

Procesos de tratamiento de aguas residuales urbanas basados en el aprovechamiento de la energía solar: Revisión del estado del arte.

Carol Tatiana Rueda Almeida

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Directores:

Viviana Raquel Güiza Argüello

PhD en Ingeniería Química

Sergio Ismael Blanco Vásquez

PhD en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Primeramente, a mis queridos padres y hermana, desde el primer día me han alentado a perseguir mis sueños y han sido mi guía en cada paso del camino. A mi padre **Luis Enrique** por su dedicación, apoyo y ejemplo de perseverancia. A mi madre **Mary Luz** por ser mi mayor defensora, consejera y por su amor incondicional. Tus palabras de aliento y tu cariño han sido mi mayor impulso en los momentos más difíciles. A mi hermana **Katheryn Dayana**, mi compañera de aventuras y confidente, tus palabras de aliento y tu inquebrantable apoyo me han impulsado a superar los desafíos que se presentaron en el camino hacia esta meta.

A mi pareja **Johan Medina**, tu amor incondicional y tu apoyo han sido mi mayor fortaleza durante este proceso. Agradezco cada instante a tu lado y todo lo que hemos compartido juntos. A mi pequeña **Mariana Antonella**, eres mi mayor motivación y la razón por la que no me rindo. Tu llegada a mi vida ha llenado de luz cada día y ha dado un propósito aún más profundo a este logro. Te prometo que siempre daré lo mejor de mí para construir un mundo lleno de oportunidades para ti.

A todos mis tíos y primos que siempre me han apoyado y aconsejado, en especial, **Pedro Camargo**, **Martha Rueda** y **Marlene Almeida** que han sido mis segundos padres, su apoyo, amor y compañía han sido fundamentales en mi vida. Y a mis “peques” cada risa compartida son recuerdos que guardo con muchísimo cariño.

Al Pbro. **José Miguel León Ortiz**, por siempre estar presente apoyándome en todos los momentos de mi vida, su sabiduría y guía han sido una luz en este viaje, recordándonos siempre la importancia de la fe y la perseverancia.

A todos mis amigos, **The5** por su apoyo, risas y momentos inolvidables, **Las de siempre** su amistad ha sido mi mayor tesoro, nuestras escapadas espontaneas que nos han permitido desconectar y recargar energías, **Paola, Wendy, Angie, Silvia P, Silvia S, Luis, Sergio** y todos los que han estado conmigo en el trayecto de la carrera, hemos compartido risas, desafíos y éxitos, cada uno de ustedes ha sido un pilar en mi vida. Este logro no habría sido posible sin la complicidad y el aliento constante que he recibido de ustedes.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander por brindarnos las herramientas y mantener un entorno de aprendizaje enriquecedor y de calidad.

A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales por brindarnos docentes y demás personal con experiencia, conocimiento, pedagogía y ética para formarnos como ingenieros metalúrgicos.

A mis directores de tesis Viviana Raquel Güiza Argüello y Sergio Ismael Blanco Vásquez por su guía y paciencia a lo largo de este proceso.

A todos los profesores y técnicos de soporte académico que me impartieron sus conocimientos y experiencias durante mi carrera. Cada uno de ustedes dejó una huella en mi formación académica y personal, y estoy agradecida por el esfuerzo y dedicación que pusieron en su labor.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	9
1. Objetivos	11
1.1 Objetivo General	11
1.2 Objetivos Específicos.....	11
2. Metodología	11
3. Marco Teórico.....	13
3.1 Generalidades de los rellenos sanitarios	13
3.2 Lixiviados	14
3.2.1 Características del lixiviado.....	15
3.2.2 Tipos de lixiviados.....	16
3.2.3 Composición de los lixiviados de rellenos sanitarios	17
3.2.4 Efectos ambientales y sociales de los lixiviados.....	18
4. Procesos de tratamientos de lixiviados	19
4.1 Transferencia de lixiviados	19
4.1.1 Proceso de recirculación	19
4.1.2 Evaporación	19
4.2 Tratamientos biológicos.....	19
4.2.1 Tratamiento aeróbico	20
4.2.1.1 Humedales construidos.	20
4.2.1.2 Reactor de biomasa inmovilizada (IBR).....	20
4.2.1.3 Reactor de lodos activados.....	20

4.2.2 Tratamiento anaerobico.	21
4.3 Tratamiento de tecnología por membranas.....	21
4.3.1 Ultrafiltración.....	21
4.3.2 Destilación por membrana.....	21
4.4 Procesos fisicoquímicos.....	22
4.4.1 Coagulación- floculación.....	22
4.4.2 Adsorción.....	22
4.4.3 Procesos de oxidación avanzada (POA).....	23
4.4.3.1 Peroxicoagulación.....	23
4.4.3.2 Electro oxidación.....	23
4.4.3.3 Foto fenton.....	23
4.4.3.4 Activación por persulfato.....	24
4.4.3.5 Electrocoagulación.....	24
4.4.3.6 Fotocatálisis.....	25
5. Técnicas actuales de tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios.....	25
5.1 Matrices de priorización.....	35
6. Análisis de factibilidad.....	40
6.1 Escalabilidad.....	41
6.2 Costos.....	42
6.3 Beneficios Ambientales.....	42
7. Conclusiones.....	42
8. Recomendaciones.....	43
Referencias Bibliográficas.....	45

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de los lixiviados con sus principales características	16
Tabla 2. Tecnologías de pretratamiento	27
Tabla 3. Tecnologías de tratamiento	28
Tabla 4. Tecnologías de pretratamiento y tratamiento	30
Tabla 5. Tecnologías de tratamiento completo	34
Tabla 6. Matriz de priorización 1 - Especificación vs especificación	36
Tabla 7. Puntuación para eficiencia de DQO	36
Tabla 8. Puntuación para tiempo de tratamiento	37
Tabla 9. Matriz de priorización 2- Especificaciones VS Tecnologías de pretratamiento	37
Tabla 10. Matriz de priorización 2- Especificaciones VS Tecnologías de tratamiento	38
Tabla 11. Matrices de priorización 2- Especificaciones VS Tecnologías de pretratamiento y tratamiento	38
Tabla 12. Matriz de priorización 2- Especificaciones VS Tecnologías de tratamiento completo	39
Tabla 13. Tecnologías ganadoras según fase de tratamiento	40

Resumen

Título: Procesos de tratamiento de aguas residuales urbanas basados en el aprovechamiento de la energía solar: Revisión del estado del arte.*

Autor: Carol Tatiana Rueda Almeida **

Palabras Clave: Energía solar, Rellenos sanitario, Tratamiento de lixiviados

Descripción:

El presente estudio se enfocó en entender los procesos de tratamientos de lixiviados de rellenos sanitarios impulsados por energía solar. La generación de lixiviados, líquidos contaminantes derivados de los residuos sólidos urbanos, representa un desafío ambiental significativo debido a su alta toxicidad y baja biodegradabilidad.

Posteriormente, se caracterizaron las diferentes tecnologías encontradas para el tratamiento de lixiviados impulsados por energía solar, analizando diferentes artículos en el periodo 2018 a 2024. Por medio del uso de matrices de priorización se evaluó la efectividad, costo, tiempo requerido y escalabilidad, destacándose el proceso foto Fenton solar y la destilación solar por su alta eficiencia en la eliminación de contaminantes como la demanda química de oxígeno (DQO), amoníaco y metales pesados. Estos métodos, al utilizar energía renovable, permiten reducir costos operativos y disminuir la huella de carbono asociada al tratamiento de lixiviados.

El estudio concluye que las tecnologías solares no solo son viables desde el punto de vista técnico, sino que también tienen un gran potencial de escalabilidad y adaptación al contexto colombiano, particularmente en regiones con alta incidencia de radiación solar, como Bucaramanga. Este enfoque contribuye al desarrollo de soluciones sostenibles, alineadas con los objetivos de economía circular y la gestión eficiente de residuos. Además, se destaca la posibilidad de implementar estas tecnologías a nivel nacional, lo que podría mejorar significativamente las prácticas de manejo de residuos en Colombia y otros países tropicales.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales. Pregrado. Directores: Viviana Raquel Güiza Argüello. PhD en Ingeniería Química. Sergio Ismael Blanco Vásquez. PhD en Ingeniería.

Abstract

Title: Urban wastewater treatment processes based on solar energy utilization: A review of the state of the art.*

Author(s): Carol Tatiana Rueda Almeida**

Key Words: Solar Energy, Landfill, Leachate Treatment.

Description:

The present study focused on understanding solar-powered landfill leachate treatment processes. The generation of leachate, a liquid pollutant derived from municipal solid waste, represents a significant environmental challenge due to its high toxicity and low biodegradability.

After that, the different technologies found for solar-powered leachate treatment were characterized by analyzing different articles in the period 2018 to 2024. Through the use of prioritization matrices, the effectiveness, cost, time required and scalability were evaluated, highlighting the solar photo Fenton process and solar distillation for their high efficiency in the removal of pollutants such as chemical oxygen demand (COD), ammonia and heavy metals. By using renewable energy, these methods reduce operating costs and reduce the carbon footprint associated with leachate treatment.

The study concludes that solar technologies are not only technically feasible, but also have great potential for scalability and adaptation to the Colombian context, particularly in regions with high solar radiation incidence, such as Bucaramanga. This approach contributes to the development of sustainable solutions, aligned with the objectives of circular economy and efficient waste management. In addition, it highlights the possibility of implementing these technologies at the national level, which could significantly improve waste management practices in Colombia and other tropical countries.

* Degree Work

** Faculty of Physical and Chemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Undergraduate. Directors: Viviana Raquel Güiza Argüello. PhD in Chemical Engineering. Sergio Ismael Blanco Vásquez. PhD in Engineering.

Introducción

La producción de basura ha alcanzado proporciones alarmantes en las últimas décadas. Según el reporte del Banco Mundial, en el 2018, se produjeron 2010 millones de toneladas de residuos a nivel mundial. Se estima que con el ritmo de crecimiento actual la producción de basura podría llegar a 3.400 millones de toneladas para el 2050 (Banco Mundial, 2018). De acuerdo con el DANE, solo en Colombia se producen 24,8 millones de toneladas de residuos al año (Departamento Nacional de Planeación, 2022), y en Santander se tiene el relleno sanitario El Carrasco al cual llegan mil toneladas diarias provenientes de Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta, Rionegro, Playón y Matanza (Alcaldía de Bucaramanga, 2022).

Ahora bien, el tratamiento adecuado de aguas residuales, especialmente los lixiviados generados por los residuos sólidos urbanos (**RSU**) provenientes de rellenos sanitarios, son un desafío crucial en la gestión de residuos y la preservación del medio ambiente. Los lixiviados son líquidos altamente contaminantes ricos en químicos tóxicos, orgánicos disueltos y partículas sólidas en suspensión (Nanda & Berruti, 2021). El manejo inadecuado acarrea graves consecuencias para el medio ambiente que se ve significativamente afectado ya que la dispersión incontenible de los lixiviados contamina el suelo y los cuerpos de agua, lo que pone en peligro tanto los sistemas ecológicos como la salud humana. Además, la liberación de lixiviados también exacerba la producción de malos olores, provoca infestaciones de plagas y aumenta la propagación de enfermedades (Barradas Rebolledo, 2009).

