



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

---

---

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

PROCESOS DE OXIDACIÓN APLICADOS A TRATAMIENTOS  
DE LIXIVIADOS GENERADOS EN RELLENOS  
SANITARIOS

T E S I N A  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
ESPECIALISTA EN GESTIÓN INTEGRAL  
DE RESIDUOS

P R E S E N T A:

M. en M. R. N. LIDIA CONCEPCIÓN GAMBOA VILLA

DIRECTOR:

Dr. JORGE ANTONIO GUERRERO ÁLVAREZ

CUERNAVACA, MORELOS

ENERO, 2023

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo es dedicado con todo el cariño y amor a mi familia, a mi madre Ascensión Villa quien siempre ha creído en mí y me alienta a continuar con mi formación académica. A la memoria de mi padre Fernando Gamboa †, sé que desde donde se encuentra se alegra y comparte cada uno de mis logros. A mis hermanos Magda y Fer, por siempre estar conmigo y brindarme todo su apoyo y cariño. A mis hermosas sobrinas Itzi y Fer por alegrarme con cada una de sus ocurrencias. Y a mi persona Jorge Sandoval por formar de mi vida, creer en mí, alentarme y apoyarme incondicionalmente en cada paso que doy.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca con número 809166 otorgada para la realización de los estudios de Especialidad y financiamiento para el desarrollo del presente trabajo.

A la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, institución de la cual me siento profundamente orgullosa de formar parte, la cual me brindó una educación de excelencia.

A la Facultad de Ciencias Biológicas por permitirme cursar la Especialidad en Gestión Integral de Residuos, así como a la coordinación y al personal administrativo por su apoyo y amabilidad.

Al Dr. Jorge Antonio Guerrero Álvarez, por fungir como director de este proyecto, por la asesoría brindada para realizar este trabajo, por compartir sus conocimientos, brindarme su apoyo y por la paciencia durante la realización de los estudios de Especialidad y ser parte fundamental en mi formación académica.

Al Dr. Hugo Alberto Saldarriaga Noreña y a la Dra. María Luisa García Betancourt por formar parte de mi comité evaluador, por las observaciones realizadas las cuales permitieron enriquecer este trabajo.

Al municipio de Xochitepec, Morelos; a la Dirección de Servicios Públicos Generales y Protección Ambiental, por brindarme la oportunidad de realizar la estancia académica, la cual fue parte importante de mi formación académica.

## RESUMEN

Uno de los subproductos de los residuos, resultado de la degradación de la materia orgánica, la compactación y percolación del agua son los lixiviados. Estos líquidos formados por materia orgánica e inorgánica, compuestos xenobióticos, metales pesados, entre otros contaminantes, pueden provocar contaminación de aguas (superficiales y subterráneas), degradación del suelo y afectaciones en la salud humana, debido a que no son tratados en los rellenos sanitarios y son vertidos en el ambiente. El presente trabajo tuvo como objetivo conocer las características de los lixiviados de rellenos sanitarios de México, analizar la eficiencia de los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) utilizados en el tratamiento de lixiviados y generar una propuesta viable para aplicar a los lixiviados en México. El trabajo se desarrolló a través de una revisión bibliográfica. Los resultados obtenidos indicaron que, 1,053 Sitios de Disposición Final (SDF) en México (47.79%) no cuentan con la infraestructura básica requerida para la operación general; 359 SDF cuentan con instalaciones para la captación de lixiviados y solo 91 tienen infraestructura para su tratamiento, sin embargo, no se garantiza que este se lleve a cabo. Se documentaron los lixiviados de 14 SDF de 11 estados de la república mexicana. Dentro de los parámetros reportados para su caracterización se encuentran el pH, DBO<sub>5</sub>, DQO, relación DBO<sub>5</sub>/DQO (biodegradabilidad), nitrógeno total, sólidos suspendidos y metales pesados. La mayoría de los lixiviados en México correspondieron a lixiviados “viejos” o en fases cercanas a su estabilización. Los POA utilizados en el tratamiento de los lixiviados de rellenos sanitarios son la Fotocatálisis heterogénea (TiO<sub>2</sub>) /UV, Ozonización peróxido de hidrógeno UV/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Fenton (Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), foto Fenton (UV/Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y UV peróxido de hidrógeno (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), los cuales son utilizados solos o en combinación con otros tratamientos, siendo el proceso Fenton y foto Fenton los más utilizados. Para el caso de los lixiviados de los rellenos sanitarios de México, estos podrían ser tratados a nivel laboratorio mediante proceso Fenton/foto Fenton debido a las características como pH, DBO y DQO presentadas.

**Palabras clave:** POA, lixiviados, rellenos sanitarios.

## ABSTRACT

One of the waste by-products resulting from the degradation of organic matter, compaction, and water percolation, is leachates. These liquids made up of organic and inorganic matter, xenobiotic compounds, and heavy metals, among other pollutants, can cause water pollution (surface and groundwater), soil degradation, and effects on human health because they are not treated in landfills and are discharged into the environment. The objective of this work was to know the characteristics of leachate from landfills in Mexico, analyze the efficiency of advanced Oxidation Processes (POA) used in the treatment of leachate and generate a viable proposal to apply to leachate in Mexico. The work was developed through a bibliographic review. The results obtained indicated that 1,053 Final Disposal Sites (FDS) in Mexico (47.79%) do not have the basic infrastructure required for general operation; 359 FDS have facilities for capturing leachate, and only 91 have the infrastructure for its treatment. However, it is not guaranteed that it will be carried out. Leachate from 14 FDS from 11 states of the Mexican Republic was documented. The parameters reported for its characterization are pH, BOD<sub>5</sub>, COD, BOD<sub>5</sub>/COD ratio (biodegradability), total nitrogen, suspended solids, and heavy metals. Most of the leachate in Mexico corresponded to “old” leachate or was in phases close to stabilization. The POAs used in the treatment of landfill leachate are heterogeneous photocatalysis (TiO<sub>2</sub>) /UV, Hydrogen peroxide ozonation UV/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Fenton (Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), Fenton photo (UV/Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) and UV hydrogen peroxide (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), which are used alone or in combination with other treatments, being the Fenton process and Fenton photo the most used. In the case of leachate from landfills in Mexico, these could be treated at the laboratory level using the Fenton/photo Fenton process due to the characteristics such as pH, BOD and COD presented.

Keywords: POA, leachate, landfills.

## ÍNDICE

INDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	ix
Capítulo I. MARCO TEÓRICO.....	1
I.1 Residuos.....	1
I.1.1 -Manejo de Residuos Sólidos Urbanos (RSU).....	2
I.2 Sitios de Disposición Final (SDF).....	3
I.3 Proceso de degradación de Residuos en Rellenos sanitarios.....	5
I.4 Lixiviados.....	6
I.4.1 Características de lixiviados de rellenos sanitarios.....	9
I.4.2 Impacto de los lixiviados de rellenos sanitarios en el ambiente.....	11
1.5 Remediación de residuos.....	13
I.5.1 Tratamientos químicos en la remediación de residuos.....	13
I.5.2 Procesos de oxidación-reducción.....	14
I.5.3 Procesos de oxidación avanzada (POA).....	15
I.5.3.1 Radical Hidroxilo (OH·).....	16
I.5.3.2. Clasificación de POA.....	18
I.5.3.3. Procesos no fotoquímicos.....	19
I.5.3.4 Procesos fotoquímicos.....	20
I.6 Tratamientos aplicados a lixiviados.....	22
CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	25
CAPÍTULO III.- OBJETIVOS.....	27
III.1 Objetivo general:.....	27
III.2 Objetivos particulares:.....	27
CAPÍTULO IV.- PROPUESTA A IMPLEMENTAR.....	28
CAPÍTULO V.-PRINCIPALES HALLAZGOS.....	30
V.1 Características de rellenos sanitarios en México.....	30
V.2 Características de lixiviados de rellenos sanitarios en México.....	31
V. 3 POA aplicados a lixiviados en rellenos sanitarios.....	38
V.4 Propuesta de tratamiento para lixiviados de rellenos sanitarios en México..	42

VI.- CONCLUSIONES .....	45
PERSPECTIVA .....	46
REFERENCIAS.....	47
ANEXOS .....	57

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Especificaciones de instalaciones y actividades para la protección del ambiente en rellenos sanitarios .....	3
Tabla 2.- Categorías de los rellenos sanitarios para México de acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003 .....	4
Tabla 3.- Valores característicos para cada parámetro de acuerdo a la edad del relleno sanitario .....	9
Tabla 4.- Clasificación de los lixiviados en función del tiempo .....	10
Tabla 5.- Generación de lixiviados en rellenos sanitarios, tomado de Nawaz et al., 2020 .....	11
Tabla 6.- Potencial de oxidación de diferentes especies.....	16
Tabla 7.- Clasificación de POA en procesos fotoquímicos y no fotoquímicos.....	18
Tabla 8.- Eficiencia de tratamientos de lixiviados vs. la edad del lixiviado.....	24
Tabla 9.- Infraestructura de los sitios de disposición final en México .....	30
Tabla 10.- Características de lixiviados en Rellenos Sanitarios de México.....	32
Tabla 11.- Tratamientos de oxidación en lixiviados de rellenos sanitarios .....	39
Tabla 12.- Comparación de parámetros de lixiviados en México y los utilizados en procesos Fenton y foto Fenton.....	42

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fases del proceso de degradación de residuos en relleno sanitario .....	5
Figura 2.- Esquema general de descomposición de los residuos al contacto con el agua.....	7
Figura 3. Reactividad general de los radicales hidroxilos .....	17

## INTRODUCCIÓN

Todas las actividades que desarrollamos día a día generan residuos, por ejemplo, las domésticas, industriales, de servicios de salud, comerciales, entre otras. Tan solo para el caso de los residuos sólidos urbanos (RSU), a nivel mundial se generan alrededor de 2,000 millones de toneladas al año, cifra que se estima aumente hasta en un 30% para el año 2050 (Kaza *et al.*, 2018). Los RSU son depositados comúnmente en rellenos sanitarios, denominados así a las instalaciones físicas utilizadas para la disposición final de residuos sólidos en los suelos superficiales de la Tierra (Tchobanoglous y Kreit, 2002).

Uno de los subproductos que se generan de los residuos son los lixiviados. Los lixiviados son el líquido que se forma por la transferencia de agua a través de los residuos y de la degradación de la materia orgánica. Están compuestos por materia orgánica, sales, amonio y metales pesados (Nawaz *et al.*, 2020), los cuales al ser vertidos en el ambiente pueden contaminar aguas superficiales y subterráneas, suelo y al evaporarse el contenido acuoso las partículas pueden causar contaminación del aire (Torres-Lozada *et al.*, 2014). Sin embargo, a pesar del potencial de contaminación que presentan los lixiviados, pocos sitios de disposición final realizan tratamiento de los mismos.

Actualmente existe una gran variedad de sistemas que pueden ser utilizados para el tratamiento de lixiviados, por ejemplo, la recirculación, evaporación, tratamientos biológicos, anaerobios, aerobios y Procesos de Oxidación Avanzada (POA) (Abdulhussain *et al.*, 2009). Los POA han sido empleados ya que transforman el contaminante químicamente, se puede conseguir mineralización completa de los compuestos y en la mayoría de los casos no se generan sustratos que se deban tratar posteriormente (Martínez-López *et al.*, 2014). En este sentido el presente trabajo tiene por objetivo el análisis de POA a fin de proponer alternativas viables para el tratamiento de lixiviados generados en rellenos sanitarios en México.

## Capítulo I. MARCO TEÓRICO

### I.1 Residuos

Un residuo de acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) se define como “*material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final*”.

Los residuos pueden clasificarse de acuerdo al estado físico (sólidos, líquidos y gaseosos), por la fuente de generación (domésticos, industriales, agrícolas, comerciales, de demolición, construcción y mineros) y de acuerdo al impacto ambiental (peligrosos y no peligrosos) Amasuomo y Baird, 2016. En México, la (LGPGIR) los clasifica en residuos de manejo especial, peligrosos y sólidos urbanos.

**Residuos de Manejo Especial (RME):** Resultantes de procesos productivos, en este grupo se incluyen residuos de actividades pesqueras, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas, ganaderas, de la construcción, mantenimiento y demolición; tecnológicos, electrónica, automotores y sólidos urbanos en grandes cantidades.

**Residuos peligrosos (RP):** Presentan alguna característica de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o contienen agentes infecciosos que les confieran peligrosidad. Por ejemplo, residuos de industrias minera y petrolera, explosivos, plaguicidas, textiles, pinturas, residuos de hospitales, laboratorios, disolventes, farmacéuticos entre otros, (Ruiz *et al.*, 2001); los cuales requieren controles estrictos de manipulación, transporte, procesamiento y eliminación (Yilmaz *et al.*, 2016).

**Residuos sólidos urbanos (RSU):** Generados en casas habitación, establecimientos o en la vía pública. Están conformados en su mayoría por desperdicios orgánicos (Harir *et al.*, 2015; Abedin y Jahiruddin, 2015) incluidos los residuos de jardines y restos de comida; así como metales, plásticos, productos químicos de uso doméstico, papel, vidrio empaques, embalajes, entre otros (Downmore *et al.*, 2011).

### **I.1.1 -Manejo de Residuos Sólidos Urbanos (RSU)**

El manejo de los RSU es una de las mayores problemáticas a nivel mundial. El manejo hace referencia a los procesos de generación, clasificación, almacenamiento, recolección, transporte y disposición final (Downmore *et al.*, 2011).

La “generación” es la primera etapa, tiene relación con las actividades que realiza el ser humano (Sáez y Urdaneta, 2014) y de factores como la industrialización, nivel económico, clima, zona geográfica, entre otros; los cuales determinan la composición y cantidad de RSU generados (Vergara y Tchobanoglous, 2012). Para América Latina y el Caribe se generan en promedio al día 1 kg de RSU por persona (Kaza *et al.*, 2018).

La “recolección y transporte” en conjunto incluyen la recolecta y transporte de los RSU desde los sitios destinados para su almacenamiento por parte de los generadores hasta el lugar donde serán descargados (planta de valorización de materiales, de tratamiento, estación de transferencia o relleno sanitario). Es la etapa más cara del manejo, las empresas/municipios destinan la mayor parte de su presupuesto en estas actividades (OPS, 2010).

La “disposición final” es la última etapa del manejo. Es un factor clave, se lleva a cabo a través de diferentes técnicas como la incineración, el depósito en tiraderos a cielo abierto, tiraderos controlados y rellenos sanitarios; siendo este último el principal método utilizado a nivel mundial (Kaza *et al.*, 2018).

A nivel global se estima que el 33% de los residuos tiene un manejo inadecuado (Kaza *et al.*, 2018), siendo algunas causas la falta de motivación, conciencia, selección adecuada de tecnología y apoyo financiero (Vergara y Tchobanoglous, 2012). En consecuencia, los residuos pueden provocar contaminación de aguas (superficiales y subterráneas); aire por la generación de biogás (metano CH<sub>4</sub> y Dióxido de carbono CO<sub>2</sub>), dioxinas y furanos (por la quema no controlada de residuos); así como la alteración de las propiedades físicas y químicas del suelo (por presencia de aceites, grasas, metales pesados y ácidos) y pueden convertirse en fuentes de vectores de enfermedades provocando afectaciones en la salud humana (OPS, 2010).

## I.2 Sitios de Disposición Final (SDF)

El sitio de disposición final (SDF), se define como el lugar en donde se depositan los residuos sólidos urbanos y de manejo especial en forma definitiva. En México, la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 hace referencia a la existencia de tres diferentes SDF: Sitio controlado, sitio no controlado y relleno sanitario.

De acuerdo con esta Norma un sitio controlado es aquel que cumple con las especificaciones de un relleno sanitario, en lo que se refiere a obras de infraestructura y operación, pero no cumple con las especificaciones de impermeabilización. Mientras que un sitio no controlado es un sitio inadecuado de disposición final que no cumple con los requisitos establecidos en la norma.

Esta misma Norma define al relleno sanitario como: *“la obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructura adicionales los impactos ambientales”*.

En esta norma se establecen los criterios para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un SDF. Dentro de estas especificaciones podemos destacar los puntos que hacen referencia a la protección del ambiente, los cuales se describen en la tabla 1.

