



Ingeniería y competitividad

ISSN: 0123-3033

ISSN: 2027-8284

Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle

Ortiz-Alvarez, María D.; Barajas-Ferreira, Crisóstomo; García-Martínez, Janet B.; Barajas-Solano, Andrés F.; Machuca-Martínez, Fiderman
Análisis bibliométrico de cultivos de microalgas en lixiviados de relleno sanitario
Ingeniería y competitividad, vol. 25, núm. 2, e12444, 2023, Julio-Diciembre
Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle

DOI: <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i2.12444>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291376231008>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UNEM [redalyc.org](https://www.redalyc.org)

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Análisis bibliométrico de cultivos de microalgas en lixiviados de relleno sanitario

Bibliometric analysis of microalgae cultures in landfill leachate

María D. Ortiz-Alvarez^{1§} , Crisóstomo Barajas-Ferreira¹ , Janet B. García-Martínez² ,
Andrés F. Barajas-Solano² , Fiderman Machuca-Martínez³ 

^{1§} Escuela de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. maria2208128@correo.uis.edu.co, cbarajas@uis.edu.co

² Departamento de Ciencias del medio ambiente, Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia. janetbibianagm@ufps.edu.co, andresfernandobs@ufps.edu.co

³ Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia. fiderman.machuca@correounivalle.edu.co

Recibido: 2 septiembre de 2022 **Aprobado:** 26 abril de 2023

Cómo citar: Ortiz-Álvarez, M.D, Barajas-Ferreira. C., García-Martínez, J.B., Barajas-Solano, A.F., Machuca-Martínez, F. Análisis bibliométrico de cultivos de microalgas en lixiviados de relleno sanitario. *Ingeniería y Competitividad* 2023; 25(2) e-30212444 doi: <https://doi.org/10.25100/iyv.v25i2.12444>

Resumen

Los lixiviados de rellenos sanitarios son residuos líquidos complejos, considerados un problema significativo para el medio ambiente. Las microalgas se presentan como una alternativa para el tratamiento y aprovechamiento de aguas residuales por su capacidad adaptativa, siendo una opción viable para su uso en lixiviados. Esta contribución presenta una descripción bibliométrica de las investigaciones indexadas en la base de datos SCOPUS relacionadas con microalgas y lixiviados de rellenos sanitarios. En base a esto, se identificó la relevancia del tratamiento con microalgas tanto en aguas residuales en general como en lixiviados con el fin de conocer la proporción de avance entre los dos. Se encontraron 88 artículos relacionados a microalgas y lixiviados, siendo China el país más productivo en cuanto a número de publicaciones. Este estudio demostró que el uso de microalgas en lixiviados es un tema que aún se encuentra en desarrollo y su enfoque está dado principalmente para el tratamiento de este residuo, siendo limitados los estudios de aprovechamiento y obtención de bioproductos.



Palabras clave: Microalgas, lixiviados de vertederos, fitorremediación, aguas residuales, bioproductos.

Abstract

Landfill leachate is a complex liquid waste, considered a significant problem for the environment. Microalgae are presented as an alternative for the treatment and use of wastewater, thanks to its adaptive capacity, being a viable option for its use in leachates. This contribution presents a bibliometric description of the investigations indexed in the SCOPUS database related to microalgae and leachates from landfills. Based on this, the relevance of treatment with microalgae was identified both in wastewater in general and in leachate, in order to know the progress ratio between the two. 88 articles related to microalgae and leachates were found, with China being the most productive country in terms of number of publications. This study showed that the use of microalgae in leachates is a subject in development and is focused on the treatment of this residue, with limited use and bioproduct production studies.

Keywords: Microalgae, landfill leachate, phytoremediation, wastewater, bioproducts.

1. Introducción

Las microalgas y cianobacterias son organismos fotosintéticos que requieren luz, dióxido de carbono y agua para producir su propia energía (1,2). Ambos microorganismos poseen una capacidad adaptativa a diferentes condiciones ambientales que les permite crecer en diversos hábitats acuáticos (marino, agua dulce y aguas residuales) de donde obtienen los nutrientes necesarios para producir biomasa rica en bioactivos de alto valor como: lípidos, proteínas, pigmentos, carbohidratos, entre otros (3,4). Por tal razón, las microalgas son útiles en sectores industriales como el farmacéutico, de alimentos y de combustible (5).

La producción de biomasa varía dependiendo de las especies de algas, técnicas o condiciones de cultivo (Temperatura, pH, intensidad de luz y concentración de nutrientes), al igual que el contenido de bioactivos (6), por tanto, la adecuación de un sistema que se ajuste de forma óptima a las condiciones requeridas es

muy importante a la hora emplear las microalgas y cianobacterias (7). El ajuste de estas condiciones permite una mayor obtención de metabolitos de interés comercial, dentro de los que se encuentran los pigmentos en el sector farmacéutico y textil (8), los lípidos en el área de los biocombustibles (9); y los biomateriales como polihidroxialcanoatos (PHA) y polihidroxibutirato (PHB), usados como biopolímeros útiles (10,11).

La obtención de subproductos de alto valor, ha ganado gran atención, sin embargo, la proyección a gran escala para uso industrial ha encontrado gran variedad de obstáculos debido a la baja productividad y al alto costo (12), especialmente por el uso de nutrientes y agua, razón por la cual, diversas investigaciones han ampliado sus estudios en el uso de las microalgas y cianobacterias como técnica sostenible para tratar aguas residuales por su capacidad de tolerar condiciones extremas medioambientales y diversos contaminantes, además de su capacidad de bioabsorción y capacidad de eliminación de

compuestos orgánicos, inorgánicos, nitrógeno, carbono y fósforo los cuales metabolizan para su crecimiento (13,14). Lo anterior arroja resultados prometedores con relación a la remoción de contaminante, la producción de biomasa como fuente de energía y la generación de subproductos de interés comercial, aliviando las limitaciones económicas en el cultivo a gran escala de microalgas (15,16).

