno: el lixiviado es aplicado en la superficie del relleno de igual forma como los métodos utilizados en la irrigación de agua para los cultivos. Este método resulta benéfico, ya que permite que los lixiviados puedan ser aplicados a una gran porción del relleno, pues el volumen de los lixiviados se reduce por evaporación. Desafortunadamente, esto trae como desventaja directa la contaminación de pozos utilizados como fuente de agua potable.
- ✓ Aplicación subsuperficial: se relaciona con la instalación de un pozo de recarga vertical, o bien un desagüe horizontal dentro de los residuos sólidos. Para tal efecto, se debe realizar una gran excavación y construir una obra con este método, pero el riesgo de exposición atmosférica se reduce dramáticamente.

En la tabla 2 se muestran las principales ventajas y desventajas de la recirculación del lixiviado a través del relleno sanitario.

Evaporación

En esta aplicación, el biogás emanado del relleno sanitario, se utiliza como fuente de energía para calentar el lixiviado. Este proceso consiste en evaporar el agua contenida en el lixiviado por calentamiento. Las tecnologías existentes permiten lograr el control del total de emisiones de los lixiviados producidos en un relleno sanitario, quedando un lodo que se dispone nuevamente en el relleno. La experiencia y los cálculos de producción de gas y lixiviados en los rellenos sanitarios, indican que se genera gas en exceso, el cual cumple con las necesidades energéticas de evaporación del lixiviado. Dependiendo del tipo de lixiviado, en algunos casos existe la necesidad de hacer un post-quemado de la mezcla gas-vapor de agua que sale del evaporador para lograr la destrucción de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) que se arrastran durante el proceso de evaporación, de tal manera que la cantidad requerida de biogás se aumenta con respecto a los cálculos termodinámicos normales. Sin embargo, una vez quemados los COVs las emisiones del proceso se limitan a vapor de agua y a un lodo espesado. Algunas de las tecnologías utilizan de manera directa la energía que se genera al quemar el gas, con el objetivo central de evaporar el lixiviado, lo que se denomina vaporización del gas.

Tabla 2: Principales ventajas y desventajas de la recirculación del lixiviado a través del relleno sanitario⁸.

<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
<ul style="list-style-type: none"> a) La recirculación de los lixiviados dentro del relleno sanitario experimenta una disminución en la concentración de estos. Esta reducción en la cantidad de lixiviados es necesario para el tratamiento y por eso los costos también se reducen. b) El incremento del contenido de humedad dentro de los residuos sólidos mejora las condiciones del sistema para el desarrollo en la descomposición biológica de la materia orgánica en el relleno. c) La materia orgánica en el relleno, la cual requiere tratamiento fuera de este, tiene la posibilidad de recircularse constantemente durante el tratamiento del relleno, esto reduce los costos del tratamiento. d) Reducción ambiental dentro del relleno por la remoción de inorgánicos en los lixiviados a través de la precipitación y adsorción. e) La recirculación de los lixiviados permite estabilidad biológica al sistema y esto reduce las amenazas ambientales en el relleno, y así mismo reduce la cantidad de monitoreos requeridos en la posclausura. f) Este método incrementa la tasa a la cual se descomponen los residuos y esto incrementa la tasa en la producción de metano. Esto hace que se pueda recuperar el metano más fácilmente para aprovecharlo en la generación de energía de combustión. g) La recirculación de lixiviados es un método de manejo de lixiviados que resulta ser relativamente simple y de bajo costo. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Los lixiviados producidos en un relleno sanitario son heterogéneos se deben hacer distintos canales por donde ellos deben pasar. Esto dificulta garantizar que los lixiviados reaccionen con todos los residuos y sean totalmente tratados. b) Existe el riesgo de exposición ambiental cuando los lixiviados son aplicados a la superficie del relleno. c) Hay carencia de información y educación respecto al creciente riesgo que traería consigo una mala aplicación

Otras tecnologías utilizan el calor residual que generan los motores de combustión o turbinas, los cuales funcionan con biogás para generar potencia mecánica, y que a su vez se puede usar para la generación de energía eléctrica. De esta manera, además del aprovechamiento del gas para la conversión a energía eléctrica, el biogás ha sido utilizado en el tratamiento de los lixiviados, solucionando los dos principales problemas que tienen los rellenos sanitarios: emisiones de gases y de lixiviados. Esta es tal vez la principal ventaja que se tiene con la tecnología de la evaporación y que no se logra con ninguna de las otras alternativas de una manera simultánea, como en este caso⁹.