Tabla 1.- Especificaciones de instalaciones y actividades para la protección del ambiente en rellenos sanitarios

NORMA	PUNTO	ESPECIFICACIONES
NOM -083- SEMARNAT- 2003	7.2	Se debe garantizar la extracción, captación, conducción y control de biogás generado.
	6.3	La generación de lixiviado se debe cuantificar mediante un balance híbrido
	7.3	Se debe construir un sistema que garantice la captación y extracción del lixiviado generado. El lixiviado debe ser recirculado en las celdas de residuos confinados en función de los requerimientos de humedad para la descomposición de los residuos, o bien ser tratado, o una combinación de ambas.
	7.10	Manual que contenga:

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Programas específicos de control de calidad, mantenimiento y monitoreo ambiental de biogás, lixiviados y acuíferos.</li> <li>• Programa de seguridad y planes de contingencia para incendios, explosiones, sismos, fenómenos meteorológicos y manejo de lixiviados, sustancias reactivas, explosivas e inflamables.</li> </ul> <p>Control de registro de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Generación y manejo de lixiviados y biogás</li> </ul>
7.11.2	<p>Se debe elaborar un programa de monitoreo de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Biogás</li> <li>• Acuíferos</li> <li>• Lixiviados: que tenga como objetivo conocer sus características de pH, DBO<sub>5</sub>, DQO y metales pesados.</li> </ul>

La NOM-083-SEMARNAT-2003, categoriza a los rellenos sanitarios según la cantidad de RSU y RME que reciben diariamente. En la tabla 2 se muestran las categorías de los rellenos sanitarios para México.

Tabla 2.- Categorías de los rellenos sanitarios para México de acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003

CATEGORÍA	TONELAJE RECIBIDO EN EL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL (ton/día)
A	Mayor a 100
B	50 hasta 100
C	10 y menor a 50
D	Menor de 10

De acuerdo a esta NORMA, los residuos que no están permitidos para su ingreso son los residuos líquidos tales como aguas residuales y líquidos industriales de proceso, así como lodos hidratados de cualquier origen; residuos conteniendo aceites minerales y los residuos peligrosos.

### I.3 Proceso de degradación de Residuos en Rellenos sanitarios

Los residuos sólidos depositados en un relleno sanitario se someten a una serie de procesos simultáneos e interrelacionados (biológicos, químicos y físicos). Las reacciones biológicas implican la descomposición de la fracción orgánica por acción de los microorganismos generando gases y lixiviados. Los procesos físicos provocan cambios de reducción de tamaño, volumen y componentes. Dentro de los procesos químicos encontramos las reacciones de óxido-reducción que afectan a los metales y la solubilidad de sales; evaporación de compuestos químicos y agua entre otros (Tchobanoglous y Kreith, 2002). Estos procesos se efectúan a través de cinco fases (Figura 1).

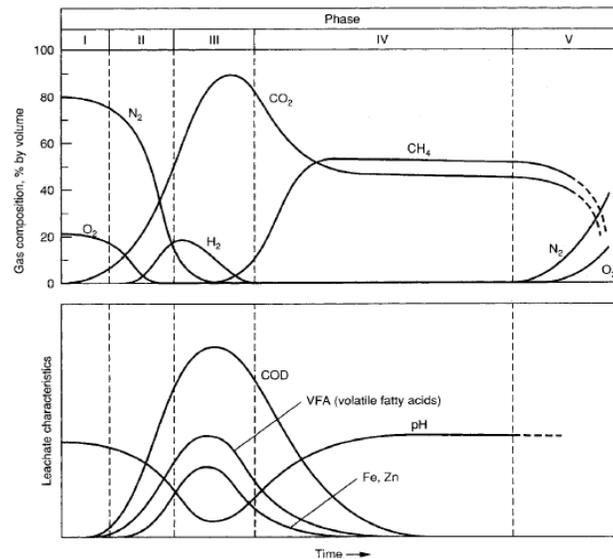


Figura 1. Fases del proceso de degradación de residuos en relleno sanitario

**Fase I (Inicial o ajuste):** Los componentes orgánicos son degradados por microorganismos generalmente bacterias, es un proceso aerobio, ya que hay presencia de oxígeno atrapado en el espacio entre los residuos. Los lixiviados producidos resultan de la liberación de humedad por la compactación de los residuos y por la precipitación.

**Fase II (Transición):** Se termina el oxígeno por lo que comienza una condición anaerobia, el nitrato y sulfato se reducen a gas nitrógeno y sulfuro de hidrógeno; en cuando a la fracción orgánica se convierte en ácidos orgánicos. Los lixiviados comienzan a disminuir el pH.

**Fase III (Ácida):** La actividad de bacterias anaerobias se incrementa, lo que implica una alta producción de ácidos orgánicos. La concentración de DBO<sub>5</sub> y DQO aumenta, el pH del lixiviado disminuye, el lixiviado en fase ácida es químicamente agresivo y aumentará la solubilidad de muchos compuestos.

**Fase IV (Fermentación del metano):** Un segundo grupo de microorganismos convierten Ácido acético en Metano (CH<sub>4</sub>) y Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). El pH del lixiviado aumenta en rangos de 6.8-8, en cuanto a la conductividad y metales pesados se reducen.

**Fase V (De maduración):** Disminuye la generación de gases, ya que los nutrientes han sido eliminados. Los lixiviados contienen mayor concentración de ácidos húmicos y fúlvicos, difíciles de procesar biológicamente, el pH se mantiene estable.

#### **I.4 Lixiviados**

Dentro de la literatura podemos encontrar diversas definiciones de los lixiviados:

- De acuerdo a la LGPGIR, es el *“líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos”*.
- Tchobanoglous y Kreith, 2002; los definen como el *“líquido resultado de la percolación de la precipitación, la escorrentía incontrolada y el agua de riego de los rellenos sanitarios, además de la contenida propiamente en los residuos”*.

La composición de los lixiviados es compleja y varía de un sitio a otro. Los factores que influyen en la composición de estos líquidos incluyen el tipo y constitución de los residuos, la etapa de descomposición, las condiciones climáticas y meteorológicas (precipitación pluvial, temperatura y viento) así como las condiciones del relleno sanitario (diseño y operación, pH y edad) (Kurniawan *et al.*, 2010). La precipitación es determinante en la generación del lixiviado (Figura 2), puesto que favorece la solubilización de los compuestos tóxicos, la temperatura y viento influyen sobre las condiciones del balance hídrico; mientras que la edad del relleno sanitario va a influir en la capacidad de reacción de los materiales depositados ya que esta disminuye con el paso del tiempo (Kiss *et al.*, 2006).

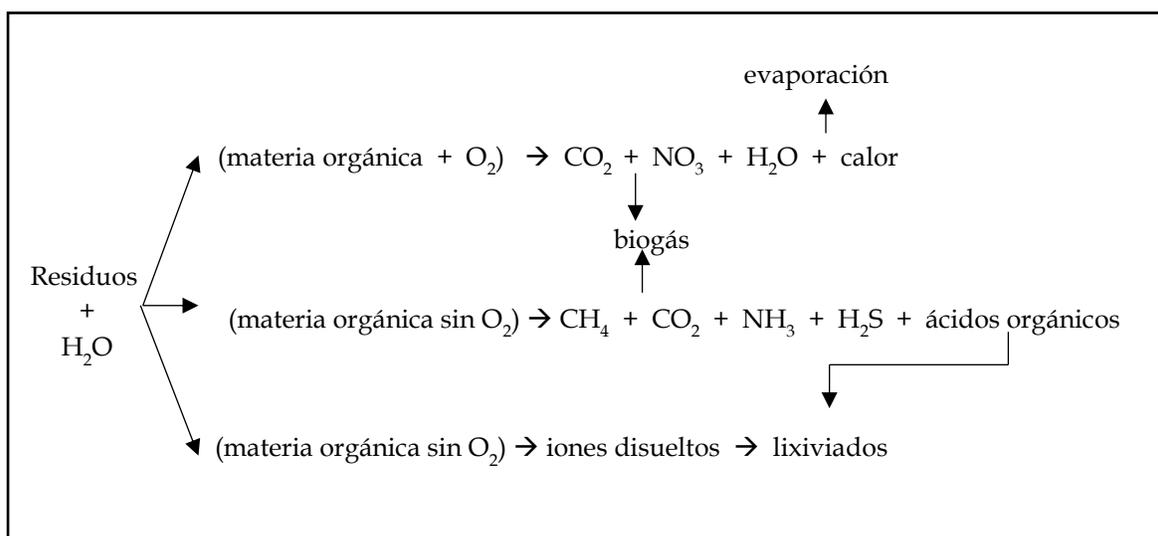


Figura 2.- Esquema general de descomposición de los residuos al contacto con el agua

Los parámetros utilizados para la caracterización de los lixiviados en rellenos sanitarios son el pH, DQO, DBO, amonio, nitrógeno total, color, carbono orgánico total, metales pesados, entre otros (Renou *et al.*, 2008):

**Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Se refiere a la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en Dióxido de

Carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Cuanto mayor es la DQO mayor es el grado de contaminación.

**Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Es la cantidad de oxígeno que los microorganismos, consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en el agua. Se usa para medir el grado de contaminación, cuanto más DBO mayor contaminación.

**Relación DBO/DQO:** permite establecer la biodegradabilidad de la materia orgánica del lixiviado. Este parámetro varía a través del tiempo. En rellenos sanitarios jóvenes los lixiviados presentan parámetros de 0.4-0.6, mientras que en rellenos sanitarios maduros los rangos pueden ir de 0.2-0.05 que indica poca biodegradabilidad.

**Carbono Orgánico Total (COT):** Es una medida de los compuestos orgánicos presentes en el agua, una elevada concentración puede tener un impacto en los ecosistemas.

**Color:** Está directamente relacionado con la presencia de materia orgánica en el lixiviado.

**Metales pesados:** Pueden encontrarse como materia coloidal fina, o formando complejos orgánicos e inorgánicos. Algunos de los metales pesados encontrados en lixiviados son arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobalto (Co), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn)

**Nitrógeno total:** está compuesto por el nitrógeno amoniacal más el nitrógeno orgánico, y este está constituido por las formas de nitrógeno correspondientes al nitrato, nitrito y amonio.

**Nitrógeno amoniacal:** La presencia de amoniaco libre o ion amonio se considera como una prueba química de contaminación. Si el medio es aerobio, el nitrógeno amoniacal se transforma en nitritos (Sardiñas y Pérez, 2004).

### I.4.1 Características de lixiviados de rellenos sanitarios

Los lixiviados de rellenos sanitarios presentan de manera general color oscuro, olor fuerte, alta carga orgánica e inorgánica, amoníaco, compuestos xenobióticos y compuestos halógenos (Peng, 2017), así como microorganismos patógenos coliformes (Pellón *et al.*, 2015). Los lixiviados son clasificados típicamente en jóvenes y maduros, en la tabla 3 se presentan los valores característicos para cada parámetro de acuerdo a la edad del relleno sanitario (Tchobanoglous y Kreith, 2002).

Tabla 3.- Valores característicos para cada parámetro de acuerdo a la edad del relleno sanitario

Constitución	Relleno sanitario		Relleno sanitario
	Rango*	Valores típicos**	maduro >10 años
			Rango
		Valores en mg/L	
BOD <sub>5</sub>	2000-30000	10000	100-200
TOC (carbono orgánico total)	1500-20000	6000	80-160
DQO (Demanda Química de oxígeno)	3000-60000	18000	100-500
Sólidos totales suspendidos	200-2000	500	100-400
Nitrógeno orgánico	10-800	200	80-120
Nitrógeno Amoniacal	10-800	200	20-40
Nitrato	5-40	25	5-10
Fósforo total	5-100	30	5-10
Alcalinidad como CaCO <sub>3</sub>	1000-10000	3000	200-1000
Ph	4.5-7.5	6	6.6-7.5
Dureza (CaCO <sub>3</sub> )	300-10000	3500	200-500
Calcio	200-3000	1000	100-400
Magnesio	50-1500	250	50-200
Potasio	200-1000	300	50-400
Sodio	200-2500	500	100-200
Cloruro	200-3000	500	100-400
Sulfato	50-1000	300	20-50
Hierro total	50-1200	60	20-200

Valores en mg/L, excepto pH  
 \*Rango representativo de valores, valores máximos más altos han sido reportados en la literatura  
 \*\*Los valores típicos para rellenos sanitarios nuevos variarán con el estado metabólico del sitio

Los lixiviados pueden también clasificarse en tres grupos de acuerdo al cambio que sufren en la composición a través del tiempo, estos tres grupos son lixiviados jóvenes, lixiviados intermedios y lixiviados viejos; Tabla 4 (Peng, 2017). Entre las principales diferencias se observa que el porcentaje de materia orgánica disminuye con el tiempo, mientras que las sustancias inorgánicas aumentan a medida que se extiende el tiempo (Ziyang *et al.*, 2009).

Tabla 4.- Clasificación de los lixiviados en función del tiempo

PARÁMETRO	LIXIVIADO JOVEN	LIXIVIADO INTERMEDIO	LIXIVIADO VIEJO
EDAD (AÑOS)	< 5	5 - 10	> 10
pH	< 6.5	6.5 - 7.5	>7.5
Biodegradabilidad	Alta	Media	Bajo
Nitrógeno Kjeldahl (g/L)	0.1 - 0.2	-	-
Amonio (mg/L)	< 400	-	> 400
COT/DQO	< 0.3	0.3 - 0.5	> 0.5
Metales pesados (mg/L)	Bajo a medio	Bajo	Bajo
DBO/DQO	0.5 - 1.0	0.1 - 0.5	< 0.1
DQO (mg/L)	> 10,000	4,000 - 10,000	< 10,000

Existe una variedad de contaminantes presentes en estos líquidos. De acuerdo con Kjeldsen *et al.*, 2002 estos pueden agruparse en cuatro categorías:

- Materia orgánica disuelta: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Carbono Orgánico Total (COT), ácidos grasos volátiles y compuestos fúlvicos y húmicos.
- Compuestos inorgánicos: calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ), manganeso ( $\text{Mn}^{2+}$ ), cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y carbonato de hidrógeno ( $\text{HCO}_3^-$ ).
- Metales pesados: cadmio ( $\text{Cd}^{2+}$ ), cromo ( $\text{Cr}^{3+}$ ), cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ), plomo ( $\text{Pb}^{2+}$ ), níquel ( $\text{Ni}^{2+}$ ) y zinc ( $\text{Zn}^{2+}$ ).
- Compuestos xenobióticos: hidrocarburos aromáticos, fenoles, pesticidas y organoclorados.

### I.4.2 Impacto de los lixiviados de rellenos sanitarios en el ambiente

Los lixiviados de rellenos sanitarios pueden ocasionar diversas afectaciones en el ambiente. Estas afectaciones se pueden dar desde la generación de los mismos y en manejo de ellos (control y tratamiento). Por ejemplo, para el caso de la generación, se estima que un relleno sanitario puede generar hasta 0.2m<sup>3</sup> de lixiviados por tonelada de RSU depositados; aun cuando los sitios son cerrados estos pueden seguir produciendo lixiviados hasta por 50 años más (Kurniawan *et al.*, 2010). Nawaz *et al.*, 2020 reportan la generación de lixiviados en diversos sitios de disposición final, cantidades que varían en función del tamaño del sitio, así como a la estacionalidad (tabla 5).

Tabla 5.- Generación de lixiviados en rellenos sanitarios, tomado de Nawaz *et al.*, 2020

LUGAR	TIPO DE LIXIVIADO	GENERACIÓN	ÁREA (HA)	REFERENCIA
Vertedero de Keeley Valley, Ontario, Canadá	Intermedio (8 años)	75-342 m <sup>3</sup> /día <sup>-1</sup>	99	Yildiz <i>et al.</i> , 2004
Sitio de Ouled Fayet, Argelia	Joven (5 años)	47 m <sup>3</sup> /día <sup>-1</sup>	40	Salem <i>et al.</i> , 2008
19 sitios en el norte occidental de Alemania, 1 sitio en Berna, Suiza	Viejos (todos mayores a 12 años)	0-24 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> /día <sup>-1</sup>	--	Ehrig, 1983
Sureste de EUA	Intermedio	16.4-26.8 m <sup>3</sup> /día en secas y 27.8-36.6 m <sup>3</sup> /día en lluvias	7.9	Ruhl <i>et al.</i> , 2017
Vertedero de Ampang, Jajar, Malasia	Vertedero semi-aerobio (10 años de edad)	8.1-9.1 m <sup>3</sup> /día en secas y de 11.1-12.3/m <sup>3</sup> luvias	2.9	Aziz <i>et al.</i> , 2012

León-Gómez *et al.*, 2015 mencionan la generación de 3,240 m<sup>3</sup> de lixiviados al año en un relleno sanitario en Linares, Nuevo León, México en donde se confinan en promedio 50 ton/día de RSU. En un tiradero a cielo abierto en el municipio de Zacatepec, Morelos, México, se estimó que en el período del 2005-2015 se generaron

112,549.80 m<sup>3</sup> de lixiviados, sitio que al no contar con barreras que impidan el paso de los contaminantes al subsuelo podrían llegar a contaminar aguas subterráneas (Hernández, 2020).