Dentro de los residuos líquidos que han tomado participación en el uso de cultivos de microalgas se encuentran los lixiviados. Este residuo se obtiene en los rellenos sanitarios mediante la descomposición de la materia orgánica junto con el agua lluvia percolada (17), por esta razón poseen altas concentraciones de compuestos orgánicos e inorgánicos como, metales pesados, amonio y compuestos biorefractarios (18), productos de procesos y reacciones fisicoquímicas y biológicas. Este residuo genera diversos efectos negativos al medio ambiente como son: la eutrofización y toxicidad en cuerpos de agua a causa de la presencia de altas concentraciones de NO_3^- , Pb, Mn y Fe (19), la pérdida de flora y fauna, la contaminación del suelo y la bioacumulación de metales pesados (20).

Debido a su complejidad, se han explorado diversos métodos fisicoquímicos y biológicos para su tratamiento. Algunos de los métodos fisicoquímicos más implementados son la floculación, la coagulación y la filtración por membranas, sin embargo, no han sido totalmente eficientes y presentan altos costos en materiales, equipos, productos químicos y eléctricos sin ningún tipo de recuperación, lo que los hacen insostenibles a largo plazo (21). En consecuencia, se prefieren los métodos biológicos debido a su fiabilidad, sencillez y rentabilidad (22). El uso de microalgas y

cianobacterias para tratar los lixiviados de rellenos sanitarios es prometedor gracias a su capacidad de recuperar nutrientes, permitir la producción de metabolitos como lípidos y pigmentos (15) y su uso en la generación de biocombustibles (16), supliendo la necesidad de las algas en el consumo de recursos hídricos y nutrientes, esto es demostrado en especies como *Scenedesmus* cf. *Rubescens* y *Chlorella* cf. *Ellipsoidea* (23).

El principal inconveniente de usar lixiviados como medio de cultivo de microalgas y cianobacterias es la variabilidad y complejidad de la composición de los lixiviados, pues presentan altas concentraciones de compuestos tóxicos que inhiben el crecimiento de las microalgas. Por esta razón se plantean el uso de pretratamientos que reduzcan la carga de algunos compuestos específicos y estabilicen el pH o la implementación de lixiviados diluidos con el fin de garantizar una concentración de compuestos tolerada por las microalgas (24), sin embargo, la primera opción aumenta los costos y la segunda requiere una alta demanda de agua limpia. De modo que se han evaluado estrategias para integrar aguas residuales de menor carga en el proceso de dilución (25). A la fecha, la gran mayoría de investigaciones realizadas en lixiviados de rellenos sanitarios se enfocan en su tratamiento y son limitadas aquellas que hacen énfasis en su aprovechamiento para la extracción de productos de alto valor, lo que aumenta el interés en esta área de estudio.

En el presente documento, se realiza una revisión del estado actual del uso de microalgas en aguas residuales, más específicamente en lixiviados de rellenos sanitarios. Mostrando la capacidad de crecimiento de las microalgas en aguas residuales en general y los metabolitos de interés industrial que puedan generar, para

finalmente realizar un análisis bibliométrico de los avances y las limitaciones en la implementación de lixiviados de rellenos sanitarios como medio de cultivo de microalgas y cianobacterias abarcando desde el tratamiento hasta la obtención de bio-productos.

2. Metodología

Reporte de avances del uso de microalgas en aguas residuales (A.R.)

Para este estudio se realizó una búsqueda inicial de información, relacionada con microalgas y aguas residuales, en la base de datos de SCOPUS (<http://www.scopus.com>; Elsevier B.V, Ámsterdam, Países Bajos), una de las bases de datos más grandes del mundo. Con el fin de contextualizar el uso de aguas residuales como medio de cultivo para las microalgas y cianobacterias, la remoción de contaminantes y su posible aprovechamiento.

Análisis bibliométrico del uso de microalgas en Lixiviados de rellenos sanitarios

Se realizó una búsqueda sistemática en SCOPUS, incluyendo los artículos publicados en todo el mundo desde 1993 hasta el 2023, con fecha de recolección de datos del 10/04/2023. La ecuación de búsqueda fue: TITLE-ABS-KEY ("microalgae" AND "landfill leachate"). Con el fin de realizar el análisis de la información, se evaluó la frecuencia de las palabras claves empleando el software VOSviewer (version 1.6.19, Leiden University, Leiden, The Netherlands) (26). El número mínimo de ocurrencias de palabras claves que se manejó fue de 5, con el fin de que los resultados fueran significativos debido a la limitada información al respecto. En este análisis cada esfera simboliza una palabra clave, su tamaño representa el número de apariciones, el color indica la relación y categorización de las palabras y los enlaces

señalan la relación de co-ocurrencia entre las palabras.

Posteriormente se realizó un análisis de los resultados encontrados teniendo en cuenta: 1) documentos por año; 2) relevancia de los autores; 3) instituciones vinculadas; 4) áreas de estudio y 5) documentos por países.

Análisis bibliográfico del uso de microalgas en Lixiviados de rellenos sanitarios

Se analizó la bibliografía encontrada en el proceso de búsqueda anterior, presentando un resumen de algunos de los artículos más citados en los últimos 10 años, relacionados directamente a los procesos de tratamiento y aprovechamiento de lixiviados de relleno sanitario mediante el uso de microalgas.

Estado del arte de los lixiviados en Colombia

Teniendo en cuenta la limitación de los documentos encontrados que relacionan los lixiviados y las microalgas en Colombia, se realizó un análisis del estado del arte de los lixiviados en Colombia y su potencial uso en cultivos de microalgas para aprovechamiento.

3. Resultados y discusión

Uso de microalgas en aguas residuales

Las microalgas y cianobacterias han ganado popularidad por su capacidad de crecer bajo diferentes condiciones y entornos. Con el paso de los años, esta habilidad ha sido reportada en diversas investigaciones que han demostrado el uso de las microalgas como una herramienta para contribuir con el mejoramiento de la calidad del medio ambiente, mediante su cultivo en aguas residuales como proceso de fitorremediación y a través de la valorización de residuos líquidos como técnica sostenible (27). En una búsqueda realizada en SCOPUS para los últimos 10 años se reportaron 4,984 documentos que describen procesos de

cultivos de microalgas en aguas residuales, de los que 3,686 corresponden a artículos de investigación.