Con la importancia mundial que están tomando el fenómeno de los gases invernadero y el cambio climático, la destrucción térmica del metano de los rellenos sanitarios se ha identificado como una de las maneras más efectivas en costos para obtener reducciones en las emisiones globales de metano.

Vale la pena mencionar que, en lo referente a la retención de las radiaciones infrarrojas causantes del fenómeno del calentamiento global, el metano es aproximadamente 15 veces más activo que el dióxido de carbono. Por esta razón y por la necesidad de controlar las emisiones de COV en los rellenos sanitarios, el quemar el metano se ha convertido en una práctica común en los países desarrollados. Una vez que se ha quemado el metano, la energía requerida para la evaporación se encuentra entonces disponible. Otras de las ventajas que con frecuencia se mencionan en favor de la tecnología de la evaporación son la simplicidad tecnológica de los equipos,

y los bajos costos que presenta en comparación con otras tecnologías similares.

Sistemas de membranas

La tecnología del tratamiento de aguas utilizando membranas es una tecnología de rápido desarrollo en la última década. Con mayor frecuencia se observan más aplicaciones de las membranas en el tratamiento de todo tipo de efluentes, incluyendo obviamente los lixiviados de rellenos sanitarios. Se encuentra en la literatura aplicaciones de la microfiltración, la ultrafiltración, la nanofiltración, la ósmosis inversa, la ósmosis directa e inclusive la pervaporación en el tratamiento de los lixiviados, bien sea de manera directa, o acoplada a otro tipo de proceso de tratamiento. Por ejemplo, se observa que tanto la microfiltración como la ultrafiltración se han acoplado a procesos biológicos de tratamiento aerobio, en reemplazo de los sedimentadores, tanto para la remoción de DBO, como para la nitrificación del amoníaco. Igualmente se encuentran reportes de la aplicación en serie de procesos de ósmosis inversa con procesos de precipitación-cristalización y nanofiltración para la remoción de sustancias precipitables de lixiviados con alto contenido de sólidos disueltos inorgánicos. De la misma manera se tienen reportes de la aplicación directa de la ósmosis inversa, y la ósmosis directa en el tratamiento de lixiviados¹⁰.

Biorreactores con membrana: los biorreactores con membrana se utilizan de la misma manera como se utilizan los sistemas biológicos de tratamiento, siendo la principal diferencia la sustitución del sedimentador como sistema de separación sólido-líquido por un sistema de micro o

ultrafiltración. Esto puede tener ventajas en términos de la disminución del volumen de tanque del reactor biológico, mas sin embargo, introduce complicaciones adicionales en la operación de los sistemas ya que los módulos de membranas son más complicados de operar y mantener que un sedimentador. Igualmente se logran aumentos significativos en la cantidad de biomasa que se tiene dentro de los reactores, pero al mismo tiempo se puede perder eficiencia en la transferencia de masa en la aireación, de tal manera que se aumentan los costos de energía por este sentido. Análisis recientes indican que, de hecho, lo que se gana en costos por la reducción del tamaño de los tanques de aireación, se pierde por el aumento en costos asociados a los equipos de aireación, al igual que el aumento de costos de operación¹⁰.

Es necesario considerar dentro de la selección de la tecnología la garantía de un suministro adecuado de reemplazo de membranas, al igual que incluir estos costos dentro de los cálculos financieros de operación y mantenimiento de este tipo de sistemas. Las eficiencias que se han reportado tanto para las aplicaciones en las cuales se utiliza el proceso biológico para la oxidación del amoníaco, como en aquellas en las cuales se busca remover la DBO, son excelentes siendo ésta su principal ventaja.

Ósmosis inversa: la osmosis inversa en una hiperfiltración, este proceso remueve partículas muy pequeñas presentes en una solución. La osmosis inversa remueve sales y otras impurezas como color y propiedades de los fluidos. Se utiliza también para purificar fluidos con contenido de etanol y glicol, los cuales pasan a través de la membrana de osmosis inversa reteniendo los iones y otros contaminantes que pueden pasar. El uso más común es la purificación del agua que implica una mayor demanda de remoción en sus especificaciones.

La membrana utilizada en la osmosis inversa es semi-permeable, permitiendo que los fluidos que pasan a través de ella sean purificados, de tal manera que, se retengan los contaminantes. La tecnología más utilizada por la osmosis inversa es el proceso conocido como “flujo transversal” permitiendo que la membrana continuamente se auto-limpie. Algunos fluidos pasan a través de la membrana por medio de una bomba a presión. La osmosis inversa es capaz de retener bacterias, sales, azúcares, proteínas, partículas, tinturas y otros constituyentes.

