UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

FACULTAD CIENCIAS DE LA VIDA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE TECNOLOGÍA DE BIORREMEDIACIÓN COMO ESTRATEGIA PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS.

AUTOR(ES):

Richart Fabian Reyes Noteno

Jairo Lizandro Solís Villagómez

DOCENTE - TUTOR:

Dr. Reiner Abreu Naranjo, Ph.D.

Puyo - Pastaza - Ecuador

2023

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

FACULTAD CIENCIAS DE LA VIDA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE TECNOLOGÍA DE BIORREMEDIACIÓN COMO ESTRATEGIA PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS.

AUTOR(ES):

Richart Fabian Reyes Noteno

Jairo Lizandro Solís Villagómez

DOCENTE - TUTOR:

Dr. Reiner Abreu Naranjo, Ph.D.

Puyo - Pastaza - Ecuador

2023

FORMATO 4
APROBACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR
(Uno por cada evaluador)

En el siguiente cuadro se detalla un conjunto de criterios a evaluar con un total de cien (100) puntos.		
Criterios	**Puntaje**	**Argumentos de la calificación**
1. TÍTULO		
El título es conciso e informativo de la idea principal del escrito. Genera expectativas de lectura que se cumplen.	5/5	Cumple
2. RESUMEN		
Entrega información necesaria que oriente al lector a identificar de qué se trata la investigación y su relevancia. Incorpora los objetivos, metodología, principales hallazgos y conclusiones.	3/5	Hay detalles en los conectores
3. INTRODUCCION		
Entrega información sobre la temática a tratar. Describe la relevancia del tema dentro de las temáticas de investigación, vinculación y docencia. Presentación del problema y objetivos del problema del artículo de manera clara y concisa.	20/20	Cumple
4. MARCO TEÓRICO		
Marco teórico coherente y articulado con los objetivos. Entrega conceptos de términos que son empleados en el estudio. Sustenta el referente conceptual con adecuadas fuentes de autoridad.	15/15	Cumple
5. METODOLOGIA		
Describe el tipo de investigación a desarrollar. Expone con claridad el procesamiento de la información y obtención de los datos. Plantea los criterios de análisis con que se abordó la información.	15/15	Cumple

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS		
Entrega los resultados de manera organizada a partir del problema planteado, objetivos específicos, etc. Los cuadros y figuras son pertinentes y están claramente representados. El texto no repite información entregada en los cuadros y figuras.	22/25	Ha mejorado
7. CONCLUSIONES		
Las conclusiones deben ser claras y precisas, acorde a los objetivos trazados. Discute, reflexiona sobre los resultados obtenidos.	10/10	Cumple
8. REFERENCIAS		
Atiende las normas APA en las citas, fuentes y referencias. Las referencias bibliográficas tienen la fuente en el texto y viceversa.	5/5	Cumple
VALORACIÓN TOTAL	95/100	

DICTAMEN

Marque la casilla correspondiente a su criterio de evaluación respecto al documento revisado.

Recomendación	**Marque con X**
Aprobar	X
No Aprobar	
CALIFICACIÓN	95 (Noventa y cinco)

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
EDGAR RUBEN CHICAIZA REISANCHO

Edgar Chicaiza R. Msc
docente PAR CIEGO

Dado en la ciudad de Puyo, a los 09 días del mes de marzo de 2023.

FORMATO 4
APROBACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR
(Uno por cada evaluador)

Tema: Revisión bibliográfica sobre Tecnología de biorremediación como estrategia para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios

En el siguiente cuadro se detalla un conjunto de criterios a evaluar con un total de cien (100) puntos.		
Criterios	**Puntaje**	**Argumentos de la calificación**
1. TÍTULO		
El título es conciso e informativo de la idea principal del escrito. Genera expectativas de lectura que se cumplen.	4/5	El tema no es acorde a la estructura de un artículo científico
2. RESUMEN		
Entrega información necesaria que oriente al lector a identificar de qué se trata la investigación y su relevancia. Incorpora los objetivos, metodología, principales hallazgos y conclusiones.	5/5	Tomó en consideración las recomendaciones emitidas en el Formato 3.
3. INTRODUCCION		
Entrega información sobre la temática a tratar. Describe la relevancia del tema dentro de las temáticas de investigación, vinculación y docencia. Presentación del problema y objetivos del problema del artículo de manera clara y concisa.	20/20	Tomó en consideración las recomendaciones emitidas en el Formato 3.
4. MARCO TEÓRICO		
Marco teórico coherente y articulado con los objetivos. Entrega conceptos de términos que son empleados en el estudio. Sustenta el referente conceptual con adecuadas fuentes de autoridad.	15/15	Tomó en consideración las recomendaciones emitidas en el Formato 3
5. METODOLOGIA		
Describe el tipo de investigación a desarrollar. Expone con claridad el procesamiento de la información y obtención de los datos. Plantea los criterios de análisis con que se abordó la información.	13/15	Existen un párrafo donde indica que se puede establecer o no una metodología; sin embargo, está aplicando un proceso metodológico durante la investigación.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS		
Entrega los resultados de manera organizada a partir del problema planteado, objetivos específicos, etc. Los cuadros y figuras son pertinentes y están claramente representados. El texto no repite información entregada en los cuadros y figuras.	23/25	No aplica adecuadamente el Sistema Internacional de Unidades en la escritura de las cantidades, el buen uso de la como y el punto.
7. CONCLUSIONES		
Las conclusiones deben ser claras y precisas, acorde a los objetivos trazados. Discute, reflexiona sobre los resultados obtenidos.	7/10	Las conclusiones están muy generales con respecto a los objetivos: general y específicos.
8. REFERENCIAS		
Atiende las normas APA en las citas, fuentes y referencias. Las referencias bibliográficas tienen la fuente en el texto y viceversa.	5/5	
VALORACIÓN TOTAL	92/100	

DICTAMEN

Marque la casilla correspondiente a su criterio de evaluación respecto al documento revisado.

Recomendación	**Marque con X**
Aprobar	**X**
No Aprobar	
CALIFICACIÓN	**92/100**

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
JOSE ANTONIO ROMERO PAGUAY

José Antonio Romero Paguay

Dado en la ciudad de Puyo, a los 10 días del mes de marzo de 2023.

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA

CARRERA DE INGNIERÍA AMBIENTAL

Puyo, 03 de marzo del 2023

Por medio del presente CERTIFICO que:

El Trabajo de Integración Curricular correspondiente al estudiante Reyes Noteno Richart Fabian con C.I. 220029101-7, con el Tema: "**Revisión bibliográfica sobre Tecnología de biorremediación como estrategia para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios.**", de la carrera de Ingeniería Ambiental. Docente director del Trabajo de Integración Curricular, Abreu Naranjo Reinier, ha sido revisado mediante el sistema anti-plagio URKUND, reportando una similitud del 9%, informe generado con fecha 01-03-2023 por parte del director conforme archivo adjunto.

Particular que comunico a usted para los fines pertinentes

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
REINIER ABREU NARANJO

Abreu Naranjo Reinier

Docente-director del Trabajo de Integración Curricular

Ouriginal by Turnitin

Document Information

Analyzed document	Artículo de biorremediación 1-03- 2023.docx (D159841688)
Submitted	2023-03-02 02:29:00
Submitted by	
Submitter email	rabreu@uea.edu.ec
Similarity	9%
Analysis address	rabreu.uea@analysis.urkund.com

Sources included in the report

SA	**UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA / Biojardineras- Aguas Residuales Domésticas-Final.docx** Document Biojardineras- Aguas Residuales Domésticas-Final.docx (D142644659) Submitted by: ja.bonillad@uea.edu.ec Receiver: ja.bonillad.uea@analysis.urkund.com	4
SA	**UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA / uic-asignación-de-revisión-716-Texto+del+artículo-7728.docx** Document uic-asignación-de-revisión-716-Texto+del+artículo-7728.docx (D159441906) Submitted by: jromero@uea.edu.ec Receiver: romero.jose.uea@analysis.urkund.com	1
W	URL: https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/3524/1/Tesis%20Final%20Daniela%20Gallardo.pdf Fetched: 2021 11-13 20:47:24	5
W	URL: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/152920/Tratamiento-de-lixiviados-de-un-rel... Fetched: 2021 11-22 03:40:06	2
W	URL: http://repositorio.ucp.edu.pe/bitstream/handle/UCP/1003/sheyla%20Perez_TESIS_TITULO_2015.pdf?s... Fetched: 2023 03-02 02:31:00	1
W	URL: https://zenodo.org/record/6347996#.Y45-H3bMLIUChemal, Fetched: 2023 03-02 02:30:00	1
W	URL: https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/9195/124290.pdf?sequence=1&isAllowed=yFern Fetched: 2023-03-02 02:30:00	3
SA	**CRISANTO ET AL_LIXIVIADOS.docx** Document CRISANTO ET AL_LIXIVIADOS.docx (D100135643)	1

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA

CARRERA DE INGNIERÍA AMBIENTAL

Puyo, 01 de marzo del 2023

Por medio del presente CERTIFICO que:

El Trabajo de Integración Curricular correspondiente al estudiante Solis Villagómez Jairo Lizandro con C.I. 180524113-8, con el Tema: "**Revisión bibliográfica sobre Tecnología de biorremediación como estrategia para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios.**", de la carrera de Ingeniería Ambiental. Docente director del Trabajo de Integración Curricular, Abreu Naranjo Reinier, ha sido revisado mediante el sistema anti-plagio URKUND, reportando una similitud del 9%, informe generado con fecha 01-03-2023 por parte del director conforme archivo adjunto.