En los últimos años, se ha sugerido el aprovechamiento de la energía solar como una solución prometedora para aumentar la eficiencia de los procedimientos de tratamiento de lixiviados de los rellenos sanitarios (Bah et al. ,2023). La energía solar al ser una fuente de energía

renovable y abundante puede usarse para impulsar tecnología y operaciones en estos lixiviados. La introducción de esta energía ofrece una serie de ventajas, como la reducción de dependencia de fuentes no renovables que disminuye la huella ambiental, y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que significa que ayuda a disminuir el impacto ambiental relacionado con la generación de residuos, promoviendo así las prácticas sostenibles (Energías totales, 2021).

La presente propuesta de investigación apunta a realizar un análisis que permita señalar las principales barreras tecnológicas y operativas que enfrentan estos métodos, detallar las características de las tecnologías empleadas, sus principios de funcionamiento y su eficiencia en la remoción de contaminantes. Posteriormente, se analizarán algunos factores para determinar su implementación a nivel local. Este proyecto tiene como finalidad contribuir al desarrollo de soluciones sostenibles para el tratamiento de lixiviados en Colombia, apoyándose en tecnologías innovadoras y amigables con el medio ambiente, como es el uso de energía solar.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar una revisión sistemática de la literatura relacionada con el desarrollo de procesos de tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios basados en el aprovechamiento de la energía solar.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar los retos actuales frente al desarrollo de tecnologías para el manejo de lixiviados de rellenos sanitarios, a partir de una revisión literaria del periodo 2018-2024.

Caracterizar los tipos de procesos de tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios basados en el aprovechamiento de la energía solar que se han reportado en la literatura en el periodo de estudio.

Evaluar la factibilidad de dichos procesos estudiados para su aplicación en un contexto regional colombiano, a partir de una comparación ponderada.

2. Metodología

- a) Revisión bibliográfica: El primer paso para realizar el presente proyecto fue la búsqueda y lectura de documentos base que permitieron comprender el tema, posteriormente una recopilación de documentos relevantes y por último una organización de artículos científicos sobre las tecnologías destinadas al tratamiento de los lixiviados generados en rellenos sanitarios impulsadas por energía solar. Se realizó la identificación de las bases de datos ofrecidas por la universidad y se determinó que el principal motor de búsqueda fuera Scopus. Para obtener la información adecuada, fue necesario la identificación de las palabras claves que relacionaran la problemática aquí tratada, tales como: *Solar Energy*,

Landfill y Leachate Treatment. Posteriormente, para la selección de los documentos, se establecieron algunos criterios de inclusión, exclusión y de calidad, los cuales fueron:

- Periodo de publicación: 2018 – 2024.
- Tipo de publicación: Solo artículos publicados en revistas científicas.
- Documentos en inglés y español.
- Los artículos encontrados, debían mostrar algún tipo de relación con el uso de la energía solar en el tratamiento de los lixiviados

La ecuación de búsqueda se diseña a partir de palabras clave y operadores booleanos (AND, OR, NOT) junto al periodo de tiempo, tipo de publicación e idiomas.

- b) Caracterización de los estudios encontrados: inicialmente, para el primer objetivo se analizaron una serie de artículos que permitiera obtener una visión integral de las barreras tecnológicas y operativas que enfrentan los distintos métodos de tratamiento. La información recopilada facilitó una comprensión más amplia de los enfoques existentes y de las posibles áreas de mejora frente al avance en tecnologías para gestionar los lixiviados de rellenos sanitarios. Para el segundo objetivo se analizaron los artículos enfocándose específicamente en estudios que analizan procesos de tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios que emplean energía solar. Esto permitió caracterizar y clasificar los diferentes tipos de procesos reportados en la literatura, identificando sus principios de funcionamiento y eficiencia, para así lograr entender y clasificar el desarrollo de estas tecnologías, por

medio de matrices de ponderación se llevó a cabo un análisis comparativo de las tecnologías estudiadas.

- c) Análisis de factibilidad: A través de la búsqueda previa se consiguió describir 1 tecnología con la percepción de ser la más prometedora a usar, posteriormente brindando así recomendaciones hacia donde se deben enfocar los estudios e investigaciones posteriores en el área de tratamientos de lixiviados usando la energía solar.

3. Marco Teórico.

3.1 Generalidades de los rellenos sanitarios

Un relleno sanitario es un método utilizado para manejar los desechos, que implica depositar los residuos en el suelo de manera que no se cause daño al medio ambiente ni se generen molestias o riesgos para la salud y la seguridad pública. Este método emplea principios de ingeniería para confinar los desechos en un área lo más compacta posible, reduciendo su volumen al mínimo. Además, al final de cada día, se cubren los residuos depositados con una capa de tierra (Meléndez, 2004). Tras realizarse la deposición de los residuos sólidos urbanos (**RSU**) en el relleno sanitario se inicia un proceso de descomposición a través de una serie de procesos químicos complejos. Esto da lugar a la formación de los principales productos de la descomposición, los cuales son los lixiviados y los gases (biogás) (Grajeda Miranda, 2010). En la parte baja del relleno sanitario se encuentran unas celdas previamente impermeabilizadas, por las cuales se drenan los lixiviados y transportados a unas lagunas donde posteriormente serán tratados (Noguera & Olivero, 2010).

En Colombia se ha reglamentado la gestión de residuos en el tiempo. Entre algunas de estas disposiciones se encuentran el Decreto 838 de 2005, que trata sobre la disposición final de residuos

sólidos y dicta normas relacionadas con la localización de áreas, consideraciones ambientales y técnicas para la planeación, construcción y operación de los rellenos sanitarios (Decreto 838 de 2005, 24 de marzo de 2005). El Decreto 1784 de 2017 aborda las actividades complementarias de tratamiento y disposición final de residuos sólidos en el servicio público de aseo (Decreto 1784 de 2017, 2 de Noviembre de 2017). El artículo 15 de la Ley 142 de 1994 establece quiénes pueden llevar a cabo la operación de los rellenos sanitarios (Ley 142 de 1994, 11 de Julio de 1994). La Resolución 1045 de 2003 adopta la metodología para la elaboración de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) (Resolución 1045 de 2003, 26 de Septiembre de 2003). Además, el Decreto 4741 de 2005 regula la prevención y manejo de residuos peligrosos generados dentro del territorio nacional, estableciendo criterios técnicos y operativos para su gestión adecuada (Decreto 4741 de 2005, 30 de Diciembre de 2005). De igual manera, la Ley 1259 de 2008 crea el comparendo ambiental, con el fin de fortalecer las políticas de manejo integral de residuos sólidos y sancionar a quienes incumplan las normas sobre disposición y manejo de residuos (Ley 1259 de 2008, 19 de Diciembre de 2008).

3.2 Lixiviados

Los lixiviados son líquidos que se forman cuando el agua de lluvia se filtra a través de los desechos, combinándose con el agua que ya contienen los residuos y los productos de los procesos bioquímicos que ocurren dentro de ellos (Renou et al. ,2008). Según estudios realizados, se estima que se generan aproximadamente entre 50 y 200 litros de lixiviados por tonelada de residuos depositados y los lixiviados de un relleno sanitario pueden persistir durante 50 años o más después de que un relleno sanitario ha sido clausurado (Lobo et al. ,2002).

3.2.1 Características del lixiviado

Según Teng et al. (2021) las características se evalúan mediante parámetros convencionales, como:

- *Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)*: Mide el grado de consumo de oxígeno debido a la oxidación de contaminantes realizada por microorganismos. Se determina generalmente calculando la cantidad de oxígeno que necesitan estos microorganismos acuáticos durante un período de 5 días (DBO_5) (Bendicho & Lavilla, 2005).
- *Demanda química de oxígeno (DQO)*: Mide la cantidad de oxígeno requerida para oxidar la materia orgánica utilizando un oxidante químico. En muchos casos, existe una correlación entre la DQO y la DBO_5 , lo cual es útil porque la DQO puede determinarse en menos tiempo (Bendicho & Lavilla, 2005).
- *Carbono orgánico total (COT)*: La cantidad de carbono que está químicamente ligado a la materia orgánica en las aguas residuales. Se mide a través de la oxidación del carbono orgánico en CO_2 , el cual puede cuantificarse mediante varios métodos, como el volumétrico, gravimétrico, entre otros (Bendicho & Lavilla, 2005).
- *Sólidos suspendidos*: Partículas sólidas suspendidas que no se sedimentan, estos sólidos pueden contener compuestos tóxicos y generar turbidez, lo que reduce la cantidad de luz solar que penetra en el agua (Fernández del Castillo et al. , 2022).
- pH
- Amoníaco ($NH_4^+ -N$)

- Concentraciones de metales pesados.
- Las relaciones entre la DBO_5/DQO y la DQO/COT son indicadores comunes que permiten medir la biodegradabilidad de los compuestos orgánicos y el grado de oxidación del carbono orgánico (Teng et al. ,2021)

3.2.2 Tipos de lixiviados

La composición de los lixiviados cambia según la antigüedad del relleno sanitario. La relación entre la edad del relleno sanitario y la composición de la materia orgánica es un factor clave a considerar al seleccionar el método de tratamiento apropiado.

Tabla 1

Clasificación de los lixiviados con sus principales características

<i>Tipo de lixiviado</i>	<i>Lixiviados jóvenes o biodegradables</i>	<i>Lixiviado intermedio</i>	<i>Lixiviado maduro o estabilizado</i>
<i>Edad (años)</i>	<5	5 - 10	>10
<i>pH</i>	6,5	6,5 -7,5	>7,5
<i>DQO ($\frac{mg}{L}$)</i>	>10000	4000 - 10000	< 4000
<i>DBO₅/DQO</i>	>0,3	0.1-0,3	<0,1
<i>Compuestos orgánicos</i>	80% ácidos grasos volátiles	5 -30% ácidos grasos volátiles + ácidos húmicos y fúlvicos	Ácidos húmicos y fúlvicos
<i>Metales pesados</i>	Bajo - medio		Bajo
<i>Biodegradabilidad</i>	Importante	Medio	Bajo

Nota. Tomada de (Renou et al. , 2008)

3.2.3 Composición de los lixiviados de rellenos sanitarios

Según Christensen et al. (2001), la composición de los lixiviados se divide en 4 grandes grupos de contaminantes:

- *Materia orgánica disuelta:* La reducción de la materia orgánica disuelta en los lixiviados se produce debido a la dilución, sorción y descomposición, que incluyen componentes como ácidos grasos volátiles, ácidos húmicos y fúlvicos (Christensen et al. ,2001; Luo et al. ,2020).
- *Macro componentes inorgánicos:* Se refiere a constituyentes inorgánicos presentes en concentraciones elevadas, incluye los aniones Cl^- , HCO_3^- y SO_4^{2-} y los cationes Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Fe^{+2} , Fe^{+3} y Mn^{+2} . Estos macrocomponentes no suelen constituir un problema grave de contaminación, en cambio, algunos de estos componentes son importantes para controlar los ambientes redox y la atenuación de metales pesados. Sin embargo, gran cantidad de amonio puede significar un problema, ya que es un nutriente tóxico para los peces. (Christensen et al. ,2001)
- *Metales pesados:* Los lixiviados suelen tener concentraciones moderadas de metales pesados, incluyendo cromo, níquel, cobre, zinc, cadmio, mercurio y plomo. Sin embargo, estos metales pesados no suelen representar un problema de contaminación en las aguas subterráneas de los rellenos sanitarios, ya que se encuentran en cantidades modestas y son susceptibles a ser reducidos mediante procesos de adsorción o precipitación (Christensen et al. ,2001).