El control de los lixiviados implica mantener el flujo del lixiviado dentro del sitio de disposición final. Si los lixiviados escapan pueden ocasionar contaminación de agua (superficial y subterránea), contaminación del suelo, causar afectaciones en la agricultura, así como en la flora y fauna (OPS, 2010). En un estudio realizado en la región centro occidente de México (la cual comprende nueve estados), se observó que en el 71 % de los rellenos sanitarios los lixiviados escapan del sitio de disposición final y este escape se intensifica durante la temporada de lluvias (Bernache, 2012); provocando riesgo de contaminación del agua y afectaciones a las zonas habitacionales cercanas al sitio. León-Gómez *et al.*, 2015, han reportado la contaminación de aguas superficiales y subterráneas aledañas al relleno sanitario de Linares, Nuevo León, en pozos aledaños al sitio se encontró alto contenido de nitrato (NO<sub>3</sub>- >10 mg/L) y plomo (Pb 70 µg/L), así como manganeso (Mn >150 µ/L) y hierro (Fe >300µ/L) cuyos valores exceden la norma oficial mexicana y son potencialmente peligrosas para la salud humana, además el pH registrado fue de 6.8 que de ser desplazado a condiciones ácidas puede dar lugar al plomo disuelto (Pb<sup>+2</sup>) el cuál es más tóxico en el ambiente.

En Cuba, Espinosa *et al.*, 2010, estimaron que cerca de 224 m<sup>3</sup>/día de lixiviados de un vertedero podrían estarse infiltrando al acuífero o escurrirse hacia el caudal del Río Almendares; estos lixiviados presentan niveles de DQO, DBO, nitrógeno total y fósforo que sobrepasan los valores establecidos en la norma en ese país. Así mismo estimaron que cerca de 91-101 toneladas/año de material orgánico refractario no biodegradable, es vertido en el caudal del Río, causando afectaciones en el ambiente. Por otro lado, se ha visto que suelos que son expuestos a lixiviados de relleno sanitarios durante un periodo de tiempo prolongado sufren cambios en su estructura, por ejemplo, en Colombia Quintero-Ramírez *et al.*, 2017, reportan

degradación del comportamiento geotécnico de los suelos, así como cambios en las propiedades físicas, químicas, estructurales, hidro-mecánicas y mineralógicas, así como contaminación de los suelos que han sido expuestos durante 15 años a lixiviados de rellenos sanitarios.

### **1.5 Remediación de residuos**

Las tecnologías de remediación son aquellas operaciones que tienen por objetivo reducir la toxicidad, movilidad o concentración del contaminante presente en el medio, mediante la alteración de la composición de la sustancia peligrosa o del medio, a través de diferentes acciones. Estas tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras entre las que encontramos:

- a) Por el lugar de aplicación de la remediación: In situ o Ex situ
- b) Objetivo de la remediación: Descontaminación, contención o confinamiento
- c) El tipo de tratamiento: Biológico, físico-químico, térmico, mixto
- d) De acuerdo al grado de desarrollo: tradicional e innovadora

Dentro de estas tecnologías, los tratamientos fisicoquímicos son aquellos que utilizan propiedades físicas y químicas de los contaminantes o del medio contaminado para transformar, separar o inmovilizar el contaminante.

#### **1.5.1 Tratamientos químicos en la remediación de residuos**

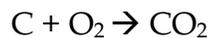
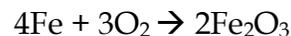
El tratamiento químico involucra reacciones de oxidación-reducción (redox) que convierten químicamente compuestos tóxicos o peligrosos a compuestos menos tóxicos o no peligrosos, que son más estables, menos móviles o inertes. Dentro de este tipo de tratamientos podemos encontrar los siguientes (Schiopu y Gavrilesco, 2010):

- Neutralización
- Precipitación química
- Cloración
- Oxido-reducción

### I.5.2 Procesos de oxidación-reducción

En la literatura podemos encontrar diferentes conceptos de oxidación, los cuales se describen a continuación:

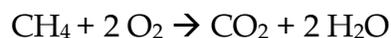
1.- La palabra oxidación se acuñó originalmente para definir a la reacción de combinación de cualquier elemento con el oxígeno para producir algún óxido (Garritz y Chamizo, 2001). Por ejemplo, cuando el hierro se oxida se produce herrumbre que es el óxido de hierro (III) o cuando se quema el carbón se produce dióxido de carbono:



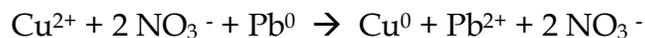
La palabra reducción se empleó para referirse a la eliminación del oxígeno de un óxido, dejando puro al elemento, con una notable reducción de la masa y/o el volumen con respecto al material original. Por ejemplo, el cobre, puede obtenerse calentando el óxido en presencia de carbono:



2.- También se ha descrito a la oxidación como la pérdida de hidrógeno y la oxidación como la ganancia de hidrógeno. Por ejemplo, en la combustión del metano, el carbono se oxida (pierde los cuatro hidrógenos) y el oxígeno se reduce (gana hidrógenos):



3.- Posteriormente, se asignó el nombre de oxidación al proceso en el cuál un elemento pierde electrones y el de reducción al proceso en el que un elemento gana electrones (Steven y De Coste, 2011). Por ejemplo, en la siguiente reacción:



Hay un cambio en el estado de oxidación del cobre, el cual pasó de 2+ a 0, es decir se redujo, ganando dos electrones. Por otro lado, el plomo aumentó el número de oxidación de 0 a 2, se oxidó pues perdió dos electrones. Ni el oxígeno ni el nitrógeno participan en este caso en la reacción de oxido-reducción, ya que permanecen formando iones nitrato, sin cambio alguno en sus números de oxidación.

Actualmente se dice que un elemento se oxida si aumenta su número de oxidación y que un elemento se reduce si disminuye su número de oxidación.

Por lo tanto, podemos decir que la oxidación es una ganancia de oxígeno, o una pérdida de electrones, aumenta el número de oxidación del elemento que se oxida. Un elemento que se oxida actúa como reductor, es un donador de electrones.

Reducción es una pérdida de oxígeno o ganancia de electrones, disminuye el número de oxidación del elemento que se reduce. Un elemento que se reduce actúa como oxidante, es un aceptor de electrones (Garritz y Chamizo, 2001).

### **I.5.3 Procesos de oxidación avanzada (POA)**

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA), son procesos fisicoquímicos que son capaces de producir cambios en la estructura química de los contaminantes e involucran la generación y uso de especies transitorias altamente reactivas, principalmente el radical hidroxilo (OH·) (Martínez-López *et. al.*, 2014).

### I.5.3.1 Radical Hidroxilo (OH·)

El radical hidroxilo (OH·) es una especie radical que posee un potencial de oxidación muy elevado y con tiempo de reacción muy corto. Se considera el segundo agente oxidante y se coloca solo por debajo del flúor Tabla 6 (Doménech *et al.*, 2004); es altamente efectivo para la oxidación de materia orgánica, en especial aquella que no es biodegradable.

Tabla 6.- Potencial de oxidación de diferentes especies

ESPECIE	E° (V, 25°C)
Flúor (F·)	3.03
Radical hidroxilo (OH·)	2.8
Oxígeno atómico (O)	2.42
Ozono (O <sub>3</sub> )	2.07
Peróxido de hidrógeno (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	1.78
Radical perhidroxilo (OOH·)	1.70
Permanganato (MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	1.68
Dióxido de cloro (ClO <sub>2</sub> )	1.57
Ácido hipocloroso (HClO)	1.49
Cloro (Cl·)	1.36
Bromo (Br·)	1.09
Yodo (I·)	0.54

El radical hidroxilo reacciona en la materia orgánica de tres diferentes maneras, como reactivo oxidante, como agente de abstracción de nitrógeno y como electrófilo (Navalon *et al.*, 2010; Mirzaei *et al.*, 2017), Figura 3.

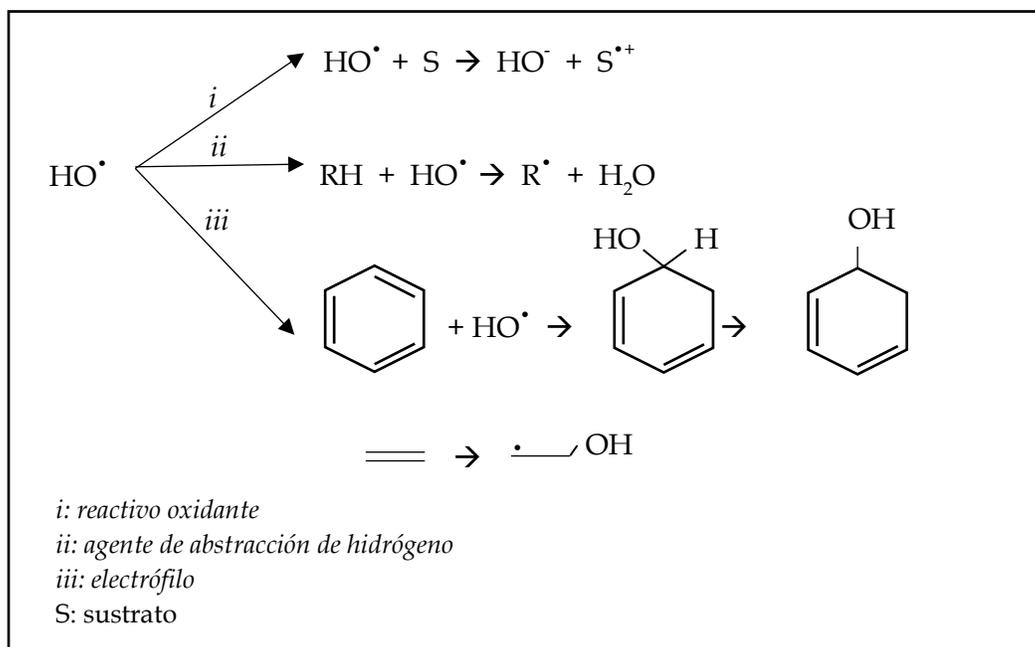


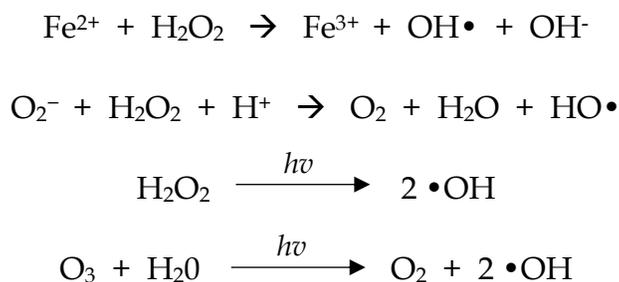
Figura 3. Reactividad general de los radicales hidroxilos

**i.- Reactivo oxidante:** Son especies extremadamente poderosas capaces de abstraer un electrón de un sustrato orgánico rico en electrones o cualquier otra especie presente en el medio para formar anión hidróxido.

**ii.- Agente de abstracción de hidrógeno:** Pueden abstraer un átomo de hidrógeno de los hidrocarburos y otros compuestos orgánicos. La condición para la extracción de hidrógeno es que, el enlace de hidrógeno para romperse debe tener una energía de enlace menor de 109 kcal mol<sup>-1</sup> que es la energía del enlace H-O formado en el proceso. Considerando que la energía del enlace O-H es mayor que las energías de los enlaces C-H, los radicales hidroxilos deberían ser capaces de abstraer un hidrógeno de casi todos los enlaces C-H en cualquier compuesto orgánico.

**iii.- Electrófilo:** Puede comportarse como un electrófilo fuerte atacando las nubes de compuestos aromáticos, alquenos y otros compuestos orgánicos insaturados.

El radical hidroxilo puede ser generado por medios fisicoquímicos (incluida la luz solar) o por otras formas de energía (Arroyave y Garcés, 2011). Se pueden generar a partir de oxígeno, agua oxigenada y catalizadores soportados y los subproductos de la reacción serán únicamente agua y dióxido de carbono. En las siguientes ecuaciones se muestran algunos ejemplos de cómo se genera el radical hidroxilo (OH·):



### I.5.3.2. Clasificación de POA

Los POA pueden clasificarse de diferentes maneras, una de ellas es en procesos no fotoquímicos y fotoquímicos en función de la participación de la luz en el proceso Tabla 7 (Doménech *et al.*, 2004). En los procesos fotoquímicos se necesita una radiación, mientras que en los procesos no fotoquímicos se requiere el uso de compuestos químicos o procesos eléctricos.

Tabla 7.- Clasificación de POA en procesos fotoquímicos y no fotoquímicos

PROCESOS NO FOTOQUÍMICOS	PROCESOS FOTOQUÍMICOS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ozonización en medio alcalino (O<sub>3</sub>/OH<sup>-</sup>)</li> <li>• Ozonización con peróxido de hidrógeno (O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)</li> <li>• Procesos Fenton (Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y relacionados</li> <li>• Oxidación electroquímica</li> <li>• Radiólisis y y tratamiento con haces de electrones</li> <li>• Plasma no térmico</li> <li>• Descarga electrohidráulica - ultrasonido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• UV/ peróxido de hidrógeno</li> <li>• Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)</li> <li>• UV/O<sub>3</sub></li> <li>• Foto-Fenton y relacionados</li> <li>• Fotocatálisis heterogénea</li> <li>• Oxidación en agua sub/y super crítica</li> </ul>

### I.5.3.3. Procesos no fotoquímicos

Estos procesos originan especies reactivas principalmente el radical hidroxilo a través de la transformación de especies químicas o mediante la utilización de distintas formas de energía, con excepción de la irradiación luminosa.

**Ozonización en medio alcalino:** El ozono ( $O_3$ ) es un agente oxidante con un potencial de oxidación de 2.07, capaz de oxidar contaminantes presentes en aguas residuales y biosólidos (Forero *et al.*, 2005). La ozonización transforma los contaminantes en compuesto más simples, más refractarios al reactivo. El ozono ( $O_3$ ) puede reaccionar en dos diferentes formas:

- **DIRECTA:** Por reacción directa del ozono molecular, mecanismo bastante selectivo que reacciona de forma lenta, preferiblemente con materia orgánica con dobles enlaces aromáticos:



- **INDIRECTA:** Por reacción de las especies formadas por la descomposición del ozono ( $O_3$ ) en agua (radicales libres) principalmente el radical hidroxilo, por lo que suscita reacciones radicalarias favorecidas en medio alcalino:



**Ozonización  $O_3$  / peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ):** El peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) es un poderoso oxidante y un compuesto inestable, la adición de este a los sistemas de ozonización es una de las formas más inmediatas de acelerar la descomposición de ozono ( $O_3$ ) a la formación de radicales hidroxilos ( $OH\cdot$ ). El uso de estos dos oxidantes combinados permite aprovechar los efectos sinérgicos entre ellos, lo que produce una destrucción adicional de la carga orgánica (Martínez-López *et al.*, 2014).