La utilización de la osmosis inversa para el tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios ha tenido una gran aceptación a nivel comercial. Las investigaciones realizadas han demostrado la influencia de la capacidad de la membrana utilizada en diferentes tipos de nuevos lixiviados en los rellenos. Existen diferentes tipos de lixiviados en los rellenos; lixiviados en rellenos convencionales y lixiviados

en rellenos nuevos. En un relleno nuevo, los residuos están divididos en diferentes categorías y depositados en diferentes celdas con sistemas de colectores separados para lixiviados, una celda de residuos biodegradables y otra con residuos especiales. Se encontró una relación lineal entre el flujo y la conductividad para ambos lixiviados, tanto para celdas con residuos convencionales como para residuos biodegradables. La reducción de los contaminantes es alta. La reducción de DQO y el $\text{NH}_4\text{-H}$ fue mayor al 98% para los lixiviados provenientes de las celdas anteriormente mencionadas¹¹.

Procesos de oxidación avanzada (POA)

Las tecnologías o procesos de oxidación avanzada han tenido gran relevancia en el tratamiento de un centenar de contaminantes presentes en el agua, ya que poseen cierta peculiaridad en la forma en que ocurre la remoción de contaminantes.

Los POA son procesos fisicoquímicos que involucran la generación y uso de especies transitorias altamente reactivas, principalmente el radical hidroxilo (HO^\bullet) que posee alta efectividad para la oxidación de la materia orgánica. Este radical puede ser generado por medios fotoquímicos (incluida la luz solar) o por otras formas de energía, suministrando un incremento en la velocidad de reacción en el tratamiento de agua contaminada¹².

Clasificación de los POA

En función de la forma de generación de las especies oxidantes, los POA se pueden dividir en procesos no fotoquímicos y fotoquímicos (*ver* Tabla 3), diferenciándose entre ellos en que los primeros originan las especies reactivas mediante la transformación de especies químicas o utilizando diversas formas de energía, con excepción de la irradiación luminosa; mientras que los procesos fotoquímicos generan las especies en cuestión mediante luz natural o artificial¹².

Tabla 3: Clasificación de los POA.

Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
✓ Ozonización en medio alcalino	✓ UV/periodato
✓ Ozonización con peróxido de hidrógeno ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$)	✓ Ferrioxalato y otros complejos de Fe (III)
✓ Procesos Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) y relacionados	✓ Fotólisis del agua en el ultravioleta al vacío (UVV)
✓ Oxidación electroquímica	✓ UV/Peróxido de hidrógeno
✓ Radiólisis γ y tratamiento con haces de electrones	✓ UV/ O_3
✓ Plasma no térmico	✓ Foto-Fenton y relacionadas
✓ Descarga electrohidráulica-Ultrasonido	✓ Fotocatálisis heterogénea

El radical HO[•] reacciona de 106 a 1012 veces más rápido que oxidantes alternativos como el O₃. De acuerdo a los potenciales de oxidación reportados para distintas especies, que se muestran en la tabla 4, se verifica que es el segundo oxidante más energético, tan sólo después del flúor.

Tabla 4: Potenciales redox de distintos agentes oxidantes.

Especie	E° (V, 25 °C)
Flúor	3,03
Radical hidroxilo	2,80
Oxígeno atómico	2,42
Ozono	2,07
Peróxido de hidrógeno	1,78
Radical perhidroxilo	1,70
Permanganato	1,68
Dióxido de cloro	1,57
Ácido hipocloroso	1,49
Cloro	1,36
Bromo	1,09
Yodo	0,54

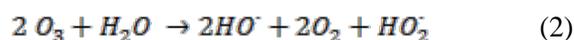
Son muchas las ventajas que presentan los POA sobre los métodos de tratamiento convencionales utilizados, las cuales se citan en la Tabla 5. También se incluyen algunas desventajas de estos procesos.

Ozonación

El ozono (O₃) y el oxígeno son oxidantes muy poderosos, los cuales pueden oxidar muchos contaminantes presentes en corrientes de agua residuales y biosólidos. El O₃ es más activo que el oxígeno, pero debe ser generado en el momento de utilizarse ya que es un material inestable. Desde 1980, el O₃ ha sido usado para el tratamiento de agua residual urbana, industrial y para tratar lodos de proceso a gran escala. También se ha aplicado en la desinfección de

agua para beber, generalmente para remover cianuros y fenoles, aunque también ha permitido un notable mejoramiento del gusto, color, características de filtración y biodegradabilidad de la misma. La purificación y desinfección oxidativa con ozono como tratamiento terciario de agua residual le confieren muchas ventajas tales como la reducción de DBO y DQO, disminución de olor, color y turbiedad, destrucción de organismos patógenos, el efluente presenta alta concentración de oxígeno disuelto, entre otras. Algunas desventajas que presenta esta tecnología es que los costos de generación de O₃ son relativamente altos, por lo que requieren de altas eficiencias de utilización de la molécula; además de que existen problemas de transferencia de masa asociados a gases, al no poseer solubilidad infinita en agua de la molécula de O₃^{11,12}.