- *Compuestos orgánicos xenobióticos*: Son sustancias químicas orgánicas identificadas como contaminantes individuales estos son ajenos a los sistemas biológicos y no se hallan de forma natural en el medio ambiente. Estos compuestos son producidos por actividades humanas, como la industria, la agricultura y el uso de productos químicos, entre estos están los fenoles, alifáticos clorados, antibióticos, disruptores endocrinos, pesticidas, productos farmacéuticos, de cuidado personal, materia orgánica comercial y micro plásticos. Este grupo de contaminantes se considera un riesgo potencial para la salud (Christensen et al. , 2001; Luo et al. ,2020).

3.2.4 Efectos ambientales y sociales de los lixiviados

El mal manejo de los residuos sólidos conlleva a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, causando consecuencias ambientales y sociales. La contaminación de cuerpos de agua superficiales debido a la presencia de materia orgánica disuelta, la cual disminuye el oxígeno disuelto y un aumento de nutrientes (N y P), conduciendo a la eutrofización y daños a la calidad biológica del agua. La contaminación de aguas subterráneas pone en peligro la salud humana por sustancias químicas peligrosas. La dispersión de los lixiviados afecta negativamente la flora y la fauna local, provocando la muerte de especies y alterando variables ambientales importantes para la vida misma. De igual manera, estos problemas tienen implicaciones sociales significativas, especialmente para los estratos más bajos, ya que se ven expuestos a enfermedades transmitidas por roedores e insectos, sufriendo mayor vulnerabilidad debido a su falta de acceso a servicios básicos y educación (Perez Gallardo, 2015).

4. Procesos de tratamientos de lixiviados

Los tratamientos de los lixiviados de rellenos sanitarios se pueden clasificar en cuatro grandes grupos; como, transferencia de lixiviados, tratamientos biológicos, tratamientos fisicoquímicos y tratamiento de tecnología por membranas.

4.1 Transferencia de lixiviados

4.1.1 Proceso de recirculación

Se refiere a la práctica de reintroducir los lixiviados en la parte superior del relleno sanitario, donde se diluyen y se reducen los compuestos generados por la actividad biológica ya que, al aumentar el contenido de humedad, la velocidad de descomposición biológica se incrementa, así como la estabilidad y la eficiencia en la recuperación del metano generado en el relleno sanitario (Martínez López et al. ,2014)

4.1.2 Evaporación

Se utilizan estanques cubiertos para evaporar el agua contenida en ellos mediante el calentamiento, quedando lodos que se disponen nuevamente en el relleno sanitario, este proceso resulta muy práctico ya que los equipos cuentan con simplicidad tecnológica y sus costos son muy bajos a comparación de otras tecnologías. (Martínez López et al. ,2014)

4.2 Tratamientos biológicos

Los tratamientos biológicos se consideran tratamientos simples, confiables y económicos, se usan de manera combinada para reducir significativamente el contenido de altas concentraciones de **DBO**, la biodegradación es realizada por microorganismos, estos pueden llegar a descomponer los compuestos orgánicos en dióxido de carbono y lodos. Estos tratamientos se dividen en dos métodos, aeróbicos y anaeróbicos (Renou et al. ,2008).

4.2.1 Tratamiento aeróbico

El tratamiento aeróbico debe lograr la nitrificación del nitrógeno amoniacal y también ayudar a reducir los contaminantes orgánicos biodegradables (Renou et al. ,2008). Este proceso implica la eliminación de los compuestos orgánicos hallados en los lixiviados mediante la actividad de microorganismos en presencia de oxígeno (Martínez López et al. ,2014). Algunos de estos métodos son:

4.2.1.1 Humedales construidos. Son sistemas diseñados que aprovechan funciones naturales, como la vegetación, suelo y organismos para tratar las aguas residuales, donde la acción conjunta de procesos espontáneos y redes ecológicas contribuyen a la remoción y degradación de contaminantes. Estos sistemas son de bajo costo, fáciles de operar y mantener, además, se han implementado con éxito en laboratorios, escala piloto y escala real, logrando altas tasas de eliminación (Luo et al. ,2020; Spiniello et al. , 2023).

4.2.1.2 Reactor de biomasa inmovilizada (IBR). El IBR es un tanque de fondo plano que contiene anillos de polipropileno como soporte, los cuales están colonizados por fangos activados. Además, este biorreactor cuenta con un sistema de soplado de aire para proporcionar oxígeno a los microorganismos y garantizar que se mantengan condiciones de oxígeno saturado en el sistema.(Oller et al. ,2007). El mecanismo de eliminación de contaminantes por biomasa inmovilizada es mediante adsorción, biosorción , biodegradación, bioprecipitación, etc. (Girijan & Kumar, 2019)

4.2.1.3 Reactor de lodos activados. En el reactor de lodos activados se realiza una combinación de microorganismos, estos son capaces de consumir materia orgánica y convertirla en nueva biomasa microbiana, así como en CO₂, agua y minerales. Sin embargo, este metodo cuenta con algunos inconvenientes como, altos costos de eliminacion por la gran produccion de

lodos, largos tiempos de exposición y alta demanda de energía y la inhibición microbiana causada por las altas concentraciones de NH_4^+ -N (Luo et al. ,2020)

4.2.2 Tratamiento anaeróbico.

El proceso de tratamiento anaeróbico implica la eliminación de los compuestos orgánicos hallados en los lixiviados mediante la actividad de una población bacteriana actuando en ausencia de oxígeno, lo que simplifica el proceso y reduce la cantidad de lodos generados (Martínez López et al. ,2014). Estos presentan algunas ventajas frente a los procesos aeróbicos, como: reducción en la generación de lodos, menor estabilización de la materia orgánica y la generación de energía gracias a la captura de metano (Luo et al. ,2020).

4.3 Tratamiento de tecnología por membranas

Las técnicas de membrana son ampliamente utilizadas para la separación por tamaño mediante membranas semipermeables. Estas técnicas destacan por usar menor espacio, manejar grandes volúmenes, ofrecer alta calidad en el efluente y contar con una capacidad de desinfección efectiva (Teng et al. ,2021).

4.3.1 Ultrafiltración

Es eficiente en la eliminación de macromoléculas y partículas, aunque su efectividad depende en gran medida del material de la membrana. Además, ese método puede emplearse para fraccionar la materia orgánica, también se utiliza para remover los componentes de mayor peso molecular del lixiviado (Renou et al. ,2008).

4.3.2 Destilación por membrana

El proceso involucra una membrana microporosa e hidrofóbica que separa soluciones acuosas de diferentes temperaturas y composiciones. Una de las ventajas de este método es que opera a temperaturas más bajas en comparación con la destilación tradicional, ofrece una alta

calidad de efluente y permite reducir el costo energético al utilizar fuentes renovables como la energía solar. En el caso de la destilación de membrana de contacto directo, tanto las soluciones de alimentación como las de enfriamiento están en contacto directo con la superficie de la membrana hidrofóbica, lo que la distingue de otras configuraciones donde el enfriamiento no toca directamente la membrana (Zoungrana et al. , 2020)

4.4 Procesos fisicoquímicos

Mediante los tratamientos físicos y químicos se reducen sólidos en suspensión, partículas coloidales, materiales flotantes, color y sustancias tóxicas (Renou et al. ,2008)

4.4.1 Coagulación- floculación

Este procedimiento incluye dos etapas principales: primero, se emplean productos químicos (coagulantes) para desestabilizar y agrandar las partículas, y luego, se separan físicamente los sólidos de la fase líquida. La coagulación-floculación es una solución simple y rentable para remover sólidos coloidales no sedimentables, tales como surfactantes, metales pesados, ácidos grasos y ácidos húmicos. Sin embargo, tiene algunas desventajas, entre ellas: sensibilidad al pH, producción de lodos y un incremento en la concentración de aluminio o hierro en la fase líquida (Renou et al. ,2008; Luo et al. ,2020).

4.4.2 Adsorción

La adsorción es un proceso de transferencia de masa en el que una sustancia pasa de la fase líquida a la superficie de un sólido, mediante interacciones físicas o químicas. Esta técnica se utiliza de manera generalizada para eliminar compuestos orgánicos difíciles de degradar y metales pesados en lixiviados de rellenos sanitarios. El carbón activado granular (GAC) y el carbón activado en polvo (PAC) son los adsorbentes más comunes debido a su amplia superficie, estructura de poros ajustable, baja reactividad ácido-base y alta eficacia en la eliminación de una

amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en los lixiviados (Saheed et al. ,2022).

4.4.3 Procesos de oxidación avanzada (POA)

Los POA se usan para transformar lixiviados antiguos o previamente tratados para estabilizarlos, de modo que la materia orgánica oxidante se transforme en formas de oxidación más estables, como agua y dióxido de carbono, con el fin de lograr una completa mineralización. Asimismo, este proceso es beneficioso para aumentar la biodegradabilidad de contaminantes orgánicos persistentes, facilitando el uso de posterior tratamiento biológico más económico (Luo et al. ,2020).

4.4.3.1 Peroxicoagulación. La peroxicoagulación es un método prometedor por su carácter ecológico y su capacidad para generar grandes cantidades de radicales hidroxilos mediante la aplicación de una corriente controlada. El proceso comienza en el ánodo de sacrificio, que libera continuamente iones Fe^{2+} a la solución. Al mismo tiempo, el H_2O_2 se produce de manera constante a partir de la reducción de O_2 en el cátodo, contribuyendo a la descontaminación de la solución (Castillo Suárez et al. ,2018).

4.4.3.2 Electro oxidación. La eliminación de contaminantes se consigue principalmente mediante dos mecanismos: la oxidación directa, en la que los electrones se transfieren directamente a la superficie del ánodo oxidante, y la oxidación indirecta, que implica la generación de sustancias electroactivas. Ambos procesos, la oxidación directa e indirecta, descomponen la estructura y estabilidad de la mayoría de los contaminantes presentes en la solución electrolítica, lo que permite una mayor eficiencia en su eliminación (Guo et al. ,2022).

4.4.3.3 Foto fenton. El proceso foto-Fenton solar combina peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y iones de hierro ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$) bajo radiación UV para generar radicales hidroxilos, los cuales son

eficaces en la degradación de contaminantes en aguas residuales. La reacción Fenton se ve limitada por la rápida conversión de Fe^{2+} a Fe^{3+} , pero al usar la radiación UV esta regenera el ion ferroso, mejorando así la eficiencia. Cuando se aprovecha la luz solar se reducen costos energéticos y se vuelve eficaz para tratar contaminantes complejos, pero su aplicación a gran escala enfrenta barreras debido a los altos costos de inversión en tecnologías como los reactores con colectores parabólicos compuestos (Poblete, Cortes et al. ,2019; Spiniello et al. ,2023)

4.4.3.4 Activación por persulfato. La activación por persulfato ($S_2O_8^{2-}$) genera radicales sulfatos (SO_4^-), que son altamente reactivos y que degradan contaminantes orgánicos. A diferencia del peróxido de hidrógeno, el persulfato puede oxidar algunos compuestos orgánicos directamente, sin involucrar especies. La activación por persulfato ha ganado atención en el tratamiento de aguas debido a su mayor rendimiento, variedad de métodos de activación y menores costos logísticos. Los radicales sulfatos tienen potenciales redox superiores a los de los radicales hidroxilos, haciéndolos una alternativa prometedora en remediación ambiental (Lee et al. ,2020).