El H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> puede iniciar la descomposición de O<sub>3</sub> por transferencia de electrones. La reacción genera HO• consumiendo H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>, a través de un mecanismo en cadena:



**Proceso Fenton:** Tecnología que se desarrolla a partir del empleo de peróxido de Hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) con una sal de hierro. En este proceso los radicales HO• se forman a partir de la interacción entre H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y hierro ferroso (Fe<sup>2+</sup>) en medio ácido (pH 2, 5-4):



Como el hierro es un catalizador, no se consume durante el proceso. Por lo contrario, el Fe<sup>2+</sup> se regenera a partir del hierro férrico (Fe<sup>3+</sup>). Normalmente el hierro es añadido como una sal ferrosa, sobre todo sulfato de hierro (II):

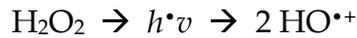


#### I.5.3.4 Procesos fotoquímicos

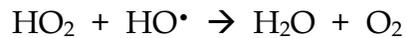
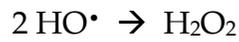
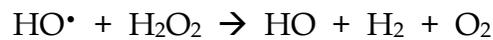
**Foto-Fenton:** La generación de radicales hidroxilos y la eficiencia de degradación de los contaminantes se ven favorecidas por la irradiación de luz ultravioleta en el proceso foto-Fenton (Mirzaei *et. al.*, 2017). El proceso foto-Fenton se basa en la producción de radicales hidroxilos por descomposición catalítica de peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) en medios ácidos bajo irradiación. En la reacción Foto-Fenton, los iones Fe<sup>3+</sup> producidos actúan como especies absorbentes de luz para generar otro hidroxilo basado en radicales:



**UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> peróxido de hidrógeno:** Implica la formación de radicales HO• por fotólisis del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y sus consiguientes reacciones de propagación. El mecanismo más comúnmente aceptado para la fotólisis del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es la ruptura homolítica del enlace O-O debida a la acción ultravioleta para formar dos radicales hidroxilos:



A continuación, el radical HO• puede reaccionar con el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dando lugar a la siguiente secuencia de reacciones:



Al mismo tiempo, al estar presente en el medio los contaminantes orgánicos, se inician reacciones con los diferentes radicales formados.

Dentro de las ventajas de la utilización de procesos de oxidación avanzada podemos mencionar los siguientes (Forero *et al.*, 2005):

- Transforma y destruyen químicamente el contaminante hasta la mineralización
- En general, no generan subproductos que requieran un posterior procesamiento
- Son útiles para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento, como el biológico
- Operan en rangos donde los sistemas convencionales no son factibles

## **I.6 Tratamientos aplicados a lixiviados**

Son variados los tratamientos que se aplican a lixiviados de rellenos sanitarios, clasificándose en tres grupos: transferencia de lixiviados, tratamientos biológicos y físico-químicos; los cuales son descritos a continuación (Renaou *et al.*, 2008; Nawaz, *et al.*, 2020, Abdulhussain *et al.*, 2009, Peng *et al.*, Hecham *et al.*, 2015):

**Transferencia de lixiviados.** Son tratamientos de bajo costo de operación y mantenimiento, sin embargo, la presencia de compuestos orgánicos poco biodegradables y metales pesados reduce la eficiencia de este tipo de tratamientos.

**Tratamiento combinado con aguas residuales.** Consiste en verter los lixiviados en la tubería del alcantarillado para ser transportados a la planta de tratamiento de aguas residuales. Puede resultar favorecedor el tratarlos si las condiciones así lo permiten.

**Recirculación.** Los lixiviados generados son vertidos en los residuos del mismo relleno sanitario. El principal objetivo es disminuir el volumen a través de la evaporación, así como aumentar el contenido de humedad en los residuos. Es uno de los métodos más utilizados en el tratamiento de lixiviados.

**Tratamientos biológicos:** Se llevan a cabo por microorganismos que degradan compuestos orgánicos a carbono y dióxido de carbono, lodos en condiciones aeróbicas y al biogás en condiciones anaeróbicas. Eficaces en la eliminación de materia orgánica y nitrogenada de lixiviados jóvenes cuando la relación DBO/DQO tiene un alto valor ( $>0.5$ ). Son tratamientos de operación simple y bajo costo de mantenimiento, dentro de las desventajas se encuentra la susceptibilidad de microorganismos a metales pesados, pH alto y toxicidad por amoníaco. Dentro de este grupo de tratamientos podemos encontrar las lagunas de aireación y la utilización de digestores para el tratamiento de los lixiviados.

**Tratamientos fisicoquímicos:** Se utilizan cuando la relación DBO/DQO es baja ( $< 0.1$ ) y los procesos biológicos son ineficientes. Útiles para la eliminación de

compuestos orgánicos volátiles, para la reducción de sólidos suspendidos, partículas coloidales, material flotante, color, y compuestos tóxicos. En el tratamiento de lixiviados se utilizan en adición en la línea de tratamiento (pretratamiento o última purificación) o para tratar un contaminante en específico (por ejemplo, amoníaco). Estos tratamientos requieren la adición de diferentes reactivos, lo que con incrementa el costo de los mismos.

**Precipitación química.** En el caso de lixiviados es utilizado como pretratamiento y en la eliminación de amoníaco-nitrógeno  $\text{NH}_3\text{-N}$ .

**Coagulación/floculación.** Utilizado comúnmente como pretratamiento, antes del tratamiento biológico o de osmosis inversa, o como paso final para eliminar materia orgánica no biodegradable. Requiere la utilización de diferentes compuestos (sales de hierro y aluminio) como coagulantes.

**Oxidación química.** Eficiente para la remoción de DQO, mediante la utilización de diferentes oxidantes como cloro, ozono, potasio, permanganato entre otros.

**Filtración por membranas.** Se utilizan para la separación de partículas, microorganismos, moléculas orgánicas y otros contaminantes finos. Dependiendo del tamaño del contaminante que se va a separar, se elige diferente proceso de membrana (microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y osmosis inversa).

Al existir una gran variedad de tratamientos, es importante tener en cuenta características como la edad del lixiviado, DBO, DQO, para la selección del tratamiento o los tratamientos más adecuados para utilizar de acuerdo con los parámetros de los lixiviados a tratar. En la tabla 8 se presenta una comparación de la eficacia de los tratamientos aplicados a lixiviados comparado con la edad del lixiviado (Abdulhussain, *et al.*, 2009).

Tabla 8.- Eficiencia de tratamientos de lixiviados *vs.* la edad del lixiviado

Tipo de tratamiento	Edad del lixiviado			Objetivo del tratamiento	Observaciones
	Joven	Intermedio	Viejo		
<b>TRANSFERENCIA</b>					
1.-Combinado con aguas residuales domésticas	Bueno	Regular	Baja	Eliminación sólidos en suspensión	Exceso de biomasa y nutrientes
2.- Recirculación	Bueno	Regular	Baja	Mejorar la calidad de los lixiviados estabilización	Menos costoso y de baja eficiencia
<b>BIOLÓGICOS</b>					
1.-Procesos aerobios	Bueno	Regular	Baja	Eliminación sólidos en suspensión	Se obstaculiza por compuestos refractarios Exceso de biomasa
2.- Procesos anaerobios	Bueno	Regular	Baja	Eliminación sólidos en suspensión	Se obstaculiza por compuestos refractarios Larga duración y generación de biogás
<b>FÍSICO/QUÍMICOS</b>					
1.-Coagulación/ Floculación	Baja	Regular	Regular	Metales pesados y sólidos en suspensión	Alta producción de lodos y posterior disposición
2.- Precipitación química	Baja	Regular	Baja	Metales pesados y NH <sub>3</sub> -N	Requiere eliminación adicional debido a la generación de lodos
3.-Adsorción	Baja	Regular	Buena	Compuestos orgánicos	La adsorción de GAC es costosa
4.- Oxidación	Baja	Regular	Regular	Compuestos orgánicos	O <sub>3</sub> residual
5.- Stripping	Baja	Regular	Regular	NH <sub>3</sub> -N	Requiere otros equipos para el control de la contaminación del aire
6.- Intercambio iónico	Bueno	Bueno	Bueno	Compuestos disueltos, cationes/ aniones	Se utiliza como paso de pulido después de los tratamientos biológicos Costo elevado
<b>FILTRACIÓN POR MEMBRANAS</b>					
1.- Microfiltración	Baja	--	--	Sólidos en suspensión	Utilizado después de la precipitación de metales
2.- Ultrafiltración	Baja	--	--	Compuestos de alto peso molecular	Costosa y limitada debido al ensuciamiento de la membrana
3.- Nanofiltración	Bueno	Bueno	Bueno	Sales de sulfato	Costosa, requiere menos presión que la osmosis inversa
4.- Osmosis inversa	Bueno	Bueno	Bueno	Compuestos orgánicos e inorgánicos	Se requiere un pretratamiento extenso y costoso antes de la RO

## **CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN**

Una de las principales problemáticas que se presenta en los rellenos sanitarios es la generación y manejo de lixiviados, los cuales surgen de los procesos de descomposición de los residuos. De acuerdo con la norma NOM-052-SEMARNAT-2005 en México, los lixiviados son catalogados como residuos peligrosos. Estos líquidos están compuestos por contaminantes orgánicos e inorgánicos, incluyendo ácidos húmicos, nitrógeno, amoníaco, sales inorgánicas y metales pesados; que de ser vertidas en el ambiente pueden causar contaminación de suelos, agua, aire y ser nocivos para los seres vivos. Algunos estudios (Gutiérrez, 2017; Chávez, 2011) indican que los lixiviados de rellenos sanitarios en México pueden presentar valores de pH entre 8- 8.5, y contienen metales pesados como cobre (Cu), níquel (Ni), mercurio (Hg) y arsénico (As). Los tratamientos de lixiviados más utilizados son la recirculación y la evaporación, sistemas fáciles de operar, pero limitados solo a la disminución de volumen. Sin embargo, dada las características de composición que presentan estos líquidos se deben analizar otro tipo de tratamientos que puedan remover los contaminantes presentes que permitan realizar un manejo óptimo de los mismos.

## **JUSTIFICACIÓN:**

Los procesos de oxidación avanzada (POA), son tecnologías aplicadas con éxito para el tratamiento de aguas residuales. Actualmente dadas las características de composición que presentan los lixiviados se han aplicado los POA para el tratamiento de estos líquidos generados en rellenos sanitarios, estos procesos son eficientes en la remoción de contaminantes que tratamientos convencionales no pueden remover. Por lo que la recopilación bibliográfica de información, así como el análisis y la evaluación de estos métodos, es importante para poder generar propuestas para el tratamiento de estos líquidos, considerando las condiciones de los rellenos sanitarios y composición de los lixiviados en México y ser considerados y aplicados en proyectos futuros.

## **CAPÍTULO III.- OBJETIVOS**

### **III.1 Objetivo general:**

Analizar la eficiencia de los procesos de oxidación en el tratamiento de lixiviados, a partir de una revisión bibliográfica con el fin de proponer un tratamiento viable para lixiviados de rellenos sanitarios en México.

### **III.2 Objetivos particulares:**

- Describir los procesos de oxidación aplicados a tratamientos
- Conocer las características de los Rellenos sanitarios en México
- Caracterizar los lixiviados de rellenos sanitarios de México
- Describir los procesos de oxidación que se aplican a los lixiviados de rellenos sanitarios
- Realizar una propuesta de los procesos de oxidación acordes a los parámetros de los lixiviados en México

## **CAPÍTULO IV.- PROPUESTA A IMPLEMENTAR**

El presente trabajo se desarrolló bajo la siguiente metodología:

### **1.- Búsqueda de información.**

Se llevó a cabo la búsqueda de información bibliográfica en diferentes medios. Para la búsqueda de información se utilizaron los buscadores Google Académico, Springer Link, Scielo y los repositorios de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Vallejo de Perú, Universidad Veracruzana, Instituto Tecnológico Nacional e Instituto Politécnico Nacional.

Los temas seleccionados para la investigación fueron los siguientes:

- Lixiviados generados en rellenos sanitarios
- Composición de lixiviados
- Impactos ambientales provocados por los lixiviados generados en rellenos sanitarios
- Tratamientos aplicados a lixiviados de rellenos sanitarios
- Procesos de oxidación avanzada

El rango de fechas seleccionados para la búsqueda de la información fue del 2000-2022.

### **2.- Análisis de la información.**

Una vez realizada la búsqueda de información se continuó con la organización de la información. Para la delimitación bibliográfica se consideraron los siguientes aspectos:

- Descripción del parámetro de los lixiviados (pH, DBO, DQO, metales pesados, SST, COT)

- Considerar solo aquellos tratamientos de oxidación avanzada en lixiviados de rellenos sanitarios

Para el manejo de la información se realizó una base de datos considerando los siguientes aspectos: año, autores, título del trabajo, palabras clave, tratamiento utilizado, país.

3.- En base a la información obtenida y analizada se realizó la caracterización de los lixiviados de los rellenos sanitarios en México, así como la propuesta para el tratamiento de lixiviados a través de procesos de oxidación; para la cual se tomaron en cuenta los siguientes factores:

- Características de los lixiviados
- Factibilidad de aplicación

## CAPÍTULO V.-PRINCIPALES HALLAZGOS

### V.1 Características de rellenos sanitarios en México

De acuerdo al diagnóstico básico (SEMARNAT, 2020) en México existen 2,203 sitios de disposición final, esta cifra incluye tiraderos a cielo abierto; tiraderos controlados y rellenos sanitarios. Tomando como referencia la clasificación que se señala en la NOM-083-SEMARNAT- 2003 del total de sitios 162 son considerados tipo A, 109 son sitios tipo B, 457 sitios son tipo C y 1,475 sitios son del tipo D. Estos lugares de disposición de residuos se localizan en 1,722 municipios del país, de todas las entidades federativas a excepción de la ciudad de México.

**Infraestructura.** La infraestructura con la que cuentan los SDF a nivel nacional es escasa. Podemos mencionar que solo el 8.62% de los sitios cuentan con báscula para pesar los residuos, 9.62% tienen infraestructura para la captación de biogás; 14.80% presentan geomembrana y 955 sitios tienen cerca perimetral. Referente a los lixiviados, 359 sitios presentan instalaciones para su captación y solo 91 de los 359 refieren infraestructura para el tratamiento de los mismos, sin embargo; no hay datos que garanticen que realmente se lleva a cabo su tratamiento. De manera general es evidente la carencia de infraestructura, resaltando que en 1053 sitios de disposición final (47.79%) no se cuenta con la infraestructura básica (tabla 9).

Tabla 9.- Infraestructura de los sitios de disposición final en México

Número de sitios	Características
190 (8.62%)	Cuentan con báscula para el pesaje de los residuos
359 (16.30%)	Cuentan con infraestructura para la captación de lixiviados y de estos <b>solo 91</b> cuentan con infraestructura para su tratamiento
213 (9.62%)	Cuentan con infraestructura para la captura de biogás
326 (14.80 %)	Cuentan con geomembrana para aislar residuos del suelo
955 (43.35%)	Cuentan con cerca perimetral
1053 (47.79%)	Ninguna de las anteriores

**Procesos operacionales.** En cuanto a la parte operacional se observa una situación similar a la infraestructura. Tan solo en 753 sitios (34.18%) se realiza el control de acceso, por otro lado, en 18.93% de los sitios se lleva a cabo el control de admisión de los residuos. Si hablamos de la compactación y recubrimiento de los residuos con tierra, esta actividad se cumple en 43.34% de los sitios; para el caso del monitoreo de aspectos de higiene y seguridad tan solo se efectúa en 260 sitios (11.80%). En 883 sitios (40%) no se realiza ninguna de las acciones antes mencionadas.

De acuerdo a los datos presentados anteriormente se observa que la disposición final de los RSU en México no garantiza el cuidado y la protección al ambiente, al tomar en cuenta que cerca del 50% de los sitios no cuentan con la infraestructura básica para el manejo de sus residuos sumando además a que alrededor del 40% de los sitios no llevan a cabo las operaciones esenciales con las que debería cumplir.

## **V.2 Características de lixiviados de rellenos sanitarios en México**

A pesar de que los lixiviados se encuentren catalogados como residuos peligrosos de acuerdo a la norma oficial mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 y que en la norma NOM-083-SEMARNAT-2003 se indique que en los rellenos sanitarios se deben de cuantificar los niveles de DBO, DQO<sub>5</sub>, metales pesados y pH, no se cuenta con un registro a nivel nacional que nos muestren los parámetros antes mencionados para los rellenos sanitarios en operación.

Son pocos los trabajos en la literatura que han analizado y reportado las características de los lixiviados en los rellenos sanitarios en México, en los cuales se registren parámetros como DBO, DQO, pH y metales pesados. En la revisión bibliográfica realizada en este trabajo, se documentaron los lixiviados de 14 sitios de disposición final, los cuales se ubican en 11 estados de la república mexicana (Ciudad de México, Quintana Roo, Chihuahua, Yucatán, Tabasco, Nuevo León, Estado de México, Guanajuato, Michoacán, Chiapas y Veracruz). En la tabla 10 se presentan los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica para lixiviados en México.