El ozono puede reaccionar en forma directa con un sustrato orgánico a través de una reacción lenta y selectiva, o en forma indirecta con las especies formadas cuando el ozono es descompuesto en agua, por lo que se suscitan reacciones radicalarias favorecidas en medio alcalino¹⁴.



La primera reacción es de importancia en medios ácidos y para solutos que reaccionan muy rápido con el O₃, tal como los compuestos orgánicos no saturados, con grupos cromofóricos o grupos aminos. La segunda reacción puede iniciarse de distintos modos, con especies tales como HO[•], HO₂[•], HCOO[•], Fe²⁺ o sustancias húmicas. Por tanto, la ozonización es sensiblemente más eficiente en medios alcalinos^{12,15}.

La ozonación también se ha aplicado en la decoloración de caolín y pulpa de celulosa, en el tratamiento de efluentes acuosos extremadamente contaminados¹².

Tabla 5: Ventajas y desventajas de los POA sobre los métodos de tratamiento convencionales^{12,13}.

Ventajas	Desventajas
a) No sólo cambian de fase al contaminante sino que lo transforma químicamente.	a) Algunos POA, como los fotoquímicos, involucran costos adicionales por consumo de energía eléctrica.
b) Se puede conseguir la mineralización completa en la mayoría de los compuestos estudiados.	b) En procesos que involucran luz, la eficiencia en la destrucción de contaminantes puede alertarse en función del diseño reactor (tipo de lámparas, geometría, hidrodinámica, etc.).
c) Casi no se generan sustratos que se tengan que tratar posteriormente.	c) Los POA mediadas por luz no son adecuadas para procesar mezclas de sustancias de elevada absortividad, ya que la eficiencia cuántica disminuye por pérdida de luz, por dispersión y/o absorción competitiva.
d) Son efectivos para tratar contaminantes refractarios y para tratamientos a bajas concentraciones (ppb).	
e) Se consume menos energía que con otros métodos como la incineración.	
f) Eliminan efectos sobre la salud como el uso de desinfectantes y oxidantes residuales como el cloro.	
g) Se pueden transformar los contaminantes refractarios en productos más simples, tratables luego por métodos económicos.	

O_3/H_2O_2

Se logra una mejora del proceso de ozonización agregando peróxido de hidrógeno (H_2O_2), que es un ácido débil, un poderoso oxidante y un compuesto inestable. El uso de dos o más oxidantes combinados permite aprovechar los posibles efectos sinérgicos entre ellos, lo que produce una destrucción adicional de la carga orgánica. Entre las posibles mezclas de agentes oxidantes, la de O_3/H_2O_2 es una de las más usadas. El H_2O_2 puede iniciar la descomposición de O_3 por transferencia de electrones. La reacción genera HO^\bullet consumiendo H_2O_2 y O_3 , a través de un mecanismo en cadena¹².

Se sabe que este proceso combinado es caro pero rápido, además se pueden tratar contaminantes organoclorados, como tricloroetileno, tetracloroetileno, plaguicidas, etc. Se ha aplicado en la decoloración de compuestos de agua residual de la industria papelerera, así como en el tratamiento de lixiviados de vertederos de RSU. Tal es el caso del trabajo de Cortez *et al.*¹⁵, que pusieron en marcha un sistema de tratamiento de lixiviado a escala laboratorio, vía la ozonación con H_2O_2 y con ajuste de pH, utilizando un reactor de tipo semi-batch de 3.5 L aproximadamente. Ellos encontraron que combinando O_3/H_2O_2 y manteniendo un pH de 7 se obtienen mejores resultados de remoción de DQO y COT. La dosis óptima de H_2O_2 usando este proceso combinado fue de 600 mg/L, que condujo la remoción del 63% de DQO y 53% de COT, además contribuyó a la remoción de materia orgánica recalcitrante. Sin embargo, se presentó un incremento en la DBO incluso por arriba del 150% al final del tratamiento, lo cual se asocia con la transformación de grandes compuestos refractarios a productos más pequeños y biodegradables. Esto último permitirá aplicar la sinergia O_3/H_2O_2 como pre-tratamiento biológico a este tipo de matriz contaminante.