4.4.3.5 Electrocoagulación. Un electrodo se sumerge en una solución electrolítica y se aplica corriente al ánodo y cátodo para impulsar el proceso de manera no espontánea. Durante la reacción, los iones del electrolito se desplazan entre ambos electrodos: los cationes se reducen y los aniones se oxidan, facilitando la eliminación de contaminantes mediante condensación. Químicamente, el proceso implica aplicar corriente para disolver gradualmente el ánodo de sacrificio, lo que genera una cantidad considerable de cationes metálicos de alta carga. Estos cationes actúan como coagulantes y se hidrolizan cerca del ánodo, formando hidróxidos $M(OH)_n$ que floculan los contaminantes. Simultáneamente, el agua se reduce a H_2 en el cátodo, promoviendo la flotación de los flóculos, permitiendo la eliminación de contaminantes tanto por precipitación como por flotación (Guo et al. ,2022).

4.4.3.6 Fotocatálisis. Es un proceso de oxidación avanzada que emplea un fotocatalizador semiconductor, al ser expuesto a una radiación específica, desencadenando reacciones de óxido-reducción. Esto facilita la eliminación de los contaminantes y produce efluentes con menor toxicidad, lo que los hace adecuados para someterse a tratamientos posteriores, como los procesos biológicos, que son menos complejos (Becerra et al. ,2020).

5. Técnicas actuales de tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios

El propósito de este proyecto fue realizar la investigación acerca de las tecnologías y los retos que presenta el tratamiento de los lixiviados de rellenos sanitarios en los últimos años (2018-2024). Para realizar la identificación de los retos actuales se realizó la revisión, lectura y análisis de los artículos que cumplieran los criterios de búsqueda, a partir de esto se logró identificar los siguientes retos:

- Altos potenciales de contaminación dada la composición de los lixiviados como metales pesados y compuesto orgánicos, igualmente, su variabilidad según la naturaleza de los residuos y edad del relleno sanitario, especialmente en lixiviados maduros que son difíciles de tratar debido a su alta toxicidad y baja biodegradabilidad.
- Altos costos de tratamiento, en términos de inversión inicial como de operación, representando un desafío en su implementación a gran escala, especialmente cuando no se cumple con la infraestructura adecuada.
- Aun no se logra el cumplimiento de normativas ambientales y de salud pública, ya que para que los lixiviados después de su tratamiento puedan ser liberados al medio ambiente deben cumplir ciertos estándares específicos de calidad del agua, siendo diferente en cada país.

- El crecimiento poblacional y el desarrollo económico, aumenta la generación de residuos sólidos urbanos, pero también se evidencia un creciente interés en la recuperación de recursos valiosos en los lixiviados, como nutrientes y agua.
- Necesidad de soluciones efectivas, económicamente viables y sostenibles que minimicen el impacto ambiental y maximicen la recuperación de recursos.

Después de la revisión de 21 artículos que cumplieron con los criterios de búsqueda y selección, se dividieron en primera instancia de acuerdo con la fase de tratamiento que abordaban, porque se identificó que las tecnologías de tratamiento de lixiviados pueden ser aplicadas en alguna fase de tratamiento, es decir, pretratamiento, tratamiento o todo el tratamiento completo. A continuación, en las **Tablas 2,3,4 y 5** se muestran agrupados estos trabajos donde se analizan diferentes aspectos y se sintetiza la información relevante.

Tabla 2

Tecnologías de pretratamiento

<i>Referencia</i>	<i>Descripción</i>	<i>Tipo de tratamiento</i>	<i>Eficiencias</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
(da Costa et al., 2018)	El proceso foto Fenton solar utilizo ferrosulfato y peróxido de hidrógeno como reactivos. Durante el proceso, el lixiviado se expuso a la radiación solar, lo que permitió la degradación de materia orgánica y la reducción de toxicidad. La reacción se llevó a cabo en un sistema donde se recirculaba el lixiviado y se ajustaba el pH al final del tratamiento.	Pretratamiento: Foto fenton solar Tratamiento: N/A Postratamiento: N/A Tipo de lixiviado: Joven y maduro	<ul style="list-style-type: none"> • Lixiviado joven Eliminación de DQO: 82% Eliminación de COT: 85% Biodegradabilidad: 89%	<ul style="list-style-type: none"> • Efectividad • Económico en comparación a otros tratamientos • Posterior aplicación de un tratamiento biológico • Potencial escalabilidad 	Complejo, dado que se requiere un control cuidadoso de las condiciones operativas
(Singh Thind & John, 2020)	El proceso consistió en el uso foto-Fenton solar como pretratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios utilizando iones ferrosos y peróxido de hidrógeno como reactivos, durante el proceso se usó un agitador magnético para evitar la formación de espuma.	Pretratamiento: Foto fenton solar Tratamiento: N/A Postratamiento: N/A Tipo de lixiviado: Joven	Eliminación de DQO: 86,21% Tiempo de reacción: 4h	<ul style="list-style-type: none"> • Mejor biodegradabilidad • Alto potencial de oxidación, degradación de una amplia variedad de compuestos xenobióticos • Alta eficiencia por generación de iones ferrosos 	Su aplicabilidad requiere un análisis más detallado, dado que se usó un análisis estadístico
(Zico et al., 2021)	El tratamiento consiste en la recuperación de amoniaco de lixiviados de rellenos sanitarios mediante la combinación de Ultrafiltración (UF) y Destilación por Membrana impulsada por energía solar. Este proceso utiliza energía solar para calentar la solución de alimentación, optimizando parámetros como el pH, la temperatura y la concentración de la solución absorbente.	Pretratamiento: Ultrafiltración + Destilación por membrana contacto directo modificada Tratamiento: N/A Postratamiento: N/A Tipo de lixiviado: Maduro	Eliminación de DQO: N/A Eliminación de amoniaco: 98% Recuperación de amoniaco: 59% Tiempo de reacción: 8,33h 3	<ul style="list-style-type: none"> • Escalable y económico, dada la reducción de costos por energía y la producción de un subproducto comercial. 	Control cuidadoso por optimización de parámetros

Tabla 3

Tecnologías de tratamiento

<i>Referencia</i>	<i>Descripción</i>	<i>Tipo de tratamiento</i>	<i>Eficiencias</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
(Castillo Suárez et al.,2018)	El tratamiento consiste en la peroxicoagulación y la peroxicoagulación solar de lixiviados de rellenos sanitarios utilizando un reactor electrolítico con un cátodo de hierro (Fe) y un ánodo de cobre (Cu). Este proceso genera peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) y radicales hidroxilos (•OH) para degradar contaminantes presentes en el lixiviado, mejorando su biodegradabilidad.	Pretratamiento: N/A Tratamiento: Peroxicoagulación solar Postratamiento: N/A Tipo de lixiviado: Maduro	Peroxicoagulación: Eliminación de DQO: 62,3% Eliminación de color: 75,4% Eliminación de DBO: 55,5% La luz UV solar no influyó en la DQO ni en el color	<ul style="list-style-type: none"> • Método ambientalmente amigable 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de turbidez, lo que causa una baja eficiencia de eliminación de contaminantes por generación de lodos • No viable para ser escalable, dado que la energía solar no es significativa en el proceso
(Salmerón et al.,2020)	Este método combina la electrólisis con la radiación solar para mejorar la biodegradabilidad del agua tratada y facilitar la eliminación de contaminantes orgánicos. Durante el tratamiento, se generaron radicales de cloro a partir de especies electrogeneradas, lo que contribuyó a la degradación de los compuestos presentes en las aguas residuales	Pretratamiento: N/A Tratamiento: Electro oxidación Postratamiento: N/A Tipo de lixiviado: Joven	Eliminación de DQO: N/A Relación de biodegradabilidad: 0,2 Tiempo de reacción: 10h	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor biodegradabilidad y reducción de toxicidad que permite un tratamiento biológico aeróbico posterior • Formación de radicales de cloro que ayudan en la eliminación de contaminantes orgánicos. • Reducción de costos por integración de foto reactor solar basado en colectores parabólicos compuestos. • Sostenible y económico, por menor consumo eléctrico con potencial para ser escalable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inversión inicial significativa • Complejo en comparación a otras técnicas

<i>Referencia</i>	<i>Descripción</i>	<i>Tipo de tratamiento</i>	<i>Eficiencias</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
(Pereira et al., 2021)	El tratamiento consistió en el proceso de solar foto-Fenton, que implica la utilización de radiación solar para activar el sistema Fenton, donde se emplean reactivos como el peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) y hierro (Fe ²⁺) para oxidar los contaminantes presentes en el lixiviado. Este proceso se llevó a cabo en un fotoreactor diseñado para maximizar la exposición a la luz solar, lo que mejora la eficiencia del tratamiento.	Pretratamiento: N/A Tratamiento: Foto fenton solar Postratamiento: N/A Tipo de lixiviado: Maduro	Eliminación de DQO: 70% Eliminación de color: 90% Tiempo de reacción: 0,5h	<ul style="list-style-type: none"> Operación sencilla y económica, ya que no se requieren equipos complejos Escalable por su adaptación a diferentes volúmenes de lixiviado. Potencial de reutilización de aguas tratadas para fines no potables. 	Dependencia de radiación solar para maximizar la eficacia del proceso
(Liu et al., 2022)	El tratamiento consistió en la utilización de biocarbono derivado de lodos de aguas residuales (SDBC) para activar fototérmicamente el persulfato (PDS) en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Se mezcla el SDBC con el lixiviado tratado biológicamente para facilitar la adsorción de contaminantes. Se añade PDS al lixiviado y se activa mediante irradiación con luz, generando radicales libres que degradan los contaminantes presentes.	Pretratamiento: N/A Tratamiento: Adsorción + activación del persulfato Postratamiento: N/A Tipo de lixiviado: Maduro	Eliminación de color: 100%, Eliminación de DQO: 80 % + Eliminación de TOC:75 % Tiempo de reacción: 3h	<ul style="list-style-type: none"> Alta eficiencia de conversión fototérmica Amplia absorción espectral Preparación de biocarbono sencillo Escalable dada la reutilización del carbono. Bajo costo al utilizar un residuo como materia prima 	Inversión en equipos y tecnología adicional para la producción del biocarbono.
(Arunkumar et al., 2023)	El tratamiento mediante destilación solar consiste en utilizar la energía solar para evaporar el agua de las aguas residuales, lo que permite la separación de contaminantes y la obtención de agua purificada. Este proceso implica la evaporación del agua, seguida de la condensación del vapor, resultando en la recolección de agua destilada que es significativamente más limpia y libre de contaminantes.	Pretratamiento: N/A Tratamiento: Destilación solar Postratamiento: N/A Tipo de lixiviado: Joven	Eliminación de DQO: 95% Eliminación de NH ₃ - N: 90,6% Eliminación de fosfato: 99,9% Tiempo de reacción: 10h	<ul style="list-style-type: none"> Proceso sostenible y sencillo, ya que utiliza un sistema de evaporación que no requiere tecnología compleja. Económico, dado que usa energía solar 	<ul style="list-style-type: none"> Necesidad de grandes áreas para instalación de sistemas Dependencia de la luz solar Estudios complementarios para verificar eliminación de contaminantes.