Particular que comunico a usted para los fines pertinentes

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
REINIER ABREU NARANJO

_____

Abreu Naranjo Reinier

Docente-director del Trabajo de Integración Curricular

Ouriginal by Turnitin

Document Information

Analyzed document	Artículo de biorremediación 1-03- 2023.docx (D159841688)
Submitted	2023-03-02 02:29:00
Submitted by	
Submitter email	rabreu@uea.edu.ec
Similarity	9%
Analysis address	rabreu.uea@analysis.urkund.com

Sources included in the report

SA	**UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA / Biojardineras- Aguas Residuales Domésticas-Final.docx** Document Biojardineras- Aguas Residuales Domésticas-Final.docx (D142644659) Submitted by: ja.bonillad@uea.edu.ec Receiver: ja.bonillad.uea@analysis.urkund.com	4
SA	**UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA / uic-asignación-de-revisión-716-Texto+del+artículo-7728.docx** Document uic-asignación-de-revisión-716-Texto+del+artículo-7728.docx (D159441906) Submitted by: jromero@uea.edu.ec Receiver: romero.jose.uea@analysis.urkund.com	1
W	URL: https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/3524/1/Tesis%20Final%20Daniela%20Gallardo.pdf Fetched: 2021 11-13 20:47:24	5
W	URL: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/152920/Tratamiento-de-lixiviados-de-un-rel... Fetched: 2021 11-22 03:40:06	2
W	URL: http://repositorio.ucp.edu.pe/bitstream/handle/UCP/1003/sheyla%20Perez_TESIS_TITULO_2015.pdf?s... Fetched: 2023 03-02 02:31:00	1
W	URL: https://zenodo.org/record/6347996#.Y45-H3bMLIUChemal, Fetched: 2023 03-02 02:30:00	1
W	URL: https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/9195/124290.pdf?sequence=1&isAllowed=yFern Fetched: 2023-03-02 02:30:00	3
SA	**CRISANTO ET AL_LIXIVIADOS.docx** Document CRISANTO ET AL_LIXIVIADOS.docx (D100135643)	1

Revisión bibliográfica sobre Tecnología de biorremediación como estrategia para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios

Reyes Noteno Richart Fabian[1]
amb2017317@uea.edu.ec

Solís Villagómez Jairo Lizandro[1]
jl.solisv@uea.edu.ec

Abreu Naranjo Reinier, Ph. D[1]
rabreu@uea.edu.ec

[1]Universidad Estatal Amazónica, Facultad de Ciencias de la Vida, Carrera de Ingeniería Ambiental.

Resumen

En la actualidad el cuidado y preservación del ambiente es una de las grandes preocupaciones de la sociedad. La contaminación provocada por los lixiviados generados en los rellenos sanitarios debido al mal manejo e ineficaz tratamiento de este líquido residual, ha provocado contaminación en aguas superficiales y subterráneas. Este estudio tiene como objetivo principal analizar las tecnologías de biorremediación como estrategia para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios mediante una revisión bibliográfica. La metodología utilizada se basó en un alcance descriptivo documental en donde se aplicó instrumentos como el diagrama de flujo PRISMA para la comprobación de requisitos que debe cumplir una revisión bibliográfica. Así mismo se empleó el instrumento Critical Review Form-Qualitative Studies (CRF-QS) para la valoración de calidad de las fuentes bibliográficas. Como resultados se obtuvo la elección de 19 documentos elegibles, de los cuales el 69% se categorización como excelente calidad. En los que se encontró la aplicación de cinco tecnologías de biorremediación, siendo el tratamiento por fitorremediación el más eficiente, con un porcentaje de remoción en DBO5 de 31.1% hasta un 60% cuando se aplicó a lixiviados maduros y previamente tratados por microorganimos. Mientras que para el DQO se obtuvo una remoción del 47% hasta el 77% de eficiencia. De igual manera la biofiltración se considera como una tecnología eficiente y amigable que remueve hasta el 44% en DQO y un 91% en coliformes. Por lo que se pudo concluir que la fitorremediación asistida por microorganismos es una estrategia eficiente para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Además, si se combina con microalgas se obtienen excelentes resultados como alternativa de biorremediación para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, seguido la biofiltración que se considera como la segunda tecnología con mayor eficiencia.

***Palabras Clave**:* biorremediación, rellenos sanitarios, lixiviados.

Abstract

At present, the care and preservation of the environment is one of the great concerns of society. The contamination caused by the leachate generated in the sanitary landfills due to the mismanagement and ineffective treatment of this residual liquid, has caused contamination in surface and groundwater. The main objective of this study is to analyze bioremediation technologies as a strategy for the treatment of leachate from sanitary landfills through a bibliographic review. The methodology used was based on a descriptive documentary scope where instruments such as the PRISMA flowchart were applied to verify the requirements that a bibliographic review must meet. Likewise, the Critical Review Form-Qualitative Studies (CRF-QS) instrument was used to assess the quality of bibliographic sources. As results, the choice of 19 eligible documents was obtained, of which 69% were categorized as excellent quality. In which the application of five bioremediation technologies was found, being the phytoremediation treatment the most efficient, with a BOD5 removal percentage of 31.1% up to 60% when applied to mature leachate and previously treated by microorganisms. While for the COD a removal of 47% up to 77% efficiency was obtained. Similarly, biofiltration is considered an efficient and friendly technology that removes up to 44% COD and 91% coliforms. Therefore, it was possible to conclude that phytoremediation assisted by microorganisms is an efficient strategy for the treatment of leachate from sanitary landfills. In addition, if it is combined with microalgae, excellent results are obtained as a bioremediation alternative for the treatment of leachate from sanitary landfills, followed by biofiltration, which is considered the second most efficient technology.

Keywords*:* bioremediation, landfills, leachate

1. INTRODUCCIÓN

El manejo adecuado de desechos sólidos urbanos, industriales peligrosos y biológicamente infecciosos es una de las preocupaciones más apremiantes del mundo. Dado que, en el mejor de los casos, estos residuos son depositados en un Relleno Sanitario (RS), resultando la mayoría de las veces insuficiente como método de tratamiento y disposición final de dichos residuos. Otra alternativa aplicada frecuentemente, son los vertederos a cielo abierto que se caracterizan por generar más contaminación, debido a que resultan ser un tratamiento poco efectivo la mayoría de las veces (López-Vega, 2017).

Los residuos sólidos municipales son una fuente constante de contaminación en las zonas urbanas de todo el mundo, incluido Ecuador. Con el desarrollo de la civilización ha venido un aumento dramático en la cantidad de basura generada en las grandes ciudades provocando la necesidad de la creación de cada vez más sistemas de tratamiento, como rellenos sanitarios. A la vez estos sistemas generan mayores flujos de lixiviados causando de las fuentes de agua superficiales y subterráneas. Así como el aumento de emisión de gases de efecto invernadero (Larrea, 2018). Los lixiviados se producen generalmente por la descomposición de los residuos sólidos urbanos y la acción de los líquidos presentes en los rellenos sanitarios que tienen su origen en fuentes externas como drenajes superficiales, filtraciones pluviales y aguas subterráneas. Los

lixiviados son altamente contaminantes, por lo que son un grave problema para el ambiente (Anrango, 2018). Las propiedades físico-químicas de un lixiviado dependen de varios factores como: la capacidad del vertedero, la edad del lixiviado, el tipo y grado de compactación del desecho, la humedad inicial de la basura, la precipitación, la humedad, la temperatura, la evaporación, la evapotranspiración, la escorrentía, la infiltración y la edad del vertedero. Los cuales juegan un papel importante en la composición físico-química del lixiviado (Zhang et al., 2017).

Las alternativas de tratamientos de lixiviados se pueden jerarquizar dependiendo de diversas características, como por el tipo de contaminación que puedan remover y de acuerdo a los niveles que se logren alcanzar de efectividad de cada una de ellas. Entre los diferentes tipos de tratamiento podemos encontrar, las tecnologías de biorremediación, que incluyen la fitorremediación, biofiltración, bioestimulación y bioaumentación (Mohammad y Weichgrebe, 2017).

El objetivo principal de este estudio fue analizar las tecnologías de biorremediación como estrategia para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios mediante una revisión bibliográfica. Para los cual se platearon los siguientes objetivos específicos, investigar información de los últimos 10 años sobre las tecnologías de biorremediación aplicadas para el tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios. Identificar los principales factores físicos, químicos y biológicos que se tienen en cuenta en cada proceso de depuración de lixiviados (TDL) y evaluar las tendencias en los sistemas y tecnologías de biorremediación de tratamiento de lixiviados que se utilizan en los vertederos de residuos sólidos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS/METODOLOGÍA

2.1.Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo documental también es conocida como una investigación de tipo bibliográfico, cuya característica principal es el análisis de información. La presente está basada en una revisión bibliográfica de artículos sobre las tecnologías de biorremediación, para conocer las diferentes estrategias para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. De modo que se utilizó fuentes de información secundarias como: Revistas científicas, artículos científicos, tesis de titulación con la finalidad de recolectar información relevante para el presente estudio (Escudero y Cortéz, 2018).

2.1.1. Enfoque de la investigación

Este estudio adopta un enfoque mixto es decir cualitativo y cuantitativo, debido a que mediante el primer enfoque busca caracterizar y definir completamente un fenómeno para comprenderlo y explicarlo mejor en su entorno natural. En particular, presenta las siguientes características: Permite el desarrollo de ideas novedosas y fomenta el diálogo abierto entre los participantes del estudio, de manera que el enunciado del problema lo crea el investigador que puede seguir o no una metodología

estricta. Por otra parte, el enfoque cuantitativo permite la aplicación de procesos estadísticos que ayudaron a dar la valoración de la calidad de estudios que fueron incluidos en la investigación (Monje , 2011).