Los principales estudios enfocan sus investigaciones en el tratamiento de aguas residuales con microalgas, dando respuesta a la crisis de los recursos hídricos y la preocupación por la contaminación que está llevando a reevaluar los procesos convencionales de tratamiento y buscando alternativas para la obtención de biocombustibles y bioproductos (28). Sin embargo, son limitados los resultados específicos para cianobacterias que se relacionan al tratamiento o aprovechamiento,

puesto que este enfoque tiene acogida en los últimos 5 años.

El principio del uso de microalgas en aguas residuales consta de diferentes etapas, la primera relacionada con su cultivo, fase en la que requieren una fuente de carbono, una fuente de luz y una fuente de nutrientes, la cual es aportada por las aguas residuales y son transformados en moléculas que promueven su crecimiento; la segunda etapa es la cosecha, en donde se busca el mayor crecimiento y la purificación del efluente; finalmente se extrae la biomasa producida para ser procesada y obtener diferentes metabolitos (Figura 1) (29).

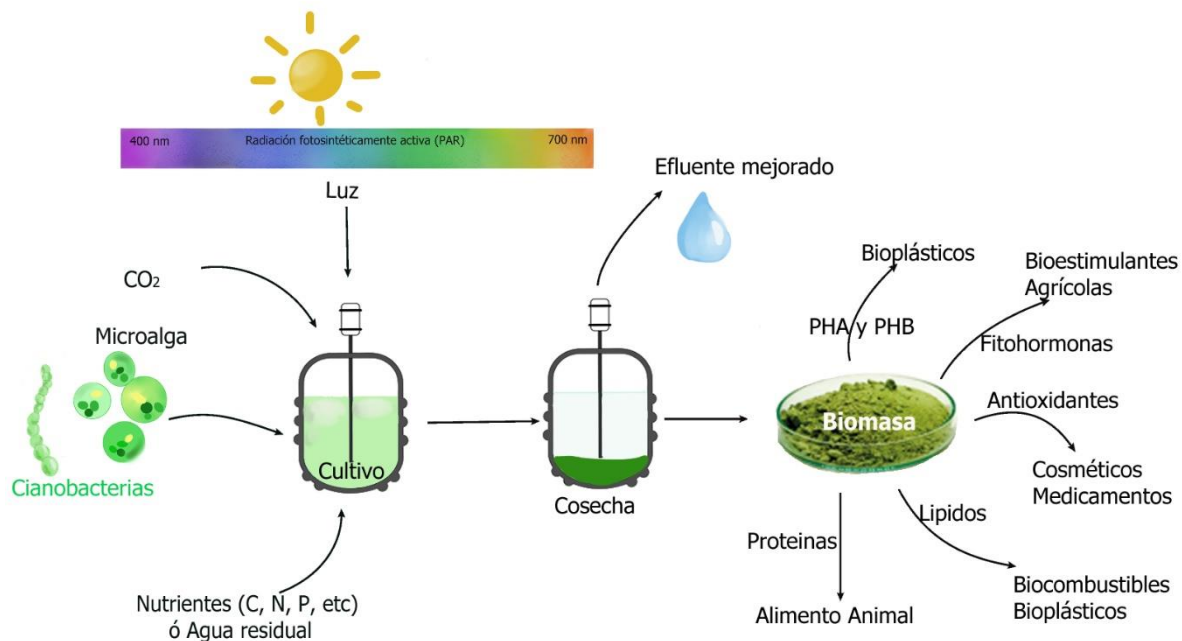


Figura 1 Proceso de cultivo de microalgas.

En ese sentido, la capacidad de las microalgas de metabolizar diversos bioproductos es atribuida a su alta tasa de producción de biomasa, compuesta principalmente por proteínas (30% - 50%), carbohidratos (20% - 40%) y lípidos (8% - 15%) que actúan como fuente de energía bajo condiciones de crecimiento normales (30). Con el fin de

apreciar los avances del cultivo de microalgas en aguas residuales tanto para biorremediación como para aprovechamiento, en la tabla 1 se presenta un resumen de algunos artículos, en los que se muestran condiciones de cultivos, remociones y obtención de productos de valor agregado.

Tabla 1. Uso de microalgas en el tratamiento de aguas residuales

Microalga - cianobacteria	Tipo de Agua residual	Condiciones de cultivo	Remociones	Producto de valor agregado	Referencia
<i>Chlorella vulgaris</i>	Agua residual textil	Agua residual al 50%	Remoción > 80% de nitrógeno y fósforo.	Lípidos (FAME para biodiésel)	(31)
<i>Tetrademus obliquus</i> , <i>Chlorella protothecoides</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Synechocystis</i> sp.	Agua residual porcina	Agua residual diluida 1:20	62-79% para DQO, 84-92% para TKN, 79-92% para NH_4^+ y más del 96% para PO_4^{3-}	Biomasa como Bioestimulante	(32)
<i>Thermosynechococcus</i> sp.	Agua residual porcina	Diferentes intensidades de luz, tipo de tratamiento del agua residual. Agua diluida	-	Ficobiliproteína y carotenoide	(33)
<i>Chlorella</i> sp. y <i>Chlorella Vulgaris</i> inmovilizadas en cápsulas inmovilizadas de alginato.	Agua residual textil	Condiciones mixotróficas Agua residual a diferentes diluciones	Remoción de > 80% NH_4^+ y 60% DQO	Lípidos	(34)
<i>Chlorella vulgaris</i> G-9	Agua residual sintética	Relación TOC/TN de 24 y 30	Remoción > 90% de nitrógeno.	35.3 y 36.5% lípidos	(35)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Agua residual doméstica primaria y secundaria y efluente de petróleo.	Mezcla de agua residual y medio estándar. Concentraciones del 100%, 75%, 50% y 25%	Máxima de 80% para N y 100 para P para agua residual primaria.	-	(36)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Agua residual doméstica	Enriquecido con carbono orgánico	Remoción de > 90% $\text{NH}_3\text{-N}$ y $\text{PO}_4\text{-P}$	-	(37)
<i>Scenedesmus</i> sp.	Agua residual doméstica	Agua residual filtrada y estéril. Diferentes concentraciones de CO_2	98% para NH_4^+ , 70.2% para NO_3^- , 78.9% para PO_4 y 95.9% para DQO	33.3% contenido total de lípidos	(38)
<i>Chlorella vulgaris</i> JSC-6	Agua residual porcina	Agua residual filtrada a diferentes concentraciones	Hasta un 91% para nitrógeno y 76% para DQO	58% de carbohidratos (90% Glucosa)	(39)
Consorcio de bacillariophyceae, chlorophyceae, cyanophyceae	Agua residual doméstica	Agua residual filtrada y estéril	6%, 90%, 89%, 70% y 76% para carbono orgánico total, nitrógeno total, NH_4^+ , fósforo	De 18% al 28.5% de lípidos. (Composición de FAME)	(40)