 UV/H_2O_2

La irradiación de la molécula de H_2O_2 por fotones de energía superior a la de la unión O-O¹ tiene un rendimiento cuántico de 0,98 (a 254 nm), que conduce a la producción de dos radicales HO^\bullet por cada molécula de H_2O_2 :



La fotólisis del H_2O_2 se realiza casi siempre utilizando lámparas de vapor de mercurio de baja o media presión de 254 nm, pero como la absorción del H_2O_2 es máxima a 220 nm, sería más conveniente el uso de lámparas de Xe/Hg que emiten en el rango de 210-240 nm, aunque éstas suelen ser más costosas. El proceso fotoquímico es más eficiente en medio alcalino, ya que la base conjugada del peróxido (HO_2^-) tiene una absorptividad mayor ($\epsilon_{254} = 240 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$). La combinación de UV/H_2O_2 presenta ventajas y desventajas, las cuales se enlistan en la tabla 6.

Tabla 6: Ventajas y desventajas del proceso UV/H_2O_2 ¹².

Ventajas	Desventajas
a) El oxidante es accesible comercialmente.	a) Se necesitan altas concentraciones del oxidante, dada la baja sección eficaz de absorción de H_2O_2 a 254 nm.
b) Es térmicamente estable.	b) El método no es efectivo para degradar alcanos fluorados o clorados, que no son atacados por HO^\bullet .
c) Puede almacenarse en el lugar donde se utilizará.	c) Tiene baja eficiencia para tratar agua contaminada de alta absorbancia a $\lambda < 300 \text{ nm}$.
	d) Un exceso de H_2O_2 en presencia de altas concentraciones de HO^\bullet pueden desencadenar reacciones competitivas que producen un efecto inhibitorio para la degradación.

Este POA se ha aplicado al tratamiento de contaminantes presentes en efluentes industriales y municipales, tales como organoclorados, alifáticos, aromáticos, fenoles, plaguicidas, colorantes, etc.¹².

Procesos Fenton y Foto-Fenton

Dos de los POA cuya aplicación se ha extendido en los últimos años para el tratamiento de una gran variedad de efluentes contaminados, son los procesos Fenton y foto-Fenton. El primero en ausencia de luz y el segundo se lleva a cabo en presencia de iluminación natural o artificial.

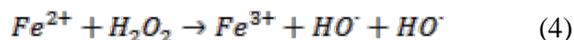
Principio del proceso Fenton: el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) es un reactivo químico seguro, abundante y de sencillo manejo, ampliamente usado para la prevención de la contaminación. Sin embargo, por sí mismo no posee significativas propiedades oxidantes, por lo que hace necesaria su combinación con otras sustancias o catalizadores para incrementar su eficiencia¹³.

El proceso Fenton es la tecnología que se desarrolla a partir del empleo de H_2O_2 en combinación con una sal de hierro (II). En 1881, Henry J. H. Fenton publicó una breve descripción de las fuertes propiedades de oxidación de una mezcla de H_2O_2 y sales de hierro. Esta mezcla llegó a ser conocida como *reactivo Fenton*, en honor a su descubridor¹⁶. En los siguientes años (1894), se conoció que inicialmente el científico aplicó esta reacción para la oxidación de ácidos orgánicos como el fórmico, glicólico, láctico, tartárico, málico, benzoico, entre otros compuestos. Lo que encontró fue que, en ausencia de sales de hierro, la degradación con H_2O_2 se daba a muy bajas velocidades, incluso a veces, no se llevaba a cabo ninguna oxidación de los ácidos orgánicos^{12,13,16}.

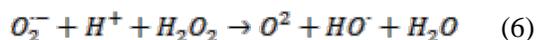
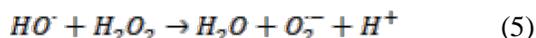
En 1900, Cross y sus colaboradores, confirmaron que las sales de hierro mejoraban significativamente las cinéticas de descomposición con H_2O_2 ; más tarde, Goldhammer investigó el efecto del reactivo Fenton sobre fenoles y encontró que para cada equivalente de Fe^{2+} se

descomponían tres equivalentes de H_2O_2 , mientras que para soluciones concentradas de H_2O_2 por cada mol de Fe^{2+} se descomponían 24 equivalentes de H_2O_2 ¹⁶.