2.2.Métodos de investigación

El método empleado para la presente investigación bibliográfica, es analítica-deductiva que se basa en recopilar información respecto a las tecnologías de biorremediación. Esta investigación se realizó con información obtenida de las distintas bases de datos como Scopus, Scielo, Science Direct, Latindex, PubMed, Springer Link, Redalyc y Google Académico. Se empleó palabras clave como: "Tecnologías de biorremediación", "Tratamiento de lixiviados", "Rellenos sanitarios" "Estrategias de biorremediación", con la finalidad de ampliar la búsqueda de artículos científicos relacionados con el tema de estudio; se realizó la búsqueda con los términos, tanto en idioma español como en inglés. Para la búsqueda de estudios se establecieron criterios de inclusión y exclusión, los mismos que fueron:

2.2.1. Términos de inclusión

- Fecha de publicación (2012-2022)
- Artículos y tesis disponibles en texto completo.
- Palabras claves traducidas al idioma inglés: *bioremediation technologies, Leachate tratment, sewage water*.
- Ancladores de criterio: AND, OR, NOT.
- Los artículos tomados, en cuenta, incluyen aquellos de alto impacto.
- Artículos que hagan referencia a las tecnologías de biorremediación y su tratamiento de lixiviados.

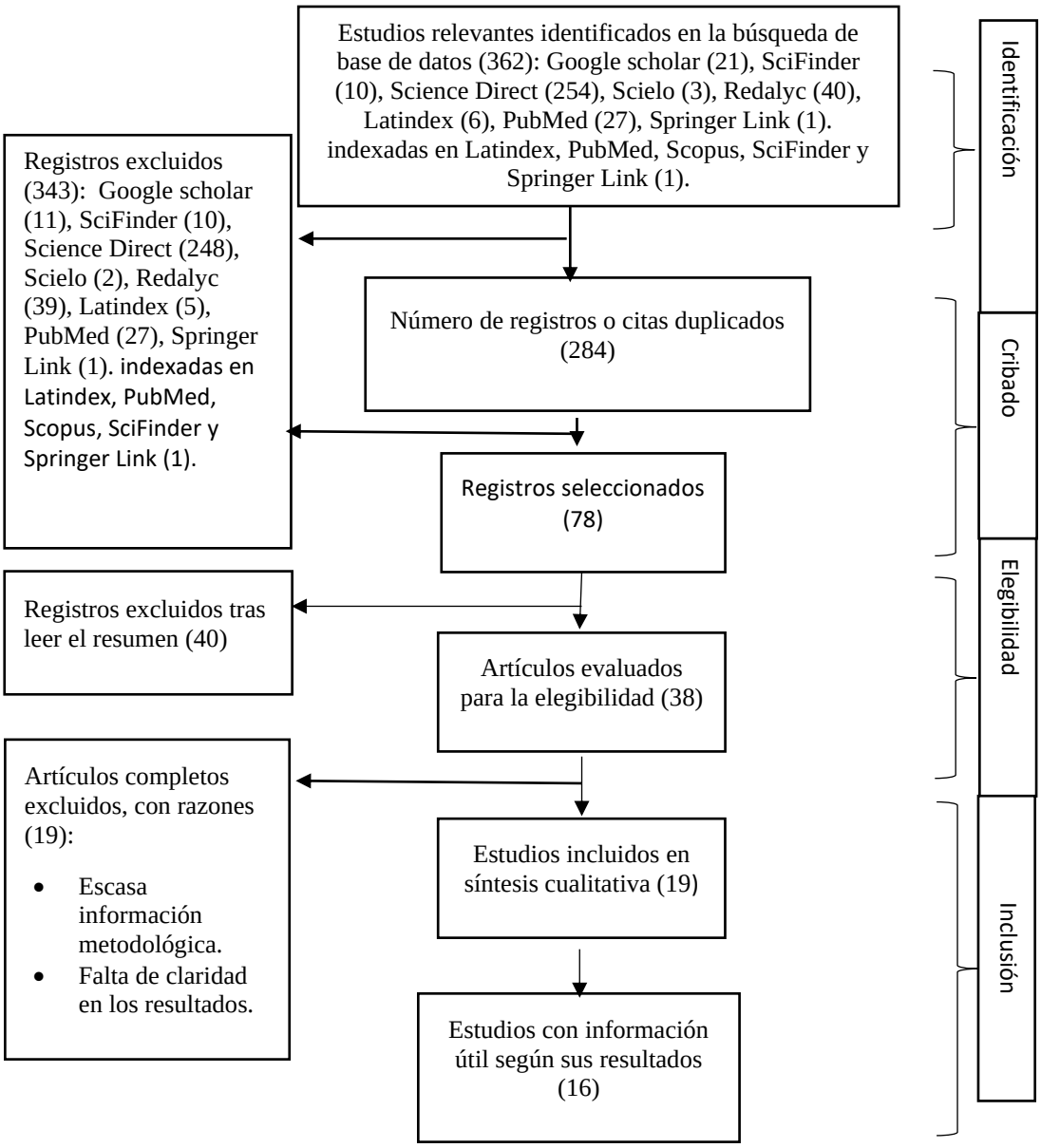
2.2.2. Criterios de exclusión

- No se incluyeron búsquedas masivas de blogs o sitios web y otros medios, de tal forma que se garantizó la confiabilidad de las fuentes de información.
- Artículos que no se puedan obtener en texto completo.
- Estudios empíricos.
- Documentos con baja calidad de metodología.

2.3.Procedimiento de trabajo

Se empleó el diagrama de flujo PRISMA debido a que es una herramienta actualizada por Moraga y Cartes (2015) con la finalidad de evaluar la calidad y transparencia de la publicación de Revisión Sistemática (RS). Las etapas y criterios considerados en esta herramienta se muestran en la figura 1.

Figura 1.Diagrama de flujo del análisis aleatorizado según la declaración de prisma.



Nota. Fuente: (Carrasco, 2022).

Con la finalidad de evaluar la calidad de los estudios seleccionados, se aplicó la metodología establecida por Law et al. (1998), denominada Critical Review Form-Qualitative Studies (CRF-QS). Este instrumento considera 19 ítems (ver Tabla 1) para otorgar una calificación de calidad a los estudios según la puntuación obtenida.

Tabla 1. Criterios de valoración de calidad para fuentes bibliográficas según el Instrumento CRF-QS.

Criterios	No ítems	Elementos a valorar
Finalidad del estudio	1	Objetivos precisos, concisos, medibles y alcanzables
Literatura	2	Relevancia científica para la investigación
Diseño	3	Muestra relación con la temática a investigar
	4	Adecuación al tipo de diseño
Muestra	5	Es apropiado con el problema de investigación
	6	Descripción de la muestra
	7	Justificación de la muestra
Medición	8	Consideraciones éticas
	9	Descripción del método de investigación
Intervención	10	Descripción de los instrumentos utilizados
	11	Descripción del análisis
	12	Relaciones entre conceptos e integración de datos
Resultados	13	De acuerdo con los objetivos de investigación
	14	Resultados precisos u concisos
	15	Importancia de los resultados para la clínica
	16	Reporte de triangulación: fuentes/datos, métodos, investigadores y teorías
Conclusión e implicación clínica de los resultados	17	No presencia de sesgos
	18	Conclusiones y hallazgos apropiados
	19	Hallazgos que contribuyen al desarrollo del estudio

Nota. Aquí se detalla los criterios a ser evaluados en cada artículo científico, de acuerdo al CRF-QS.

La categorización se establece acorde a la siguiente valoración:

- *Pobre* calidad metodológica ≤ 11 criterios
- *Aceptable* calidad metodológica entre 12 y 13 criterios
- *Buena calidad* metodológica entre 14 y 15 criterios

- *Muy buena* calidad metodológica entre 16 y17 criterios
- *Excelente* calidad metodológica ≥ 18 criterios

Para la obtención y evaluación de los estudios relacionados a las tecnologías de biorremediación como estrategia de tratamiento de lixiviados, se realizó una base de datos en la herramienta de Microsoft Excel. Donde se consideró los siguientes criterios como el país, fuente, título, objetivo y metodología, tecnología, descripción del tratamiento, parámetro a tratar, tiempo y porcentaje de remoción, para el análisis de cada uno de los resultados obtenidos, mediante identificación y evaluación de las tendencias en los sistemas y tecnologías de biorremediación (ver Anexo B).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.Distribución geográfica de los estudios

Utilizando los criterios mencionados anteriormente, se seleccionaron 19 estudios que incluyen el idioma inglés y español (Ver anexo B). Como se observa en la Figura 2A, la mayoría de estudios encontrados sobre biorremediación para el periodo analizado, han sido publicados en los años 2017 y 2021, seguido en el año 2014, 2015 y 2018. Finalmente, los años 2012, 2020, 2022 fueron donde se encontraron la menor cantidad de publicaciones. En cuanto a la procedencia, Colombia fue el país de mayor representación en cantidad de estudios relacionado con la temática, de un total de 9 países donde realizaron las investigaciones como se puede observar en la figura 2B.

Figura 2. Categorización de los artículos: (A) Distribución de artículos seleccionados para el periodo 2012-2022: (B) Procedencia geográfica de los estudios realizados sobre la biorremediación de lixiviados.