Tabla 4

Tecnologías de pretratamiento y tratamiento

<i>Referencia</i>	<i>Descripción</i>	<i>Tipo de tratamiento</i>	<i>Eficiencias</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
(Rebolledo et al., 2019)	El tratamiento consiste en coagulación con cloruro de polialuminio seguida del proceso foto Fenton solar. Este tratamiento busca reducir la demanda química de oxígeno (DQO) en el lixiviado de rellenos sanitarios mediante la coagulación y un proceso de oxidación avanzada utilizando luz solar.	Pretratamiento: Coagulación/sedimentación Tratamiento: Foto fenton solar Postratamiento: N/A Tipo de lixiviado: Maduro	Eliminación de DQO: 73% Tiempo de reacción: 0,83 h en pretratamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia superior, ambos tratamientos alternativos son más eficientes que el tratamiento actual • Opción sostenible y renovable, especialmente en regiones con clima tropical (Barranquilla). • Cumple límite legal de descarga por DQO en aguas residuales públicas, cumpliendo con el límite legal de DQO de 2000 mg O₂/L. 	<ul style="list-style-type: none"> • El tratamiento de coagulación con FeCl₃·6H₂O es más costoso que el tratamiento de coagulación con cloruro de polialuminio. • Complejo, dado que se requiere un control cuidadoso de las condiciones operativas
(Rebolledo et al., 2019)	El tratamiento consiste en coagulación con FeCl ₃ ·6H ₂ O seguida del proceso foto Fenton solar inducido por ferrioxalato. Este tratamiento busca reducir la demanda química de oxígeno (DQO) en el lixiviado de rellenos sanitarios mediante la coagulación y un proceso de oxidación avanzada utilizando luz solar.	Pretratamiento: Coagulación / sedimentación Tratamiento: Foto fenton solar Postratamiento: N/A Tipo de lixiviado: Maduro	Eliminación de DQO: 80% Tiempo de reacción: 1h en pretratamiento		
(Poblete, Cortes et al., 2019)	Las muestras fueron sometidas a un proceso de filtración, seguido se sometió a un proceso de coagulación-floculación con el fin de eliminar los sólidos suspendidos restantes. Posteriormente, se realiza un tratamiento de adsorción utilizando carbón activado (AC) producido a partir de escamas de pescado, por último, se usó el proceso foto fenton solar, para eliminar la materia	Pretratamiento: Filtración + coagulación/floculación+ adsorción (escamas) Tratamiento: foto fenton solar (O ₃ /O ₂) Postratamiento: N/A	Eliminación de DQO: 75,4% Eliminación de color: 99,4% Eliminación de cobre:94,4% Eliminación de hierro: 68,3% Tiempo de reacción: 11h	<ul style="list-style-type: none"> • Mejor rendimiento por eliminación de color y metales del lixiviado • Sostenible y económico por uso de escamas de pescado • Sencillo y escalable, dada su facilidad de operación y adaptabilidad a diferentes volúmenes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Complejidad por composición de lixiviados, se sugieren tratamientos adicionales para alcanzar niveles de seguridad ambiental adecuados

<i>Referencia</i>	<i>Descripción</i>	<i>Tipo de tratamiento</i>	<i>Eficiencias</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
	orgánica del lixiviado de rellenos sanitarios.	Tipo de lixiviado: Joven			
(Poblete & Pérez, 2020)	La muestra de lixiviado de rellenos sanitarios se sometió a filtración para posteriormente aplicarse a un proceso de adsorción utilizando aserrín activado, por último, se llevó a cabo el tratamiento foto Fenton solar, utilizando peróxido de hidrógeno y sales de hierro, optimizando las condiciones de pH y concentración de reactivos	Pretratamiento: Filtración +adsorción (aserrín) Tratamiento: Foto fenton solar Postratamiento: N/A Tipo de lixiviado: Joven	Eliminación de DQO: 95,1%, Eliminación de color: 95% Eliminación de amonio: 94,5% Eliminación de ácidos húmicos :97,9%. Tiempo de reacción: 12h	<ul style="list-style-type: none"> • Mejor rendimiento y efectividad, debido a la combinación de procesos. • Económico, eficiente, fácil de implementar y operar, por el uso de aserrín activado como un material de adsorción • Proceso escalable, ya que se puede adaptar a diferentes volúmenes de tratamiento. 	Complejo, dado que se requiere un control cuidadoso de las condiciones operativas
(Becerra et al., 2020)	El tratamiento consistió en la acoplar la fotocatalisis solar utilizando TiO ₂ como catalizador seguido de un proceso biológico aeróbico. La fotocatalisis se llevó a cabo en un colector parabólico y se probaron diferentes niveles de TiO ₂ y pH. Posteriormente, se aplicó un proceso biológico aeróbico.	Pretratamiento: Fotocatalisis solar Tratamiento: Reactor de lodos activados Postratamiento: N/A Tipo de lixiviado: Mediana edad	Eliminación de DQO: 68% Eliminación de DOC: 76% Tiempo de reacción: 672h	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia en la eliminación de contaminantes, que producen efluentes con menor toxicidad • Sostenibilidad económica y ambiental, dado el uso de radiación solar hace que el proceso sea económicamente viable, especialmente para aplicaciones a gran escala. • Mejor biodegradabilidad y un efluente más estable 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependencia de la luz solar • Necesidad de filtración después de fotocatalisis
(Becerra et al., 2022)	El tratamiento consistió en la combinación de fotocatalisis solar utilizando TiO ₂ -UV y un proceso biológico anaeróbico. La fotocatalisis se llevó a cabo en un colector parabólico con un tanque de tratamiento de 20 litros y una concentración inicial de lixiviados de 400 mg/L de DQO. Se utilizó H ₂ O ₂ como auxiliar de oxidación y se probaron diferentes niveles de TiO ₂ y pH. Posteriormente, se aplicó un proceso biológico anaeróbico para mejorar la	Pretratamiento: Fotocatalisis solar Tratamiento: Proceso anaeróbico Postratamiento: N/A Tipo de lixiviado: Maduro	Eliminación de DQO: N/A Eliminación de COD: 78% Tiempo de reacción: 556,16 h	<ul style="list-style-type: none"> • Efectivo, capaz de convertir efluentes tóxicos en aguas más biodegradables • Viable dada su capacidad para degradar lixiviados 	<ul style="list-style-type: none"> • Complejo, dado que se requiere un control cuidadoso de las condiciones operativas • Se requiere más estudios y optimización para su escalabilidad.

<i>Referencia</i>	<i>Descripción</i>	<i>Tipo de tratamiento</i>	<i>Eficiencias</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
	mineralización de los contaminantes restantes.				
(Jegadeesan et al. ,2022)	El tratamiento consistió en una combinación de electrocoagulación y el proceso solar foto-Fenton para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. La electrocoagulación se empleó para eliminar contaminantes, mientras que el proceso solar foto-Fenton se utilizó para mejorar la eliminación de color y compuestos orgánicos. Este tratamiento se llevó a cabo bajo diversas condiciones operativas	Pretratamiento: Electrocoagulación Tratamiento: Foto fenton solar Postratamiento: N/A Tipo de lixiviado: Maduro	Eliminación de DQO: 90% Eliminación de color: 91% Tiempo de reacción: 2 h	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia • Rentable y sencillo • Ambientalmente amigable, dado que el hierro y el peróxido no son tóxicos • Posible escalabilidad, realización de estudios para ampliar este procedimiento al mundo real • Cumple límite legal de descarga por DQO en aguas residuales públicas 	Se requieren estudios, para ver si el proceso de electrocoagulación puede usar energía solar como fuente impulsora
(Floriano Santon et al. ,2022)	El proceso consistió en la degradación de lixiviados utilizando un proceso foto-Fenton solar (SPF), que se evaluó en términos de la influencia de la coagulación-floculación como un paso de pretratamiento. Se realizaron experimentos aplicando el proceso a muestras crudas en presencia o ausencia de ácido oxálico, así como a muestras con coagulación de hierro (III) en ausencia de ácido oxálico.	Pretratamiento: Coagulación/ floculación Tratamiento: Foto fenton solar Postratamiento: N/A Tipo de lixiviado: Joven	Eliminación del DQO: 90% Eliminación de DOC:86% Tiempo de reacción: 4,42h	<ul style="list-style-type: none"> • Menores cantidades de reactivos con foto fenton solar • Se descarta la necesidad del proceso coagulación/floculación • Mayor efectividad del proceso SPF sin ningún otro tratamiento • Reducción de costos energéticos, buena incidencia de radiación solar por ubicación en zona tropical. • Mejor biodegradabilidad, lo que permite una integración más efectiva con tratamientos biológicos posteriores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Complejo, dado que se requiere un control cuidadoso de las condiciones operativas
(Moretti et al. ,2023)	El proceso consistió en la combinación de un proceso fisicoquímico de coagulación-floculación y un proceso de oxidación avanzada conocido como foto-Fenton solar heterogéneo. En este	Pretratamiento: Coagulación- floculación Tratamiento: Foto fenton solar	Eliminación de DQO: 74% Eliminación de color: 94% Eliminación de DBO: 62%	<ul style="list-style-type: none"> • Catalizador de ferrita de zinc-manganeso con buena actividad, alta estabilidad y con capacidad de reutilización 	<ul style="list-style-type: none"> • Complejidad operativa por combinación de procesos fisicoquímicos y

<i>Referencia</i>	<i>Descripción</i>	<i>Tipo de tratamiento</i>	<i>Eficiencias</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
	enfoque, se utilizó ferrita de zinc-manganeso como catalizador. El proceso implicó la adición de coagulantes para ajustar el pH y facilitar la eliminación de sólidos en suspensión, seguido de la aplicación del proceso foto-Fenton.	Postratamiento: N/A Tipo de lixiviado: Mediana edad	Tiempo de reacción: 2h	<ul style="list-style-type: none"> • Escalabilidad por su efluente biodegradable y transparente 	<p>cuidado en las condiciones operativas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Altos costos operativos por necesidad de múltiples etapas de tratamiento
(Spiniello et al., 2023)	Los estudios analizaron el tratamiento de residuos sanitarios y lixiviados de rellenos sanitarios mediante sistemas híbridos de humedales construidos combinados con procesos solares foto-Fenton. Estas tecnologías integradas mostraron una alta eficiencia de eliminación de diversos contaminantes, y el proceso solar foto-Fenton mejoró la eliminación de DQO en el lixiviado tratado.	Pretratamiento: Humedales construidos híbridos Tratamiento: Foto fenton oscuro + solar Postratamiento: N/A Tipo de lixiviado: Joven	Eliminación de DQO: 93% Eliminación de DBO5: 95% Eliminación de Nitrógeno: 92% Tiempo de reacción: 241,5 h	<ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento sostenible y con menor impacto ambiental. • Adaptación del tamaño de los humedales y tratamiento de mayores volúmenes de lixiviados por foto fenton solar 	<ul style="list-style-type: none"> • Supervisión constante, ya que se requiere monitoreo y mantenimiento de los sistemas integrados.
(Poblete et al., 2023)	El proceso consistió en someter el lixiviado primero a un proceso de pretratamiento por filtración para eliminar sólidos suspendidos, posteriormente a un proceso de coagulación/floculación y por último un tratamiento solar tipo foto-Fenton utilizando láminas de cobre y peróxido de hidrogeno como catalizador.	Pretratamiento: Filtración + coagulación/floculación Tratamiento: Foto fenton solar Postratamiento: N/A Tipo de lixiviado: Mediana Edad	Eliminación de DQO: 90,1% Eliminación de TOC: 90,2% Eliminación de cobre: 99,7% Eliminación de ácidos húmicos: 99,9% Tiempo de reacción: 22h	<ul style="list-style-type: none"> • Alta reactividad, dado que el cobre y el peróxido de hidrógeno tiene una muy alta reactividad • Reducción de la formación de lodos, por el uso de un catalizador sólido ya que evita la formación de lodos de hierro. • Elimina compuestos tóxicos, mejorando así su biodegradabilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidación del catalizador, ya que puede afectar su efectividad a lo largo del tiempo. • Complejo, dada las condiciones de operación.

