

## Scoping acoplado a la metodología de Conesa para la evaluación ambiental de un sistema avanzado de descontaminación de lixiviado de relleno sanitario

## Scoping coupled to the Conesa methodology for the environmental assessment of an advanced system of landfill leachate decontamination

Salvador Villamizar<sup>1§</sup>, Aymer Maturana Cordoba<sup>1</sup>, Carlos A. Pacheco Bustos<sup>1</sup>,  
Joseph Soto-verjel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad del Norte, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Instituto de Estudio Hidráulicos y Ambientales, Barranquilla, Colombia

<sup>§</sup>salvadorv@uninorte.edu.co, maturanaa@uninorte.edu.co, cbustosa@uninorte.edu.co, jwsoto@uninorte.edu.co

Recibido: 9 de junio de 2021 – Aceptado: 22 de octubre de 2021

**Cómo citar:** Villamizar, S., Maturana Córdoba, A., Pacheco Bustos, C.A., Soto-Verjel, J. Scoping acoplado a la metodología de conesa para la evaluación ambiental de un sistema avanzado de descontaminación de lixiviado de relleno sanitario. *Ingeniería y Competitividad*, 2023, 24(2), e11359. Doi: 10.25100/iyc.v0i00.11359.

### Abstract

Landfill leachate is an effluent generated by the degradation of solid waste and the percolation of rainwater, which carries organic and inorganic substances, it is characterized as a dark-colored liquid with toxic, dangerous, pathogenic, and other compounds. It has been shown that the use of advanced oxidation processes coupled with biological treatments achieves effluents with low hazards. Despite benefits generated by these combinations, usually, the researcher's goals focus just on the effluent, skipping the environmental impact generated in the construction, start-up, and maintenance of the treatments, resulting in a knowledge gap because there is not enough bibliography of works that develop combination between Scoping and Conesa methodology over coupled treatments used in leachate decontamination, in the environmental impact quantification. Considering the last, in the current manuscript was determined the impacts on the biotic, abiotic, and socioeconomic components, generated for coupling a photocatalytic system with a biological process. The Scoping technique was used as input of the environmental impact quantification through Conesa's methodology. The main result was that environmental impacts produced by leachate leaks, waste generated, and energy consumed are considered as critical in the treatments, and future researchers working in this field should control, prevent, or mitigate. Finally, the presence of positive impacts of the treatments such as the increase in the availability of water resources due to the effectiveness of the treatment carried out, and compliance with the Sustainable Development Goals is highlighted.

**Keywords:** Landfill, Heterogeneous photocatalysis, Membrane bioreactor, Wastewater, Environmental assessment.

## Resumen

Los lixiviados de rellenos sanitarios son efluentes generados por la degradación de los residuos sólidos y la percolación del agua lluvia, caracterizados por ser un líquido de color oscuro con compuestos tóxicos, peligrosos, patogénicos, entre otras, que al ser descontaminados mediante procesos de oxidación avanzada acoplados a tratamientos biológicos logran efluentes con baja peligrosidad. A pesar de los beneficios otorgados por estas combinaciones, los investigadores usualmente se enfocan en analizar solo el efluente resultante, ignorando el impacto ambiental generado en la construcción, puesta en marcha y mantenimiento de los tratamientos, existiendo una brecha de conocimiento al no encontrarse suficiente bibliografía de trabajos que combinen el Scoping y la metodología de Conesa sobre tratamientos acoplados para la descontaminación de lixiviados, en la cuantificación del impacto ambiental. Atendiendo a lo mencionado, el presente manuscrito determinó los impactos sobre los componentes biótico, abiótico y socioeconómico que genera acoplar un sistema fotocatalítico con un proceso biológico, para lo que se utilizó la técnica del Scoping como insumo de la cuantificación del impacto ambiental realizada a través de la metodología de Conesa, obteniendo como conclusión que impactos generados por fugas de lixiviado, así como los generados por los residuos y consumo de energía son considerados como críticos en los tratamientos y futuros investigadores que trabajen en el tema deben controlar, prevenir o mitigar. Finalmente, se destaca la presencia de impactos positivos de los tratamientos tales como el aumento de la disponibilidad del recurso hídrico gracias a la efectividad del tratamiento realizado y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

**Palabras clave:** *Relleno sanitario, Fotocatálisis heterogénea, Biorreactor de Membranas, Agua residual, Evaluación ambiental.*

## 1. Introducción

La generación de residuos sólidos urbanos está directamente relacionada y es proporcional con el número de habitantes de las ciudades. Es por este motivo que se debe tener en consideración el crecimiento exponencial de la misma, para de esta forma analizar los sistemas de manejo de estos residuos <sup>(1)</sup>, y requerir de tecnologías capaces de brindar soluciones que permitan realizar una adecuada disposición de estos residuos, siendo el relleno sanitario la estrategia con mayor viabilidad económica y ambiental y usada de manera tradicional a nivel mundial <sup>(2)</sup>. No obstante, una de las principales problemáticas generadas en estos sitios de disposición legal está asociada con los lixiviados generados y su tratamiento. Ya que estos son el líquido residual generado por el proceso de degradación de los residuos y que con la ayuda de la percolación de las aguas lluvias generan un efluente tóxico con una composición bastante compleja, que está caracterizada principalmente por compuestos recalcitrantes, contaminantes emergentes, materia orgánica y metales pesados

<sup>(3)</sup>.

Dada la complejidad que presentan los lixiviados y los impactos al medio ambiente, la aplicación de técnicas convencionales para su descontaminación podría resultar no efectiva especialmente por la composición tóxica y presencia de sustancias tales como los metales pesados que podrían inhibir microorganismos si se tratasen con procesos biológicos <sup>(4,5)</sup>.

Es entonces, cuando los procesos de oxidación avanzada contribuyen con la solución a estas problemáticas <sup>(6,7)</sup>, dado que estos procesos a partir de los procesos oxidativos propician la formación de radicales Hidroxilos y Superóxidos que tienen la capacidad de degradar sustancias complejas y reducirlas a otras más simples <sup>(8,9)</sup>. A pesar de su efectividad para el tratamiento de aguas residuales tóxicas, es posible considerar que el uso de procesos de oxidación avanzada como único tratamiento podría no ser sostenible económicamente, es por esto por lo que diversos autores los orientan a cumplir funciones de desbaste para ser acoplados por procesos biológicos que permitan alcanzar los parámetros deseados <sup>(10-14)</sup>.

Dentro de los casos de éxito de lo mencionado anteriormente y que fortalece el acople entre las alternativas de tratamiento, es el estudio desarrollado por Becerra, Barrientos, Rodríguez, Machuca-Martínez y Ramírez <sup>(15)</sup> quienes aplicaron un fotocatalisis heterogénea acoplada con un proceso anaerobio para la descontaminación de aguas residuales tóxicas producidas en actividades agrícolas, donde gracias al proceso de oxidación avanzada lograron mejorar la biodegradabilidad del agua tratante a más del 70% y obtener una eficiencia de remoción en términos de COT superior al 80%. Caso similar es la investigación ejecutada por <sup>(16)</sup> quienes acoplaron un tratamiento de foto-fenton con un proceso de lodos activados convencionales, alcanzando remociones superiores al 98% en términos de DQO y DBO<sub>5</sub>, alcanzando parámetros ideales para disponer el efluente sobre cuerpos de agua superficiales o reusarlo en actividades de mantenimiento de los rellenos sanitarios.

A pesar de los resultados expuestos en la remoción de contaminantes aplicando acoples entre tratamientos u otras alternativas, hasta el momento no existe suficiente evidencia bibliográfica que soporte el análisis de impactos ambientales que genera el uso de dichos tratamientos sobre lixiviados, ya que solo se cuantifica el desempeño ambiental del efluente, dejando a un lado los subproductos, residuos y demás aspectos ambientales involucrados en la construcción, puesta en marcha, mantenimiento y demás actividades de los sistemas utilizados. Para lograr este análisis, existen metodologías que permiten determinar los impactos ambientales que generan los tratamientos empleados en la descontaminación de lixiviados dentro de los que se destacan métodos cuantitativos y cualitativos, sin embargo estos

últimos permiten la dualidad dado que los rangos de clasificación oscilan entre irrelevante, moderado, severo y crítico, sin añadir categorizaciones numéricas, permitiendo la subjetividad del evaluador y ofreciendo resultados poco precisos <sup>(17)</sup>.

En cuanto a modelos cuantitativos se destacan el análisis de Ciclo de Vida (ACV), la metodología de arboleda, de Conesa y algunos programas de cómputo que abordan desde los componentes bióticos, abióticos y socioeconómicos los impactos derivados de las actividades propias de la disposición final de los residuos, pero que dado su reciente aparición no cuentan con la confiabilidad requerida <sup>(18,19)</sup>. Así mismo, según los análisis realizados por Toro Calderón y Martínez Prada <sup>(20)</sup> la determinación cuantitativa de los impactos ambientales utilizando la metodología de Conesa es la mayor frecuentemente utilizada para la medición de impactos ambientales de proyectos con un 67% en comparación con otras metodologías como la EPM (9%) o el método de la matriz de Leopold (23%). Esta metodología la cual tiene como objetivo reconocer, proyectar y explicar impactos ambientales generados por las actividades de un proyecto en el caso que este se ejecutara <sup>(21)</sup>, analizando numéricamente categorías como aspectos ambientales, impactos ambientales, valoración de los impactos y significancia de los mismos que se generan en las actividades detalladas del proceso <sup>(22)</sup>.