			total y fósforo orgánico		
<i>Chlorella zofingiensis</i>	Agua residual porcina	Agua residual pretratada a diferentes concentraciones de DQO	65.81% - 79.84% para DQO, 68.96% - 82.70% para nitrógeno total y entre el 85.00% y el 100% para fósforo total	Mayor productividad de lípidos de 110.56 mgL ⁻¹ d ⁻¹ y biodiésel del 30.14 mg L ⁻¹ d ⁻¹	(41)
Consorcio de <i>Spirulina</i> sp., <i>Oscillatoria</i> sp. y <i>Synechocystis</i> sp.	Solución con contenido de Cr ₃	100 mg L ⁻¹ Cr ₃	100 % de Cr ₃	-	(42)
<i>Nannochloropsis</i> sp.	Agua residual municipal	Agua residual al 50% y CO ₂ al 15%	-	59.9 % Lípidos	(43)

Las aguas residuales domésticas y porcícolas han sido las de mayor uso en cultivos de microalgas, pues su carga orgánica es fuente de nutrientes para su crecimiento (44). La microalga más ampliamente utilizada es *Chlorella* por su capacidad de adaptarse a diferentes condiciones. Los resultados de las diferentes investigaciones demuestran la habilidad de las microalgas para tratar aguas residuales, así como también de producir metabolitos de valor agregado, con el fin de crear técnicas sostenibles, lo que las hace una herramienta prometedora para el uso con otros tipos de aguas residuales.

Análisis bibliométrico para uso de microalgas en lixiviados de rellenos sanitarios

Los lixiviados son residuos líquidos con altas cargas de compuestos tóxicos que representan gran impacto al medio ambiente (45), por lo que se resalta la necesidad de buscar diferentes alternativas para su manejo. Las microalgas se presentan como una alternativa para el tratamiento de los lixiviados, a pesar de los factores que demuestran la toxicidad de los

lixiviados hacia ellas (46). La implementación de este tipo de tratamiento biológico se puede desarrollar mediante estrategias que permitan una mejor adaptabilidad, capacidad de tratamiento y su aprovechamiento (21).

En el análisis de correlación de palabras claves realizado en VOSviewer utilizando todos los artículos publicados, se encontraron 4 grandes grupos (figura 2), en donde los ejes centrales son los lixiviados de relleno y las microalgas. El primer grupo se enfoca en el uso de microalgas para el tratamiento de lixiviados mediante la remoción de compuestos y la producción de biomasa (Verde), el segundo grupo relaciona la producción de biomasa y la obtención biocombustibles (Rojo), el tercer grupo demuestra el uso de microalgas como indicador de respuestas tóxicas, debido a los compuestos químicos presentes en los lixiviados y su uso para biorremediación (Azul), finalmente se presenta un grupo más pequeño relacionado con la obtención de bioproductos (amarillo), lo que demuestra que la valorización de la biomasa aún se encuentra en desarrollo.



Figura 2. Conexiones bibliométricas entre Microalgas y Lixiviados.

Se registraron un total de 1135 palabras, entre palabras clave de autor y palabras clave indexadas, de las cuales 79 aparecieron más de 5 veces. Las palabras clave con mayor incidencia fueron: “landfill leachate” (n=63), seguida de “microalgae” (n=49), “leachate treatment” (n=40), “biomass” (n=35) y “microorganisms” (n=33).

Posteriormente, se realizó un análisis de los resultados obtenidos en SCOPUS, en donde se

encontró un total de 88 artículos comprendidos entre los años 1993 -2023 (Figura 3), lo que comparado con los resultados obtenidos para aguas residuales abarca solo un 1.76 %. Se aprecia que las publicaciones antes del año 2011 se limitan a 7 y después de este año se presenta una tendencia creciente, encontrando su pico en el año 2020 con 15 artículos, sin embargo, es importante resaltar que el año 2023 se encuentra aún vigente.

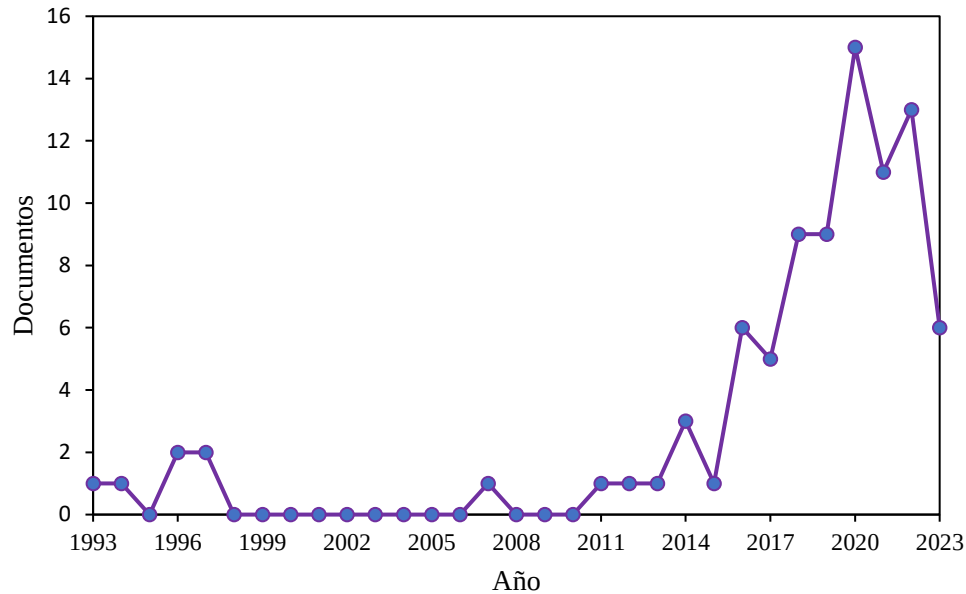


Figura 3. Publicaciones por año.