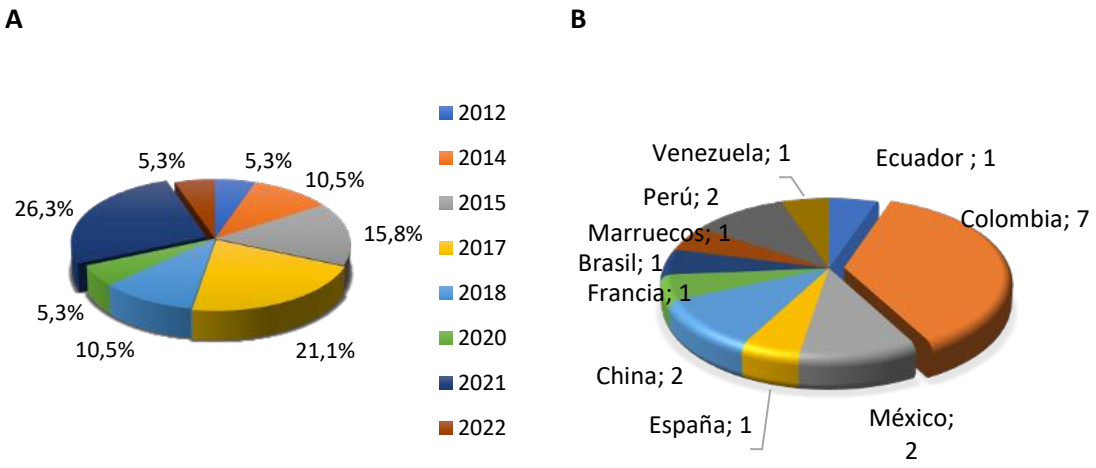
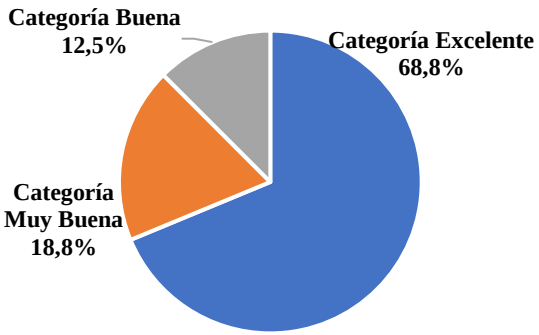


Figura 3. Valoración de la calidad de estudios mediante el instrumento CRF-QS.

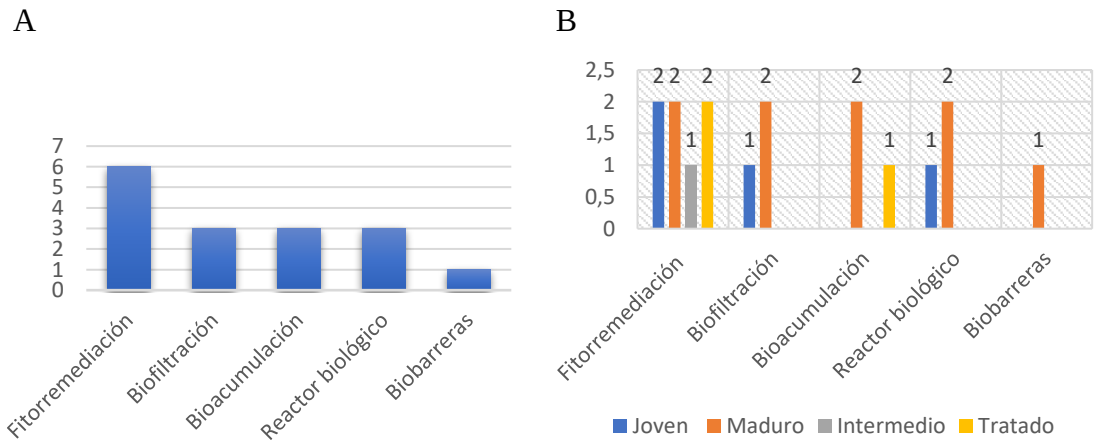


En la figura 3, se observa el porcentaje de valoración de calidad obtenido en correspondencia a la metodología aplicada. Como resultado se obtuvo que el 69% de documentos presentan una calidad excelente, mientras que el 19% se valoraron como muy buena calidad. Finalmente, el 12% se categoriza como buena calidad. Lo que en términos generales se evidenció que los documentos elegidos son de buena calidad y cumplen los criterios establecidos para ser considerados como una fuente confiable de información.

3.2.Tecnologías de biorremediación para lixiviados de rellenos sanitarios

En la figura 4A se observa que de los 19 estudios elegidos 16 fueron incluidos para su evaluación y análisis, en donde se encontraron 5 tecnologías de biorremediación, de las cuales la fitorremediación fue la más aplicada en los estudios con un total de 6 artículos, seguido de la biofiltración, bioacumulación, reactor biológico con un total de 3 estudios cada tecnología, y por último las biobarreras con 1 estudio. Igualmente se observa en la figura 3B las tecnologías que han sido aplicadas según el tipo de lixiviado utilizado en cada estudio.

Figura 4. Tecnologías de biorremediación: (A) Cantidad de Tecnologías aplicadas en los documentos elegidos. (B) tipo de lixiviados tratados mediante las tecnologías.



De acuerdo con la comparación de investigaciones se obtuvo que la mayoría de los estudios aplicaron como tecnología de biorremediación la fitorremediación, seguido de tecnologías como Biofiltración, Bioacumulación, adsorción Biorreactor y tratamientos anaerobios. Además, se observó que los parámetros más estudiados por los autores fueron el DBO_5, DQO, N, P y metales pesados como (Cr, Cu, Pb, Ni, Zn) (Más detalles en Anexo B).

Los estudios coinciden que para escoger el sistema de tratamiento es importante considerar la edad del lixiviado debido a la biodegradabilidad que estos poseen. Por lo que recomiendan usar sistemas biológicos para los lixiviados jóvenes, mientras que para lixiviados viejos dada su baja biodegradabilidad, es preferible el uso de sistemas fisicoquímicos.

3.2.1. Fitorremediación

En este sentido se puede citar el estudio realizado por Ruedas (2017) que aplicó la fitorremediación a lixiviados jóvenes, en cual obtuvo un porcentaje de remoción del 71.2% en DBO_5, el 48.3% en DQO y el 84.6% de remoción en SST. Demostrando que la depuración por medio de macrófitas es una buena alternativa de tratamiento, con una buena eficiencia de remoción. Por otra parte, Sardi et al. (2018) en su estudio muestra que aplicando el tratamiento por fitoplancton para la depuración de lixiviados de edad intermedia también resulta eficiente, dado a que obtuvo una remoción del 83% en DQO y un 67% en Nitrógeno amoniacal. No obstante López y Contreras (2017) en su investigación experimental de depuración de metales pesados por medio de la fitorremediación asistida por microorganismos en lixiviados jóvenes y maduros demostró que no obtuvo buena remoción de metales pesados (cobre 56.5% y Níquel 6.9%) y que se obtienen resultados similares de remoción con las especies *Pennisetum purpureum* y *Chrysopogon zizaniodes*.

Por otra parte, una alternativa para mejorar la eficiencia de remoción de la fitorremediación, es realizar una etapa pretratamiento de los lixiviados, como sugieren los estudios llevados a cabo por Fernández (2014) y Torres et al. (2020). El primer estudio aplico un pretratamiento con la especie jacinto de agua y obtuvo una remoción del 31.1% y 77% de DBO_5 y DQO respectivamente. Sin embargo, cuando fue utilizada la especie pasto alemán, no se obtuvo ningún efecto de fitorremediación en los por cientos de DQO y DBO_5. Mientras que Torres et al. (2020) determinó que las especies *Rhizophora mangle* y *Typha latiflolia* son una alternativa viable para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario. Mientras que Montero y Salazar (2018) concluye sobre la base de sus resultados que la depuración de lixiviados maduros, únicamente se obtiene una remoción eficiente en el nitrógeno orgánico y un 60% de remoción en DBO_5 y 47% en DQO. Sin embargo, en términos generales el autor sugiere que los tratamientos de humedales no son aptos como un único tratamiento para el lixiviado maduro, ya que no logra cumplir con los estándares, no obstante, sirve como un tratamiento complementario.

3.2.2. Biofiltración

Respecto al método de Biofiltración los autores Ibarra (2015), y Faisal (2015) realizaron estudios basados en la depuración de contaminantes en lixiviados maduros, mediante tratamientos como Biofiltro de composta y el Biofiltro anaerobio descendente respectivamente. Mientras que Maldonado et al. (2017) estudió la depuración de contaminantes en lixiviados jóvenes mediante filtros anaerobios de flujo ascendente.

De acuerdo con Ibarra (2015), el tratamiento a través de un biofiltro de bagazo de caña aplicando recirculación durante 5 días ayudó a la remoción de contaminantes orgánicos, inorgánicos y microorganismos; con una eficiencia de remoción del 44% en DQO, metales pesados (hierro el 96%, aluminio 7%) y los coliformes con una disminución del 91%. Este estudio concluye que esta tecnología es de bajo costo, el material resultante es inocuo lo que convierte en una tecnología amigable con el medio ambiente. Igualmente, el estudio de Faisal (2015) concuerda con los resultados mencionados, reflejando que el porcentaje de remoción en su investigación experimental fue del 86% correspondiente a la DBO_5 y 79% en DQO. Finalmente, Maldonado (2017) concluye que los lixiviados jóvenes pueden ser tratados por un sistema biológico anaerobio debido que presenta ventajas económicas y es un sistema viable que logra eficiencias de remoción de DQO mayores al 72%.