Con el fin de conocer las tendencias de investigación asociadas con las palabras claves “Evaluación ambiental” y “Lixiviado”, se utilizó el software VosViewer el cual, a partir de un análisis bibliométrico entre más de 190 artículos, ofreció un mapa de correlación de las palabras claves de dichos artículos obteniendo como resultado la Figura 1.

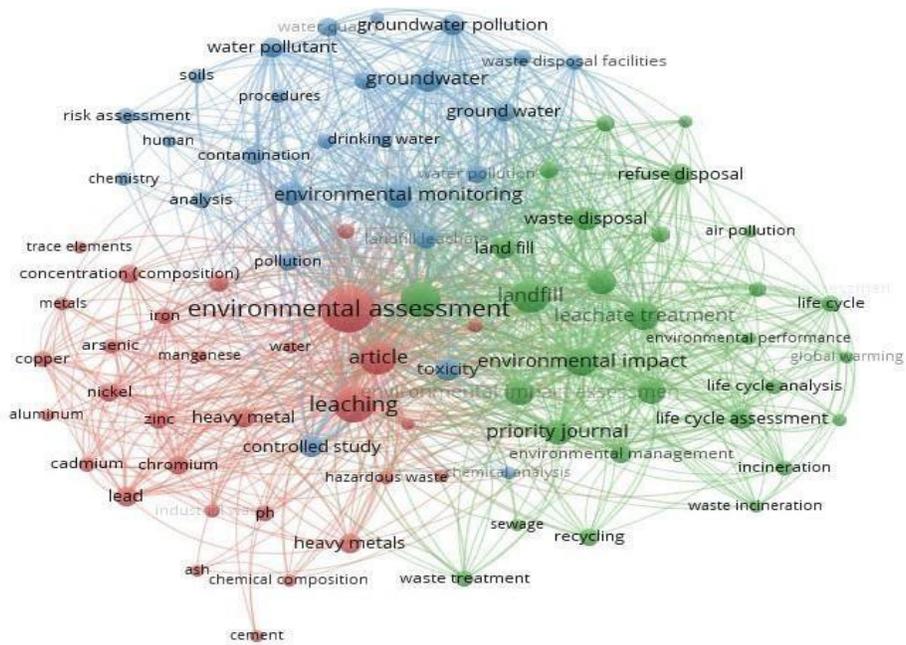


Figura 1. Mapa de correlación de palabras claves. Fuente: VosViewer

De acuerdo con la Figura 1, es posible identificar que en las investigaciones realizadas a nivel mundial sobre la evaluación ambiental aplicada a lixiviados, se destacan tres grandes grupos que se correlacionan, compuestos en primera instancia, por los contaminantes puntuales que inducen ser los que frecuentemente se encuentran en el efluente residual de los sitios de disposición final de residuos destacándose “metales pesados” (32 artículos), “plomo” (17 artículos), “níquel” y “zinc” (14 manuscritos). Seguidamente se identifica un segundo grupo que en su mayor parte está compuesto por palabras claves que se relacionan con las técnicas analizadas para calcular los impactos sobre el medio ambiente tales como “evaluación de impacto ambiental” con una ocurrencia de 28 documentos, “monitoreo ambiental” (25 artículos), “análisis de ciclo de vida” (17 artículos) y “estudios controlados” con 18 investigaciones publicadas. Finalmente, el tercer grupo identificado contiene los impactos generados sobre los componentes medioambientales tales como “contaminación de

agua subterránea”, “contaminación del agua”, “contaminación”, “agua potable”, “suelo” cada uno de ellos con más de 10 manuscritos. Lo descrito anteriormente permite direccionar los estudios de impacto ambiental aplicados a lixiviados, dado que da a conocer las tendencias que actualmente se manejan en el campo de la investigación, en el cual a partir de la composición variada (tóxica, patogénica, peligrosa) de este efluente residual es posible determinar los impactos ambientales a partir de la aplicación de metodologías capaces de medir cualitativa y cuantitativamente la afectación de los componentes bióticos, abióticos y socioeconómicos del medio ambiente.

De manera similar, para entender las dimensiones en que un proyecto puede degradar el medio ambiente se hace necesario tener claridad sobre los componentes que lo constituyen, los cuales son el medio biótico asociado con todos los seres vivos, el medio abiótico constituido por todos los componentes físicos y químicos sin vida del medio ambiente y medio socioeconómico constituido por las

dinámicas, características y configuraciones económicas y sociales de la población que tenga incidencia sobre el proyecto <sup>(23,24)</sup>. Además de esto, en la etapa previa de un proyecto y con el objetivo de hacer predicciones sobre los posibles impactos ambientales que se derivaran de las actividades del mismo, es posible aplicar una técnica llamada “Scoping”, la cual a partir de revisión del estado del arte permite prever las dificultades y afecciones antes de la puesta en marcha de las actividades, permitiendo realizar modificaciones a los diseños o funcionamiento del proyecto <sup>(25)</sup>, lo cual garantiza la sostenibilidad de este, dado que realizar estos cambios una vez ejecutado el proyecto, implicaría un elevado costo. Así mismo, el uso de esta técnica permite precisar las fases que requieren de mayor atención <sup>(26)</sup>, así como conocer cuáles actividades que se puedan repetir dentro del proyecto conllevan a impactos ambientales con mayor frecuencia absoluta. Además de lo mencionado, el uso del “Scoping” permite concluir la necesidad de elaboración de un estudio de impacto ambiental, debido a que si los impactos son de muy poca relevancia no sería necesario este tipo de estudio, requiriendo entonces la aplicación de metodologías de menor complejidad <sup>(27)</sup>.

Una vez considerada la importancia de aplicación de la técnica del Scoping y del uso de la metodología de cuantificación del impacto ambiental de Conesa, el acople entre estas alternativas resulta novedoso dado que no existen registros de la aplicación de estas técnicas sobre tratamientos de lixiviados y en que los resultados del Scoping serán insumos para el desarrollo de metodología de Conesa. Lo cual permite orientar a investigadores que trabajen procesos de oxidación avanzada seguidos de procesos biológicos, hacia el diseño de estrategias que focalicen los puntos críticos de los tratamientos contribuyendo con la sostenibilidad y perdurabilidad de los procesos, en especial sobre aquellos subproductos, residuos o efectos adversos que en muchos casos

no son considerados al momento de descontaminar los lixiviados.

Finalmente, con esta investigación se buscó utilizar la técnica de “Scoping” como insumo para la cuantificación del impacto ambiental mediante la Metodología de Conesa de un sistema acoplado de oxidación avanzada y un proceso biológico usado para la remoción de contaminantes de lixiviado de relleno sanitario, estableciendo medidas de mitigación que permitan reducir la afectación del medio ambiente ocasionada por los impactos más significativos del tratamiento. Así mismo, el resultado obtenido sirve como punto de partida para futuros investigadores que deseen aplicar las mencionadas combinaciones de tratamientos en escala real y para proyectos que por su complejidad requieran el desarrollo de Estudios de Impacto Ambiental.

## **2. Metodología**

### **2.1 Contexto y fases del proyecto.**

A partir de los casos de éxito mencionados en la introducción del actual manuscrito, donde al acoplar sistemas fotocatalíticos y procesos biológicos en lixiviados se logran eficiencias de remoción superiores al 90% <sup>(28-30)</sup>, se han seleccionado estos sistemas como la alternativa para la descontaminación de esta agua residual tóxica. Una vez definido el tratamiento se definen de los objetivos del tratamiento, el alcance del mismo, y un análisis del entorno en que se va a desarrollar la alternativa de descontaminación de lixiviados, donde se analice el estado actual del medio en el que se va a trabajar, condiciones atmosféricas, ambientales, de operatividad y sociales tanto de sitio de disposición final de los residuos como de la ubicación geográfica donde este se sitúa, incluyendo el componente social, económico y político del mismo y considerando los recursos disponibles o proyecciones del proyecto.

Una vez analizado el ambiente en el cual se desarrollará el proyecto, se procede con la

estructuración de las fases y la descripción de las actividades que componen a cada una de estas, sin exceptuar detalles que posteriormente dificulten el correcto avance de la metodología y de la determinación de los impactos ambientales.

## 2.2 Aplicación de la técnica de Scoping al tratamiento acoplado de lixiviados.

Para iniciar con la aplicación de la técnica del Scoping se debe crear una tabla de revisión del estado del arte que permita prever de manera global ventajas y desventajas de las alternativas de tratamiento seleccionadas, teniendo en consideración estudios desarrollados por diferentes autores <sup>(26)</sup>. Seguidamente, una vez conocidas las implicaciones de los tratamientos y las actividades en cada proceso de tratamiento se determinan los aspectos e impactos ambientales que se derivan de estas, así como la incidencia que tendrían sobre los componentes biótico, abiótico y socioeconómico, asignados a partir de listas de revisión de aspectos e impactos tomadas de evaluaciones de impactos ambientales desarrollados previamente <sup>(31-34)</sup>, lo cual contribuye a la focalización de las actividades que mayor de la daño o beneficio generan y de las medidas de previsión, control o mitigación que se requieren <sup>(35,36)</sup>.