No fue sino hasta 1934, cuando Haber y Weiss propusieron por primera vez que existían radicales libres (HO^\bullet) debido a la reacción:



Además, éstos investigadores describieron que el HO^\bullet en presencia de H_2O_2 forma el anión superóxido $O_2^{\bullet-}$ y que este último ante un exceso de H_2O_2 , da lugar a la generación de una cantidad adicional de radical hidroxilo, según las siguientes reacciones:



El proceso Fenton ha resultado efectivo para degradar compuestos alifáticos y aromáticos clorados, PCBs, nitroaromáticos, colorantes azo, clorobenceno, PCP, fenoles, fenoles clorados, etc.

Son muy pocos los compuestos que no pueden ser atacados por este reactivo, entre ellos la acetona, el ácido acético, el ácido oxálico, las parafinas y los compuestos organoclorados.

Es un buen oxidante de herbicidas y otros contaminantes de suelos, tales como hexadecano o Dieldrin. Puede decolorar agua residual con distintos tipos de colorantes y otros residuos industriales, reduciendo su DQO.

También se ha aplicado exitosamente el reactivo de Fenton en la reducción de DQO de agua residual municipal y subterránea, y en el tratamiento de lixiviados, además es útil como pre-tratamiento de compuestos no biodegradables¹². Algunas de las ventajas y desventajas que se presentan al usar esta tecnología se mencionan en la tabla 7.

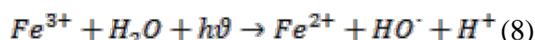
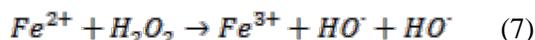
Tabla 7: Ventajas y desventajas del proceso Fenton¹².

Ventajas	Desventajas
a) El Fe (II) es abundante y no tóxico.	a) Un exceso de Fe (II) puede causar condiciones para el atrapamiento de HO^\bullet .
b) El peróxido de hidrógeno es fácil de manejar y ambientalmente benigno.	b) Si no se controla adecuadamente el pH y se trabaja a valores >5 se genera Fe (III) particulado, por ende, se forma lodo residual que debe ser gestionado.
c) No se forman compuestos clorados como en otras técnicas oxidantes	c) En el laboratorio, el agregado del metal se realiza en forma de sales ferrosas, pero en escalas mayores el uso de éstas se vuelve costosa.
d) No existen limitaciones de transferencia de masa por tratarse de un sistema homogéneo.	

Principio del proceso foto-Fenton

El proceso foto-Fenton tiene lugar en presencia de luz ultravioleta ($UV/H_2O_2/Fe^{2+}$), la cual es la principal diferencia que se tiene con el proceso Fenton (H_2O_2/Fe^{2+}). En presencia de radiación ultravioleta, se observa un aumento de la velocidad de oxidación de compuestos orgánicos mediante el proceso Fenton. Bajo estas condiciones, la fotólisis de los complejos Fe^{3+} permite una mayor regeneración del Fe^{2+} . Además se genera otra vía para la generación del radical HO^\bullet , a partir de la fotólisis del H_2O_2 ¹³.

De manera general, en este proceso se llevan a cabo las siguientes reacciones¹⁷:



La ruta de reacción propuesta por¹⁸, el proceso Foto-Fenton, comienza con la fotoreducción primaria de complejos de Fe^{3+} disueltos a iones Fe^{2+} , seguida de la reacción Fenton y la oxidación de compuestos orgánicos. La fotólisis de complejos de Fe^{3+} toma lugar bajo irradiación con luz UV cercano, incluso con luz visible. Los iones de Fe^{2+} formados por la fotoreducción de complejos de Fe^{3+} proveen en presencia de H_2O_2 de radicales hidroxilos en el paso secundario.

Los radicales HO^\bullet formados en el proceso Foto-Fenton, son altamente reactivos e inician la destrucción oxidativa de sustancias orgánicas en agua, los cuales puede conducir incluso a la mineralización total de contaminantes orgánicos.

Como ya se mencionó, estas reacciones tienen lugar desde longitudes de onda que van de los 300 nm hasta la región visible. Por lo tanto, este proceso podría ser llevado a cabo bajo radiación solar permitiendo una reducción del costo de operación. En este contexto, se han llevado a cabo tratamientos vía foto-Fenton utilizando como fuente de radiación la luz solar, como lo han reportado¹⁹, quienes trataron una muestra residual de formaldehído proveniente de un laboratorio biológico. Ellos encontraron que la remoción del analito con Foto-Fenton/luz solar fue de hasta 89%, en comparación con 88% de remoción usando luz artificial. Para esta prueba hallaron como dosis óptima de ferroxalato de potasio (fuente de Fe^{2+}) 0,5 mmol/L y de H_2O_2 1 mol/L.