3.2.3. Bioacumulación

Con respecto a la tecnología de Bioacumulación Pérez (2015) y Viegas et al. (2021) analizaron la depuración en lixiviados maduros mediante la aplicación de microalgas (*Scenedesmus quadricanda* y *Scenedesmus clorofíceas*) respectivamente; en el estudio de Pérez (2015) obtuvo una remoción del dióxido de carbono un 3.7×10^{-5} kg/L y el cloruro 2.2×10^{-5} kg/L mientras que los compuestos nitrogenados se mantuvieron. Concluyendo que el tiempo de exposición al lixiviado solamente indujo a la producción de biomasa microalgal y a la acumulación lipídica de la especie de *Scenedesmus quadricanda*.

Por el contrario, el estudio de Viegas et al. (2021) obtuvo una remoción desde el 18% al 62% en DQO, Nitrógeno del 63-71%, fósforo desde 15-100% y color 98.5%; en consecuencia, los autores mencionan que las microalgas son excelentes como agentes de biorremediación para el tratamiento de lixiviados, es un tratamiento que presenta bajos requerimientos de producción y es de fácil adaptabilidad.

Consecutivamente Souza et al. (2021) indica en sus resultados la remoción de contaminantes en lixiviados tratados; un 69% en Nitrógeno, Fósforo 87% y un 80% de eliminación de metales pesados a través de la bioadsorción; de modo que apoya a Viegas et al. (2021) en su teoría, que las microalgas son viables ´para remediar aguas residuales con alta capacidad de contaminantes debido que esta especie tiene la capacidad de crecer y desarrollarse con altos contenido de nitratos y metales pesados.

3.2.4. Reactor biológico

En referencia a la tecnología de, los autores Chemlal et al. (2014), Huicheng et al. (2021) y Zhu et al. (2020) aplicaron como tratamiento de biorremediación a; biorreactores inoculados, reactor con microorganismos y fibras de basalto, y reactor de goteo, para la depuración de lixiviados de edad joven y maduro; obteniendo dentro de sus resultados una remoción del 90% en la DBO_5 y el 87% de remoción en DQO, demostrando así en este estudio que el tratamiento biológico tiene una capacidad potencial de los microorganismos autóctonos del vertedero para degradar el lixiviado. Así mismo Huicheng et al. (2021) concuerda con sus resultados, obteniendo una remoción de DQO con un 86.9% y en metales pesados el 77%, 99.8%, 69.6%, 88% y 94.4% en los parámetros (Cr, Cu, Pb, Ni y Zn) respectivamente. Esto gracias a la presencia de filamentos de fibras de basalto que ayudó al enriquecimiento de las comunidades microbianas dando como resultado la nitrificación y desnitrificación; dado a que el nitrógeno total en los lixiviaos suele ser alto, logrando así la adsorción de metales pesados en un corto tiempo. Así mismo estos hallazgos concuerdan con los de Zhu et al. (2020) que en su estudio experimental de reactor de goteo empleó desechos textiles, de animales, y microrganismos logrando una remoción del 85% en DQO, el 76% y 99.9% en nitrógeno total y amoniacal respectivamente, determinando que el reactor presentó un buen desempeño después de los 100 días de operación evidenciando una ligera acumulación de sustancias orgánicas y nitrogenadas.

3.2.5. Biobarreras

Finalmente, respecto a la tecnología de Biobarreras Arena (2017), aporta a la investigación indicando que el tratamiento de biobarreras reactivas permeables utilizando texontle y composta se logra una eficiencia de remoción del 50 y 40% respectivamente, observándose una mayor capacidad de eliminación con el texontle sin embargo el autor sugiere que para una mejor remoción aumente el tiempo de retención en las barreras.

4. CONCLUSIONES

Diecinueves artículos sobre biorremediación como estrategias de tratamiento de lixiviado. A partir de sus análisis se identificaron 5 tecnologías para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: Fitorremediación, biofiltración, bioacumalción, reactor biológico y biobarreras. Además, la aplicación de especies vegetales y microorganismos como pretratamiento de depuración son las más empleadas para la eliminación de sustancias orgánicas como DBO y DQO e inorgánicas como metales pesados entre ellos mercurio, cadmio, cromo y plomo.

La fitorremediación fue la estrategia para tratamiento de lixiviados más investigada y su aplicación fue principalmente a lixiviados jóvenes y/o tratados previamente mediante el uso de macrófitas y fitoplancton. Para los cuales se reportaron los mayores porcentajes de eficiencia de remoción de contaminantes. De la misma manera los tratamientos mediante la aplicación de microalgas se consideran como excelentes agentes de biorremediación para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Mientras que los resultados de más baja eficiencia de remoción es reportada para fitorremediación asistida por microorganismos en lixiviados maduros. Finalmente, las tecnologías de biofiltración

según los diferentes autores, presenta ventajas eficientes de remoción para el tratamiento de los lixiviados jóvenes por medio de un sistema anaerobio, considerándose como un sistema viable.

REFERENCIAS

Alcántara, C., Posadas, E., Guieysse, B., & Muñoz, R. (2015). Microalgae-based Wastewater Treatment. *Handbook of Marine Microalgae: Biotechnology Advances*, 439–455. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128007761000297

Anrango, M. J. (2018). Métodos alternativos para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario del Cantón Mejía, Pichincha, Ecuador. Revista de Ingeniería.

Antonio, J., Sepúlveda, V., & Lorena, T. (1980). Onshore exploration and production in the United Kingdom (petroleum). *Transactions, Institution of Mining & Metallurgy, Section B, Special Issue*, 44–46. https://www.redalyc.org/pdf/539/53906604.pdf

Arenas Moreno, G. A. (2017). *Barreras reactivas aplicables en acuíferos para la remoción de materia orgánica proveniente de residuso urbanos [Tesis de grado, Universidad Ncional Autónoma de México]*. Repositorio institucional. http://132.248.52.100:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/12416/tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Carrasco, E. (11 de Marzo de 2022). *Prisma 2020: Diagrama de flujo para nuevas revisiones sistemáticas que incluyeron búsquedas en bases de datos y registros solamente.* Zenodo.org: https://zenodo.org/record/6347996#.Y45-H3bMLIU

Chemal, R., Azzouz, L., Kernani, R., Abdi, N., Lounici, H., Grib, H., Mameri, N., & Drouiche, N. (2014). Combination of advanced oxidation and biological processes for the landfill leachate treatment. *Ecological Engineering, 73*, 281-289. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.043

De Souza, L., Schueng Lima, A., Paggi Matos, A., Menezes Wheeler, R., Borkb, A., Cubas, A., & Siegel , E. (2021). Journal of Cleaner Production. *Biopolishing sanitary landfill leachate via cultivation of lipid-rich Scenedesmus microalgae, 303*, 1-12. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127094

Escudero, C., & Cortéz, L. (2018). *Técnicas y métodos cualitativos para la investigación científica.* UTMACH. http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/12501/1/Tecnicas-y-MetodoscualitativosParaInvestigacionCientifica.pdf

Faisal Bernal, H. (2015). *Determinación de parámetros cinéticos en biofiltros utilizando como soporte residuos de llanta para el tratamiento de lixiviados maduros mezclados con aguas residuales municipales [Tesis de grado, Universidad del Norte]*. Repositorio institucional. https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/9195/124290.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Fernández Suqui, Á. R. (2014). Tratamiento de los liviados del relleno sanitario del relleno sanitario del cantón Yantzaza mediante el proceso de fitorremediación con las especies pasto aleman (Echinochloa polystachya) y (Jacinto de agua (Eichhornia crassipes). *[Tesis de grado, Universidad Nacional de Loja]*. Repositorio institucional.

https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/13923/1/TESIS-DIGITAL.pdf

Fernández, Á. (2014). *Tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario del cantón yantzaza mediante el proceso de fitorremediación con las especies pasto aleman (echinochloa polystachya) y jacinto de agua (Eichhornia crassipes)* [Universidad Nacional de Loja]. https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/13923/1/TESIS-DIGITAL.pdf

Giraldo, E. (2010). Tratamiento De Lixiviados De Rellenos Sanitarios. *Revista Ingenieria Uniandes*, 44–55. https://core.ac.uk/download/pdf/268121715.pdf

Guthrie, J. P. (2017). Tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario "Los Corazones. *Can. J. Chem*, *55*, 3562–3574. https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/403/1/Tesis Wendy Margarita Chávez Montes.pdf

Hernández, M, . (2020). *Evaluación de la aplicación de microalgas para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: Revisión de Literatura*. 2–33. https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/f80b7950-4ca7-4c72-8d19-ad1c19d22efe/content

Huicheng, N., Muhammad, A., Junchao, Q., Wang, Y., Zhigang, L., Zhijun, L., Ruoqi, C., Mohamed, G., & Zhiren, W. (2021). Application of basalt fibers in a biological contact oxidation reactor for the treatment of landfill leachate. *Journal of Cleaner Production*, *297*, 1-10. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126648

Ibarra Rodríguez, D. (2015). *Tratamiento de lixiviados provenientes de residuos de manejo especial aplicando la biorremediación [Tesis de grado, Universidad Autónoma de Nayarit.* Repositorio institucional. http://192.100.162.123:8080/bitstream/123456789/1372/1/2015%20TRATAMIENTO%20DE%20LIXIVIADOS%20PROVENIENTES%20DE%20RESIDUOS%20DE%20MANEJO%20ESPECIAL%20APLICANDO%20LA%20BIORREMEDIACION.pdf

Keister, B. A., & Repetto, P. C. (2016). Landfills. *The Handbook of Groundwater Engineering: Third Edition*, *III*(08), 993–1016. https://doi.org/10.1201/9781315371801