El primer estudio en el año 1993 está relacionado con el efecto tóxico de los lixiviados en las microalgas *Chlorella pyrenoidosa*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus* sp. y *Dunaliella tertiolecta* (47), al igual que los artículos encontrados para los años 1994, 1996 y 1997, pues estiman el efecto tóxico de los lixiviados de rellenos sanitarios mediante el uso de un test que contenían microorganismos, entre los que se encontraban las microalgas (48–51). Esto demuestra que los primeros usos de las microalgas se enfocaron en identificar la toxicidad de los lixiviados, sin considerarlos un recurso aprovechable.

Después de ello no se realizaron más estudios sino hasta el año 2007 en donde se comparó la tolerancia de microalgas aisladas de lixiviados y de agua limpia, a diferentes concentraciones de lixiviado (10 %, 30 %, 50 %, 80 %, 100 %), demostrando que en concentraciones de hasta el 10 % hubo crecimiento de microalgas y

reducción de nitrógeno amoniacal, ortofosfatos y DQO y para porcentajes superiores al 10% se presentó una inhibición en el crecimiento, atribuido al alto nivel de amoníaco (52), siendo éste, el primer estudio encontrado que relaciona las remociones de los contaminantes con el uso de microalgas en lixiviados, llegando a ser el segundo artículo más citado (118 citas) de la búsqueda solo después de dos artículos de revisión.

La tabla 2 muestra los 8 autores más relevantes con base en el número de publicaciones y se reporta el número de citas. El análisis resalta que este top de autores se divide en 3 grupos, pues sus publicaciones son colaboraciones. Demostrando que a la fecha los estudios se limitan a unos grupos de investigación específicos y comprenden los años 2016 al 2023.

Tabla 2. Top de autores búsqueda SCOPUS

Agrupación según colaboraciones	Top	Autor	h-índice	Documentos	Afiliación	# citas
1	1	Chang, H.	18	7	Chongqing University of Technology, China	245
	2	Zhong, N.	25	6		244
	3	Quan, X.	22	3	Universidad de Cádiz, España	187
2	4	Touzet, N.	18	3	Atlantic Technological University, Killybegs, Ireland	114
	5	Paskuliakova, A.	6	3		
	6	Tonry, S.	5	3		
3	7	Cantero, D.	32	3	Universidad de Cádiz, España	23
	8	Ramírez, M.	21	3		

Los estudios realizados por el equipo de Chang et al. (15,53–55) se enfocan en el uso de microalgas como tratamiento para los lixiviados, la recuperación de nutrientes como nitrógeno y fósforo, y la bioconversión de nutrientes en lípidos, biohidrógeno y ácidos grasos volátiles (AGV). Touzet et al. (56–58) abarcan solamente la fitorremediación del lixiviado sin realizar búsqueda de metabolitos. Finalmente, los estudios realizados por Centro y Ramírez (59–61) se relacionan a la implementación de microalgas aisladas de lixiviados de rellenos sanitarios, sin contemplar inicialmente el uso de los lixiviados como medio de cultivo, sin embargo, para su último estudio lo

implementan en un sistema de producción de biogás.

La figura 4 muestra las instituciones vinculadas a procesos de investigación con microalgas y lixiviados, siendo en total 144 instituciones participantes. En este contexto se puede evidenciar que la institución principal es la Chongqing University of Technology encabezando la lista con 7 publicaciones, lo que se relaciona directamente con los resultados obtenidos para autores, puesto que los principales contribuyentes están vinculados a esta institución. Esta misma relación la guardan la Universidad de Cádiz y la Atlantic Technological University, siendo las afiliaciones más relevantes.

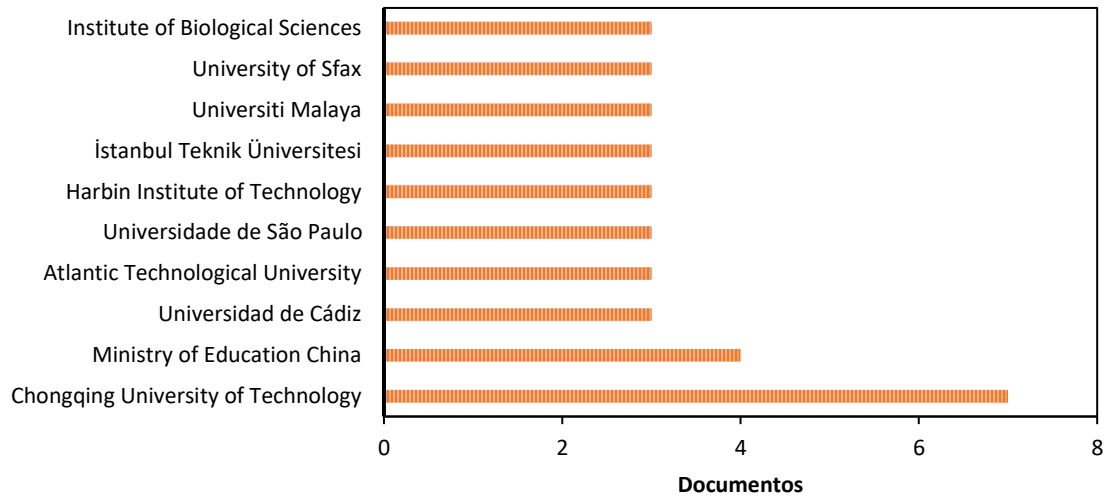


Figura 4. Contribuciones por afiliación

En total hay 18 áreas de estudio que han contribuido en investigaciones relacionadas con el cultivo de microalgas en lixiviados, tal como lo muestra la figura 5, de las cuales las principales son: ciencias ambientales con 58 publicaciones, ingeniería química con 20, energía con 20, ingeniería con 19 y ciencias agrícolas y biológicas con 15 publicaciones. El hecho de que el área de ciencias ambientales abarque un 32.2 %, demuestra el enfoque que

se le ha dado en los últimos años, pues aunque es un campo relativamente nuevo, las principales investigaciones abarcan aspectos del mejoramiento de la calidad del medio ambiente al implementar procesos de fitorremediación de un residuo altamente complejo aunque se encuentre a escala laboratorio o piloto (25).