Otra ventaja de esta tecnología es que la concentración del hierro (II) puede ser menor que la empleada en el proceso Fenton, reduciendo de esta manera, el costo asociado al tratamiento¹³.

Esta tecnología fotoquímica ha sido utilizada en el tratamiento de agua residual municipal, efluentes de la industria papelera, de la industria farmacéutica, en la degradación de herbicidas en medio acuoso, insecticidas, colorantes, compuestos fenólicos, lixiviados de vertederos de RSU, etc.^{13,20-25}.

Conclusiones

El tratamiento de los lixiviados es un problema que requiere de pronta solución, y en este artículo de revisión se busca presentar algunas investigaciones realizadas y en proceso alrededor del tema.

Hipotéticamente, podríamos considerar como una solución final y racional el no producir los lixiviados, o al menos reducir los contaminantes contenidos en los mismos. Sin embargo, esta solución se podrá dar cuando se mire de una manera global el flujo de materiales en la sociedad, y se asuman los costos ambientales en todo el ciclo de los mismos, desde su producción, transformación, distribución, uso y descarte.

Realizando una comparación de las tecnologías revisadas, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

Las características de los rellenos sanitarios varían de acuerdo a las condiciones geográficas, climáticas y la economía de la región por lo que se debe elegir la tecnología adecuada para contar con un proceso óptimo.

En cuanto a la aplicación de tratamientos biológicos, la viabilidad de los mismos está condicionada por una serie de elementos y compuestos tóxicos para los microorganismos y que puedan inhibir las reacciones, por lo que se hace necesario un estudio detallado de la composición de los lixiviados.

Las ventajas que presenta un sistema anaerobio son: que no requiere de un aporte de oxígeno, minimización de la producción de lodos, mayor resistencia a la concentración de elementos tóxicos, reducción de los malos olores, y el hecho de que se puedan tratar directamente aguas de elevada carga contaminante. Adicionalmente, el sistema anaerobio completa el proceso de degradación anaerobia iniciado en el relleno sanitario, ya que este se comporta como un gran filtro anaerobio.

Al hacer uso de un sistema aerobio se obtienen buenos resultados en la eliminación de DQO, sin embargo este sistema está limitado por varios motivos: los problemas de toxicidad, el enorme espacio que ocupan, sensibilidad a los cambios de temperatura, necesidad de adición de nutrientes en el caso de lixiviados la adición de fosfatos, enorme gasto energético que conlleva la aireación y por último la gran producción de lodos.

Por su parte, los sistemas naturales son tecnologías de bajo costo, sin embargo necesitan de una gran extensión de terreno, por lo que no se considera viable su aplicación en zonas donde los terrenos son muy costosos y, adicionalmente, requieren de mayor tiempo de tratamiento.

El tratamiento por recirculación no es un tratamiento aconsejable cuando la pluviometría de la zona es muy elevada. Existen serios cuestionamientos en sus efectos sobre la estabilidad geotécnica del relleno, lo que limita su aplicación a situaciones donde se pueda comprobar la estabilidad, y adicionalmente sobre la necesidad posterior de pulir finalmente el lixiviado recirculado y pretratado.

Los tratamientos físico-químicos son poco eficaces en la eliminación de DQO, además de presentar el problema de los altos costos debido a la utilización de reactivos químicos.

En el caso del tratamiento por evaporación, se cuenta con una tecnología viable, ya que es autosuficiente y no necesita de suministro de energía, de equipos mecánicos, aunque presenta como una desventaja la ubicación del relleno, ya que produce cierto grado de contaminación y malos olores.

Es necesario mencionar que no se puede hablar de una tecnología óptima para el manejo de lixiviados, ya que la selección dependerá de las características antes mencionadas. Asimismo, el conocimiento del manejo de los mismos podría llegar a lograr su aprovechamiento como un medio de generación de energía, lo cual resulta ser un mejor panorama que permitir su conversión tan solo en contaminantes del suelo y/o el agua.

Referencias

1. E Giraldo. Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: Avances recientes. **Revista de Ingeniería Universidad de los Andes**, **14**, 44-55 (2001).
2. L Borzacconi, I López, E Arcia, L Cardelino, A Castagna, M Viñas. Comparación de tratamientos aerobios y anaerobios aplicados a lixiviado de relleno sanitario. XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, México. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS). Pp. 1-8 (1996).
3. S Mohajeri, M Isa, H Aziz. Investigation of landfill leachate treatment by Advanced Oxidation Processes. 1st Civil Engineering Colloquium (CEC' 06), Association of Civil Engineering Post Graduates & Research Officers (ACEPRO), School of Civil Engineering, Universiti Sains, Malasia.(2006)
4. J Colomer, A Gallardo. Tratamiento y Gestión de Residuos Sólidos. 1ra edición, Limusa, Universidad Politécnica de Valencia, 9-24 (2007).