Larrea, F. (2018). Propuesta de manejo de residuos sólidos de la quebrada del río monjas de la parroquia San Antonio de Pichincha, Ecuador. Director, 15(2), 2017–2019. https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2004.3.66178

Law, M., Pollock, N., Letts, J., & Westmorland, M. (1998). *Critical Review Form – Quantitative Studies.* unisa.edu.au: https://www.unisa.edu.au/siteassets/episerver-6-files/global/health/sansom/documents/icahe/cats/mcmasters_quantitative-review.pdf

López Oliva, J. D., & Contreras Gómez, E. (2017). *Estudio de factibilidad del uso de la fitorremediación como alternativa para la remoción de metales pesados en el suelo usado como botader usado como botadero a cielo abier o a cielo abierto en Ut o en Utopía-Yopal [Tesis de grado, Universidad la Salle]*. Repositorio institucional. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1715&context=ing_ambiental_sanitaria

López-Vega, M. E., & Santos-Herrero, R. (2017). La recirculación de lixiviados de rellenos sanitarios en biodigestores a escala de laboratorio. Tecnología Química, 37(3), 433-444

Lu, S., Zhang, X., & Xue, Y. (2017). Application of calcium peroxide in water and soil treatment: A review. Journal of Hazardous Materials, 337, 163–177. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.04.064

Maldonado M, J. I., Rodríguez Chona, J. A., & Cajiao, Á. M. (2017). Treatment landfill leachate in filters anaerobic upflow of two phases (DI – FAFS). *Revista Ingeniería UC*, *24*(1), 91-104. https://www.redalyc.org/pdf/707/70750544011.pdf

Mestres, A. (2017). *residus.gencat.cat.* Aplicaciones de tecnologías punteras de biorremediación-proyectos a gran escala: https://residus.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/sols_contaminats/jornada_2017/15-E-Coggiola-Tauw-Iberia.pdf

Méndez Novelo, r. i., Castillo Borges, e. r., Sauri Riancho, m. r., Quintal Franco, c. a., Giácoman Vallejos, g., & Jiménez Cisneros, b. (2009). Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados. *revista internacional de contaminación ambiental*, *25*(3), 133–145. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0188-49992009000300002&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Monje , C. (2011). *Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa Guía didáctica.* https://www.uv.mx/rmipe/files/2017/02/Guia-didactica-metodologia-de-la-investigacion.pdf

Montero Zapata , L. J., & Salazar Zapata , K. J. (2018). *Estudio de humedales artificiales para la eliminación de nitrógeno en lixiviados provenientes de la disposición final de residuos sólidos municipales [Tesis de grado, Universidad Autónoma de Occidente]*. Repositorio institucional. https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/10544/T08217.pdf?sequence=6&isAllowed=y

Moraga, J., & Cartes, R. (2015). Pautas de chequeo, parte II: QUORUM y PRISMA. *Revista Chilena de Cirugía*, *67*(3), 325-330. https://www.researchgate.net/publication/279197876_Pautas_de_chequeo_parte_II_QUORUM_Y_PRISMA

Perez Gallardo, S. L. (2015). *Evaluación de la remoción de contaminantes en lixiviado empleando tres especies de microalgas oleaginosas amazónicas [Tesis de grado, Universidad Científica del Perú]*. Repositorio institucional. http://repositorio.ucp.edu.pe/bitstream/handle/UCP/1003/sheyla%20Perez_TESIS_TITULO_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Pérez, J. (2010). *Aplicación y evaluación de un reactor de contactores biológicos rotativos (rbc o biodiscos) a escala laboratorio como tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario de la pradera* [Universidad de Medellín]. https://core.ac.uk/download/pdf/51194433.pdf

P. Mohammad y G. Weichgrebe, "Municipal landfill leachate characteristics and feasibility of retrofitting existing treatment systems with deammonification e - A full scale survey", Environ. Manag., vol. 187, pp. 354-364, 2017.

Ríos, X. (2016). *Biosorcion de compuestos recalcitrantes de lixiviados usando Maguey Morado* [Universidad Quintana Roo]. http://risisbi.uqroo.mx/bitstream/handle/20.500.12249/1947/Tesis Biosorción de compuestos recalcitrantes de lixiviados usando maguey morado.pdf?sequence=1

Sardi Saavedra , A., Madera Parra, C., Peña Salamanca, E. J., Cerón, V. A., & Mosquera, J. (2018). Phytoplankton Functional Groups in a High-rate Algal pond Used for the Bioremediation of Landfill Leachate. *Acta Biológica Colombiana, 23*(3), 295-303. https://doi.org/DOI:http://dx.doi.org/10.15446/abc.v23n3.69537

Sardi Saavedra, A., Peña Salamanca, E. J., Madera Parra, C. A., & Cerón Hernández, A. (2016). Diversity of algal communities associated with a photosynthetic high rate algal system for bioremediation landfill leachate. *Latin american journal of aquatic research, 44*(1), 113-120. https://doi.org/10.3856/vol44-issue1-fulltext-11

Torres Gil, L. K., Saba, M., & Eljaiek Urzola, M. (2020). horizontal Subsurface-flow-Constructed Wetlands with Tropical Vegetable the Treatment of Labdfill Leachate: Case study in Cartagena, Colombia. *Journal of Environmental Engineering, 146*(10), 1-10. https://doi.org/doi/epdf/10.1061/%28ASCE%29EE.1943-7870.0001798

Viegas, C., Nobre, C., Mota, A., Vilarinho, C., Gouveia, L., & Goncalves, M. (2021). A circular approach for landfill leachate treatment: Chemical precipitation with biomass ash followed by bioremediation through microalgae. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 9*, 1-48. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105187

Zhu , Z., Zhao, Y., Zhu, Y., Zhang, M., Guoa, Y., & Zhou, T. (2021). Efficient treatment of mature landfill leachate with a novel composite biological trickle reactor developed using refractory domestic waste and aged refuse. *Journal of Cleaner Production, 305*, 2-13. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127194

ANEXOS

Anexo A

5. Marco Teórico

5.1.Calidad de lixiviados

Las variaciones en la edad del relleno y el tipo de relleno sanitario conducen a grandes cambios en la calidad de los lixiviados. En comparación con sus homólogos del mundo desarrollado, los vertederos de los países pobres producen lixiviados con cantidades muchos mayores de DBO_5, amoníaco, metales y precipitables. El lixiviado joven tiene cantidades mayores de todos los parámetros en comparación con el lixiviado más antiguo. (Giraldo, 2010).

5.2.Problemática para el manejo de lixiviados

La cantidad y composición de la basura depositada en cada vertedero, además de las condiciones climáticas de los lugares donde se encuentran, influye mucho en las condiciones de los lixiviados. La complejidad de los lixiviados se debe a varios parámetros como el pH, procesos corrosivos, olores ofensivos, presencia de metales, generación de lodos entre otros que complican los tratamientos.

5.3.Tratamientos de los lixiviados en un relleno sanitario

Según Guthrie (2017) la transferencia de lixiviados (incluyendo recirculación y tratamiento combinado con aguas residuales), biológica (aeróbica y anaeróbica) y fisicoquímica (oxidación química, adsorción, precipitación química, coagulación/floculación, sedimentación y extracción de aire) son las tres categorías principales en las que se clasifican los tratamientos convencionales de lixiviados. Los lixiviados jóvenes a menudo se tratan mediante técnicas biológicas, mientras que los lixiviados más antiguos suelen tratarse mediante enfoques fisicoquímicos.

Según Méndez et al. (2009) determinar la forma correcta de tratar los lixiviados puede ser un desafío debido al alto componente contaminante de este líquido.

Según Giraldo (2010) hay varias alternativas de tratamiento en las cuales se encuentran: Procesos anaerobios, Procesos aerobios, evaporación, Recirculación de los Lixiviados, Sistemas de Membranas y Sistemas Naturales, centrándonos en este último tratamiento este sistema realiza una combinación de las laguna y los humedales que son eficientes para la remoción de estos contaminantes de los lixiviados. Los tratamientos de lixiviados se clasifican en tres grupos:

5.3.1. Procesos biológicos

Debido a la alta concentración de amoníaco y compuestos orgánicos persistentes en los lixiviados de los vertederos, se obtienen valores de remoción bajos cuando se utilizan técnicas biológicas (aeróbicas, anaeróbicas o facultativas) para su tratamiento. Sin embargo, sin el reemplazo de esos desechos orgánicos, la eficiencia del vertedero disminuye a medida que pasan los años de operación. Entre los métodos de tratamiento biológico se encuentran lagunas aerobias, lodos activados, reactores de secuenciación SRB, filtros anaerobios, digestión anaerobia fitorremediación y fitorremediación. El método anaerobio alcanza una remoción entre el 91 – 99 y 30 – 79% en DBO_5 y DQO lo

que resulta una alternativa con mayor eficiencia para la remoción en lixiviados de relleno sanitarios (Hernández, M, 2020).

5.3.2. Procesos Fisicoquímicos

Mantienen un alto nivel de eficiencia en presencia de la mayoría de los tipos de contaminantes y sobresalen con sustancias refractarias. Estos procedimientos se utilizan en vertederos que han estado en funcionamiento durante al menos 10 años y, por lo tanto, se consideran estables. Los métodos de tratamiento fisicoquímico incluyen coagulación/floculación, precipitación química, filtración por membrana, oxidación química y procedimientos de oxidación avanzada (Hernández, M, 2020).

5.3.3. Procesos mixtos

Proceso que incluyen muchas fases de tratamiento físico, químico y biológico para eliminar las impurezas del efluente. Porque otros métodos no eliminan todos los contaminantes y necesitan agregar más pasos de tratamiento para obtener buenos resultados (Hernández, M, 2020).