Tabla 5

Tecnologías de tratamiento completo

<i>Referencia</i>	<i>Descripción</i>	<i>Tipo de tratamiento</i>	<i>Eficiencias</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
(Poblete, Oller et al. ,2019)	El tratamiento consiste en un proceso de oxidación avanzada que incluyó ozonización, radiación solar UV, peróxido de hidrógeno y persulfato complementado con un proceso de adsorción utilizando zeolita natural.	Pretratamiento: Filtración Tratamiento: solar UV /O ₃ /H ₂ O ₂ /S ₂ O ₈ ⁻² Postratamiento: adsorción (zeolita) Tipo de lixiviado: Joven	Eliminación de DQO: 64,9% Eliminación de color:76,8% Tiempo de reacción: 5h	<ul style="list-style-type: none"> • Sostenibilidad, ya que se reduce el consumo de energía eléctrica • Mejor rendimiento de algunos reactivos por uso de radiación UV 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos y complejidad operativa asociado a reactivos • Algunos parámetros aun exceden regulaciones de calidad de agua • Toxicidad residual, pobre germinación de semillas
(Ruiz Delgado et al. ,2020)	El proceso consistió en una combinación de coagulación / floculación se utilizó cloruro férrico anhidro, un proceso de foto-Fenton solar el cual se llevó a cabo en un colector parabólico solar y se completó en un reactor biológico aeróbico. El proceso se llevó a cabo a escala piloto en la Plataforma Solar de Almería	Pretratamiento: Coagulación/floculación Tratamiento: Foto fenton solar Postratamiento: Reactor de biomasa inmovilizada Tipo de lixiviado: Maduro	Eliminación de DQO: 97% Eliminación de OMC: 94% Tiempo de reacción: 528 h	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción significativa de micro contaminantes orgánicos (OMC) • Mejor biodegradabilidad del efluente permite posterior incorporación a un proceso biológico • Realización de escala piloto lo que sugiere su viabilidad en entornos controlados 	<ul style="list-style-type: none"> • Complejo y costos, dada la necesidad de varias etapas
(Poblete et al. ,2024)	El tratamiento consiste en un sistema de fotocatalisis heterogénea con fly ash (ceniza volante), Las corridas fotocatalíticas se llevaron a cabo en modo discontinuo con recirculación, en un fotorreactor solar de colector parabólico compuesto y un proceso biológico posterior, el biorreactor consistió en una torre empacada de 1 L de volumen, llena con 1 kg de compost.	Pretratamiento: Coagulación/ floculación + filtración Tratamiento: Fotocatalisis solar Postratamiento: Biológico aeróbico (compost adaptado) Tipo de lixiviado: Maduro	Eliminación de DQO: 71,9% Eliminación de cobre: 68% Eliminación de hierro: 68% Tiempo de reacción: 260h	<ul style="list-style-type: none"> • Efectividad, en la remoción de metales como el hierro y el cobre con el compost adaptado. • Disminución de la toxicidad, debido a la eliminación de compuestos orgánicos tóxicos en moléculas más pequeñas y oxidadas. • Sostenible y económico, por el uso de residuos como catalizadores 	<ul style="list-style-type: none"> • Complejo y costos, dada la necesidad de varias etapas • Se deben explorar estrategias alternativas para mejorar la eliminación de DQO por el sistema biológico

5.1 Matrices de priorización

Con el fin de comparar las tecnologías estudiadas serán evaluadas por medio de matrices de priorización, es indispensable tener en cuenta y analizar diversos factores, con el fin de tener un mejor criterio a la hora de escoger la tecnología más adecuada según su fase de tratamiento.

Se han realizado dos tipos de matriz; en la primera se escogieron las especificaciones que se tienen en cuenta al momento de evaluar las tecnologías, dichas especificaciones son las siguientes:

- Eficiencia DQO
- Costo
- Tiempo de tratamiento
- Escalabilidad

En la matriz 1 se evalúa la importancia relativa de las especificaciones, comparándolas entre sí (especificaciones contra especificaciones). Se asigna un valor de 0 a la menos importante, 0,5 cuando tienen el mismo nivel de importancia y 1 a la más importante. De esta manera, se determina el valor que refleja la importancia y relevancia de cada especificación en relación con cada concepto evaluado.

Tabla 6*Matriz de priorización 1 - Especificación vs especificación*

	Eficiencia DQO	Costo	Tiempo tratamiento	Escalabilidad		Fracción	Porcentaje
Eficiencia DQO		0,5	0,5	0,5	1,5	0,2500	25,00
Costo	0,5		1,0	0,5	2,0	0,3333	33,33
Tiempo tratamiento	0,5	0,0		0,0	0,5	0,0833	8,33
Escalabilidad	0,5	0,5	1		2,0	0,3333	33,33
				Total	6,00	1,00	100,00

En la segunda matriz, se comparan las especificaciones previamente mencionadas con las características de cada tecnología. Cada tecnología es evaluada en función del grado en que cumple con las especificaciones requeridas, asignando una puntuación de 1 a 3, donde 1 es el menos favorable y 3 el más favorable. Posteriormente, se suman los resultados de cada tecnología, y la tecnología de tratamiento que obtenga la mayor puntuación será elegido en cada una de las distintas fases de tratamiento.

Para la calificación de cada tecnología se debe tener en cuenta los siguientes parámetros de calificación.

Tabla 7*Puntuación para eficiencia de DQO*

Puntuación	Rango de porcentaje
1	< 80% y N/A
2	$80\% \geq x < 90\%$
3	$\geq 90\%$

Tabla 8

Puntuación para tiempo de tratamiento

Puntuación	Rango de tiempo
1	$\geq 120h$
2	$5h > x < 120h$
3	$\leq 5h$

Tabla 9

Matriz de priorización 2- Especificaciones VS Tecnologías de pretratamiento

		(da Costa et al. ,2018)		(da Costa et al. ,2018)		(Singh Thind & John, 2020)		(Zico et al. ,2021)	
	Valor	Puntaje	Total	Puntaje	Total	Puntaje	Total	Puntaje	Total
Eficiencia DQO	0,2500	2	0,50	1	0,25	2	0,50	1	0,25
Costo	0,3333	3	1,00	3	1,00	1	0,33	3	1,00
Tiempo tratamiento	0,0833	3	0,25	3	0,25	3	0,25	2	0,17
Escalabilidad	0,3333	3	1,00	3	1,00	1	0,33	2	0,67
		Total	2,75	Total	2,50	Total	1,42	Total	2,08

Tabla 10

Matriz de priorización 2- Especificaciones VS Tecnologías de tratamiento

	(Castillo Suárez et al. ,2018)			(Salmerón et al. ,2020)		(Pereira et al. ,2021)		(Liu et al. ,2022)		(Arunkumar et al. ,2023)	
	Valor	Puntaje	Total	Puntaje	Total	Puntaje	Total	Puntaje	Total	Puntaje	Total
Eficiencia DQO	0,2500	1	0,250	1	0,25	1	0,25	2	0,50	3	0,75
Costo	0,3333	1	0,333	2	0,67	3	1,00	2	0,67	3	1,00
Tiempo tratamiento	0,0833	1	0,083	2	0,17	3	0,25	3	0,25	2	0,17
Escalabilidad	0,3333	1	0,333	2	0,67	3	1,00	2	0,67	2	0,67
		Total	1,000	Total	1,75	Total	2,50	Total	2,08	Total	2,58

Tabla 11

Matrices de priorización 2- Especificaciones VS Tecnologías de pretratamiento y tratamiento

	(Rebolledo et al. ,2019)			(Rebolledo et al. ,2019)		(Poblete, Cortes et al. ,2019)		(Poblete & Pérez, 2020)		(Becerra et al. ,2020)	
	Valor	Puntaje	Total	Puntaje	Total	Puntaje	Total	Puntaje	Total	Puntaje	Total
Eficiencia DQO	0,2500	1	0,25	2	0,50	1	0,25	3	0,75	1	0,25
Costo	0,3333	3	1,00	2	0,67	2	0,67	3	1,00	3	1,00
Tiempo tratamiento	0,0833	3	0,25	3	0,25	2	0,17	2	0,17	1	0,08
Escalabilidad	0,3333	3	1,00	3	1,00	3	1,00	3	1,00	3	1,00
		Total	2,50	Total	2,42	Total	2,08	Total	2,92	Total	2,33

	(Becerra et al. , 2022)			(Jegadeesan et al. ,2022)		(Floriano Santos et al. ,2022)		(Moretti et al. ,2023)		(Spiniello et al. ,2023)		(Poblete et al. ,2023)	
	Valor	Puntaje	Total	Puntaje	Total	Puntaje	Total	Puntaje	Total	Puntaje	Total	Puntaje	Total
Eficiencia DQO	0,2500	1	0,250	3	0,75	3	0,75	1	0,25	3	0,75	3	0,75
Costo	0,3333	2	0,667	2	0,67	3	1,00	2	0,67	3	1,00	2	1,33
Tiempo tratamiento	0,0833	1	0,083	3	0,25	3	0,25	3	0,25	1	0,08	2	0,17
Escalabilidad	0,3333	2	0,667	2	0,67	3	1,00	3	1,00	3	1,00	2	1,33
		Total	1,50	Total	2,50	Total	3,00	Total	2,17	Total	2,83	Total	3,58

Tabla 12

Matriz de priorización 2- Especificaciones VS Tecnologías de tratamiento completo