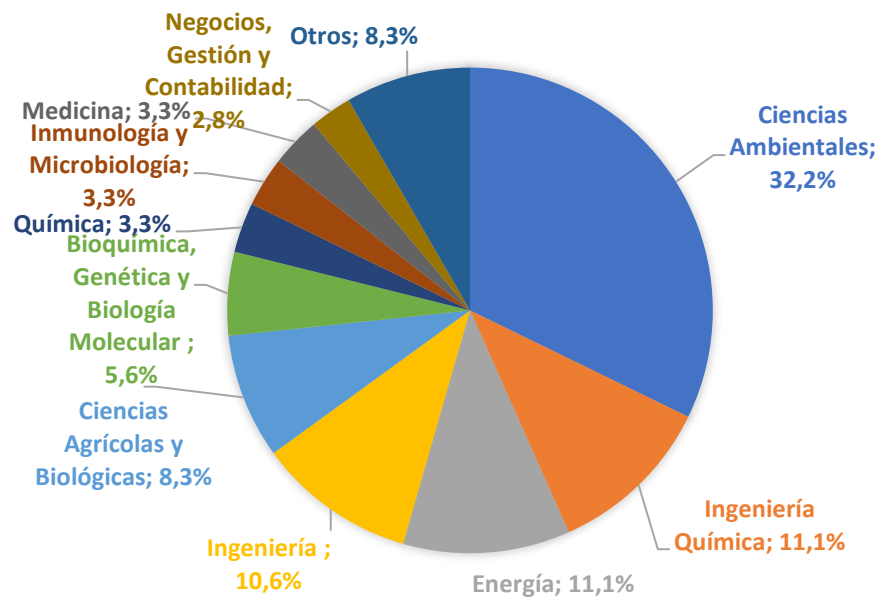


Figura 5. Documentos por área de estudio

Las principales investigaciones en el área de ciencias ambientales abarcan directamente el uso de microalgas como herramienta para el tratamiento de lixiviados (62,63). Por otra parte, se muestra el uso de microalgas como una adición sostenible de aprovechamiento de lixiviados (13,64) orientada a la obtención de energía (65), fijación de carbono (66) y obtención de metabolitos (67,68). En otros aspectos se exponen diferentes artículos de revisión y capítulos de libros en donde se muestra su prospección como tratamiento de lixiviados (69) y fuente de materia prima para biocombustibles (70).

De igual manera la influencia de las contribuciones por países se presenta en la tabla 3, en donde se detallan los 10 países con mayor producción bibliográfica, siendo china quien ocupa el primer lugar con 21 documentos. Así mismo se expone el número de artículos enfocados solamente a tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios con microalgas y el número de aquellos que buscan aprovechar los lixiviados para la generación de metabolitos, los demás documentos no contemplados hacen referencias a capítulos de libros, revisiones bibliográficas, procesos de aislamiento o análisis de toxicidad.

Tabla 3. Países con mayores contribuciones

País	Documentos	# citas	Año de inicio	Artículos relacionados a tratamiento	Artículos relacionados a Aprovechamiento
China	21	609	2007	9	10
Malasia	9	234	2012	7	0
EE. UU	8	260	2014	4	3
Brasil	7	61	2014	4	3
Italia	6	187	2015	2	1
España	5	40	2020	2	0
Turquía	5	102	2017	3	1
España	4	10	2020	1	0
Colombia	4	19	2016	0	1
India	4	129	2016	3	0

Los estudios reportados en China presentan una mayor tendencia a la investigación relacionada con procesos de aprovechamiento, por otra parte, EE.UU. y Brasil se relacionan directamente con el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, alrededor de la mitad de los artículos reportan procesos de aprovechamiento de lixiviados en simultaneo con la remediación de los mismo, por otro lado, el panorama cambia para los demás países, pues su principal enfoque es el tratamiento (71).

Los estudios reportados en Colombia abarcan temas de aislamiento de microalgas para implementarlas en un modelo matemático de captura de CO₂ (59) y de identificación de especies en un sistema de biorremediación de lixiviados a escala piloto asociado al relleno sanitario Presidente ubicado en el Valle del Cauca (72,73), no obstante, el proceso de biorremediación no se describe y no está reportado en un artículo indexado a la búsqueda. Finalmente, el último estudio reportado en Colombia abarca la producción

de biogás en un sistema mixto mediante el uso de microalgas y lixiviados como medio de cultivo (61). Lo cual demuestra que el enfoque de aprovechamiento para los lixiviados con microalgas aún es un tema en desarrollo, a pesar de la importancia que se le da a este aspecto en los cultivos de microalgas con aguas residuales en general.

Análisis bibliográfico para uso de microalgas en lixiviados de rellenos sanitarios

Con base en los análisis realizados anteriormente y con el fin de apreciar mejor la relación entre microalgas y lixiviados, en la tabla 4 se describen algunos de los artículos más citados en los últimos 10 años, sin tener en cuenta aquellos relacionados con test de toxicidad o artículos de revisión.