5.4.Tecnologías de biorremediación

5.4.1. Fitorremediación (humedad de flujo superficial)

Debido a su capacidad para degradar, descomponer y cambiar contaminantes como hidrocarburos y PM, las especies de plantas se utilizan cada vez más en técnicas de digestión química con el objetivo de reducir la contaminación ambiental. El uso de microorganismos para descomponer sustancias orgánicas, incluidos sulfuros, ácidos orgánicos e hidrocarburos, así como partículas (Keister & Repetto, 2016).

5.4.2. Biofiltración

El tratamiento biológico o filtración biológica es el empleo de microorganismos en un sustrato para descomponer los productos de desecho. El objetivo de la biofiltración es la separación de partículas y microorganismos presentes en el efluente, pero también se utiliza para el control o tratamiento de compuestos orgánicos volátiles e inorgánicos presentes en la fase gaseosa (Ibarra, 2015).

5.4.3. Biorremediación a través de microalgas para el tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios

La eficiencia en la remoción de residuos y la capacidad de adaptación de las microalgas a las condiciones ambientales en los lixiviados de los rellenos sanitarios se ven afectadas por las especies utilizadas. Los mecanismos para la eliminación de nutrientes por parte de las microalgas se basan en las necesidades nutricionales y ambientales para el crecimiento de la biomasa (Alcántara et al., 2015).

5.4.4. Reactor Biológico

Los reactores de biodisco se utilizan para eliminar los contaminantes orgánicos carbonáceos y amoniacales de las aguas residuales mediante un tratamiento biológico aeróbico de crecimiento adherente mientras en el reactor de tipo UASB es utilizado para el tratamiento anaeróbico de lixiviados que son utilizados cuando los valores de DQO

son mayores a 800 mg/L y cuando la relación DBO_5/DQO se encuentra entre 0,3 - 0,7 (Pérez, 2010).

5.4.5. Bioacumulación

La bioacumulación es una tecnología de Biorremediación que se basa en la acumulación de los contaminantes dentro de las células el cual requiere de la actividad metabólica de un organismo vivo para realizar la eliminación de contaminantes. Es un proceso activo de biomasa viva que requiere de nutrientes (Ríos, 2016).

5.4.6. Biobarreras

Las biobarreras, también conocidas como barreras biológicas in situ, son un tipo de pared o barrera de tratamiento/permeable/reactiva utilizada en proyectos de descontaminación de aguas subterráneas para contener y, finalmente, limpiar áreas contaminadas. Las barreras biológicas pueden basarse únicamente en procesos biológicos o pueden combinar mecanismos biológicos con fisicoquímicos (Mestres, 2017).

6. Marco Conceptual

6.1.Relleno sanitario

Un relleno sanitario es un método de disposición de residuos sólidos que es seguro para los trabajadores, el público y el medio ambiente tanto durante como después de su uso. La basura se contiene en un área pequeña utilizando principios de ingeniería, luego se cubre con tierra diariamente y se compacta para reducir su volumen (Fernández, 2014).

6.2.Lixiviado

El lixiviado, a menudo llamado percolado, es un líquido negro maloliente creado durante la descomposición o putrefacción natural de los desechos; se asemeja a las aguas residuales residenciales, pero está considerablemente más concentrada (Fernández, 2014).

6.3.Biorremediación

La biorremediación es una palabra amplia que describe el uso de organismos vivos (como plantas, hongos, bacterias, etc.) para descomponer, alterar o eliminar sustancias químicas peligrosas en productos metabólicos inofensivos o menos peligrosos (Antonio et al., 1980).

Anexo B

Tabla 2. Tecnologías de biorremediación.

N°	País	Fuente	Título	Objetivo y metodología	Tecnología	Tipo de lixiviado	Descripción del tratamiento	Parámetro a tratar	Tiempo de remoción	% de remoción	Claridad metodológica
1	Ecuador	Fernández (2014)	Tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario del cantón Yantzaza mediante el proceso de fitorremediación con las especies pasto aleman (Echinochloa polystachya) y jacinto de agua (Eichhornia crassipes).	Evaluar la capacidad de tratamiento de descontaminación en los lixiviados generados en el relleno sanitario del cantón Yantzaza mediante el proceso de fitorremediación. Metodología experimental.	Fitorremediación = Piscina experimental con especies vegetales.	Lixiviado tratado	Se realizó la depuración de aguas por medio de tres micrófitas (Echinochloa, polystachya y eichhornia crassipes) acuáticas que fueron sembradas en las unidades experimentales. Cada especie se sometió a un gradiente de concentraciones de lixiviado de 0,5%, 2%, 5% y 10%.	DBO_5, NKT, Fósforo, Conductividad.	4 meses	Jacinto de agua = DBO_5= 33,1%, NKT= 36,1%, Fósforo= 50,7%, Conductividad = 97,2%.	Sí
2	Colombia	Ruedas (2017)	Diseño y evaluación de un sistema piloto a partir de las plantas hiperacumuladoras para la depuración de los lixiviados generados en el parque tecnológico ambiental "Las	Diseñar y evaluar un sistema piloto a partir de plantas hiperacumuladoras para la depuración de los lixiviados. La metodología aplicada fue la experimental.	Fitorremediación, Humedal artificial= (Humedal de flujo subsuperficial)	Lixiviado joven	El lixiviado pasa por 3 unidades de tratamiento (grava, granito y arena) y las especies vegetales utilizadas son (h. psittacorum, P. purpureum)	DBO_5, DQO Y SST	96 horas	DBO_5=71,23 %, DQO=48,23% , SST=84,61%	Sí

N°	País	Fuente	Título	Objetivo y metodología	Tecnología	Tipo de lixiviado	Descripción del tratamiento	Parámetro a tratar	Tiempo de remoción	% de remoción	Claridad metodológica
			bateas" del municipio de Aguachica César.								
3	Colombia	Acosta (2012)	Respuesta de crecimiento en tres especies vegetales nativas tropicales empleadas para la fitorremediación de lixiviados a nivel de microcosmos.	Evaluar la respuesta de crecimiento de tres especies vegetales nativas tropicales y su en la fitorremediación de lixiviados de relleno sanitario, a escala de microcosmos. Metodología experimental.	Fitorremediación = Humedales construidos subsuperficiales de flujo horizontal (HCFSS).	Lixiviado sintético	La fitorremediación está realizada por plantas hiperacumuladoras (Gynerium sagittatum, Colocasia esculenta y Heliconia psittacorum)	Metales pesados (Mercurio, cadmio, cromo, plomo	63 días	Mercurio= 92,13%, Cadmio= 77,84%, Cromo= 92,94%, Cromo= 75,54%	Sí
4	México	Ibarra (2015)	Tratamiento de lixiviados provenientes de residuos de manejo especial aplicando la biorremediación	Diseñar un biofiltro como alternativa tecnológica de biorremediación, para el tratamiento de lixiviados de residuos de manejo especial.	Biofiltración= Biofiltro de composta	Lixiviado maduro	El lixiviado se hizo pasar a través del biofiltro de bagazo de caña 5 veces aplicando la recirculación.	DQO, Hierro, Calcio, Cobre y boro	5 días aplicando recirculación	DQO= 44%, Hierro= 96%, Calcio=25%, Cobre y boro= 100%	Sí
5	Perú	Pérez (2015)	Evaluación de la remoción de contaminantes en lixiviado empleando tres especies de microalgas oleaginosas amazónicas	Evaluar la remoción de contaminantes químicos en lixiviado empleando microalgas. La metodología fue tipo experimental.	Bioacumulación = Sistemas biológicos con microalgas	Lixiviado maduro	las microalgas Chlrella, Scenedesmus quadricanda y Ankistrodesmus nannoselene fueron expuestas a dos concentraciones	Compuestos nitrogenados, dióxido de carbono y cloruro	9 días	Compuestos nitrogenados= 0, dióxido de carbono= 37-0 ppm, Cloruro= 2.2E-5 kg/L.	Sí

N°	País	Fuente	Título	Objetivo y metodología	Tecnología	Tipo de lixiviado	Descripción del tratamiento	Parámetro a tratar	Tiempo de remoción	% de remoción	Claridad metodológica
							de lixiviado por triplicado				
6	Colombia	López y Contreras (2017)	Estudio de factibilidad del uso de la fitorremediación como alternativa para la remoción de metales pesados en el suelo usado como botadero a cielo abierto en Utopía-Yopal	Evaluar la factibilidad de aplicación de la fitorremediación como alternativa de remoción de metales pesados. Aplicó una metodología experimental.	Fitorremediación asistida por microorganismos	lixiviado joven y maduro	Remoción de metales con las especies Arachis Pintoi y Chrysopogon Zizanioides	Cobre y Níquel	90 días	Cobre= 56,5%, Níquel= 6,9%	Sí
7	Perú	Julca (2022)	Capacidad de fitorremediación del maíz y el girasol en suelo contaminados del botadero municipal de Lucma.	Determinar el efecto de la capacidad fitorremediadora del maíz y girasol en suelo contaminados con metales pesados en el botadero municipal de Luema. La metodología fue no experimental-transversal-descriptiva.	Fitorremediación por especies vegetales (Fitoacumulación)	X	Se realizó la remoción de metales pesados por medio del Maíz y girasol	Plomo, arsénico, mercurio y cadmio	90 días	Plomo=44,44 %, Arsénico= 50,26%, Mercurio= 62,68%, Cadmio= 76,41%	Sí
8	Colombia	Sardi et al. 2018	Phytoplankton Functional Groups in a High-Rate Algal Pond Used for the Bioremediation	Evaluar por primera vez la dinámica de las comunidades de fitoplancton en un HRAP utilizado para la	Fitorremediación, sistemas naturales= Laguna anaerobia sistemas de algas	Lixiviada edad intermedia	se realizó la aplicación de especies de fitonplancton (Charophyta, clorofita, cianobacterias,	Fosfatos, Sólidos suspendidos totales, DQO, DCO, Nitrógeno	7 meses	DOC= 65%, DQO= 83%, NH4= 67%	Sí