Tabla 10.- Características de lixiviados en Rellenos Sanitarios de México

DBO <sub>5</sub> mg/L	DQO mg/L	Ph	COT (mg/L)	Relación DBO <sub>5</sub> / DQO	SST (mg/L)	Metales pesados mg/L	"N" total	C. E. (ms/ cm)	Relleno sanitario	Tipo de lixiviado	Autor
--	--	6.17- 8.82	--	--	--	Pb (0.08-0.24) (mg/L-1) Ni (0.18-1.04) Cr (1.8- 2.63) Hg (0.000366-0.000818) Ag (0.01) Cd (0.0666) Ba (3.0) Se (0.002)	--	--	Ciudad de México Bordo poniente (cerrado)	---	Robles- Martínez <i>et al.</i> , 2011
66.6	1609	8.55	224	0.041	12.3	Hg (0.0047143) As (0.003163) Cu (0.2923) Ni (0.227)	--	22.8	Bacalar, Quintana Roo	Estabilizados "viejos"	Gutiérrez, 2017
1344	29040.13	8.04	--	0.05	480	Ca (159.67, 78.60, 93.20)	2702.50	46.10	Chihuahua	Fase generación de metano	Chávez, 2011
828	19515.95	8.14	--	0.04	130	Fe (5.09, 8.59, 11.28)	2022.47	37.7			
693	20932.78	8.16	--	0.03	320	Mn (1.01, 0.28, 0.23) Hg (18.46, 23.03, 29.97)** Se (2.36, 3.65, 5.29)** As (0.11, 0.29, 0.29) Cu (0.41, 0.09, 0.06) Zn (1.89, 0.56, 0.98) Ni (0.80, 0.44, 0.50) Cr (5.82, 1.97, 2.89) Ba (4.43, 2.17, 2.42) Al (11.43, 5.56, 9.44)	2102.18	41.10			
647	9080	8.57	2266	0.07	--	--	--	21.83	Mérida, Yucatán	Intermedio- viejos	Méndez <i>et al.</i> , 2010
142*	439*	6.8	--	0.32*	205*	--	185.92 mg/L-1	4200	Teapa, Tabasco	---	Laines <i>et al.</i> , 2008

15.6	--	8.1	--	--	425	Al (3830, 1630)**	--	11950	Linares,	Fermentación	León-Gómez
424	--	7.8	--	--	131	Si (41300, 46900)**		6820	Nuevo León	metano génica	<i>et al.</i> , 2015
						Cr (1600, 590)**					
						Mn (262, 420)**					
						Fe (20700, 9000)**					
						Zn (395, 160)**					
						As (40, 27)**					
						Ba (768, 690)**					
						Pb (19, 42)**					
1032	1084.6	8.5	--	--	-	Fe (15.7)	1792	--	Zinacantepec, Estado de México	Lixiviados viejos	Márquez- Benavides <i>et al.</i> , 2014
						Cu (0.008)					
						Ni (0.354)					
						Zn (0.38)					
						Pb (0.14)					
						Cr (0.468)					
						Hg (0.002)					
						As (1.89)					
2,034.4	42,000	8.1	--	--	-	Fe (45.8)	2240	--	San Francisco del Río Guanajuato (tiradero)	---	Márquez- Benavides <i>et al.</i> , 2014
						Cu (1.26)					
						Ni (0.85)					
						Zn (0.49)					
						Pb (0.91)					
						Cr (31.1)					
						Hg (0.008)					
						As (10.9)					
1098	5,346	8.3	2857	--	-	Fe (64.05)	1419	17.9	Mérida, Yucatán	Mezcla de lixiviados producidos durante la fermentación ácida y fase metano génica	Méndez- Novillo <i>et al.</i> , 2019
						Mn (0.81)					
						Zn (3.20)					
						Na (11,850)					
						K (10,252)					
						Cd (0.0069)					
						Pb (0.236)					
						Cr (6.98)					
						Cu (0.214)					
						Ni (0.349)					
						Ag (0039)					
861	10,193	8.31	4,950	0.084	360	--	2,113	--	Mérida, Yucatán	Características mixtas (recirculación)	Pedro- Cedillo <i>et al.</i> , 2015

220	4295	8.16	1488	0.05	--	--	10.42	Morelia, Michoacán (tiradero)	Estabilizados "viejos"	Cerda, 2007
520	3159.3	7.35	--	0.16	--	--	15.7	Chiapas	Lixiviados maduros	Ubaldo <i>et. al.</i> , 2014
915	10632	8	--	0.08	1260	--	1152.5	Xalapa, Veracruz (tiradero)	Fase metano génica	Galicia, 2006
138	16727	8.5	--	0.008	330	--	1924			
4808	9184	7.75	--	0.52	351	--	31.1	Tlalnepantla	Biodegradable	Rosales, 2014
9180	15350	8.3	--	0.59	388	--	32.2	Edo. México		
1375	7712	8.27	--	0.17	--	--	6.22	Medellín, Veracruz	Intermedios cercanos a la etapa madura	Hernández, 2021
2025	3946	8.23	--	0.51	--	--	5	(relleno sanitario)		
723	4248	8.16	--	0.17	--	--	10.93			
13800	37000	8	--	0.37	1036	--	5292	Santa Fe, Ciudad de México (cerrado)	---	González y Valdivia, 2000
150	1408	8.5	--	0.1	33	Al (0.0624) Ba (0.23860) Cr (0.16340) Hg (0.000992) Ni (0.22290) Cu (0.05850)	--	Etapa III, Bordo poniente (Clausurado)	Lixiviado "viejo"	Jojoa, 2016
35-37	2126-668	8.73-8.13	--	0.016-0.05	--	--	2.82-1.27	Bordo	Lixiviados	Alcantar, 2015
79-202	1966-2441	8.01-8.10	--	0.04-0.08	--	--	3.89-4.16	poniente	estabilizados	
76-109	2082-2786	7.79-7.83	--	0.03-0.03	--	--	3.85-3.64	(Etapas I, II, III, IV)	"viejos"	
250-370	7296-7838	8.08-8.03	--	0.03-0.04	--	--	4.96-4.70			
10-20	980-4580	8.5-9.5	--	0.01-0.004	--	Cr (0.863-1.13) Fe (4.35-8.15) Pb (0.5) Ni (1.09) Zn (0.55-1.40)	12000- 40000	Bordo poniente III	Lixiviados estabilizados "viejos"	Monje, 2004

Fuente: Elaboración propia,

\*mg/L-1; \*\* ug/L; -- sin datos, ST: sólidos totales

**pH.** El parámetro reportado en todos los trabajos fue el pH. En esta revisión se observó que los lixiviados se encuentran en un rango que va de los 6.17 a 9.5, solo para el caso del relleno sanitario Bordo poniente (Monje, 2004) este valor se encuentra por encima de los límites permisibles (pH de 6-9, ANEXO 1) de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas de aguas residuales en cuerpos receptores. El valor del pH varía de acuerdo a la etapa en la que se encuentre el relleno sanitario, siguiendo como referencia la tabla 3 (página 9), los rangos de pH en estos trabajos nos indican que proceden de rellenos sanitarios viejos y pueden ser categorizados como estabilizados (maduros).

**DBO<sub>5</sub>.** Los lixiviados analizados presentan concentraciones de DBO<sub>5</sub> que van de los 15.5 a los 13,800 mg/L. La literatura nos indica que para rellenos sanitarios jóvenes el rango de DBO<sub>5</sub> oscila entre 2,000-30,000 mg/L, mientras que en rellenos sanitarios viejos el parámetro se encuentra en rangos de 100-200 mg/L (tabla 3, página 9). De acuerdo a estos parámetros se puede mencionar que en 9 sitios los lixiviados presentan poca presencia de material biodegradable (lixiviados viejos), en tres sitios (ubicados en Guanajuato y dos en Veracruz) las concentraciones oscilan en una etapa intermedia cercana a la maduración. Solo en el relleno sanitario de Tlalnepantla los lixiviados contienen alta carga de material biodegradable (4,808-9,180) rango que los cataloga como lixiviados jóvenes.

**DQO.** En relación a la DQO, los lixiviados analizados presentan un alto contenido de materia orgánica, se reportan rangos desde los 439 a 42,100 mg/L, cantidades que rebasan los límites máximos permisibles (60-210 mg/L) NOM-001-SEMARNAT-2021. En referencia a la Tabla 3, los lixiviados de rellenos sanitarios jóvenes oscilan entre 3,000-60,000 mg/L para el parámetro DQO, considerándose lixiviados jóvenes aquellos que presentan una DQO mayor a 10,000 mg/L (Tabla 4, página 10). En el presente análisis se puede observar que de acuerdo a la DQO reportada, los lixiviados de cuatro sitios Quintana Roo, Zinacantepec, Chiapas y Bordo poniente (Monje 2004, Alcantar 2015 y Jojoa 2016) se encuentran dentro del rango de

lixiviados viejos. En tres sitios Yucatán, Morelia y Medellín en Veracruz, los lixiviados pueden ser catalogados como intermedios, cercanos a edad madura, encontrándose en etapa ácida o de generación de metano. Para el caso de los rellenos sanitarios de Chihuahua y Xalapa, los valores de DQO reportados (19,000-29,000 y 10,693-16727 mg/L respectivamente) son característicos de lixiviados jóvenes, sin embargo, los autores manifiestan que se encuentran en fase metano génica. Para el caso del relleno de Tlalnepantla los lixiviados corresponden a “lixiviados jóvenes”, lo mismo que para los rellenos de Guanajuato y Santa Fe, donde se reportan DQO elevadas, no obstante; las condiciones de estos dos sitios (tiradero y cierre del mismo) podrían influir en las concentraciones reportadas. Para el relleno sanitario de Nuevo León no se reporta este parámetro.

**Relación DBO<sub>5</sub>/DQO.** Nos proporciona el grado de biodegradabilidad del lixiviado. En nueve trabajos se reporta la relación DBO<sub>5</sub>/DQO en concentraciones menores a 0.1 mg/L, lo que nos indica una baja biodegradabilidad; característica de lixiviados viejos (Tabla 4, página 10). En cuatro sitios, Chiapas, Medellín en Veracruz, Santa Fe y Yucatán (Méndez-Novelo *et al.*, 2019) los rangos oscilan entre 0.16-0.51 mg/L, es decir presentan biodegradabilidad media “lixiviado intermedio”; mientras que el relleno sanitario de Tlalnepantla (0.52, 0.59) y Zinacantepec (0.98 mg/L) pueden ser catalogados como lixiviados jóvenes con alta biodegradabilidad.

**Nitrógeno total.** De acuerdo con la norma NOM-001-SEMARNAT-2021 los niveles máximos permisibles para el nitrógeno total van de 15 a 35 mg/L. En el presente trabajo se observó que los lixiviados de siete rellenos sanitarios, presentan concentraciones de 185 a 5,292 mg/L, las cuales se encuentran por encima de lo permitido en la norma. En el relleno sanitario de Tlalnepantla (Rosales, 2014) las concentraciones de nitrógeno se encuentran dentro de la norma (31.2, 31.2 mg/L).

**Sólidos suspendidos totales (SST).** El parámetro de sólidos suspendidos totales fue reportado en nueve rellenos sanitarios, siendo el valor mínimo 12.3 mg/L y el máximo 1260 mg/L. La norma nos indica que el máximo permisible para (SST) va

en un rango de 20 a 120 mg/L. En los datos presentados en la tabla 10, podemos observar que seis rellenos sanitarios rebasan los máximos permisibles (Chihuahua, Nuevo León, Yucatán (Pedro-Cedillo *et al.*, 2015), Xalapa, Tlalnepantla y Santa Fe). En rellenos sanitarios jóvenes las concentraciones típicas de SST son de 500 mg/L mientras que en rellenos sanitarios maduros el rango oscila entre 100-400 mg/L (tabla 3, página 9), de acuerdo a los resultados obtenidos podemos inferir que los lixiviados estudiados pueden provenir de rellenos sanitarios maduros, solo en el caso de Xalapa y Santa Fe estos rangos son característicos de rellenos sanitarios jóvenes.

**Metales pesados.** La presencia de metales pesados se reportó en siete rellenos sanitarios Cd. Mx., Quintana Roo, Chihuahua, Edo. De México, Nuevo León, Yucatán y Guanajuato. Entre los metales pesados reportados se encuentran el arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn), siendo arsénico, cromo y níquel los tres con mayor frecuencia de reporte.

Sobre la concentración de los metales en los lixiviados podemos mencionar que la mayoría de ellos no sobrepasan los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021. Para el caso del arsénico (As) los lixiviados de dos rellenos sanitarios el localizado en Toluca (1.89 mg/L) y Guanajuato (10.9 mg/L) sobrepasan por mucho el máximo permisible que es de 0.04 mg/L para este metal. Para el caso del cromo (Cr) tres rellenos sanitarios Bordo poniente (1.8-2.63 mg/L) Chihuahua (1.97-5.82 mg/L) y Guanajuato (31.1 mg/L) registran concentraciones por encima de lo permitido (1-1.25 mg/L). En cuanto al metal mercurio (Hg), en el sanitario ubicado en Chihuahua (0.018-0.02 mg/L) se registran concentraciones ligeramente por encima de lo permitido en la Norma (0.01 mg/L).

### V. 3 POA aplicados a lixiviados en rellenos sanitarios

En la literatura existen trabajos en los cuales se han aplicado tratamientos a lixiviados que provienen de rellenos sanitarios, entre los cuales destacan los procesos de oxidación avanzada. Estos trabajos se han desarrollado a nivel laboratorio y plantas piloto. Dentro de los POA utilizados se encuentran la Fotocatálisis heterogénea ( $\text{TiO}_2$ ) /UV, Ozonización peróxido de hidrógeno UV/ $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ , Fenton ( $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ ), foto Fenton (UV/ $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ ) y UV peróxido de hidrógeno (UV/ $\text{H}_2\text{O}_2$ ), ya sea solos o en combinación en trenes de tratamientos, se ha demostrado que los procesos de oxidación pueden ser utilizados para el tratamiento de lixiviados tabla 11.

A pesar de que los procesos utilizados son variados, todos evalúan la disminución en la concentración de materia orgánica en base al parámetro DQO. Para el caso de los trabajos analizados, los procesos utilizados presentan porcentajes de disminución que van del 17.3% al 99% en cuanto a DQO. Estas variaciones en la eficiencia de disminución están relacionadas a factores como las características fisicoquímicas del lixiviado a tratar, el proceso utilizado, las concentraciones en los reactivos utilizados y el tiempo de duración del tratamiento. Todos estos parámetros son evaluados en cada uno de los trabajos y las mejores condiciones de aplicación se describen en la tabla 11.

Los procesos con mayor eficacia para la disminución en la concentración de DQO fueron foto Fenton ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{DQO} = 2$  y  $\text{Fe}^{2+}/\text{DQO} = 0.33$ , 60 minutos, pH 3) en donde se redujo el 84% de la DQO y 77% de la COT (Primo, 2008). Así como la fotocatalisis heterogénea (pH: 3.18, 0.05 mg/L de  $\text{TiO}_2$ /UV solar) en donde se disminuyó el 94% de la concentración de DQO del lixiviado tratado (Buzón y Ponce, 2014).

En los trabajos analizados, también se observó que los lixiviados de rellenos sanitarios pueden ser tratados mediante la combinación de diversos tratamientos (físicos, químicos y biológicos) los cuales son aplicados comúnmente en secuencias. Por ejemplo, Chávez, 2011 combinó una serie de tratamientos la cual consistió en

una coagulación-floculación, sedimentación, adsorción con carbono orgánico, oxidación Fenton y membranas de osmosis inversas mediante la cual se removió el 92% de DQO, 68% DBO<sub>5</sub> y 63% del nitrógeno en lixiviados maduros. Por su parte Méndez-Novelo *et. al.*, 2019, realizaron tratamiento de lixiviados mediante la secuencia de procesos Fenton/filtración/adsorción; logrando el 99 % de remoción de DQO y 95.7% en color, atribuyendo el 90.8% (remoción DQO) y 95.7 % (remoción color) al proceso Fenton.