Seguidamente, se realiza una representación que permita identificar y correlacionar los impactos ambientales de mayor frecuencia relativa existentes en las diversas fases, con el objetivo de analizar tendencias de afectación del proyecto sobre el medio ambiente y las etapas donde se deben enfatizar las medidas de control previo al inicio operativo del proyecto.

## 2.3 Cuantificación y análisis de impactos ambientales

A partir de las actividades identificadas para cada una de las fases del acople de los tratamientos, así como los aspectos e impactos determinados para estas a través de la técnica del Scoping y de la definición que otorga la “Guía metodológica para la evaluación de impacto

ambiental” <sup>(37)</sup>, de ítems como el efecto, periodicidad, signo, intensidad, extensión, momento, reversibilidad, persistencia, recuperabilidad, acumulación y sinergia, se realiza la cuantificación del impactos ambiental, donde los rangos de calificación se asignan acorde con el significado, alcance e incidencia según corresponda con los valores evidenciados en la Tabla 1.

Con el objetivo de lograr un rango de calificación que permita determinar el rango de importancia de los impactos analizados, se procede a aplicar la Ec.1, otorgada para la cuantificación del impacto ambiental mediante la metodología de Conesa en la “Guía metodológica para la evaluación de impacto ambiental” <sup>(37)</sup>.

$$I = (3IN + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC) \quad (1)$$

IN= Intensidad  
PE= Persistencia  
EX= Extensión  
MO= Momento  
RV= Reversibilidad  
SI= Sinergia  
AC= Acumulación  
PR= Periodicidad  
EF= Efecto  
MC= Recuperabilidad

Para desarrollar la categorización y análisis de los impactos ambientales cuantificados mediante la metodología de Conesa, se procede a clasificarlos en Insignificante, Moderado, Severo y Crítico según el grado de afectación negativa sobre el equilibrio medioambiental resultante de la aplicación de la Ec.1. De igual manera se ponderan como Positivo y Positivo importante los impactos beneficiosos del proyecto. Lo mencionado es presentado en la Tabla 2. Finalmente, se analizan los impactos más relevantes donde se plantean posibles medidas de mitigación, prevención o promoción que permitan reducir la afectación del medio ambiente al utilizar sistemas acoplados de tratamientos para la descontaminación de lixiviados.

**Tabla 1.** Cuantificación de los criterios de evaluación de impactos ambientales

Efecto (EF)		Signo		Extensión (EX)	
Indirecto	1	Impacto benéfico	+	Puntual	1
Directo	4	Impacto perjudicial	-	Parcial	2
Periodicidad (PR)		Momento (MO)		Extensa	4
Irregular	1	Largo plazo	1	Total	8
Periódico	2	Mediano plazo	2	Critica	12
Continuo	4	Inmediato plazo	4		
Persistencia (PE)		Reversibilidad (RV)		Intensidad (IN)	
Fugaz	1	Corto plazo	1	Baja	1
Temporal	2	Mediano plazo	2	Media	2
Permanente	4	Irreversible	4	Alta	4
				Muy alta	8
				Total	12
Recuperabilidad (MC)		Sinergia (SI)		Acumulación (AC)	
Inmediato	1	Sin sinergismo	1	Simple	1
Mediano plazo	2	Sinérgico	2	Acumulativo	4
Mitigable	4	Muy sinérgico	4		
Irrecuperable	8				

Fuente: propia

**Tabla 2.** Categorización de los impactos ambientales

Categoría	Rango	Significado
 <b>Positivo</b>	1 hasta 45	Los impactos presentan beneficios para los diversos componentes del medio ambiente, sin embargo, no alcanzan la puntuación requerida para ser considerados importantes.
 <b>Positivo Importante</b>	>45	Los impactos generados contribuyen notablemente con mantener o mejorar la calidad de los componentes del medio ambiente y logran la sostenibilidad de las actividades que los generan.
<b>Insignificante</b>	-1 hasta -29	Los impactos no presentan importancia ni alteran el equilibrio del medio ambiente por lo que se consideran intrascendentes.
<b>Moderado</b>	-30 hasta -59	Impactos que de ser intervenidos adecuadamente no generan gran afectación del medio ambiente, no obstante, de no ser intervenidos puede ascender de categoría.
<b>Severo</b>	-60 hasta -89	Impactos que degradan notablemente el medio ambiente, requiriendo su intervención en corto plazo.
<b>Critico</b>	-90 hasta -100	Impactos que requieren especial grado de atención dado que representan un alto riesgo para la salud humana y del medio ambiente.

Fuente: propia

### 3. Resultados

#### 3.1 Contexto y fases del proyecto

Párrafo explicativo Tabla 3.

**Tabla 3.** Descripción alternativa de tratamiento de lixiviados

Contexto del sistema acoplado de tratamiento	
Objetivo del tratamiento	Descontaminar lixiviado de relleno sanitario a través de un sistema acoplado
Alternativas de tratamiento	Tratamiento fotocatalítico heterogéneo acoplado a Sistema biológico aerobio
Tipo de agua residual	Lixiviado proveniente de relleno sanitario
Tipo de residuos	Residuos sólidos urbanos
Insumos	Catalizador TiO <sub>2</sub> , Lodo aeróbio, Sustancias neutralizadoras de pH, Fotoreactor, Biorreactor aerobio, Aireadores, lámparas uv.

Fuente: propia

#### 3.2 Aplicación de la técnica de Scoping al tratamiento acoplado de lixiviados.

Para complementar las ventajas y desventajas ofrecidas en la Tabla 4, se procedió a aplicar la técnica del Scoping a partir de la identificación de aspectos ambientales que inciden sobre los componentes biótico, abiótico y socioeconómico del medio ambiente y previendo los posibles impactos positivos y negativos que se generan, teniendo como referencia el estado del arte relacionado con las fases y los tratamientos expuestos y las listas de revisión de aspectos e impactos ambientales. En este punto se destaca que se incluyeron todos los impactos sin considerar cuantitativamente el grado de afectación de estos, teniendo como referencias listas de revisión de aspectos e impactos ambientales utilizadas en trabajos desarrollados por otros autores. El resultado obtenido se evidencia en la Tabla 5.

**Tabla 4.** Ventajas y desventajas alternativas de tratamiento

Tratamiento	Ventajas	Desventajas	Referencias
Fotocatálisis Heterogénea	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite influentes tóxicos.</li> <li>- Puede ser utilizado con luz solar.</li> <li>- Mejora la biodegradabilidad del efluente tratado aptos para continuar con otro tratamiento.</li> <li>- No genera lodo residual.</li> <li>- Remueve contaminantes emergentes o recalcitrantes del lixiviado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requiere reactivos reguladores de pH y dosis de oxidantes.</li> <li>- Generación de subproductos y residuos peligrosos.</li> <li>- De acuerdo con el tipo de reactor utilizado tiene alto consumo energético.</li> <li>- Alto costo al ser empleado como único tratamiento.</li> <li>- Separación del catalizador en el efluente tratado</li> </ul>	(38-42)
Proceso biológico Aerobio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No genera malos olores</li> <li>- Permite escalar el tratamiento de laboratorio a caudal real.</li> <li>- Fácil implantación según el reactor y proceso utilizado.</li> <li>- Gran cantidad de aplicación y estado del arte.</li> <li>- Posibilidad de ser acoplado con otros sistemas de tratamiento.</li> <li>- Bajo uso de reactivos o productos oxidantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja eficiencia ante lixiviados con baja biodegradabilidad.</li> <li>- Alto consumo energético especialmente en los aireadores.</li> <li>- Generación de lodo residual y residuos.</li> <li>- Sensibilidad a fluctuación en la composición de entrada al sistema de tratamiento.</li> <li>- Es escala real requiere supervisión por personal calificado.</li> </ul>	(43-47)