	Valor	(Poblete, Oller et al. ,2019)		(Ruiz Delgado et al. ,2020)		(Poblete et al. ,2024)	
		Puntaje	Total	Puntaje	Total	Puntaje	Total
Eficiencia DQO	0,2500	1	0,250	3	0,75	1	0,25
Costo	0,3333	2	0,667	2	0,67	2	0,67
Tiempo tratamiento	0,0833	3	0,250	1	0,08	1	0,08
Escalabilidad	0,3333	1	0,333	3	1,00	3	0,67
		Total	1,50	Total	2,50	Total	1,67

Después de estas ponderaciones se identificaron las siguientes tecnologías por fase de tratamiento que según su puntaje fueron las que ocuparon el primer lugar:

Tabla 13

Tecnologías ganadoras según fase de tratamiento

Fase de tratamiento	Referencia	Características
Tecnología de pretratamiento	(da Costa et al. ,2018)	Se uso foto fenton solar como pretratamiento de un lixiviado joven, obteniendo un 82% de eliminación de DQO y en un tiempo de reacción de 1h, señalando que posteriormente se puede usar un tratamiento biológico para lograr mayor eliminación de DQO y otras características.
Tecnología de tratamiento	(Arunkumar et al. ,2023)	Se uso destilación solar como tratamiento de un lixiviado joven, con eliminación de DQO del 95% y en un tiempo de reacción de 10h.
Tecnología de pretratamiento y tratamiento	(Poblete et al. ,2023)	Se uso filtración + coagulación/floculación como pretratamiento y foto fenton solar como fase de tratamiento para tratar un lixiviado de mediana edad, en un tiempo de reacción de 22h, llegando a eliminar el DQO en 90,1%.
Tecnología de tratamiento completo	(Ruiz Delgado et al. ,2020)	Como pretratamiento se usó coagulación/floculación como tratamiento foto fenton solar y como postratamiento un Reactor de biomasa inmovilizada para tratar un lixiviado maduro, con una eliminación de DQO del 97%, además para contrastar su efectividad se realizó una escala piloto con una duración de 528h.

6. Análisis de factibilidad

Hasta este momento se puede decir que se ha logrado explicar cuáles son las principales tecnologías de tratamiento. Ahora si queremos implementar alguna de estas tecnologías de tratamiento de lixiviados en un contexto regional debemos mirar la empresa que funciona en este sector, la cual es el “Relleno sanitario el Carrasco”. A este relleno sanitario llegan mil toneladas diarias de residuos sólidos urbanos provenientes de siete municipios: Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta, Rionegro, Playón y Matanza. La ciudad de Bucaramanga posee una de las pocas plantas de tratamiento de lixiviados en el país, lo que ha permitido que la Empresa de aseo de Bucaramanga (EMAB) sea la única empresa de servicios públicos en la región oriental de Colombia con autorización para verter aguas en las quebradas cercanas desde 2018. Esto es posible

gracias a la combinación de tecnologías de tratamientos fisicoquímicos y tecnología por membranas, que garantizan la completa purificación y reutilización del lixiviado (Alcaldía de Bucaramanga, 2022).

Sin embargo, el costo de las tecnologías de separación por membranas puede llegar a tener un alto costo operativo, alto consumo de energía y un retenido de membrana muy contaminado con metales pesados, materia orgánica, entre otros (Bandala et al. ,2021)

Por tanto, el proceso que se usa actualmente se puede modificar para una mayor sostenibilidad. Por ende, al analizar la Tabla 13, se observa que el proceso que más se usa en pretratamiento y tratamiento y que tiene altas eficiencias es el proceso foto fenton solar. Siendo una buena alternativa a usar dado que estamos en un país tropical, con buena incidencia de rayos UV, por lo que se puede aprovechar al máximo una fuente renovable y sostenible (Rebolledo et al. ,2019; Floriano Santos et al. ,2022).

El proceso foto fenton solar tiene una buena escalabilidad, basándonos en las pruebas piloto realizadas por Ruiz Delgado et al.(2020) y otros estudios mencionados anteriormente que sugieren que este tratamiento puede adaptarse a volúmenes más grandes de tratamiento.

A continuación, se analiza la viabilidad técnica y económica de esta tecnología, evaluando la escalabilidad, costos y beneficios.

6.1 Escalabilidad

Primero debemos tener en cuenta el diseño de diseño de reactores solares eficientes. Según los estudios aquí analizados se demuestran que los colectores parabólicos compuestos (CPC) son los mejores a usar, dado que ayudan a concentrar y reflejar toda la radiación difusa e incidente en un receptor.

Ahora para lograr una alta eficiencia del proceso foto fenton solar se requiere que no esté en presencia de altos niveles de metales pesados y sólidos suspendidos, lo que sugiere la necesidad de un pretratamiento, como lo sugiere Poblete et al. (2023) que usan filtración + coagulación/floculación, para esto se puede usar la tecnología existente en el relleno sanitario, la cual es una celda de flotación por aire disuelto y un sistema de filtración.

6.2 Costos

El diseño y construcción de reactores adaptados para captar luz solar y soportar reacciones químicas a gran escala tiene un costo de instalación elevado.

Los reactivos para el proceso (peróxido de hidrógeno y sales de hierro) requieren una inversión inicial y continua. Sin embargo, al ser sustancias relativamente económicas y disponibles, el costo es moderado.

Silva et al. (2016) hicieron un análisis de costes de este sistema, basándose en todo lo que incluye el proyecto, desde la ingeniería, configuración y repuestos, personal, mantenimiento, suministros y productos químicos para dar un valor de costo unitario, alcanzando valores de DQO de 1000 y 150 mg O₂ /L, fueron 6,8 y 11,0 €/m³ utilizando CPC's. El coste del reactivo H₂O₂ representa entre el 30% y 39% del coste total anual.

6.3 Beneficios Ambientales

Al utilizar energía solar, se reduce la dependencia de fuentes de energía fósiles, reduciendo así su impacto ambiental. El agua tratada mediante este proceso puede reutilizarse en actividades industriales o incluso en riego, lo que promueve la economía circular.

7. Conclusiones

El análisis realizado en este proyecto permitió identificar, evaluar y realizar una clasificación detallada de tecnologías de tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Entre las

contribuciones principales se destaca el uso de la energía solar en procesos de tratamiento de lixiviados convencionales, lo que contribuiría al desarrollo de prácticas más sostenibles y reduciría la dependencia de tecnologías costosas y con alto consumo energético. La comprensión de estas tecnologías logro identificar los retos que se tienen actualmente en el tratamiento de los lixiviados siendo el principal la necesidad de soluciones efectivas, economías y sostenibles que sean ambientalmente amigables, además se observa la necesidad de usar residuos como materia prima en procesos como adsorción y foto fenton solar.

A partir de la caracterización y evaluación por matrices de ponderación, se logró identificar las tecnologías más eficientes, como la destilación solar y el foto-Fenton solar, que muestran altos niveles de eficiencia en la eliminación de DQO y la degradación de contaminantes. Además, se logró proponer el proceso foto fenton solar como una alternativa viable y escalable, aprovechando que Colombia es un país tropical, sin embargo, aún existen desafíos en términos de costos y optimización operativa.

El análisis de factibilidad realizado propuso usar parte de la tecnología existente en el relleno sanitario como pretratamiento para el proceso foto fenton solar, sin embargo, la inversión inicial en infraestructura podría ser un obstáculo, pero sus beneficios a largo plazo, en términos de sostenibilidad y eficiencia, justificarían su implementación. Además, los resultados del proyecto pueden servir como base para el desarrollo de políticas públicas que promuevan el uso de energías renovables en el tratamiento de lixiviados, de esta manera incentivando la implementación de tecnologías limpias en todo el país y fomentando la innovación en la gestión de residuos.

8. Recomendaciones

A partir del análisis que se realizó, se considera importante el estudio de diseño de reactores solares eficientes y económicos, junto con la optimización de las condiciones operativas según el

tipo de lixiviado a tratar. Además, evaluar si los residuos generados en Santander pueden ayudar como catalizadores, materiales adsorbentes orgánicos o la creación de algún tipo de membrana biodegradable para el proceso de filtración.

De igual manera, se deben realizar estudios que permitan la realización de una medición cuantitativa del impacto real que puede causar el empleo de estas tecnologías, por ende, la realización de pruebas piloto para evaluar si el lixiviado tratado cumple con los estándares de calidad del agua en la región.

Además, es importante sensibilizar a la población sobre la importancia de la correcta gestión de los residuos generados en nuestro hogar para la preservación del medio ambiente y la salud pública.

Referencias Bibliográficas

- Alcaldía de Bucaramanga. (7 de Mayo de 2022). *Así opera El Carrasco actualmente*. Obtenido de Gobernar Es Hacer: <https://www.bucaramanga.gov.co/noticias/asi-opera-el-carrasco-actualmente/#:~:text=Son%20mil%20toneladas%20diarias%20las,%2C%20Rionegro%2C%20Play%C3%B3n%20y%20Matanza>.
- Arunkumar, T., Wang, J., & Lee, S. (2023). Efficient solar desalination for clean water production from different wastewaters. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 121759–121769. doi:<https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1007/s11356-023-30507-7>
- Bah, A., Chen, Z., Alhassane, B., Qian, Q., Dinh Tuan, P., & Feng, D. (2023). Systematic literature review of solar-powered landfill leachate sanitation: Challenges and research directions over the past decade. *Journal of Environmental Management*, Volume 326, Part B, 116751, ISSN 0301-4797. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116751>.
- Banco Mundial. (20 de Septiembre de 2018). *Informe del Banco Mundial: Los desechos a nivel mundial crecerán un 70 % para 2050, a menos que se adopten medidas urgentes*. Obtenido de World Bank: <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report>
- Bandala , E. R., Liu, A., Wijesiri, B., Zeidman, A. B., & Gononetilleke, A. (2021). Emerging materials and technologies for landfill leachate treatment: A critical review. *Environmental Pollution*, 291, 118133. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118133>
- Barradas Rebolledo, A. (2009). *Gestión integral de residuos sólidos municipales: estado del arte. Tesis de doctorado*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

- Becerra , D., Soto, J., Villamizar, S., Machuca Martínez, F., & Ramírez, L. (2020). Alternative for the Treatment of Leachates Generated in a Landfill of Norte de Santander–Colombia, by Means of the Coupling of a Photocatalytic and Biological Aerobic Process. *Topics in Catalysis*, 63, 1336 - 1349. doi:<https://doi.org/10.1007/s11244-020-01284-1>
- Becerra, D., Caicedo, N., Velásquez, C., Machuca Martínez, F., & Soto Verjel, J. (2022). Heterogeneous Photocatalysis and an Anaerobic Biological Process for Leachate Treatment. *Ciencia en Desarrollo*, 13(2), 113-130. doi:<https://doi.org/10.19053/01217488.v13.n2.2022.13851>
- Bendicho, C., & Lavilla, I. (2005). Water Analysis | Sewage. In P. Worsfold, C. Poole, A. Townshend, & M. Miró, *Encyclopedia of Analytical Science (Third Edition)* (pp. 371 - 381). Vigo: Academic Press.
- Castillo Suárez, L. A., Bruno Severo, F., Lugo Lugo, V., Esparza Soto, M., Martínez Miranda, V., & Linares Hernández, I. (2018). Peroxicoagulation and Solar Peroxicoagulation for Landfill Leachate Treatment Using a Cu–Fe System. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229, 385. doi:<https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1007/s11270-018-4031-7>
- Christensen, T., Kjeldsen, P., Bjerg, P., Jensen, D., Christensen, J., Baun, A., . . . Heron, G. (2001). Biogeochemistry of landfill leachate plumes,. *Applied Geochemistry*, 16, 659-718. doi:[https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(00\)00082-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(00)00082-2).
- da Costa, F. M., Alves Daflon, S. D., Maia Bila, D., da Fonseca, F., & Carbonelli Campos, J. (2018). Evaluation of the biodegradability and toxicity of landfill leachates after pretreatment using advanced oxidative processes. *Waste Management*, 76, 606 - 613. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.030>.