De los tratamientos reportados los procesos Fenton y foto Fenton fueron los más utilizados. Se puede observar que las concentraciones de Fe<sup>2+</sup> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> utilizadas fueron diferentes para cada caso, este factor es importante ya que las diferentes dosis influirán en los costos operativos y la eficiencia de la eliminación de los compuestos orgánicos en los procesos (Otero, 2012). De acuerdo a los datos analizados en dos casos se presentaron remociones de DQO bajas 23% y 33%, comparado con el resto de casos por Fenton y foto Fenton en donde los porcentajes de remoción de DQO oscilaron entre el 72-84% (Tabla 11).

Tabla 11.- Tratamientos de oxidación en lixiviados de rellenos sanitarios

AUTOR	CARACTERÍSTICA LIXIVIADOS (mg/L)	TRATAMIENTO	RESULTADOS	LUGAR
Ortiz 2018	pH: 8.45 DQO: 12627 DBO <sub>5</sub> : 3250 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 1437	<b>Fotocatálisis Dióxido de Titanio (TiO<sub>2</sub>)/UV</b> 1.- Lecho fijo: 1 g de TiO <sub>2</sub> , Tres lámparas UV (0.6W) , pH: 8  2.-En suspensión: 3 g de TiO <sub>2</sub> , Tres lámparas UV (0.6W), pH: 8	1.-Remoción del 63% DQO, 14% DBO <sub>5</sub> y 38% de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  2.- Remoción del 71% DQO 55% DBO <sub>5</sub> y 97% de	ECUADOR
Gallegos-Alcaino <i>et al.</i> , 2021	pH: 8.7 Amonio: 1010 Conductividad: 36.2 ST: 836 Color:	<b>1.- UV/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b> Radiación constante, 3g O <sub>3</sub> /h, 0.67 g/L H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 140 minutos  <b>2.-UV/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>-2</sup></b> Radiación constante, 3g O <sub>3</sub> /h, 0.67 g/L H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , 1mM de S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> <sup>-2</sup> 250 minutos	1.- Reducción del 17.3% del DQO y 56% de color  2.- Reducción del 28.9% de DQO y 76.8% color	CHILE

Barrantes 2020	pH: 8.11 DQO: 7849.6 mg/L O <sub>2</sub> Turbiedad: 792 STD:11670 SST: 8200 C. E.: 23.25 ms/cm Lixiviado intermedio	<b>Fenton</b> pH:4 Dosis: (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>2+</sup> ) de 6 20 minutos 60 minutos	-En tiempo 20 minutos: 73.29% remoción de DQO  -En 60 minutos: 89% de remoción del color 76.35 de remoción de la turbiedad	PERÚ
Guevara 2019	pH: 8.5 DQO: 6100 DBO <sub>5</sub> : 27000 TDS: 8.1 g/L Turbidez: 1820 Color: 31100	<b>Fenton</b> pH: 3 Ácido sulfúrico (97% w/w) Dosis: 400 mg/L H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y 1000 mg/L Fe <sup>2+</sup> 120 minutos	-Remoción de: DQO: 73% DBO <sub>5</sub> : 85% TDS: 66% Turbidez: 91% Color: 87%	ECUADOR
López de Morais y Peralta 2005	pH: 8.4 DQO: 5200 DBO: 720 Biodegradabilidad (DBQ/DQO): <0.13 COT: 1058  Relleno sanitario maduro Lixiviados viejos	<b>1.- Foto Fenton Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV</b> Dosis: 2000 mg L <sup>-1</sup> de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y 10 mg L <sup>-1</sup> Fe <sup>2+</sup> Tiempo: 60 minutos pH: 2.8  <b>2.- H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV</b> Dosis: 3000 mg L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1.-Reducción de 57.5% DQO Remoción de 89.9% COT Biodegradabilidad aumentó: 0.42  2.- Remoción de 55.5% DQO Remoción de 97.2% COT Biodegradabilidad aumentó: 0.37	BRASIL Para aumentar biodegrada bilidad
Otero 2012	pH: 7.3 DQO: 9600 SDT: 4.68 Color: 100	<b>Fenton</b> pH: 3 Dosis: 50 mg/L de Fe <sup>2+</sup> , 200 mg de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Tiempo: 120 minutos	Remoción del 33% de DQO Mejora en color y olor	COLOMBIA
Primo 2008	pH: 7.49-9.35 DBO: 420-1500 DQO: 2232-4434 DBO/DQO: 0.14-.038 COT: 630-2782 Color marrón-negro Concentración de amoníaco y cloruros	<b>1.- Fenton Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b> Fe <sup>2+</sup> /DQO =28, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /DQO = 1.70 60 minutos pH 3 <b>2.- Foto Fenton</b> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /DQO = 2 y Fe <sup>2+</sup> /DQO = 0.33 60 minutos pH 3	1.-Reducción DQO de 76% Reducción COT de 65%  2.- Reducción DQO de 84% Reducción COT de 77%	ESPAÑA
Pérez <i>et al.</i> , 2017	pH: 7.7 DQO: 2000 Biodegradabilidad: 0.1 Nitrógeno amoniacal: 1000 Cloruros: 1500 DBO5: 120  Lixiviado maduro	<b>1.- Fenton (Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)</b> , intensificado con la integración de una etapa de ultrafiltración con membranas sumergidas. Tiempo dos horas, 1 g/L Fe <sup>2+</sup> , relación másica H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /DQO = 4	1.- Reducción del 80% de DQO Mejora en la biodegradabilidad	ESPAÑA Planta piloto en relleno sanitario
Cortez <i>et al.</i> , 2010	pH: 3.5 DBO <sub>5</sub> : 10 DQO: 743 COD: 284	<b>Ozonización/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b> Tiempo 60 minutos Concentraciones: 112 mg O <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> y 600 mL <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> pH: 7	Disminución de: 63% de DQO 53% del COT 42% del contenido aromático Aumento d biodegradabilidad de 0.1 a 0.17	PORTUGAL
Buzón y Ponce, 2014	1.- pH: 7.1 DQO: 2179 SST: 12.68 C.E.: 669.8 ms/cm	<b>1.- Foto Fenton</b> pH: 3.5	1.- Disminución del 23% DQO	COLOMBIA

	2.- pH: 7.29 DQO: 683.2 SST: 12.52 C.E.: 19.34 ms/cm	Dosis: 1500 mg/L de FeSO <sub>4</sub> y 3 mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> UV solar	2.- Disminución del 94% de DQO	
		<b>2.- Fotocatálisis heterogénea</b> <b>pH: 3.18</b> <b>Dosis: 0.05 mg/L de TiO<sub>2</sub></b> <b>UV solar</b>		
Méndez <i>et al.</i> , 2010	pH: 8.57 DBO <sub>5</sub> : 647 DQO: 9080 COT: 2266	<b>Fenton</b> Tiempo de contacto: 20 min. Dosis: 600 mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y 1.0 mg/L Fe <sup>2+</sup>	Remoción del 72% de DQO Remoción del 68% de COT pH=4	MÉXICO
Chávez, 2011	pH: 8.16 DBO <sub>5</sub> : 693 DQO: 20932.78 NT: 2102.18 ST: 35.71 STD: 35.39	<b>Tren de tratamientos</b> a) Coagulación/floculación/sedimentación mediante coagulante inorgánico b) Adsorción con carbono activado c) Oxidación química mediante reactivo Fenton d) Membranas de osmosis inversa	Remoción al final del tren de tratamientos: 92% de DQO 68% de DBO <sub>5</sub> 63% de Nitrógeno Total 43% de Sólidos totales 45% de Sólidos totales disueltos	MÉXICO
Cerda, 2007	pH: 8.16 DQO: 4295 DBO <sub>5</sub> : 220 COT: 1488 ST: 7519 SVT: C.E.: 1042 ms/cm Lixiviados viejos	<b>Foto Fenton</b> pH: 3 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 4N Relación DQO: H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> de 1 g de DQO= 2.125 g de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y la relación molar Fe II: H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> de 1:25 (6.76x10 <sup>-3</sup> M Fe (II): 0.169 M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) Tiempo: 19 horas exposición a UV solar	Remoción de: 73% DQO 13% DBO <sub>5</sub> 18% SVT 83% COT	MEXICO
Méndez- Novelo, <i>et. al.</i> , 2019	pH: 8.57 BOD <sub>5</sub> : 647 DQO: 9080 COT: 2266 DBO/DQO: 0.071	<b>Fenton/filtración/Adsorción</b>  pH= 4 Tiempo 60 minutos Fe <sup>2+</sup> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 0.6 COD/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 9 Papel de filtro 4 µm de poro Columna llena con carbón activado granular macro poroso	Remoción después del tren de tratamientos: -99% de remoción de DQO, donde 90.8% fue por proceso Fenton/filtración y 9.1% por adsorción. -100% remoción del color donde 95.7 de remoción del color fue por proceso Fenton/filtración y 4.3% por adsorción  Biodegradabilidad aumentó a 0.727	MÉXICO

#### V.4 Propuesta de tratamiento para lixiviados de rellenos sanitarios en México

En base a las características de los lixiviados de diversos sitios de disposición final reportados para México podemos mencionar que solo en un caso los lixiviados presentan las características para poder ser tratados mediante métodos biológicos. En la mayoría de los trabajos, los lixiviados se encuentran en etapas cercanas a la estabilización (generación de metano) o son lixiviados estabilizados “viejos”, presentan un alto contenido de materia orgánica no biodegradable, acorde a que los sitios de disposición final del cual han sido muestreados son considerados también como sitios “viejos” con más de 10 años de operación o han sido clausurados.

Debido a las características de los lixiviados anteriormente descritos (tabla 10), es evidente que los métodos convencionales (recirculación, laguna de evaporación y tratamientos biológicos) no serían eficaces para el tratamiento de esos lixiviados, dentro de las alternativas que pueden ser utilizadas se encuentran los procesos de oxidación avanzada los cuales han mostrado una alta efectividad a nivel laboratorio para el tratamiento de lixiviados (tabla 11).

En base a la revisión bibliográfica realizada el tratamiento más utilizado en diversos países es el Fenton y Foto Fenton, incluso en México se reportan algunos trabajos donde han sido utilizados con éxito. Por lo que podría ser un proceso para el tratamiento de lixiviados acorde a las características analizadas anteriormente. En la tabla 12, se presenta una comparación de los parámetros de los lixiviados en México y aquellos que utilizaron proceso Fenton/foto Fenton para su tratamiento.

Tabla 12.- Comparación de parámetros de lixiviados en México y los utilizados en procesos Fenton y foto Fenton

PARÁMETRO	Fenton/foto Fenton	México
Ph	7.1-9.35 (ajuste a 2.8 - 4)	6.17-9.5
DQO	420-20932	439-42100
DBO	10-27000	15.5-13800

Si se comparan los parámetros de los trabajos analizados podemos observar que el pH de los lixiviados en México oscila entre 6.17-9.5, sin embargo, en el proceso Fenton foto/Fenton este debe ser llevado a condiciones ácidas, por lo que invariablemente deberá ser ajustado. En cuanto a los rangos de DBO, los lixiviados en México se encuentran dentro de lo reportado en otros trabajos. Para el caso de la DQO, se encuentran dentro del rango, sin embargo, en casos específicos estos superan el rango reportado en otros trabajos, por lo que se deberá analizar la utilización de una secuencia de tratamientos como lo realizan diversos autores.

De manera general, los lixiviados analizados si presentan características similares a las utilizadas en estudios por lo que los procesos Fenton y Foto Fenton podrían ser un recurso para el tratamiento de lixiviados en México a nivel laboratorio.

Al momento de la selección del tratamiento, se debe considerar también el costo operacional de los mismos, ya que es fundamental en el momento de la implementación. Estos costos varían de acuerdo al reactivo y dosis a utilizar, tiempo de reacción, utilización de energía, así como de la infraestructura que se necesite para la operación. Por ejemplo, Cortez *et al.*, 2011, realizaron un análisis económico aproximado de los costos para el proceso Fenton y Ozonización, considerando solo los reactivos y la energía requerida; concluyendo que el proceso Fenton ( $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ ) implica un costo operacional de 8.2 € ( $\text{m}^{-3} \text{g}^{-1}$  de DQO eliminado), mientras que la ozonización ( $\text{O}_3$ ) varia de 101-36.3 € ( $\text{m}^{-3} \text{g}^{-1}$  de DQO eliminado) dependiendo del pH y de la combinación con  $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$  cuyo costo oscila de 41.5-25.6 € ( $\text{m}^{-3} \text{g}^{-1}$  de DQO eliminado) resaltando que el proceso Fenton ofrece el menor costo operativo para los lixiviados tratados (ANEXO 2). Miralles-Cuevas *et al.*, 2016, reportan los costos de los reactivos químicos de grado industrial utilizados en los procesos Foto-Fenton y Ozonización, como parte de un tren de tratamientos de aguas residuales:

- $\text{H}_2\text{O}_2$  solución 33% (w/v): 0.45 €/L
- $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ : 0.71 €/kg
- $\text{H}_2\text{SO}_4$  (98% w/v): 0.10 €/L

- Energía eléctrica: 0.1 €/kwh
- Ozono (O<sub>3</sub>) producido (electricidad 20 w y efluente 100 L/h): 23.1 €/kg

Los mismos autores hacen referencia que en el caso de la Ozonización se debe tener en cuenta el costo del reactor, ya que es lo que mayor gasto implica; mientras que para el proceso Fenton se deben considerar los costos de los colectores, instrumentación y equipos auxiliares necesarios para la instalación.

Por otro lado, Morales 2000; analiza los costos de operación para el tratamiento de lixiviados utilizando como agente oxidante el peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), estimando un costo total de 35,855 dólares al año, de los cuales 3,160 dólares son considerados sólo para el agente oxidante; el resto incluye gastos de mantenimiento, operación, monitoreo, jornales de trabajo y gastos generales. Asimismo, presenta los gastos de oxidación por ozonización, tecnología más costosa considerando que debe instalarse el equipo adecuado. Tan sólo el costo de la generación de ozono, incluida la construcción y contactor suman 539,202.42 dólares sin contar los gastos adicionales anuales en el proceso (ANEXO 2).

Los datos mencionados anteriormente son un panorama general de los registros de la literatura, si bien tienden a presentar un mismo patrón, no podemos dar por hecho que todos los lixiviados de los sitios en México presentarán esas características, por lo que es necesario conocer a través de análisis de parámetros fisicoquímicos el estado actual y composición de los lixiviados que serán tratados en cada caso. Adicionalmente es necesario analizar los costos económicos para su implementación, así como de los costos de mantenimiento y operación, para el éxito del tratamiento a implementar.

## VI.- CONCLUSIONES

- La infraestructura con la que cuentan los sitios de disposición final en México es escasa, en el 50 % de los casos no se realizan operaciones ni cuentan con infraestructura básica, por lo que es posible que los sitios de disposición final sean lugares potenciales de contaminación al ambiente.
- De acuerdo a los datos obtenidos, los lixiviados reportados en la literatura provienen de rellenos sanitarios denominados “viejos” es decir con más de 10 años de operación, en algunos casos los sitios ya han sido clausurados.
- Los parámetros analizados para la caracterización de los lixiviados en México, nos indican que existe un gran porcentaje de lixiviados que se encuentran en estado estabilizado “viejos” o se encuentran en fases cercanas a su estabilización.
- Las características de los lixiviados de los rellenos sanitarios en México nos indican que estos no pueden ser tratados por medios biológicos.
- El proceso Fenton y Foto Fenton ha sido el proceso de oxidación más utilizado para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios en diversas regiones del mundo.
- En base a las características de los lixiviados analizados se sugiere que el proceso Fenton/foto Fenton solo en combinación de tratamientos podría ser efectivo para el tratamiento de lixiviados en México.

## **PERSPECTIVA**

Es evidente que el tema de lixiviados generados en rellenos sanitarios en México debe ser tratado de manera urgente. En el presente trabajo se abordó la descripción de las características de los lixiviados en rellenos sanitarios en México, sin embargo, se pudo observar que la información respecto al tema es escasa. No se reportaron trabajos en sitios de disposición final en el estado de Morelos, por lo que futuras investigaciones podrían estar encaminadas a la caracterización de los lixiviados que son generados en rellenos sanitarios en el estado de Morelos, así como a la propuesta de tratamientos de los mismos.