Fuente: propia

**Tabla 5.** Scoping como herramienta para prever impactos ambientales.

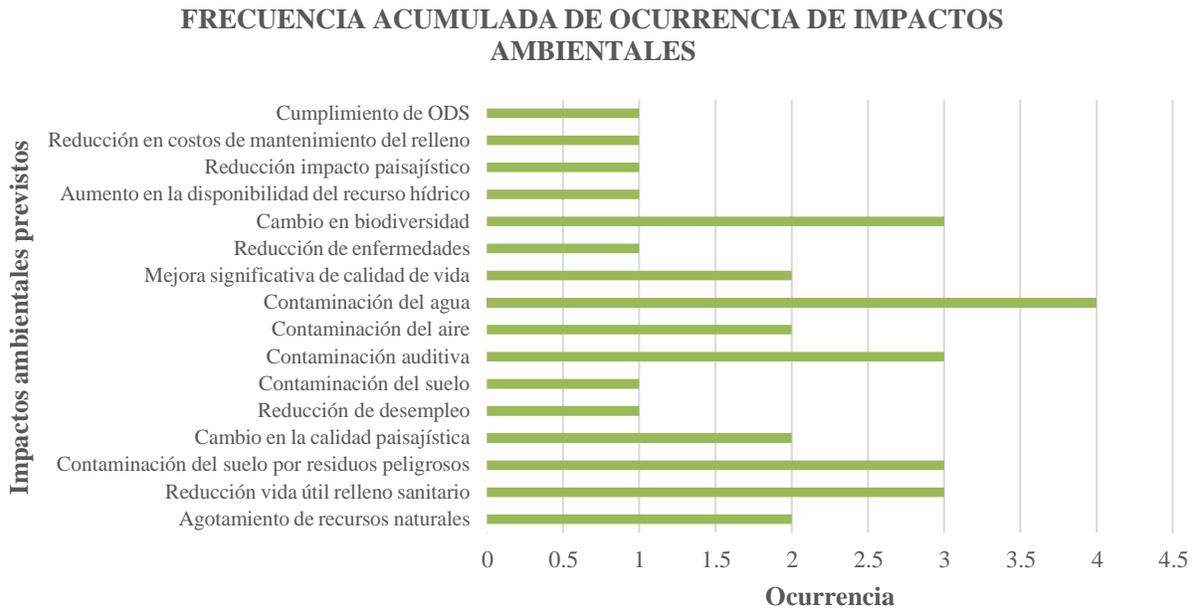
No.	Fase	Nombre actividad	Aspecto ambiental	Componente afectado	Impacto ambiental previsto	Referencias
1	Construcción sistema de tratamiento Fotocatalítico y sistema biológico	-Construcción reactor fotocatalítico -Climatización del lodo activado -Solicitud de membranas -Consumo de reactivos -Adecuaciones bombas y aireadores	-Consumo de energía	Componente	-Agotamiento recursos naturales	(48-53)
			-Consumo de productos químicos	abiótico	-Reducción vida útil relleno sanitario	
			-Generación de residuos		-Contaminación del suelo por residuos peligrosos	
			-Consumo de combustibles		-Cambio en la calidad paisajística	
			-Generación de subproductos peligrosos			
			-Generación de ruido			
			Generación de residuos	Componente biótico	Cambio en la biodiversidad	
			Generación de empleo	Componente socioeconómico	Reducción de desempleo	
2	Puesta en marcha del sistema acoplado de tratamiento para descontaminación de lixiviados	-Adecuación del sistema con flujo continuo. -Disponibilidad energética para funcionamiento del sistema -Ubicación del sistema de tratamiento en terreno -Dilución lixiviado en agua residual doméstica de población cercana al relleno -Disponibilidad de reactivos -Disponibilidad de membranas -Cambio de lodo al cumplir su tiempo de retención hidráulico. -Consumo reactivos y sustancias químicas.	-Consumo energía	Componente	-Reducción vida útil relleno sanitario	(54-58)
			-Generación de residuos peligrosos	abiótico	-Contaminación del suelo por residuos peligrosos	
			-Generación de residuos ordinarios		-Contaminación auditiva	
			-Generación subproductos químicos		-Contaminación del aire	
			-Disposición adecuada de agua residual doméstica		-Contaminación del agua	
			Generación de efluente tratado con menor toxicidad		-Contaminación visual	
			-Generación de fugas de lixiviado.		-Contaminación de acuíferos y aguas subterráneas	
					-Agotamiento de recursos naturales	
					-Contribución al calentamiento global	
			Componente	-Mejora significativa de		

No.	Fase	Nombre actividad	Aspecto ambiental	Componente afectado	Impacto ambiental previsto	Referencias
				socioeconómico	calidad de vida -Reducción de enfermedades	
3	Habilitación de puntos para vertimiento y reúso del efluente tratado	-Vertimiento de efluente tratado en fuente hídrica superficial cercana -Reúso de lixiviado descontaminado en actividades de mantenimiento de zonas verdes del relleno sanitario -Vertimiento en reservorios de agua existentes en el relleno sanitario	-Vertimiento de agua tratada -Reúso de agua tratada en actividades de mantenimiento del relleno sanitario -Fugas de lixiviado sin tratar -Cumplimiento objetivo 11 de desarrollo sostenible Ciudades y comunidades sostenibles.	Componente biótico  Componente abiótico  Componente socioeconómico	-Cambio en biodiversidad  -Aumento en la disponibilidad del recurso hídrico -Reducción impacto paisajístico -Contaminación del agua  -Reducción en costos de mantenimiento del relleno -Cumplimiento de ODS	(59-64)
4	Mantenimiento del sistema de tratamiento	-Cambio de membranas -Disposición del lodo activado usado -Dosificación de reactivos -Limpieza del reactor fotocatalítico -Limpieza del sistema biológico aerobio	-Incremento en la carga contaminante del efluente -Generación de subproductos -Generación residuos peligrosos -Consumo de reactivos y productos químicos. -Generación lodo residual -Generación de residuos no peligrosos -Generación de empleo	Componente abiótico  Componente socioeconómico	-Contaminación del aire -Contaminación del suelo -Contaminación del agua superficial y subterránea -Contaminación del suelo por residuos peligrosos -Contaminación auditiva. -Reducción vida útil relleno sanitario  -Reducción del desempleo	(65-69)

Fuente: propia

Una vez realizado el Scoping representado en la Tabla 5, buscando identificar los impactos ambientales previstos que se derivan del tratamiento acoplado de lixiviado proveniente de relleno sanitario, se procede a determinar la

frecuencia acumulada de ocurrencia de los impactos durante las fases del proyecto contenidas en la Tabla 5. Lo anterior es representado en la Figura 2.



**Figura 2.** Frecuencia acumulada de ocurrencia de impactos ambientales previstos contenidos en Tabla 5. Fuente: propia

De acuerdo con lo ilustrado en la Figura 2, es posible concluir como resultado de la aplicación de la técnica del Scoping que en el componente abiótico el principal impacto se relaciona con la contaminación del agua con una frecuencia acumulada de 4, es decir, repitiéndose en todas las fases planteadas, lo cual entendiendo la complejidad de agua residual tratante resulta coherente y se genera por posibles fugas de lixiviado o vertimientos bajo condiciones no optimizadas. Lo mencionado es corroborado por Dalun y Abdullah <sup>(70)</sup>, quienes demostraron que el lixiviado sin tratar al interactuar con una fuente hídrica superficial aportó niveles altos de contaminantes tales como metales pesados, DBO y NH<sub>3</sub>, alterando la composición de un cuerpo de agua superficial cercana al relleno sanitario.

De igual manera, el principal impacto sobre el componente biótico es el cambio de biodiversidad el cual se repite 3 veces y está relacionado con alteraciones en la estructura ecológica de fauna y flora que se pudiese alterar por variaciones en la composición del agua, del suelo y del aire derivados por contaminación de los mismo a causa de las actividades del proyecto. Lo mencionado anteriormente es acorde con el trabajo ejecutado por Ibor et al. <sup>(71)</sup> y Budi, Suliasih, Othman, Heng y Surif <sup>(72)</sup>, quienes comprobaron que posterior a la interacción de un efluente contaminado con lixiviado con especies bioindicadores de referencia como pescados y algunas semillas, se evidencia una contaminación notoria de metales pesados que a su vez cuales alteraran los

procesos naturales desarrollados dentro de un ecosistema, especialmente en lo relacionado con la cadena trófica.

En cuanto al componente socioeconómico, se identifica que el tratamiento permitirá la mejora significativa de las condiciones básicas de habitabilidad de personas que no cuenten con saneamiento básico y cuyas aguas residuales puedan ser usadas como insumo para el pretratamiento de lixiviados logrando la entrada constante de carga contaminante al sistema y al mismo tiempo servir como alternativa de adecuada gestión de sus aguas residuales <sup>(73,74)</sup>. Además, se pueden percibir impactos beneficiosos tales como reducción de enfermedades que se generan en estas poblaciones por la falta de sistemas de tratamiento especialmente las de origen bacteriano <sup>(75)</sup> y reducción del desempleo lo cual permite analizar qué la trascendencia del sistema de tratamiento supera las fronteras del sitio de aplicación y permite atender a problemáticas de poblaciones en condición de vulnerabilidad, contribuyendo intrínsecamente con el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible en especial del objetivo número 11. Ciudades y Comunidades Sostenibles.

### **3.3 Cuantificación y análisis de impactos ambientales**

Una vez conocidos los principales componentes que podrían ser afectados o beneficiados por los impactos negativos y positivos ambientales generados por el tratamiento de lixiviados mediante el acople de un sistema fotocatalítico y un sistema biológico aerobio de tratamiento, se procede a la cuantificación de estos impactos aplicando la metodología de Conesa mencionada en el numeral 2.3 del actual manuscrito y representada a través de la Tabla 6.