Decreto 1784 de 2017. (2 de Noviembre de 2017). [*Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio*].

Por el cual se modifica y adiciona el decreto 1077 de 2015 en lo relativo con las actividades complementarias de tratamiento y disposición final de residuos sólidos en el servicio público de aseo. DO N°50405.

Decreto 4741 de 2005. (30 de Diciembre de 2005). [*Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo*

Territorial]. Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.

Decreto 838 de 2005. (24 de marzo de 2005). [*Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo*

Territorial]. Por medio del cual se modifica el decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones. DO N°45862.

Departamento Nacional de Planeación. (30 de Junio de 2022). *GUÍA NACIONAL PARA LA*

ADECUADA SEPARACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS. Obtenido de DANE: <https://economiacircular.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/06/guia-nacional-para-la-adecuada-gestion-de-residuos-colombia-2022.pdf>

Energías totales. (2021). *Las principales ventajas y desventajas de la energía solar*. Obtenido de

Energías totales: <https://www.totalenergies.es/es/pymes/blog/ventajas-desventajas-energia-solar#:~:text=Es%20una%20energ%C3%ADa%20limpia%20que,de%20ning%C3%BA%20tipo%20para%2>

Fernández del Castillo, A., Verduzco Garibay, M., Senés Guerrero, C., Orozco Nunnelly, D. A.,

de Anda, J., & Gradilla Hernández, M. (2022). A review of the sustainability of anaerobic reactors combined with constructed wetlands for decentralized wastewater treatment.

- Journal of Cleaner Production*, 371, 133428.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133428>.
- Floriano Santos, A. P., Gozzi, F., Evaristo de Carvalho, A., Ferreira de Oliveira, K. R., Rodrigues Lima Caires, A., Pereira Cavalcante, R., . . . Machulek Junior, A. (2022). Leachate degradation using solar photo-fenton like process: Influence of coagulation-flocculation as a pre-treatment step. *Separation and Purification Technology*, 289, 120712.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120712>.
- Girijan, S., & Kumar, M. (2019). Immobilized biomass systems: an approach for trace organics removal from wastewater and environmental remediation. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 12, 18- 29.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.08.005>.
- Grajeda Miranda, G. (2010). Generación y manejo de gases en rellenos sanitarios. *Tesis*. Universidad de Sonora, Hermosillo, México. Obtenido de <http://www.bidi.uson.mx/TesisIndice.aspx?tesis=20593>
- Guo, Z., Zhang, Y., Jia, H., Guo, J., Meng, X., & Wang, J. (2022). Electrochemical methods for landfill leachate treatment: A review on electrocoagulation and electrooxidation. *Science of The Total Environment*, 806(Part 2), 150529.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150529>.
- Jegadeesan, C., Somanathan, A., Jeyakumar, R. B., & Godvin Sharmila, V. (2022). Combination of electrocoagulation with solar photo Fenton process for treatment of landfill leachate. *Environmental Technology*, 44(28), 4441-4459. doi:<https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1080/09593330.2022.2093654>

- Lee, J., von Gunten, U., & Kim, J.-H. (2020). Persulfate-Based Advanced Oxidation: Critical Assessment of Opportunities and Roadblocks. *Environmental Science & Technology*, 54(6), 3064–3081. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07082>
- Ley 1259 de 2008. (19 de Diciembre de 2008). [*Congreso de la Republica*]. Por medio de la cual se instaure en el territorio nacional la aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros; y se dictan otras disposiciones.
- Ley 142 de 1994. (11 de Julio de 1994). [*Congreso de la República de Colombia*]. Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones. DO N°41433.
- Liu, Y., Huang, R., Hu, W., Lin, L., Liu, J., Wang, Q., . . . Zhang, J. (2022). High-performance photothermal conversion of sludge derived biochar and its potential for peroxydisulfate-based advanced oxidation processes. *Separation and Purification Technology*, 303, 122214. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122214>.
- Lobo, A., Herrero, J., Montero, O., Fantelli, M., & Tejero, I. (2002). Modeling for environmental assessment of municipal solid waste landfills (Part 2: Biodegradation). *Waste Management and Research*(20(6)), 514 - 528.
- Luo, H., Zeng, Y., Cheng, Y., He, D., & Pan, X. (2020). Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment. *Science of The Total Environment*, 703, 135468. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135468>.
- Martinez-Lopez, A., Padrón-Hernández, W., Rodríguez-Bernal, O. F., Chiquito-Coyotl, O., EscarolaRosas, M. A., Hernández-Lara, J., . . . Martínez-Castillo, J. (2014). Alternativas

- actuales del manejo de lixiviados. *Avances en Química*, vol. 9, núm. 1, pp. 37-47. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/933/93330767005.pdf>
- Meléndez, C. E. (2004). PROARCA. *Guía práctica para la operación de celdas diarias en rellenos sanitarios pequeños y medianos*. Sistemas de Gestión para el Medio Ambiente, El Salvador.
- Moretti, A. L., dos Santos, M. G., Soares, M., de Freitas, J. R., Rios, L., Soares Silva, F., . . . da Silva, M. A. (2023). Degradation of Municipal Solid Waste Landfill Leachate Using Ferrites from Spent Batteries as Heterogeneous Solar Photo-Fenton Catalyst. *International Journal of Environmental Research*, 17, 33. doi:<https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1007/s41742-023-00519-9>
- Nanda, S., & Berruti, F. (2021). Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review. *Environ Chem Lett* , 1433-1456.
- Noguera, K. M., & Olivero, J. T. (2010). Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso colombiano. *Revista Academia Colombiana de Ciencias exactas, físicas y naturales*, XXXIV(132), 347-356.
- Oller, I., Malato, S., Sánchez Pérez, J. A., Maldonado, M. I., & Gassó, R. (2007). Detoxification of wastewater containing five common pesticides by solar AOPs-biological coupled system. *Catalysis Today*, 129(1 - 2), 69 - 78. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2007.06.055>.
- Pereira, S. T., Rodrigues Rocha, E. M., & do Anjos Junior, R. H. (2021). Reuse potential of mature leachate after application or isolated and combined advanced oxidative processes. *International Journal of Environment and Waste Management*, 27(4), 475-486.

- Perez Gallardo, S. L. (2015). Evaluación de la remoción de contaminantes en lixiviado empleando tres especies de microalgas oleaginosas amazónicas. *Tesis de pregrado*. UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ, Iquitos.
- Poblete, R., & Pérez, N. (2020). Use of sawdust as pretreatment of photo-Fenton process in the depuration of landfill leachate. *Journal of Environmental Management*, 253, 109697. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109697>.
- Poblete, R., Alanís, F., Serna-Galvis, E. A., & Torres-Palma, R. A. (2024). Depuration of landfill leachates using fly ash as a catalyst in solar advanced oxidation processes and a compost bioreactor. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(1), 111651. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111651>.
- Poblete, R., Cortes, E., Bakit, J., & Luna-Galiano, Y. (2019). Landfill leachate treatment using combined fish scales based activated carbon and solar advanced oxidation processes. *Process Safety and Environmental Protection*, 123, 253-262. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.017>.
- Poblete, R., Oller, I., Maldonado, M. I., & Cortes, E. (2019). Improved landfill leachate quality using ozone, UV solar radiation, hydrogen peroxide, persulfate and adsorption processes. *Journal of Environmental Management*, 232, 45 - 51. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.030>.
- Poblete, R., Rodríguez, C. A., Carrasco, C., Herrera, J., & Salazar González, R. (2023). Use of copper sheet in a solar photo-Fenton-like process applied in the treatment of landfill leachate. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 67513-67524. doi:<https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1007/s11356-023-27127-6>

- Rebolledo, L. P., Arana, V. A., Trilleras, J., Barros, G. E., Gonzales Solano, A. J., & Maury Ardila, H. (2019). Efficiency of Combined Processes Coagulation/Solar Photo Fenton in the Treatment of Landfill Leachate. *Water*, *11*(7), 1351. doi:<https://doi.org/10.3390/w11071351>
- Renou, S., Givaudan, J., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, *150*, 468-493. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.077>.
- Resolución 1045 de 2003. (26 de Septiembre de 2003). [Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial]. Por el cual se adopta la metodologá para la elaboración de los Planes de Gestión integral de Sólidos, PGIRS, y se toman otras determinaciones.DO N° 45329.
- Ruiz Delgado, A., Plaza Bolaños , P., Oller, I., Malato, S., & Agüera, A. (2020). Advanced evaluation of landfill leachate treatments by low and high-resolution mass spectrometry focusing on microcontaminant removal. *Journal of Hazardous Materials*, *384*, 121372. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121372>.
- Saheed, I. O., Azeez, S. O., & Suah, F. B. (2022). Imidazolium based ionic liquids modified polysaccharides for adsorption and solid-phase extraction applications: A review. *Carbohydrate Polymers*, *298*, 120138. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120138>.
- Salmerón, I., Oller, I., & Malato, S. (2020). Electro-oxidation process assisted by solar energy for the treatment of wastewater with high salinity. *Science of The Total Environment*, *705*, 135831. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135831>.

- Silva, T. F., Fonseca, A., Saraiva, I., Boaventura, R. A., & Vilar, V. J. (2016). Scale-up and cost analysis of a photo-Fenton system for sanitary landfill leachate treatment. *Chemical Engineering Journal*, 283, 76-86. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.07.063>.
- Singh Thind, P., & John, S. (2020). Optimizing the Fenton Based Pre-Treatment of Landfill Leachate Using Response Surface Methodology. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 42, 275 - 280. doi:<https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.3103/S1063455X2004013X>
- Spiniello, I., De Carluccio, M., Castiglione, S., Amineva, E., Kostryukova, N., Cicatelli, A., . . . Guarino, F. (2023). Landfill leachate treatment by a combination of a multiple plant hybrid constructed wetland system with a solar photoFenton process in a raceway pond reactor. *Journal of Environmental Management*, 331, 117211. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117211>.
- Teng, C., Zhou, K., Peng, C., & Chen, W. (2021). Characterization and treatment of landfill leachate: A review. *Water Research*, 203, 117525. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117525>.
- Zico, M., Ricci, B., Reis, B., Magalhães, N., & Amaral, M. (2021). Sustainable ammonia resource recovery from landfill leachate by solar-driven modified direct contact membrane distillation. *Separation and Purification Technology*, 264, 118356. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118356>.
- Zoungrana, A., Zengin, Í. H., Türk, O. K., & Çakmakçı, M. (2020). Ammoniacal nitrogen reclamation by membrane distillation from high ammonia polluted solutions. *Chemical Papers*, 74, 1903–1915. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1007/s11696-019-01034-y>