Tabla 4. Artículos relevantes en el uso de microalgas en lixiviados de rellenos sanitarios

Microalga - cianobacteria	Citas	Condiciones de cultivo	Remociones	Producto de valor agregado	Referencia
Consorcio de microalgas (<i>Desmodesmus</i> spp. Y <i>Scenedesmus obliquus</i>) y bacterias	112	Mezcla de agua residual y lixiviado. Dilución del 0, 7%, 10%, y 15% de lixiviado en AR	82% de NH_4^+ y 43% ortofosfatos	20% lípidos, 41% carbohidratos.	(13)
<i>Chlorella pyrenoidosa</i> y bacterias	109	Mezcla de agua residual doméstica enriquecida con Lixiviado al 0, 5% 10 %, 15% y 20% (ideal 10%)	90% nitrógeno total	24.1 mg L ⁻¹ d ⁻¹ de lípidos	(66)
<i>Chlorella vulgaris</i>	94	En fotobiorreactor de membrana	-	Recuperación del 50% de N y 70% de P. 10 mg L ⁻¹ d ⁻¹ de lípidos para biocombustibles	(15)
<i>Chlorella vulgaris</i>, <i>Scenedesmus quadricauda</i>, <i>Euglena gracilis</i>, <i>Ankistrodesmus convolutus</i> y <i>Chlorococcum oviforme</i>	64	Lixiviado pretratado diluido hasta 50%	91% DQO, 99.9% nitrógeno amoniacal y 86% ortofosfatos	-	(74)
<i>Scenedesmus</i> sp. y una cepa bacteriana de <i>Paenibacillus</i> sp.	62	Lixiviado al 20%	Reducción de compuestos orgánicos, citotoxicidad y genotoxicidad	-	(22)

2 cepas de <i>Chlamydomonas</i> sp y 2 cepas de, <i>Scenedesmus</i> sp	56	Lixiviado crudo, del proceso y tratado. Dilución al 10% en agua desionizada	51.7 % nitrógeno amoniacal	-	(56)
<i>Chlorella vulgaris</i>	38	Lixiviado pretratado bajo 3 procesos diferentes	NH ₄ ⁺ y P	-	(46)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	37	Técnica integrada de ozonización y biorremediación	81.6% de N	-	(54)
Cultivo mixto microalgas-bacterias	26	Lixiviado diluido entre el 5% y 20%	Máxima de 9.18 mg N L ⁻¹ d ⁻¹ .	-	(75)

De los diferentes resultados se aprecia la implementación de cultivos mixtos con bacterias, lo que se atribuye a la habilidad de las microalgas para la eliminación de nutrientes y metales pesados, proporcionando O₂, que es utilizado por las bacterias para degradar compuestos orgánicos (22). Otro factor importante es la relación N:P, para garantizar la estabilidad del proceso, pues las grandes cantidades de NH₄⁺ pueden inhibir el crecimiento (46) al igual que las concentraciones por encima de los 80 mg N-NH₃ L⁻¹ (75) y la limitación de fósforo (55). Esto se evidencia en la necesidad de realizar pretratamientos al lixiviado o diluciones con el fin de disminuir el efecto inhibitor, en donde diversos estudios demuestran que la concentración más apropiada de dilución para el uso de lixiviados se encuentra en el 10 % (65) siendo *Chlorella* sp. la cepa más tolerante comparada con *Scenedesmus* sp. (76). Para cianobacterias los estudios son más limitados, reportando su uso junto con otros filos como Proteobacteria, Bacteroidetes y Chlorophyta como cátodos para la producción de energía y eliminación de nutrientes (77), entre otros. Lo anterior demuestra que el principal enfoque que se le ha dado en los últimos años a las

microalgas y cianobacterias es el tratamiento de los lixiviados, pues los estudios en aprovechamiento aún son limitados a pesar de obtener resultados prometedores. Esto hace que esta área sea de gran interés para su exploración, con el fin de cambiar el concepto actual que se tiene de los lixiviados como un residuo sin valor y transformarlo en un residuo altamente aprovechable, así mismo, identificar y estudiar más las condiciones de cultivo para el mejoramiento de este proceso es aún más prometedor.

Lixiviados y microalgas en Colombia

En Colombia la información referente a los lixiviados de rellenos sanitarios es limitada y su enfoque es la problemática ambiental que causan en los diferentes rellenos sanitarios, por lo cual los procesos relacionados con ellos se orientan hacia el tratamiento con el fin de mitigar los impactos ambientales. Diversas empresas han generado estrategias para su tratamiento, entre las que se destacan tratamientos físicos, fisicoquímicos y algunos procesos biológicos con consorcios de microorganismos, siendo el sistema de osmosis inversa el más implementado (Tabla 5) (78).

Tabla 5. Tipos de tratamiento de lixiviados en Colombia

Nombre del vertedero	Ubicación	Descripción/detalle
Parque Ambiental La Pradera	Municipio de Don Matías, a 57 kilómetros de Medellín	Sistema de tratamiento de lixiviados que posee tres etapas: - Tratamiento físico - Tratamiento fisicoquímico - Biorreactores con membrana – MBR.
Planta de lixiviados del Carrasco	Bucaramanga	Plantas de membrana de separación - Sistema de ósmosis inversa con vibración mecánica - Sistema de ósmosis inversa con espirales estáticos
Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo	Bojacá	Sistema biológico - Sistema de tratamiento de ósmosis y nano filtración
Relleno Sanitario Colombo – El Guabal,	Yotoco, Valle del Cauca	- Sistema de tratamiento de ósmosis inversa
Relleno Sanitario Regional presidente	Buga	- Sistema de tratamiento de ósmosis inversa con sistema de vibración (VSEP)
Relleno Sanitario de Navarro	Santiago de Cali	- Pretratamiento fisicoquímico - Sistema de tratamiento de ósmosis inversa
Parque Tecnológico Ambiental Guayabal	Cúcuta	Sistema de tratamiento de ósmosis inversa

Nota: Adaptado de García, 2019 (78)