## REFERENCIAS

- Abdulhussain, A. A., Guo, J., Liu, Z. P., Pan, Y. Y., Wisaam, S. A. (2009). Journal of Applied Sciences Research, 5 (5), 534-545.
- Abedin, A. y Jahiruddin, M. (2015). Waste generation and management in Bangladesh: An overview. Asian Journal of Medical and Biological Research, 1 (1), 114-120.
- Alcántar, N. R. F. (2015). Evolución de las características fisicoquímicas del lixiviado generado en el Relleno Sanitario Bordo Poniente. Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Tesis Ingeniería. 122 pp. Cuautitlán Izcalli, Edo de México.
- Amasuomo, E. y Baird, J. (2016). The Concept of Waste and Waste Management. Journal of Management and Sustainability, 6 (4), 88-96.
- Arroyavé, R. J. A., Garcés, G. L. F. (2011). Evaluación de la degradación del pesticida Mertect empleando procesos avanzados de oxidación (POA). Producción + Limpia, 6 (2), 9-18.
- Barrantes, S. N. F. (2020). Remoción de parámetros fisicoquímicos del lixiviado del botadero controlado "La Pushura", mediante procesos de oxidación avanzada, Jaén, Cajamarca. Tesis Ingeniería. Universidad Nacional de Jaén. Jaén, Perú. 67 pp.
- Baun, D.L., Chistensen T. H. (2004). Speciation of heavy metals in landfill leachate: a review. Waste Management & Research, 22, 2-23.
- Bernache, P. G. (2012). Riesgo de contaminación por disposición final de residuos. Un estudio de la región centro occidente de México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 28 (2), 97-105.
- Buzón, H. K. F., Ponce, A. A. C. (2014). Comparación de la aplicación de dos procesos de oxidación avanzada: foto-Fenton y fotocatalisis heterogénea en la

- remoción de DQO de lixiviado maduro del relleno sanitario el Henequén. Universidad de la Costa CUC. Barranquilla, Colombia. 88 pp.
- Cerda, S. I. (2007). Aplicación de Foto- Fenton a lixiviados de rellenos sanitarios. Tesis Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. 116 pp.
- Chávez, M. W. R. (2011). Tratamiento de Lixiviados generados en el relleno sanitario de la Ciudad de Chihuahua, México. Tesis de Maestría. Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados. Chihuahua, Chihuahua, 102 pp.
- Cortez S., Teixeira P., Oliveira R. y Mota M. 2010. Ozonation as polishing treatment of mature landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*. 182, 730-734.
- Cortez, S., Teixeira, P., Oliveira R. y Mota, M. (2011). Evaluation of Fenton and ozone-based advanced oxidation processes as mature landfill leachate pre-treatments. *Jornal of Enviromental Management*. 92, 749-755.
- Downmore, M., Shepherd, M., Andrew, M., Barbara, N. y Jambwa, D. (2011). Municipality solidwaste (MSW) management challenges of chinhoyi town in zimbabwe: opportunities of waste reduction and recycling. *Journal of Sustainable Development in Africa*, 13 (2), 168-180.
- Doménech, X., Jardim, W., Litter, M. (2004). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. Pp 3-25. En: *Eliminación de contaminantes por Fotocatálisis Heterogenea*, editorial Blesa. Buenos Aires, Argentina.
- Espinosa, L. M. C., López, M., Pellón, A., Robert, M., Díaz, S., González, A., Rodríguez, N., Fernández, A. (2010). Análisis del comportamiento de los lixiviados generados en un vertedero de residuos sólidos municipales de la ciudad de la Habana. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 26 (4), 313-325.

- Forero, J. E., Ortiz, O. P., Ríos, F. (2005). Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. *CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3 (1), 97-109.
- Galicia, S. M. A. (2006). Evaluación del proceso Foto-Fenton como proceso alternativo de tratamiento de los lixiviados del tiradero de basura el "atorón" de Xalapa, Veracruz. Tesis Maestría. Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz. 123 pp.
- Gallegos-Alcaíno, A., Poblete, R., Maureira, H., Felipe, F. J. A. (2021). Evaluación de la factibilidad técnica de un sistema de tratamiento de líquidos percolados del relleno sanitario el Panul basado en procesos de oxidación avanzada y adsorción con zeolita. 4to Congreso Sul-Americano de Residuos Sólidos e Sustentabilidad. Instituto Brasileiro de Estudios Ambientais. 1-11.
- Garriz, A., Chamizo, J. A. (2001). "Tu y la química". Ed. Prentice Hall, México, 2001. Pp 178-183, 626-628.
- González, S., Valdivia C. (2000). Tratamiento de prados de la montaña en un sistema de lodos activados. En XII. Congreso Nacional 2000 (Modelos y técnicas analíticas), Tomo II. México.
- Guevara, V. M. A. (2019). "Construcción de un prototipo Fenton coadyuvante de tratamientos biológicos para lixiviados en el relleno sanitario Porlón". Tesis Ingeniería. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador. 75 pp.
- Gutiérrez, L. M. A. (2017). Tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Bacalar, Quintana Roo, mediante coagulación-floculación y foto-fenton. Tesis de Ingeniería. Universidad de Quintana Roo, División de Ciencias e Ingeniería. Chetumal, Quintana Roo, 88 pp.

- Harir, A. I., Kasim, R. y Ishiyaku, B. (2015). Exploring the Resource Recovery Potentials of Municipal Solid Waste: A review of solid wastes composting in Developing Countries. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5 (4), 1-8.
- Hecham, O., Sohrab, R. (2015). Treatment of landfill waste, leachate and landfill gas: A review. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 1-18.
- Hernández, T. G. (2020). Estimación del impacto ambiental de los lixiviados y biogases generados en el tiradero a cielo abierto de Zacatepec Morelos. Tesis licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Jojutla, Morelos, 85 pp.
- Hernández, V. C. A. (2021). Evaluación de la fitorremediación de lixiviados de un relleno sanitario utilizando *Pistia stratiotes*. Tesis Maestría. Instituto Tecnológico de Boca del Río. Boca del Río, Veracruz, México. 70 pp.
- Jojoa, U. G. D. (2016). Tratamiento de Lixiviados de un relleno sanitario utilizando un filtro biológico aireado (BAF). Tesis Maestro en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. 90 pp.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., Van, W. F. (2018). What a Waste 2.0. A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. International Bank for Reconstruction and Development, 272 pp.
- Kiss, K. G., Encarnación A., G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica*. 79, 39-51.
- Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, B. A., Baun, A., Ledin, A. y Christensen, T. H. (2002). Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32 (4), 297-336.

- Kurniawan, T. A., Lo, W., Chan, G., y Sillanpaa, M. E. T. (2010). Biological processes for treatment of landfill leachate. *Journal of Environmental Monitoring*. 12, 2032-2047.
- Laines, C. J. R., Goñi, A. J. A., Adams, S. R. H., Camacho, C. W. (2008). Mezclas con potencial coagulante para tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario. *Interciencia*. 33 (1), 22-28.
- LGPGIR. 2003. Ley General para la prevención y Gestión Integral de Residuos. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 08.10.2003. Última reforma publicada el 19.0.2007.
- León-Gómez, H., Cruz-Vega, C. R., Dávila-Porcel, R. A., Velazco-Tapia, F., y Chapa-Guerrero, J. R. (2015). Impacto del lixiviado generado en el relleno sanitario de Linares (Nuevo León) sobre la calidad del agua superficial y subterránea. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 32 (3), 514-526.
- Lopes de Morais, J., Peralta, Z. P. (2005). Use of advanced oxidation processes to improve the biodegradability of mature landfill leachates. *Journal of Hazardous Materials*. B 123, 181-186.
- Martínez-López, A. G., Padrón-Hernández, W., Rodríguez-Bernal, O. F., Chiquito-Coyotl, O., Escarola-Rosas, M.A., Hernández-Lara, J. M., Elvira-Hernández, E. A., Méndez, G. A., Tinoco-Magaña, J. C., Martínez-Castillo, J. (2014). Alternativas actuales del manejo de lixiviados. *Avances de Química*. 9 (1), 37-47.
- Márquez-Benavides L. y Sánchez-Yáñez, J. M. (2014). Evaluación del Índice de Contaminación de Lixiviados de Relleno Sanitario y Efecto fitotóxico en la Germinación y Plántula de *Phaseolus vulgaris* L. *Journal of the Selva Andina Research Society*. 5 (1), 13-23.

- Méndez, N. R. I., García, R. R. B., Castillo, B. E. R., y Sauri, R. M.R. (2010). Tratamiento de Lixiviados por oxidación Fenton. *Ingeniería e investigación*. 30 (1), 80-85.
- Méndez-Novelo, R. I., May-Marrufo, a. A., Pedro-Cedilla, L., Rojas-Valencia, M. N. y Giácoman-Vallejos, G. (2019). Leachate treatment with a combined Fenton/filtration/adsorption processes. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. 20 (2), 1-9.
- Miralles-Cuevas, S., Oller, I., Aguera, A., Sánchez, J., Sánchez-Moreno, R. y Malato, S. (2016). Is the combination of nanofiltration membranas and AOPs for removing microcontaminants cost effective in real municipal wastewater effluents?. *Environmental Science: Water Research & Technology*.
- Mirzaei, A., Chen, Z., Haghghat, F. y Yerushalmi, L. (2017). Removal of pharmaceuticals from water by homo/heterogonous Fenton-type processes – a Review. *Chemosphere*. 174, 665-688.
- Monje, R. I. (2004). Ozonización de lixiviados estabilizados de rellenos sanitarios para transformar materia orgánica recalcitrante soluble. Tesis Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. 192 pp.
- Morales, J.R.M. (2000). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios por acoplamiento de los procesos de coagulación/floculación y de oxidación con el de adsorción con carbón activado. Tesis Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. 105 pp.
- Navalon, S., Alvaro, M., García, H. (2010). Heterogeneous Fenton catalysis base don clays, silicas and zeolites. *Applied Catalysis B: Environmental*. 99, 1-26.
- Nawaz, T., Rahman, A., Pan, S., Dixon, K., Petri, B., Selvaratnam, T. (2020). A Review of Landfill Leachate Treatment by Microalgae: Current Status and Future Directions. *Processes*, 8, 384-

- Organización Panamericana de la Salud OPS. (2010). Informe de la evaluación regional del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe 2010. 158 pp.
- Ortíz, A. P. M. (2018). Tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario El Inga mediante fotocatalisis con dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) en presencia de luz UV. Tesis Ingeniería. Universidad San Francisco de Quito USFQ. Quito, Ecuador. 51 pp.
- Otero, R. A. T. (2012). Determinación de la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno del lixiviado maduro del relleno el henequén tratado con oxidación foto-Fenton. Tesis Ingeniería. Universidad de la Costa. Barranquilla, Atlántico, Colombia. 123 pp.
- Pedro-Cedillo, L., Méndez-Novelo, R.I., Rojas-Valencia M. N., Barceló-Quintal M., Castillo-Borges, E. R., Sauri-Riancho, M. R., Marrufo-Gómez, J. M. (2015). Evaluation and adsorption and fenton-adsorption precesses for landfill leachate treatment. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 14 (3), 745-755.
- Pellón, A. P., López, T. M., Espinosa, Ll. M. C., González, D. O. (2015). Propuesta para tratamiento de lixiviados en un vertedero de residuos sólidos urbanos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 36 (2), 3-16.
- Peng, Y. (2017). Perspectives on technology for landfill leachate treatment. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S2567-S2574.
- Pérez, G. G., Primo, M. O., Rivero, M. M. J., Ibañez, M. R., Urtiaga, M. A., Ortiz, U. I. (2017). Memorias del VII Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos: hacia una Economía Circular. 13-14 junio, Santander, España.
- Primo, M. O. (2008). Mejoras en el tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU mediante procesos de oxidación avanzada. Tesis Doctorado. Universidad de Cantabria, 233 pp.

- Quintero-Ramírez, A., Valencia-González, Y., Lara-Valencia, L. A. (2017). Efecto de los lixiviados de residuos sólidos en un suelo tropical. *DYNA*, 84 (203), 283-290.
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*. 150, 468-493.
- Robles-Martínez, F., Morales-López, Y., Piña-Guzmán, A. B., Espíndola-Serafín, O., Tovar-Gálvez, L. R., y Valencia- del Toro, G. (2011). Medición de pH y cuantificación de metales pesados en los lixiviados del relleno sanitario más grande de la zona metropolitana de la Ciudad de México. *Universidad y Ciencia, Trópico Húmedo*. 27 (2), 121-132.
- Rosales, H. A. G. (2014). Procesos de Oxidación Avanzada tipo Fenton con y sin Luz solar para el tratamiento de lixiviados pretratados de rellenos sanitarios. Tesis Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 116 pp.
- Ruiz, A. G., Fernández, S. J. M., Rodríguez, V. R. (2001). Residuos peligrosos: grave riesgo ambiental. *Avance y perspectiva*, 20, 151-158.
- Sáez A., Urdaneta G. J.A. (2014). Manejo de Residuos Sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, 20 (3), 121-135.
- Sardiñas P. O., Pérez C. A. (2004). Determinación de nitrógeno amoniacal y total en aguas de consumo y residuales por el método del fenato. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*. 42 (2).
- Schiopu, A. M., Gavrilescu, M. (2010) Municipal solid waste landfilling and treatment of resulting liquid effluents. *Environmental Engineering and Management Journal*, 9 (7), 993-1019.
- SEMARNAT. 2004. Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño,

construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

SEMARNAT. 2006. Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005. Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de residuos peligrosos

SEMARNAT. 2020. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diagnóstico Básico para la gestión integral de residuos. Primera edición, 272 pp.

SEMARNAT. 2022. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021. Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Steven, S. Z. y De Coste, D. J. 2011. Principios de Química. Cengage learning Editores. Séptima Edición. 595 pp.

Tchobanoglous, G., Kreith, F. (2002). Handbook of Solid waste management. Segunda edición. 834 pp.

Torres-Lozada, P., Barba-Ho, L. E., Ojeda, C., Martínez, J., Castaño, Y. (2014). Influencia de la edad de lixiviados sobre su composición físico química y su potencial de toxicidad. Actualidad y Divulgación Científica, 17 (1), 245-255.

Ubaldo, V. E. C., Nájera, A. H. A., Gutiérrez, H. R. F. (2014). Evaluación de la Remoción de Carga Orgánica en lixiviados maduros mediante un sistema aclopado: coagulación- floculación-oxidación anódica. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, 7 (2), 170-178.

Vergara, S. E., Tchobanoglous, G. (2012). Municipal Solid Waste and the Enviroment: A Global Perspective. The Annual Review of Enviroment and Resources, 37, 277-309.

Yilmaz, O., Kara, B. Y. y Yetis, U. (2016). Hazardous waste management system design under population and enviromental impact considerations. *Journal or Enviromental Management*, 1-12.

Ziyang, L., Youcai, Z., Tao, Y., Yu, S., Huili, C., Nanwen, Z., Renhua, H. (2009). Natural attenuation and characterization of contaminants composition in landfill leachate under different disposing ages. *Science of the Total Enviroment*, 407, 3385-3391.