De acuerdo con la Tabla 6, es posible concluir que de los 37 aspectos ambientales identificados en cada una de las fases el 62,16% se

cuantificaron negativamente encontrando 4 impactos críticos, 6 severos y 13 moderados. Mientras que el 37,83% son categorizados como beneficiosos al medio ambiente representados por 5 positivos y 4 positivos importante. Subsecuentemente, se proceden a analizar los ítems que son categorizados como críticos y positivos importantes dado que estos representan la cuantificación con mayor puntaje en según los componentes descritos en “Guía metodológica para la evaluación de impacto ambiental” <sup>(37)</sup>.

Dentro de los impactos ambientales categorizados como críticos y que deben ser tenidos en cuenta por investigadores que deseen implementar el acople mencionado para la descontaminación de lixiviado, se encuentra la contaminación del agua, lo cual coincide con otros estudios donde desarrollan evaluaciones de impacto ambiental sobre rellenos sanitarios y tratamientos de lixiviados <sup>(76-78)</sup>, especialmente relacionado con posibles fugas durante el tratamiento, para lo cual se requiere que se tomen medidas de prevención tales como revisiones en las tuberías y en los reactores previo al inicio de los tratamientos. Así mismo, se deben considerar medidas que permitan controlar y mitigar los impactos que se generarían al momento de ocurrir el suceso, tales como kits de derrames, protocolos y planes de contingencia que permitan reducir la degradación del medio ambiente.

En cuanto al agotamiento de recursos naturales derivados del consumo energético que requiere el sistema, especialmente asociado con el funcionamiento de los aireadores requeridos para el tratamiento biológico aerobio y de las lámparas utilizadas en el proceso fotocatalítico y de las bombas que permitan la circulación del líquido tratante en el sistema, Anand et al. <sup>(79)</sup> concluyeron posterior a la aplicación de otra metodología para calcular impacto ambiental, que la sostenibilidad ambiental de un sistema de tratamiento de efluentes tóxicos está relacionado

Tabla 6. Cuantificación de los impactos ambientales.

Actividad	Componente relacionado	Aspecto ambiental	Impacto ambiental	NAT	IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MC	I	Calificación impacto
Construcción sistema de tratamiento Fotocatalítico acoplado a un proceso biológico	Abiótico	Consumo de energía	Agotamiento de recursos naturales	-1	4	4	2	2	2	2	4	1	2	4	-43	Moderado
	Abiótico	Generación de subproductos peligrosos	Contaminación del suelo por residuos peligrosos	-1	8	2	2	2	2	1	1	4	1	2	-45	Moderado
	Biótico	Generación de ruido	Cambio en biodiversidad	-1	8	3	2	4	2	4	4	4	4	4	-61	Severo
	Abiótico	Generación de residuos	Reducción vida útil relleno sanitario	-1	8	4	2	2	2	1	1	4	1	2	-51	Moderado
	Abiótico	Generación efluentes	Contaminación del agua	-1	-12	3	2	2	2	4	4	4	4	4	-71	Severo
	Abiótico	Generación de residuos	Contaminación del aire	-1	4	3	4	2	2	4	4	4	2	4	-47	Moderado
	Socioeconómico	Generación de empleo	Reducción de desempleo	1	4	2	4	2	2	2	1	4	2	1	36	Positivo
	Abiótico	Generación de ruido	Contaminación auditiva	-1	2	2	4	2	2	2	1	4	2	1	-30	Moderado
Puesta en marcha del sistema acoplado de tratamiento	Abiótico	Consumo de energía	Agotamiento de recursos naturales	-1	8	8	4	4	2	2	4	4	4	2	-74	Severo
	Abiótico	Generación de residuos solidos	Reducción vida útil relleno sanitario	-1	8	8	2	4	2	4	4	4	4	4	-76	Severo
	Abiótico	Generación de subproductos peligrosos	Contaminación del aire	-1	2	4	1	2	2	2	4	1	2	8	-40	Moderado
	Abiótico	Generación de subproductos peligrosos	Contaminación del suelo por residuos peligrosos	-1	8	4	2	2	2	2	4	4	2	2	-56	Moderado
	Abiótico	Generación de ruido	Contaminación auditiva	-1	2	2	4	2	2	1	4	1	2	1	-29	Moderado
	Abiótico	Generación de efluente con alta carga contaminante	Contaminación del agua	-1	12	8	4	4	4	4	4	4	1	8	-93	Critico
	Biótico	Fugas de lixiviado	Cambio en biodiversidad	-1	12	8	2	4	4	4	4	4	1	8	-91	Critico
	Socioeconómico	Ingreso dilución lixiviado con ARD	Mejora de calidad de vida de habitantes	1	8	4	4	4	2	4	4	4	4	2	64	Positivo importante
Socioeconómico		Reducción de enfermedades	1	8	1	2	4	1	4	1	4	4	4	51	Positivo importante	

Actividad	Componente relacionado	Aspecto ambiental	Impacto ambiental	NAT	IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MC	I	Calificación impacto	
Habilitación de puntos para vertimiento y reúso del efluente tratado	Abiótico	Reúso de agua	Aumento en la disponibilidad del recurso hídrico	1	1	8	1	4	1	4	4	1	2	1	45	Positivo	
	Socioeconómico		Mejora de imagen institucional	1	1	1	2	4	1	4	1	1	4	1	24	Positivo	
	Socioeconómico y Cultural		Reducción costos operativos de mantenimiento del relleno sanitario	1	4	1	2	4	1	4	1	1	4	1	33	Positivo	
	Abiótico		Reducción impacto paisajístico	1	1	1	2	2	1	4	4	1	2	1	23	Positivo	
	Biótico		Generación de vertimiento de agua residual tratada	Mejora de calidad de vida de habitantes	1	8	4	4	4	2	4	4	4	4	2	64	Positivo importante
	Abiótico		Aumento en la disponibilidad del recurso hídrico	1	1	8	2	4	1	4	4	1	4	1	48	Positivo importante	
	Abiótico		Fugas de lixiviado sin tratar	Contaminación del suelo	-1	8	8	4	4	4	4	4	4	1	8	-81	Severo
	Abiótico			Contaminación del agua	-1	12	8	4	4	4	4	4	4	1	8	-93	Critico
	Biótico			Cambio en biodiversidad	-1	12	8	2	4	4	4	4	4	1	8	-91	Critico
Mantenimiento del sistema de tratamiento	Abiótico	Consumo de energía	Agotamiento de recursos naturales	-1	4	4	2	2	2	2	4	1	2	4	-43	Moderado	
	Abiótico	Generación de residuos solidos	Reducción vida útil relleno sanitario	-1	8	8	2	4	2	4	4	4	4	4	-76	Severo	
	Abiótico	Generación efluentes	Contaminación del agua	-1	-12	3	2	2	2	4	4	4	4	4	-71	Severo	
	Abiótico	Generación de residuos solidos	Contaminación del aire	-1	8	2	2	2	2	4	4	4	2	1	-51	Moderado	
	Abiótico	Generación de subproductos peligrosos	Contaminación del suelo por residuos peligrosos	-1	8	2	2	2	2	4	4	4	2	2	-52	Moderado	
	Abiótico	Generación de ruido	Contaminación auditiva	-1	2	2	4	2	2	2	1	1	2	1	-27	Moderado	
	Abiótico	Generación de efluente	Contaminación del agua	-1	8	2	2	2	2	4	4	1	2	2	-49	Moderado	
	Socioeconómico	Generación de empleo	Reducción de desempleo	1	4	2	4	2	2	2	1	1	2	1	33	Positivo	

Fuente: propia

directamente con el requerimiento de energía, por lo cual, se recomienda buscar alternativas que permitan la no dependencia de la energía eléctrica sino utilizar energías alternativas como la solar. No obstante, considerando la inestabilidad de esta se podrían optar por diseños híbridos que garanticen la protección del medio ambiente.

Así mismo, teniendo en consideración que el proceso fotocatalítico está relacionado con el uso de elementos químicos que aumentan la velocidad de la reacción <sup>(80)</sup>, conocidos como catalizadores y con sustancias básicas y ácidas reguladoras de pH, se deriva el impacto denominado contaminación del suelo por residuos peligrosos, el cual es catalogado como severo, requiriendo entonces medidas de mitigación dentro de las cuales se encuentra implementar una adecuada segregación y disposición de los residuos generados teniendo en consideración las recomendaciones que otorgue el gestor externo de residuos y las fichas de seguridad de cada una de las sustancias dispuestas.

Otro componente catalogado como “crítico” en la cuantificación ilustrada en la Tabla 6, es el cambio en la biodiversidad, dado que, al realizarse la disposición del efluente tratado sobre un cuerpo de agua, a pesar de no contener mayor carga contaminante, se espera que este vertimiento altere el equilibrio existente lo que a su vez deriva en variaciones de los ciclos y procesos naturales existentes en la fuente de agua superficial. Para dar mitigar dicho impacto, se recomienda realizar la caracterización de fauna y flora previo al inicio del sistema de tratamiento y ejecutar controles periódicos que permitan determinar el comportamiento y preservación de la biodiversidad en dicho sector.