N°	País	Fuente	Título	Objetivo y metodología	Tecnología	Tipo de lixiviado	Descripción del tratamiento	Parámetro a tratar	Tiempo de remoción	% de remoción	Claridad metodológica
			of Landfill Leachate	biorremediación de lixiviados de vertederos. Empleó una metodología experimental.	de alta tasa (HRAP).		euglenophyta, baslariophyta) en un estanque de algas de alta tasa para la reacción de contaminantes por medio de la producción de algas y la tasa fotosintética.	total y amoniacal.			
9	Marruecos	Chaoki et al (2021)	Treatment of a landfill leachate from Casablanca city by a coagulation-flocculation and adsorption process using a palm bark powder (PBP)	Evaluar la eficiencia de un tratamiento combinado de lixiviados de vertederos con coagulación con cloruro férrico y con adsorción en polvo de corteza de palma. Se aplicó una metodología experimental	Adsorción= Coagulación floculación adsorción sobre carbón activado.	Lixiviado crudo	Los lixiviados recolectados fueron transportados a laboratorio y se aplicó un procedimiento experimental de coagulación y floculación luego un análisis del adsorbente.	Sustancias orgánicas, inorgánicas		DQO= 59%, Turbidez= 99%, Color= 99%	Sí
10	Francia	Chemlal et al (2014)	Combination of advanced oxidation and biological processes for the landfill leachate treatment.	Contribuir a la descontaminación de lixiviados del vertedero de Qued Smar.	Reactor biológico= Oxidación con biorreactores sembrados diferentes tipos de inóculos.	lixiviado joven y maduro	Se realizó mediante el establecimiento de tres biorreactores inoculados (lixiviado crudo, extracto de tierra del vertedero y lodo activado)	DQO	27 horas	DQO= 50 a 80%	Sí
11	Brasil	Souza et al (2021)	Biopolishing sanitary landfill leachate via	Evaluar la vialidad de Scenedesmusso.	Bioacumulación = Tratamiento	Lixiviado tratado	Se utilizó lixiviado de relleno sanitario	Metales pesados (Al, Cd, Cu, Fe,		Nitrógeno= 69%, Fósforo=	Sí

N°	País	Fuente	Título	Objetivo y metodología	Tecnología	Tipo de lixiviado	Descripción del tratamiento	Parámetro a tratar	Tiempo de remoción	% de remoción	Claridad metodológica
			cultivation of lipid-rich Scenedesmus microalgae.	Cultivo como paso de pulido tras la biorremediación. Metodología experimental.	biológico con microalgas.		tratado para luego someterse a un tratamiento secundario (estanque de estabilización biológica) Scenedesmus Clorofíceas.	Ni, Rb y Zn) y Nitrógeno, fósforo.		87%, metales pesados=80%.	
12	China	Huichen g et al (2021)	Application of basalt fibers in a biological contact oxidation reactor for the treatment of landfill leachate.	Evaluar la eficiencia del tratamiento biológico. Aplicó una metodología experimental.	Reactor biológico= Tratamiento biológico con comunidad microbiana.	X	Se realizó mediante microorganismos y fibras de basalto con una densidad 263 kg/l.	DQO, Nitrógeno, Nitrógeno amoniacal y metales pesados (Cr, Cu, Pb, Ni, Zn)	30 días	DQO= 86,9%, Nitrógeno= 76,7%, NH4= 82,9%, Cr= 77%, Cu= 99,8%, Pb= 69,6% Ni= 88%, Zn= 94,4%.	Sí
13	España	Viegas et al (2021)	A circular approach for landfill leachate treatment: Chemical precipitation with biomass ash followed by bioremediation through microalgae.	Estudiar un enfoque integrado para la remediación de lixiviados de vertederos. Se realizó con una metodología experimental.	Bioacumulación = Biorremediación a través de microalgas.	Lixiviado maduro	Chlorella vulgaris, Chorella protothecoides, Scenedesmus obliquus, Spirulina major, Nannochoropis salina, Isochrysis galbana.	Color, DQO, N, P	96 horas	Color= 98,5%, DQO= 18 a 62%, N= 63 a 71%, P= 15 a 100%	Sí
14	China	Zhu et al (2021)	Efficient treatment of mature landfill leachate with a novel composite biological trickle reactor developed using	Desarrollar un reactor de goteo biológico compuesto para el tratamiento de lixiviados. Aplicó una	Reactor biológico= Reactor de goteo.	Lixiviado maduro	Se utilizó desechos textiles, huesos de animales y desechos envejecidos y microorganismos	DQO, Nitrógeno total, Nitrógeno amoniacal, Fósforo	100 días	DQO= 85,02%, Nitógeno total= 76%, Nitrógeno amoniacal= 99,90%,	Sí

N°	País	Fuente	Título	Objetivo y metodología	Tecnología	Tipo de lixiviado	Descripción del tratamiento	Parámetro a tratar	Tiempo de remoción	% de remoción	Claridad metodológica
			refractory domestic waste and aged refuse.	metodología experimental.			para el tratamiento.			Fósforo= 96,83%	
15	Colombia	Torres et al (2020)	Horizontal Subsurface-flow-Constructed Wetlands with Tropical Vegetable the Treatment of Labdfill Leachate: Case study in Cartagena, Colombia.	Evaluar la factibilidad técnica de implementar humedales construidos con flujo horizontal subsuperficial con las especies Rhizophora mangle (HM) y Typha latifolia (HE). Metodología experimental.	Fitorremediación = Humedal artificial con flujo horizontal subsuperficial.	Lixiviado pretratado y crudo	Se construyó tres módulos de humedales el cual fueron operados con un tiempo de retención hidráulica de 8 días.	DQO, Cloruro, Sulfato, Nitrito, Nitrato, TDS	16 días	DQO (HE)=77%, HM= 73%, Cloruro HE= 58% HM=50%, Sulfato HE=58,6%, HM= 54,5%, Nitrito HE= 54,7%, HM= 67%, Nitrato HE= 98,4%, HM= 90,5%, TDS HE=56%, HM=54%.	Sí
16	Venezuela	Maldonado et al (2017)	Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios en filtros anaerobios de flujo ascendente	Determinar la eficiencia de los filtros anaerobios de flujo ascendente. Presenta un diseño experimental.	Biofiltración= Sistema biológico anaerobio de flujo ascendente-Tratamiento anaerobio.	Lixiviado joven	Se empleó microorganismos (Methanobacterium, Methanococcus	DQO	18 horas	DQO= 72,86%	Sí
17	Colombia	Faisal (2015)	Determinación de parámetros cinéticos en biofiltros utilizando como soporte residuos de llantapara el tratamiento de lixiviados maduros mezclados con	Determinar los parámetros cinéticos en biofiltros utilizando como material de soporte residuos de llantas para el tratamiento de lixiviados maduros	Biofiltración= Biofiltro anaerobio descendente-Tratamiento anaerobio.	Lixiviado maduro	se utilizó un biofiltro de llanta triturada como material de soporte para filtros en procesos biológicos de depuración el cual constó de Pseudomonas	DBO_5, DQO	69 días	DBO_5=86%, DQO=79%	Sí

N°	País	Fuente	Título	Objetivo y metodología	Tecnología	Tipo de lixiviado	Descripción del tratamiento	Parámetro a tratar	Tiempo de remoción	% de remoción	Claridad metodológica
			aguas municipales.	mezclados con aguas residuales municipales. Metodología experimental.							
18	Colombia	Montero y Salazar (2018)	Estudio de humedales artificiales para la eliminación de nitrógeno en lixiviados provenientes de la disposición final de residuos sólidos municipales	Evaluar el desempeño de humedales artificiales para la eliminación de nitrógeno en lixiviados provenientes de la disposición final de residuos sólidos municipales.	Fitorremediación = Humedales artificiales (reactores) de flujo subsuperficial a escala piloto.	Lixiviado maduro	Se sembraron en los humedales las especies tropicales Heliconia y Colocasia y fue alimentada con un caudal de 2.02546 *10-3 l/s de lixiviado maduro, la operación se realizó durante 6 meses mediante mediciones periódicas.	DQO, DBO_5, Nitrógeno amoniacal total, Nitrógeno inorgánico	6 meses	DQO= 47,8%, DBO_5= 60%, Nitrógeno amoniacal total= 67%, Nitrógeno inorgánico= 60,5%	Sí
19	México	Arenas (2017)	Barreras reactivas aplicables en acuíferos para la remoción de materia orgánica provenientes de residuos urbanos	Determinar la eficiencia de remoción de materia orgánica proveniente de lixiviados en acuíferos mediante barreras reactivas biológicas a nivel laboratorio. Metodología experimental.	Biobarreras= Biobarreras reactivas permeables.	Lixiviado maduro	El estudio se realizó a escala de laboratorio en donde se utilizaron tres celdas, dos con (texontle y composta) y una de testigo solo con arena. Fueron alimentados por diferentes concentraciones y con un flujo de agua de (0,01L/ 60s)	DQO	20 días	DQO= 50% con el tezontle. DQO= 40% composta, testigo= 17%	Sí