## ANEXOS

ANEXO I.- Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación, de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-2021

### LÍMITES PERMISIBLES

Parámetros (*) miligramos por litro excepto cuando se especifique	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			SUELO								
										Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico		
	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Grasas y aceites	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21
Sólidos Suspendidos Totales	60	72	84	20	24	28	20	24	28	30	36	42	100	120	140	20	24	28
Demanda Química de Oxígeno	150	180	210	100	120	140	85	100	120	60	72	84	150	180	210	60	72	84
Carbono Orgánico Total *	38	45	53	25	30	35	21	25	30	15	18	21	38	45	53	15	18	21
Nitrógeno total	25	30	35	15	25	30	25	30	35	NA	NA	NA	NA	NA	NA	15	25	30
Fósforo total	15	18	21	5	10	15	15	18	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5	10	15
Huevos de helmintos (huevos/litro)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1								
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100ml)	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	50	100	200
Enterococos fecales * (NMP/100 ml)	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	50	100	200
pH (UpH)	6-9																	
Color verdadero	Longitud de onda									Coeficiente de absorción espectral máximo								
	436 nm									7,0 m <sup>-1</sup>								
	525 nm									5,0 m <sup>-1</sup>								
	620 nm									3,0 m <sup>-1</sup>								
Toxicidad aguda (UT)	2 a los 15 minutos de exposición																	
NA: No Aplica P.M.: Promedio Mensual P. D.: Promedio Diario V.I.: Valor Instantáneo NMP: Número más probable UpH: Unidades de pH UT: Unidades de Toxicidad									*Si cloruros es menor a 1000 mg/L se analiza y reporta DQO *Si cloruros es mayor o igual a 1000 mg/L se analiza y reporta COT *Si la conductividad eléctrica menor a 3500 uS/cm se analiza y reporta <i>E. coli</i> *Si la conductividad eléctrica en mayor o igual a 3500 uS/ cm se analiza y reporta Enterococos fecales Las determinaciones de conductividad eléctrica y de Cloruros no requieren la acreditación y aprobación de la entidad correspondiente									

## LÍMITES PERMISIBLES PARA METALES Y CIANUROS

Parámetros miligramos por litro	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			SUELO								
										Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico		
	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.
Arsénico	0.2	0.3	0.4	0.1	0.15	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.1	0.15	0.2	0.1	0.15	0.2
Cadmio	0.2	0.3	0.4	0.1	0.15	0.2	0.2	0.3	0.4	0.05	0.075	0.1	0.1	0.15	0.2	0.05	0.075	0.1
Cianuro	1	2	3	1	1.5	2	2	2.5	3	2	2.5	3	1	1.5	2	1	1.5	2
Cobre	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6
Cromo	1	1.25	1.5	0.5	0.75	1	1	1.25	1.5	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1
Mercurio	0.01	0.015	0.02	0.005	0.008	0.01	0.01	0.015	0.02	0.005	0.008	0.01	0.005	0.008	0.01	0.005	0.008	0.01
Níquel	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4
Plomo	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4
Zinc	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20
Parámetros medidos de manera total	P.M.: Promedio Mensual P.D.: Promedio Diario V.I.: Valor Instantáneo																	

## ANEXO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS COSTOS PARA CADA TRATAMIENTO

<b>Costos estimados de reactivos y energía para el proceso Fenton y Ozonización (Cortez <i>et. al.</i>, 2011).</b>	
Consideraciones generales:	
Costo de unidad de potencia: 0.09 € kWh <sup>-1</sup>	
Costo de reactivos: 0.179 € kg <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 0.35 € kg <sup>-1</sup> NaOH, 0.134 € kg <sup>-1</sup> FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O, 0.33 € L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (35%) and 0.08 € m <sup>-3</sup> O <sub>2</sub>	
Tiempo de operación: Fenton y Ozono (40-30 minutos)	
POA	Costos de operación (€ m <sup>-3</sup> g <sup>-1</sup> de DQO eliminado)
Fe <sup>2+</sup> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	8.2
O <sub>3</sub> /pH =5.5	101.1
O <sub>3</sub> /pH = 7	65.5
O <sub>3</sub> /pH = 9	36.8
O <sub>3</sub> /pH = 11	36.3
O <sub>3</sub> /100 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	41.5
O <sub>3</sub> /200 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	30.5
O <sub>3</sub> /400 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	25.6

<b>Costos, sistemas de operación con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Morales 2000).</b>		
Consideraciones generales:		
Flujo Q: 1.5 L/s, = 90 L/min = 24GPM		
Oxidante: H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , grado Industrial (50% pureza)		
Densidad (p):1.8 Kg/m <sup>3</sup>		
Dosis de oxidante aplicado: 20 mL/L		
Tiempo de contacto (t): 30 minutos		
		Costos anuales de operación
OPERACIÓN	Costo oxidante	3,160 dólares
	Sistema de adsorción y almacenamiento:	
	-Jornada de trabajo (hombre-año)	16,000 dólares
	-Mantenimiento @ 6% capital/año	190 dólares
	-Monitoreo y gastos generales (hombre-año)	16,000 dólares
INVERSION	Anuales de capital (inversión)	505 dólares
Total, anual		35,855 dólares

<b>Costos, sistemas de operación Ozonización (Morales 2000).</b>		
Consideraciones generales:		
Flujo a tratar: 1.5 L/s		
Dosis: 100 mg/L		
Tiempo de contacto (t): 15 minutos		
Energía eléctrica: \$ 0.015/KWh		
Energía específica: 26.4 kWhKg		
		Costos anuales de operación
GENERACIÓN DE OZONO	CONCEPTO: -Costo de generación -Costo de construcción -Costo del contactor	285,777.29 dólares 134,800.60 dólares 118,624.53 dólares
MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN	CONCEPTO: -Costo anual de potencia -Costo de mantenimiento -Costo del agua de enfriamiento -Costo de la mano de obra	1,873 dólares 3,253.59 dólares 170.24 dólares 3,235.59 dólares
Total		547,774.84 dólares

Cuernavaca, Morelos a 12 de diciembre 2022

**COMISIÓN REVISORA  
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS  
P R E S E N T E**

COMO MIEMBRO DEL JURADO REVISOR DE TESINA, HAGO DE SU CONOCIMIENTO QUE DESPUES DE HABER ANALIZADO LA TESINA QUE PARA OBTENER EL DIPLOMA DE ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS, DE LA ESTUDIANTE C. GAMBOA VILLA LIDIA CONCEPCIÓN, CON NÚMERO DE MATRÍCULA **10053504**, BAJO EL TÍTULO “PROCESOS DE OXIDACIÓN APLICADOS A TRATAMIENTOS DE LIXIVIADOS GENERADOS EN RELLENOS SANITARIOS”, CONSIDERO QUE EL DOCUMENTO REÚNE LOS REQUISITOS ACADÉMICOS PARA SU DEFENSA ORAL EN EL EXAMEN, POR LO TANTO, EMITO MI **VOTO APROBATORIO**.

AGRADEZCO DE ANTEMANO LA ATENCIÓN QUE SE SIRVA PRESTAR A LA PRESENTE.

**A T E N T A M E N T E**  
*Por Una Humanidad Culta*

\_\_\_\_\_  
DR. HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA  
(FIRMA ELECTRÓNICA)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA | Fecha:2023-01-19 06:44:14 | Firmante**

PqyDn0UJhCOAV55HkUChel6Bmv3LRDZslyw1GOL91M2sEsXBnvmEI4r34Ghn4DV18Wi2RvOsj30CveuGgFEO9MJkQIk9GFUcKY0F9X3uWQrFmE6+QiaaVmOCSTil/RUvraqC  
/VVPgAXuArQzEvS0sGknxWm9fBw05BUHGqeKrU40xoOM2UIRjkhaoPuhTkjJMsDgHHq9kGg40v50+jr0qbm9SpV1tnN9PjJ9utgsBY1ZfqWfIvkbVcMQ4cl951PqY12JH9uMT459f  
5Z8cDrfPSzMKHIHRZTtuo9aMzau9wLLLpWfPbMNuHRGx8DIMAYn28DiSBBL/TKzHrQIOFNZqA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o  
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[ClvZzkdI0](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/4vm0Mlg3ZCgi8aRGUSNwsbHHK0J5IVHL>



Cuernavaca, Morelos a 12 de diciembre 2022

**COMISIÓN REVISORA  
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS  
P R E S E N T E**

COMO MIEMBRO DEL JURADO REVISOR DE TESIS, HAGO DE SU CONOCIMIENTO QUE DESPUES DE HABER ANALIZADO LA TESIS QUE PARA OBTENER EL DIPLOMA DE ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS, DE LA ESTUDIANTE C. GAMBOA VILLA LIDIA CONCEPCIÓN, CON NÚMERO DE MATRÍCULA **10053504**, BAJO EL TÍTULO “PROCESOS DE OXIDACIÓN APLICADOS A TRATAMIENTOS DE LIXIVIADOS GENERADOS EN RELLENOS SANITARIOS”, CONSIDERO QUE EL DOCUMENTO REÚNE LOS REQUISITOS ACADÉMICOS PARA SU DEFENSA ORAL EN EL EXAMEN, POR LO TANTO, EMITO MI **VOTO APROBATORIO**.

AGRADEZCO DE ANTEMANO LA ATENCIÓN QUE SE SIRVA PRESTAR A LA PRESENTE.

**A T E N T A M E N T E**  
*Por Una Humanidad Culta*

\_\_\_\_\_  
DRA. MARÍA LUISA GARCÍA BETANCOURT  
(FIRMA ELECTRÓNICA)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**MARIA LUISA GARCIA BETANCOURT** | Fecha:2023-01-19 08:28:12 | Firmante

oe6yazPlgbdtxegAMpEfDoSCNLFH49hsVjr7KVBBDYHJxl6dZbm0rLCnLo4Zog2rj+9L2ImMOOxbkePhVkcKQPUERO3ozLh6b8pGJ86miaaQWsdTgSm/5IUVD1ECPmBmNXV  
ggDFkCZVspvUuccqU0mszG1e26QgeDW8oWEv/WVci3pAo2RiSQ5tXR0Bx6HL+pOvJLjOD/ApuqK59m2tB4BZ52hUg4CLKC5Trkz/Ru9vFR8OrDk08pagimcM7mltTGatE2WIS4  
3K5B74UnsjX9HTT1ZwTRIWDZoVsyaKMnlXhQoU7gu0mfMnNB8jMCiwUQNznmAW3wfav7K0hcuw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o  
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[LsGy6imtJ](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/BeqITGYbJz0nO0JepFJHHgAFaIET7s5Z>



Cuernavaca, Morelos a 12 de diciembre 2022

**COMISIÓN REVISORA  
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS  
P R E S E N T E**

COMO MIEMBRO DEL JURADO REVISOR DE TESINA, HAGO DE SU CONOCIMIENTO QUE DESPUES DE HABER ANALIZADO LA TESINA QUE PARA OBTENER EL DIPLOMA DE ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS, DE LA ESTUDIANTE C. GAMBOA VILLA LIDIA CONCEPCIÓN, CON NÚMERO DE MATRÍCULA **10053504**, BAJO EL TÍTULO “PROCESOS DE OXIDACIÓN APLICADOS A TRATAMIENTOS DE LIXIVIADOS GENERADOS EN RELLENOS SANITARIOS”, CONSIDERO QUE EL DOCUMENTO REÚNE LOS REQUISITOS ACADÉMICOS PARA SU DEFENSA ORAL EN EL EXAMEN, POR LO TANTO, EMITO MI **VOTO APROBATORIO**.

AGRADEZCO DE ANTEMANO LA ATENCIÓN QUE SE SIRVA PRESTAR A LA PRESENTE.

**A T E N T A M E N T E**  
*Por Una Humanidad Culta*

\_\_\_\_\_  
DR. JORGE ANTONIO GUERRERO ÁLVAREZ  
(FIRMA ELECTRÓNICA)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

JORGE ANTONIO GUERRERO ALVAREZ | Fecha:2022-12-12 08:40:45 | Firmante

wcNNK/4bRtKgfje1/yWJ+T0vJs48Ux+Wcvm2DNLnUKbIF+cynGI0H4fhBO/v8NbRWYRgq9hWzMrUhMyvyF2lO8mHS+K2M5T/R4Srrm3tjM13lFn3e0vEuEclzEXiAdYlw5qwJdoK0eAhkwkXmtEwhjsz6f3d16zAqe80f5TcUEXgfSHKTM89dPAfNQz++WVvyTA/mB2YFJ0Jni9VM+QTXFL/tqdGgeS4FxBegs1QUNSmml2WQr30Goq4zMrQ/c7aF/xlrwvcqfF37wbPllcBGYvNeBjM0lsRvLUptmKZxV7J978x5el3+ai74ORmKmxv66vOaChoN30H/zjLZLrUCLg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[sHE61Rubk](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/Hf3XKkcmf03Z9NFLJRHvjs6BeRJAAdu>



Cuernavaca, Morelos a 12 de diciembre 2022

**COMISIÓN REVISORA  
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS  
P R E S E N T E**

COMO MIEMBRO DEL JURADO REVISOR DE TESIS, HAGO DE SU CONOCIMIENTO QUE DESPUES DE HABER ANALIZADO LA TESIS QUE PARA OBTENER EL DIPLOMA DE ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS, DE LA ESTUDIANTE C. GAMBOA VILLA LIDIA CONCEPCIÓN, CON NÚMERO DE MATRÍCULA **10053504**, BAJO EL TÍTULO “PROCESOS DE OXIDACIÓN APLICADOS A TRATAMIENTOS DE LIXIVIADOS GENERADOS EN RELLENOS SANITARIOS”, CONSIDERO QUE EL DOCUMENTO REÚNE LOS REQUISITOS ACADÉMICOS PARA SU DEFENSA ORAL EN EL EXAMEN, POR LO TANTO, EMITO MI **VOTO APROBATORIO**.

AGRADEZCO DE ANTEMANO LA ATENCIÓN QUE SE SIRVA PRESTAR A LA PRESENTE.

**A T E N T A M E N T E**  
*Por Una Humanidad Culta*

---

DR. ALEXIS JOAVANY RODRÍGUEZ SOLÍS  
(FIRMA ELECTRÓNICA)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**ALEXIS JOAVANY RODRIGUEZ SOLIS | Fecha:2022-12-12 12:31:02 | Firmante**

iHHMcsVGgwr9SAeBpg9WV2N2W7kjPkCGx0lwOyJjgsAwO7Ws34Yeaj4hVn6N+eGMA0+eBgwnR+qPMLITAqXf6lu3oi6BAbN7SqcucCqYxmE8rSnkVpocFnp+G09W6htkrqUoP  
RVJIGSJ8Ex8QmpKTVPPQk0flnXpn9UPdsYNSGkvUu/9O1YTR9YRtZK5mejF2vii8lsDAznT9j2OWhM0KTPbSB8yMfQHAOBwceQ1c7u3EMF5jUSSZqRYOHR66exfQX5+lwED2  
e7aVp6UFWmfpYRfsMLXq2UmF+/Xi2mepJHLj2SWrjzmuYbGdfiloRX1Z/VXIoHnBgA7Nc9RBaZQ0Q==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o  
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[YLoR7wcr9](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/jRd5hYnB9rmTc5BxF6lm8X4VLI57wtV3>



Cuernavaca, Morelos a 12 de diciembre 2022

**COMISIÓN REVISORA  
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS  
P R E S E N T E**

COMO MIEMBRO DEL JURADO REVISOR DE TESINA, HAGO DE SU CONOCIMIENTO QUE DESPUES DE HABER ANALIZADO LA TESINA QUE PARA OBTENER EL DIPLOMA DE ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS, DE LA ESTUDIANTE C. GAMBOA VILLA LIDIA CONCEPCIÓN, CON NÚMERO DE MATRÍCULA **10053504**, BAJO EL TÍTULO “PROCESOS DE OXIDACIÓN APLICADOS A TRATAMIENTOS DE LIXIVIADOS GENERADOS EN RELLENOS SANITARIOS”, CONSIDERO QUE EL DOCUMENTO REÚNE LOS REQUISITOS ACADÉMICOS PARA SU DEFENSA ORAL EN EL EXAMEN, POR LO TANTO, EMITO MI **VOTO APROBATORIO**.

AGRADEZCO DE ANTEMANO LA ATENCIÓN QUE SE SIRVA PRESTAR A LA PRESENTE.

**A T E N T A M E N T E**  
*Por Una Humanidad Culta*

\_\_\_\_\_  
MTRA. ARIADNA ZENIL RODRÍGUEZ  
(FIRMA ELECTRÓNICA)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**ARIADNA ZENIL RODRIGUEZ | Fecha:2023-01-22 21:20:01 | Firmante**

QnOsGKw1IPh+rvQahWDBlyLiA7hifJOK8Hont1lxGTkeuHaHKSS4lluoBSwEECgXfoGeOvntQwbJsUz1Bkw0Ad0CmWiqA9iDEH90zr+gXHPHrvEIX7EX2rP9p1jjWtOuEr6l119Jp  
pOUJOCygLkLcmcAQzzhskZOE75RAaiYKM4/ISC9JWxsIT3gjqplirgOYI6MKxTClozgR5VCHRHIRyLK7W/GcNi1B3EUB0yjDN3EznsWdC09i4+brOjrWfcMLQ+Klfp/ik/OBlqdl/AoL  
M8EljnJ7FB7ufU4vWq2W/jdcrijTUbK4m8H7MS6OYJEprAKZNPobzH2xnE9ETD/w==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o  
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[cjmHtSFM2](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/4GMxoBHyV0jIC0wvFtHLrCECPJ1MjqA>