Subsecuentemente, según Sathya, Keerthi, Nithya y Balasubramanian <sup>(81)</sup> los efluentes tratados mediante acoples entre procesos de

oxidación avanzada y tratamiento biológicos avanzados como los biorreactores de membranas, cuentan con muy bajas cargas contaminantes que permitirían ya sea su vertimiento a una fuente superficial, o su reúso en actividades diferentes al consumo humano, como lo son las de mantenimiento de zonas verdes u otras propias del relleno sanitario como lo sería el control de emisiones de material particulado mediante el riego de estas sobre las vías. Así mismo, estas aguas tratadas permiten la posibilidad de ser dispuestas en reservorios que contribuyan a aliviar las problemáticas que sufren los rellenos sanitarios durante las épocas de sequía motivadas principalmente a causa del cambio climático y fenómenos naturales como el del niño. De igual manera, teniendo en consideración que los proyectos y futuras investigaciones se deben regir por el marco de los objetivos de desarrollo sostenible, la implementación de estas metodologías permite dar cumplimiento al objetivo número 11. Ciudades y comunidades sostenibles ya que además de permitir un ciclo cerrado del agua y reincorporación de parte de esta a los ciclos naturales dado su vertimiento con cargas contaminantes muy reducidas, se brinda solución a una problemática mundial que enfrentan todos los rellenos sanitarios como lo es el tratamiento de este líquido altamente tóxico derivado por la disposición de los residuos sólidos urbanos y que representa un reto para todas las ciudades a nivel mundial <sup>(82)</sup>.

Finalmente, según la categorización ilustrada en la Tabla 6, un sistema fotocatalítico acoplado a un biorreactor de membrana ofrece impactos positivos importante que permiten considerar como viable su aplicación a escala real, especialmente cuando se involucra la dilución inicial de este líquido con aguas residuales domésticas de población que no cuente con cobertura de saneamiento básico, permitiendo entonces mejorarles la calidad de vida y la

reducción de enfermedades que se derivan por el déficit de alcantarillado existente.

#### 4. Conclusiones y recomendaciones

Es posible concluir que mediante la combinación de la técnica del Scoping y de la Cuantificación de impactos ambientales empleando la metodología de Conesa, fue posible identificar los principales afectaciones que se obtienen al acoplar un Proceso de Oxidación Avanzada y un Reactor Biológico Aerobio, sirviendo como insumo para que futuros investigadores que pretendan utilizar acoples para la descontaminación de lixiviados establezcan estrategias que reduzcan, controlen o mitiguen los daños que se generan sobre el medioambiente.

Además, se concluye que no existe suficiente estado del arte relacionado con la combinación del Scoping con metodologías de evaluación de impacto ambiental sobre acoples entre sistemas Fotocatalíticos con Procesos Biológicos para la descontaminación de lixiviado, por lo que el trabajo desarrollado contribuye con la reducción de la brecha del conocimiento existente.

Así mismo, es posible destacar que a pesar de la relevancia que tiene aplicar la técnica del Scoping para tener conocimiento de los impactos del sistema acoplado previo a la puesta en marcha de los tratamientos, existe la necesidad de aplicar una metodología de cuantificación de impacto ambiental como la aplicada en el actual manuscrito, ya que de no hacerse se tendría en cuenta únicamente la frecuencia absoluta que ofrece el Scoping y la evidencia del estado del arte, lo que podría no ser preciso al momento de categorizar los impactos reales del proyecto.

Por otro lado, según los resultados obtenidos de la metodología de Conesa, se concluye que el principal impacto negativo sobre el medio ambiente de acoplar el tratamiento de oxidación avanzada y el proceso biológico se origina por

posibles fugas de lixiviado en el sistema de tratamiento, por lo que la principal recomendación se asocia con establecer medidas de control sobre las tuberías y flujo del sistema. También se destaca la producción de residuos tanto peligrosos como no peligrosos tales como lodos residuales, reactivos y químicos, los cuales deben ser segregados y dispuestos acorde con las recomendaciones de un gestor externo especializado y de lo establecido por la normatividad. En cuanto a los impactos positivos, sobresale el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible, que a su vez se ve plasmado en el mejoramiento de la calidad de vida de poblaciones que presenten déficit en saneamiento básico, dado que se reducirán las enfermedades originadas por este factor. Finalmente, la aplicación de esta combinación de tratamiento permite aumentar la disponibilidad del recurso hídrico, beneficiando directamente al gestor del relleno sanitario y al medio ambiente en general.

#### 5. Agradecimientos y financiamiento

El actual manuscrito fue financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Colombiano en el marco de las “Becas del Bicentenario” con recursos del “Fondo de Ciencia, Tecnología e Innovación del sistema general de regalías de Colombia.

#### 6. Referencias

- (1) Al-Jarallah R, Aleisa E. A baseline study characterizing the municipal solid waste in the State of Kuwait. *Waste Manag* [Internet]. 2014 May;34(5):952–60. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X14000671>
- (2) Luo H, Zeng Y, Cheng Y, He D, Pan X. Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity

- assessment. Vol. 703, Science of the Total Environment. Elsevier B.V.; 2020. p. 135468.
- (3) Augustsson A, Uddh Söderberg T, Jarsjö J, Åström M, Olofsson B, Balfors B, et al. The risk of overestimating the risk-metal leaching to groundwater near contaminated glass waste deposits and exposure via drinking water. *Sci Total Environ* [Internet]. 2016 Oct;566–567:1420–31. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969716311676>
- (4) Xiao S, Peng J, Song Y, Zhang D, Liu R, Zeng P. Degradation of biologically treated landfill leachate by using electrochemical process combined with UV irradiation. *Sep Purif Technol* [Internet]. 2013 Sep;117:24–9. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1383586613002487>
- (5) Ye Z, Zhang H, Yang L, Wu L, Qian Y, Geng J, et al. Effect of a solar Fered-Fenton system using a recirculation reactor on biologically treated landfill leachate. *J Hazard Mater* [Internet]. 2016 Dec;319:51–60. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389416300279>
- (6) Xu Q, Siracusa G, Di Gregorio S, Yuan Q. COD removal from biologically stabilized landfill leachate using Advanced Oxidation Processes (AOPs). *Process Saf Environ Prot* [Internet]. 2018 Nov;120:278–85. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582018308668>
- (7) Chen C, Feng H, Deng Y. Re-evaluation of sulfate radical based-advanced oxidation processes (SR-AOPs) for treatment of raw municipal landfill leachate. *Water Res* [Internet]. 2019 Apr;153:100–7. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135419300478>
- (8) Gautam P, Kumar S, Lokhandwala S. Advanced oxidation processes for treatment of leachate from hazardous waste landfill: A critical review. *J Clean Prod* [Internet]. 2019 Nov;237:117639. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619324898>
- (9) Del Moro G, Mancini A, Mascolo G, Di Iaconi C. Comparison of UV/H2O2based AOP as an end treatment or integrated with biological degradation for treating landfill leachates. *Chem Eng J* [Internet]. 2013 Feb;218:133–7. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1385894713000247>
- (10) Arimi MM. Integration of Fenton with biological and physical-chemical methods in the treatment of complex effluents: a review. Vol. 6, *Environmental Technology Reviews*. Taylor and Francis Ltd.; 2017. p. 156–73.
- (11) Oller I, Malato S, Sánchez-Pérez JA. Combination of Advanced Oxidation Processes and biological treatments for wastewater decontamination-A review. 2011;
- (12) LAMOUR R, AZEVEDO E, LEITE S, DEZOTTI M. Removal of phenol in high salinity media by a hybrid process (activated sludge+photocatalysis). *Sep Purif Technol* [Internet]. 2008 Apr 20;60(2):142–6. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1383586607003759>
- (13) Dia O, Drogui P, Buelna G, Dubé R. Hybrid process, electrocoagulation-biofiltration for landfill leachate treatment. *Waste Manag* [Internet]. 2018 May;75:391–9. Available from:

- (14) <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X18300825>  
 Grippa E, Campos JC, da Fonseca F V. Combination of ozonation and microfiltration to condition landfill leachate for reverse osmosis treatment. *J Water Process Eng* [Internet]. 2021 Oct;43:102264. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214714421003512>
- (15) Becerra D, Barrientos I, Rodriguez A, Machuca-Martinez F, Ramirez L. Treatment of Agricultural Wastewater with Chlorpyrifos by Coupling of Heterogeneous Photocatalysis and Anaerobic Biological Process. *Top Catal* [Internet]. 2020 Oct 29;63(11–14):1261–71. Available from: <https://link.springer.com/10.1007/s11244-020-01281-4>
- (16) Colombo A, Módenes AN, Góes Trigueros DE, Giordani da Costa SI, Borba FH, Espinoza-Quiñones FR. Treatment of sanitary landfill leachate by the combination of photo-Fenton and biological processes. *J Clean Prod* [Internet]. 2019 Mar;214:145–53. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618340411>
- (17) Zadeh LA. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Inf Sci (Ny)* [Internet]. 1975 Jan;8(3):199–249. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0020025575900365>
- (18) Sauve G, Van Acker K. The environmental impacts of municipal solid waste landfills in Europe: A life cycle assessment of proper reference cases to support decision making. *J Environ Manage* [Internet]. 2020 May;261:110216. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479720301511>
- (19) Laner D, Cencic O, Svensson N, Krook J. Quantitative Analysis of Critical Factors for the Climate Impact of Landfill Mining. *Environ Sci Technol* [Internet]. 2016 Jul 5;50(13):6882–91. Available from: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.6b01275>
- (20) Toro Calderón J, Martínez Prada R. Métodos de Evaluación de Impacto Ambiental en Colombia. *Rev Investig Agrar y Ambient* [Internet]. 2013 Oct 15;4(2):43. Available from: <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/990>
- (21) Villacreses G, Salinas SS, Ortiz WD, Villacís S, Martínez-Gómez J, Narváez C. RA. Environmental Impact Assessment of Internal Combustion and Electric Engines for Maritime Transport. *Environ Process* [Internet]. 2017 Dec 23;4(4):907–22. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s40710-017-0270-7>
- (22) Alfonso Zorro NY, Díaz Sánchez SS, Gómez Hernández F. Propuesta de un sistema de gestión integrado basado en NTC-ISO 9001:2015, NTC-ISO 14001:2015 y el Decreto 1072 de 2015 (capítulo 6) para una empresa de atención médica domiciliaria. *SIGNOS - Investig en Sist gestión* [Internet]. 2017 Jan 1;9(1):45–57. Available from: <https://revistas.usantotomas.edu.co/index.php/signos/article/view/4000>
- (23) Lezama JL, Graizbord B. Medio ambiente [Internet]. 2010 [cited 2021 Apr 5]. Available from: <http://ezproxy.uninorte.edu.co:2142/ehost/ebookviewer/ebook/bmxlYmtfXzEwMTc5OTJfX0FO0?sid=d98a4699-57fa-4c22-89d9-a4e509fc64b2@pdc-v->

- sessmgr02&vid=0&format=EK&lpid=n  
avpoint5&rid=0
- (24) Chavarro Cadesa JE. estructuras y condiciones sociales y económicas [Internet]. Grupo Editorial Nueva Legislación SAS. 2017 [cited 2021 Apr 5]. p. 217. Available from: <https://ezproxy.uninorte.edu.co:6051/es/ereader/unorte/68882>
- (25) Sadler B, McCabe M, Fuller K, Australia E, Ridgway B, Bailey J, et al. Environmental Impact Assessment Training Resource Manual This is the second edition of the EIA Training Resource Manual prepared by The Institute of Environmental Management and Assessment Centre for Environmental Assessment and Management United Nations [Internet]. 2002 [cited 2021 Apr 4]. Available from: <http://www.unep.ch/etu>
- (26) Koornneef J, Faaij A, Turkenburg W. The screening and scoping of Environmental Impact Assessment and Strategic Environmental Assessment of Carbon Capture and Storage in the Netherlands. *Environ Impact Assess Rev* [Internet]. 2008 Aug;28(6):392–414. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0195925507001266>
- (27) Dougherty TC, Hall AW. Chapter 3: EIA process. In: Environmental impact assessment of irrigation and drainage projects [Internet]. [cited 2021 Apr 4]. p. 11–28. Available from: <http://www.fao.org/3/V8350E/v8350e06.htm>
- (28) Chemlal R, Azzouz L, Kernani R, Abdi N, Lounici H, Grib H, et al. Combination of advanced oxidation and biological processes for the landfill leachate treatment. *Ecol Eng*. 2014;73:281–9.
- (29) Vilar VJP, Rocha EMR, Mota FS, Fonseca A, Saraiva I, Boaventura RAR. Treatment of a sanitary landfill leachate using combined solar photo-Fenton and biological immobilized biomass reactor at a pilot scale. *Water Res* [Internet]. 2011 Apr;45(8):2647–58. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135411000753>
- (30) Titchou FE, Zazou H, Afanga H, El Gaayda J, Ait Akbour R, Nidheesh PV, et al. Removal of organic pollutants from wastewater by advanced oxidation processes and its combination with membrane processes. *Chem Eng Process - Process Intensif* [Internet]. 2021 Dec;169:108631. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S025527012100324X>
- (31) Juan Pérez JI. Identificación y evaluación de impactos ambientales en el Campus Ciudad Universitaria, Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro de Coatepec, Toluca México. *Acta Univ* [Internet]. 2017 Aug 2;27(3):36–56. Available from: <http://148.214.150.50/index.php/acta/article/view/1249>
- (32) Lijteroff R, Giorda EC, Dávila SA. Identificación y valoración de aspectos e impactos ambientales en la Dirección Nacional de Vialidad, Distrito San Luis, Argentina. Un caso de estudio. *Gestión y Ambient*. 2018;21(1):22–30.
- (33) Darbra RM, Ronza A, Stojanovic TA, Wooldridge C, Casal J. A procedure for identifying significant environmental aspects in sea ports. *Mar Pollut Bull* [Internet]. 2005 Aug;50(8):866–74. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0025326X05001918>
- (34) Marazza D, Bandini V, Contin A.

- Ranking environmental aspects in environmental management systems: A new method tested on local authorities. *Environ Int* [Internet]. 2010 Feb;36(2):168–79. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0160412009002177>
- (35) Snell T, Cowell R. Scoping in environmental impact assessment: Balancing precaution and efficiency? *Environ Impact Assess Rev* [Internet]. 2006 May;26(4):359–76. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0195925505001411>
- (36) Wood G, Glasson J, Becker J. EIA scoping in England and Wales: Practitioner approaches, perspectives and constraints. *Environ Impact Assess Rev* [Internet]. 2006 Apr;26(3):221–41. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0195925505000028>
- (37) FERNANDEZ-VITORIA V. Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental [Internet]. 2011 [cited 2021 Apr 4]. 203–318 p. Available from: [https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=wa4SAQAQBAJ&oi=fnd&pg=PP2&dq=Guia+Metodologica+para+la+evaluacion+del+impacto+ambiental.&ots=r-0dbNnf9u&sig=YLktn3bxmtg\\_-YW8tC9s4NfV5Oc#v=onepage&q=Guia+Metodologica+para+la+evaluacion+del+impacto+ambiental](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=wa4SAQAQBAJ&oi=fnd&pg=PP2&dq=Guia+Metodologica+para+la+evaluacion+del+impacto+ambiental.&ots=r-0dbNnf9u&sig=YLktn3bxmtg_-YW8tC9s4NfV5Oc#v=onepage&q=Guia+Metodologica+para+la+evaluacion+del+impacto+ambiental).
- (38) Teng C, Zhou K, Peng C, Chen W. Characterization and treatment of landfill leachate: A review. *Water Res* [Internet]. 2021 Sep;203:117525. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135421007211>
- (39) Luo H, Zeng Y, Cheng Y, He D, Pan X. Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment. *Sci Total Environ* [Internet]. 2020 Feb;703:135468. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969719354610>
- (40) Hassan M, Zhao Y, Xie B. Employing TiO<sub>2</sub> photocatalysis to deal with landfill leachate: Current status and development. *Chem Eng J* [Internet]. 2016 Feb;285:264–75. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1385894715013649>
- (41) Poblete R, Otal E, Vilches LF, Vale J, Fernández-Pereira C. Photocatalytic degradation of humic acids and landfill leachate using a solid industrial by-product containing TiO<sub>2</sub> and Fe. *Appl Catal B Environ* [Internet]. 2011 Feb;102(1–2):172–9. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926337310005278>
- (42) Pelaez M, Nolan NT, Pillai SC, Seery MK, Falaras P, Kontos AG, et al. A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications. *Appl Catal B Environ* [Internet]. 2012 Aug;125:331–49. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926337312002391>
- (43) Lebron YAR, Moreira VR, Brasil YL, Silva AFR, Santos LV de S, Lange LC, et al. A survey on experiences in leachate treatment: Common practices, differences worldwide and future perspectives. *J Environ Manage* [Internet]. 2021 Jun;288:112475. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479721005375>
- (44) Miao L, Yang G, Tao T, Peng Y. Recent