5. S Sumanaweera. Advanced oxidation combined with a membrane bio-reactor for landfill leachate treatment. Tesis de maestría. Asian Institute of Technology, Tailandia (2004).
6. P Torres, J Rodríguez, L Barba, A Morán, J Narváez. Tratamiento anaerobio de lixiviados en reactores UASB. **Ingeniería y Desarrollo**, **18**, 50-60 (2005).
7. A Álvarez, GJ Suárez. Tratamiento biológico del lixiviado generado en el relleno sanitario "El Guayabal" de la ciudad San José de Cúcuta. **Ingeniería y Desarrollo**, **20**, 95-105 (2006).
8. L Salazar, I Saavedra. Tratamiento de lixiviados, casos prácticos en diferentes temperaturas. II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Universidad del Norte, Colombia. 1-15 (2009).
9. S Renou, J Givaudan, S Poulain, F Dirassouyan, P Moulin. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. **Journal of Hazardous Materials**, **150**, 468-493 (2008).
10. A Robinson. Landfill Leachate Treatment. Paper prepared for "MBR 5 – The 5th International Conference on Membrane Bioreactors", 1-14 (2005).
11. L Wang, Y Hung. Handbook of environmental engineering: Advanced physicochemical treatment. Vol. 5, Humana Press, Estados Unidos, Pp., 1-50 (2007).
12. X Domènech, W Jardim, M Litter. Procesos Avanzados de Oxidación para la eliminación de contaminantes. En: Eliminación de contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea, (M. Blesa, Ed.). Pp. 3-25. Red CYTED VIII-G, Buenos Aires, Argentina (2001).
13. O Primo. Mejoras en el tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU mediante procesos de oxidación avanzada. Tesis de doctorado. Universidad de Cantabria, España (2008).
14. F Wang, D Smith, M Gamal. Application of advanced oxidation methods for landfill leachate treatment - A review. **J. Environ. Eng. Sci.**, **2**, 413-427 (2003).
15. S Cortez, P Teixeira, R Oliveira, M Mota. Ozonation as polishing treatment of mature landfill leachate. **Journal of Hazardous Materials**, **182**, 730-734 (2010).
16. W Tang W. Physicochemical treatment of hazardous wastes. Lewis Publishers, Estados Unidos, 321-377 (2004).
17. J Bacardit, J Malfeito, M Micó, C Sans. Procesos de Oxidación Avanzada para el tratamiento integrado de fitosanitarios. Universitat de Barcelona, España. 1-22 (2009).
18. SM Kim, A Vogelpohl. Degradation of Organic Pollutants by the Photo-Fenton-Process. **Chem. Eng. Technol.**, **21**, 187-191 (1998).
19. J Conrado, T Pupo, M Rodrigues. Photo-Fenton process for treating biological laboratory wastewater containing formaldehyde. **Eclética Química, São Paulo**, **35(1)**, 25-33 (2010).
20. J Chacón, T Leal, M Sánchez, E Bandala. Solar photocatalytic degradation of azo-dyes by photo-Fenton process. **Dyes and Pigments**, **69(3)**, 144-150 (2006).
21. H Feng, L Le-cheng. Degradation kinetics and mechanisms of phenol in photo-Fenton process. **J Zhejiang Univ. SCI**, **5(2)**, 198-205 (2004).
22. A Silva, L Mendes, G Stollar, R Guardani, C Oller. Photo-Fenton remediation of wastewaters containing agrochemicals. **Brazilian Archives Biology and Technology**, **48**, 207-218 (2005).
23. M Hincapié, G Peñuela, I Oller, I Maldonado, S Malato. Degradación de atrazina en agua por fotocatalisis y fotofenton en una planta piloto solar. Universidad de Medellín, Colombia. 1-8 (2006).
24. M Azam, A Kumar, M Paliwal, R Ameta, R Khandelwal. Degradation of organic effluents containing wastewater by photo-Fenton oxidation process. **Indian journal of chemistry**, **A47(11)**, 1681-1684 (2008).
25. J Blanco J. Degradación de un efluente textil real mediante procesos Fenton y Foto-Fenton. Tesis de maestría. Universitat Politècnica de Catalunya, España (2009).