- advances in nitrogen removal from landfill leachate using biological treatments – A review. *J Environ Manage* [Internet]. 2019 Apr;235:178–85. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030147971930060X>
- (45) Ehrig H-J, Stegmann R, Robinson T. Biological Leachate Treatment. In: *Solid Waste Landfilling* [Internet]. Elsevier; 2018. p. 541–74. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780124077218000279>
- (46) Chaturvedi H, Kaushal P. Comparative study of different Biological Processes for non-segregated Municipal Solid Waste (MSW) leachate treatment. *Environ Technol Innov* [Internet]. 2018 Feb;9:134–9. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352186417302717>
- (47) El-Gohary FA, Kamel G. Characterization and biological treatment of pre-treated landfill leachate. *Ecol Eng* [Internet]. 2016 Sep;94:268–74. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857416303093>
- (48) Muñoz I, Peral J, Antonio Ayllón J, Malato S, Passarinho P, Domènech X. Life cycle assessment of a coupled solar photocatalytic–biological process for wastewater treatment. *Water Res* [Internet]. 2006 Nov;40(19):3533–40. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135406004490>
- (49) Chemlal R, Azzouz L, Kernani R, Abdi N, Lounici H, Grib H, et al. Combination of advanced oxidation and biological processes for the landfill leachate treatment. *Ecol Eng* [Internet]. 2014 Dec;73:281–9. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857414004546>
- (50) Jagaba AH, Kutty SRM, Lawal IM, Abubakar S, Hassan I, Zubairu I, et al. Sequencing batch reactor technology for landfill leachate treatment: A state-of-the-art review. *J Environ Manage* [Internet]. 2021 Mar;282:111946. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479721000086>
- (51) O'Connor M, Garnier G, Batchelor W. Life cycle assessment comparison of industrial effluent management strategies. *J Clean Prod* [Internet]. 2014 Sep;79:168–81. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614005435>
- (52) Postacchini L, Ciarapica FE, Bevilacqua M. Environmental assessment of a landfill leachate treatment plant: Impacts and research for more sustainable chemical alternatives. *J Clean Prod* [Internet]. 2018 May;183:1021–33. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618305493>
- (53) Ortiz O, Pasqualino JC, Díez G, Castells F. The environmental impact of the construction phase: An application to composite walls from a life cycle perspective. *Resour Conserv Recycl* [Internet]. 2010 Sep;54(11):832–40. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344910000108>
- (54) Niero M, Pizzol M, Bruun HG, Thomsen M. Comparative life cycle assessment of wastewater treatment in Denmark including sensitivity and uncertainty analysis. *J Clean Prod* [Internet]. 2014 Apr;68:25–35. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652613009050>
- (55) Dominguez S, Laso J, Margallo M,

- Aldaco R, Rivero MJ, Irabien Á, et al. LCA of greywater management within a water circular economy restorative thinking framework. *Sci Total Environ* [Internet]. 2018 Apr;621:1047–56. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969717328322>
- (56) Muñoz I, Rodríguez A, Rosal R, Fernández-Alba AR. Life Cycle Assessment of urban wastewater reuse with ozonation as tertiary treatment. *Sci Total Environ* [Internet]. 2009 Feb;407(4):1245–56. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969708009996>
- (57) Chatzisyneon E, Foteinis S, Mantzavinos D, Tsoutsos T. Life cycle assessment of advanced oxidation processes for olive mill wastewater treatment. *J Clean Prod* [Internet]. 2013 Sep;54:229–34. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965261300320X>
- (58) Ontiveros GA, Campanella EA. Environmental performance of biological nutrient removal processes from a life cycle perspective. *Bioresour Technol* [Internet]. 2013 Dec;150:506–12. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852413012893>
- (59) Cornejo PK, Zhang Q, Mihelcic JR. Quantifying benefits of resource recovery from sanitation provision in a developing world setting. *J Environ Manage* [Internet]. 2013 Dec;131:7–15. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479713006439>
- (60) Zepon Tarpani RR, Azapagic A. Life cycle environmental impacts of advanced wastewater treatment techniques for removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs). *J Environ Manage* [Internet]. 2018 Jun;215:258–72. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479718302743>
- (61) Rutherford LA, Matthews SL, Doe KG, Julien GRJ. Aquatic Toxicity and Environmental Impact of Leachate Discharges from a Municipal Landfill. *Water Qual Res J* [Internet]. 2000 Feb 1;35(1):39–58. Available from: <https://iwaponline.com/wqrj/article/35/1/39/40480/Aquatic-Toxicity-and-Environmental-Impact-of>
- (62) Renzoni R, Germain A. Life Cycle Assessment of Water: From the pumping station to the wastewater treatment plant (9 pp). *Int J Life Cycle Assess* [Internet]. 2007 Mar 1;12(2):118–26. Available from: <http://link.springer.com/10.1065/lca2005.12.243>
- (63) Muga HE, Mihelcic JR. Sustainability of wastewater treatment technologies. *J Environ Manage* [Internet]. 2008 Aug;88(3):437–47. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479707001028>
- (64) Chong MN, Sharma AK, Burn S, Saint CP. Feasibility study on the application of advanced oxidation technologies for decentralised wastewater treatment. *J Clean Prod* [Internet]. 2012 Nov;35:230–8. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652612002867>
- (65) Bove D, Merello S, Frumento D, Arni S Al, Aliakbarian B, Converti A. A Critical Review of Biological Processes and Technologies for Landfill Leachate Treatment. *Chem Eng Technol* [Internet]. 2015 Dec;38(12):2115–26. Available from:

- <http://doi.wiley.com/10.1002/ceat.201500257>
- (66) Feng D, Song C, Mo W. Environmental, human health, and economic implications of landfill leachate treatment for per- and polyfluoroalkyl substance removal. *J Environ Manage* [Internet]. 2021 Jul;289:112558. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479721006204>
- (67) Di Maria F, Sisani F. A life cycle assessment of conventional technologies for landfill leachate treatment. *Environ Technol Innov* [Internet]. 2017 Nov;8:411–22. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352186417300159>
- (68) Li Y, Luo X, Huang X, Wang D, Zhang W. Life Cycle Assessment of a municipal wastewater treatment plant: a case study in Suzhou, China. *J Clean Prod* [Internet]. 2013 Oct;57:221–7. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652613003739>
- (69) Garfí M, Flores L, Ferrer I. Life Cycle Assessment of wastewater treatment systems for small communities: Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds. *J Clean Prod* [Internet]. 2017 Sep;161:211–9. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617310569>
- (70) Dalun H, Abdullah MO. Regional leachate discharge, monitoring and the associated riverine pollutants propagation model simulation of Sungai Sarawak in Malaysia. *J Clean Prod* [Internet]. 2021 Jun;303:127091. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965262101310X>
- (71) Ibor OR, Eni G, Andem AB, Bassey IU, Arong GA, Asor J, et al. Biotransformation and oxidative stress responses in relation to tissue contaminant burden in *Clarias gariepinus* exposed to simulated leachate from a solid waste dumpsite in Calabar, Nigeria. *Chemosphere* [Internet]. 2020 Aug;253:126630. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653520308237>
- (72) Budi S, Suliasih BA, Othman MS, Heng LY, Surif S. Toxicity identification evaluation of landfill leachate using fish, prawn and seed plant. *Waste Manag* [Internet]. 2016 Sep;55:231–7. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X15301318>
- (73) Pesci Pereira C, da Conceição Pereira T, Gomes G, Quintaes BR, Bila DM, Campos JC. Evaluation of reduction estrogenic activity in the combined treatment of landfill leachate and sanitary sewage. *Waste Manag* [Internet]. 2018 Oct;80:339–48. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X18305592>
- (74) Ferraz FM, Povinelli J, Pozzi E, Vieira EM, Trofino JC. Co-treatment of landfill leachate and domestic wastewater using a submerged aerobic biofilter. *J Environ Manage* [Internet]. 2014 Aug;141:9–15. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479714001728>
- (75) Sims N, Kasprzyk-Hordern B. Future perspectives of wastewater-based epidemiology: Monitoring infectious disease spread and resistance to the community level. *Environ Int* [Internet]. 2020 Jun;139:105689. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/>

- pii/S0160412020304542
- (76) Mayer F, Bhandari R, Gäth SA, Himanshu H, Stoberneck N. Economic and environmental life cycle assessment of organic waste treatment by means of incineration and biogasification. Is source segregation of biowaste justified in Germany? *Sci Total Environ* [Internet]. 2020 Jun;721:137731. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969720312420>
- (77) Ziegler-Rodriguez K, Margallo M, Aldaco R, Vázquez-Rowe I, Kahhat R. Transitioning from open dumpsters to landfilling in Peru: Environmental benefits and challenges from a life-cycle perspective. *J Clean Prod* [Internet]. 2019 Aug;229:989–1003. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619315252>
- (78) Turner DA, Beaven RP, Woodman ND. Evaluating landfill aftercare strategies: A life cycle assessment approach. *Waste Manag* [Internet]. 2017 May;63:417–31. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X16307437>
- (79) Anand U, Li X, Sunita K, Lokhandwala S, Gautam P, Suresh S, et al. SARS-CoV-2 and other pathogens in municipal wastewater, landfill leachate, and solid waste: A review about virus surveillance, infectivity, and inactivation. *Environ Res* [Internet]. 2022 Jan;203:111839. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013935121011336>
- (80) Antonopoulou M, Kosma C, Albanis T, Konstantinou I. An overview of homogeneous and heterogeneous photocatalysis applications for the removal of pharmaceutical compounds from real or synthetic hospital wastewaters under lab or pilot scale. *Sci Total Environ* [Internet]. 2021 Apr;765:144163. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969720376944>
- (81) Sathya U, Keerthi, Nithya M, Balasubramanian N. Evaluation of advanced oxidation processes (AOPs) integrated membrane bioreactor (MBR) for the real textile wastewater treatment. *J Environ Manage* [Internet]. 2019 Sep;246:768–75. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479719308278>
- (82) Calderón Márquez AJ, Cassettari Filho PC, Rutkowski EW, de Lima Isaac R. Landfill mining as a strategic tool towards global sustainable development. *J Clean Prod* [Internet]. 2019 Jul;226:1102–15. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619311345>