Sin embargo, los métodos expuestos son costosos y algunas veces ineficaces, como los reportados por Canizales et al. (79) para el relleno Doña Juana (Bogotá) con su sistema de tratamiento con humedales y para el relleno sanitario de Navarro (Cali). Por esta razón, diversas instituciones han guiado sus investigaciones a procesos de mejora en los tratamientos de estos residuos con el fin de brindar alternativas más eficientes. En este contexto, se desarrolló una investigación utilizando un sistema combinado de electrodisolución de hierro, oxidación de hierro por H_2O_2 y floculación química para lixiviados provenientes del relleno sanitario

“El Carrasco” (Bucaramanga), obteniendo remociones del 85 %, 96 % y 76 % para DQO, color y turbidez respectivamente (80). En Medellín se estudiaron diferentes procesos fisicoquímicos, siendo la oxidación de Fenton la más prometedora, con remoción de hasta un 95 % y 97 % para DQO y color respectivamente (79), así como se evaluó la viabilidad de biorremediación con bacterias (81). En Valle del Cauca se evaluó el efecto de acumulación de Cd (II), Hg (II), Cr (VI) y Pb (II) de plantas (*Gynerium sagittatum*, *Colocasia esculenta* y *Heliconia psittacorum*) en humedales artificiales para el tratamiento

de lixiviados provenientes del Relleno Sanitario Regional presidente (82).

En Norte de Santander son limitados los estudios realizados; sin embargo, en el año 2020 se evaluó un acople de un proceso de fotocátalisis con TiO_2 y un sistema biológico aeróbico de lodos activos, proporcionando remociones del 68 % y 76 % para DQO y carbono orgánico disuelto (83). Todo lo anterior demuestra que el aprovechamiento de este residuo para producción de metabolitos y el uso de microalgas como sistema principal no se han contemplado aún. A nivel bibliográfico no se reportan estudios

indexados relacionados con la implementación de microalgas en cultivos de lixiviado para su aprovechamiento. Sin embargo, en línea con el estudio reportado en Norte de Santander, se está desarrollando por parte del Laboratorio INNOValgae perteneciente a la Universidad Francisco de Paula Santander, sede Cúcuta, un proyecto que busca evaluar el acople de un sistema de fotocátalisis con cultivos de microalgas con el fin de valorizar los lixiviados de relleno sanitario orientado a la producción de metabolitos como bioplásticos, biofertilizantes para cultivos no alimentarios y colorantes.

4. Conclusiones

Los primeros estudios reportados para el uso de microalgas en lixiviados se enfocan en la implementación de microalgas en ensayos para determinar el grado de toxicidad de los lixiviados de rellenos sanitarios. A partir del año 2007 arrojó resultados prometedores en el uso de cultivos de microalgas en lixiviados, aunque el número de investigaciones son limitadas comparadas con las encontradas para otro tipo de aguas residuales, abarcando el 1.76%.

Aún se encuentran limitaciones en los cultivos a causa de la alta toxicidad de los lixiviados, por lo que se sugiere el uso de un pretratamiento que ajuste las concentraciones de los compuestos. Los principales estudios han sugerido el uso de lixiviados al 10% como medio de cultivo eficiente para el crecimiento de microalgas, la remoción de nutrientes y la producción de algunos metabolitos. Los estudios de microalgas en lixiviados se han orientado a procesos de biorremediación, siendo reducidas las investigaciones que promuevan el aprovechamiento de los lixiviados. No obstante, el análisis realizó

demostró la capacidad de las microalgas de metabolizar nutrientes presentes en los lixiviados y aunque el principal enfoque ha sido la obtención de lípidos para biocombustible, se aprecia el potencial de las microalgas y cianobacterias en la recuperación de compuestos y en la transformación a productos de interés comercial. Demostrando un campo de acción amplio por explorar y una integración de los lixiviados al ciclo productivo.

En Colombia no se reportan procesos de aprovechamiento para la transformación de lixiviados en metabolitos de interés, el único avance reportado en los estudios indexados se relaciona con la obtención de biogás. Finalmente se expone la posibilidad de incursionar en el área de aprovechamiento de lixiviados mediante proyectos en ejecución por parte de la Universidad Francisco de Paula Santander, lo que sería un proceso innovador para el país y permitiría la integración de estrategias sostenibles con énfasis al uso de recursos en diversas áreas de la industria.

5. Referencias bibliográficas

1. Metsoviti MN, Papapolymerou G, Karapanagiotidis IT, Katsoulas N. Effect of Light Intensity and Quality on Growth Rate and Composition of *Chlorella vulgaris*. *Plants* (Basel, Switzerland) [Internet]. 2019 Dec 24;9(1):31. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31878279>
2. Zavřel T, Schoffman H, Lukeš M, Fedorko J, Keren N, Červený J. Monitoring fitness and productivity in cyanobacteria batch cultures. *Algal Res* [Internet]. 2021;56:102328. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926421001478>
3. Mathimani T, Baldinelli A, Rajendran K, Prabakar D, Matheswaran M, Pieter van Leeuwen R, et al. Review on cultivation and thermochemical conversion of microalgae to fuels and chemicals: Process evaluation and knowledge gaps. *J Clean Prod*. 2019 Jan;208:1053–64.
4. Nur MMA, Buma AGJ. Opportunities and Challenges of Microalgal Cultivation on Wastewater, with Special Focus on Palm Oil Mill Effluent and the Production of High Value Compounds. *Waste and Biomass Valorization*. 2019;10(8):2079–97.
5. Úbeda B, Gálvez JÁ, Michel M, Bartual A. Microalgae cultivation in urban wastewater: *Coelastrum cf. pseudomicroporum* as a novel carotenoid source and a potential microalgae harvesting tool. *Bioresour Technol*. 2017 Mar;228:210–7.
6. Chia SR, Ong HC, Chew KW, Show PL, Phang S-M, Ling TC, et al. Sustainable approaches for algae utilisation in bioenergy production. *Renew Energy* [Internet]. 2018;129:838–52. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117302938>
7. Wan C, Alam MA, Zhao X-Q, Zhang X-Y, Guo S-L, Ho S-H, et al. Current progress and future prospect of microalgal biomass harvest using various flocculation technologies. *Bioresour Technol* [Internet]. 2015;184:251–7. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852414016939>
8. Hu J, Nagarajan D, Zhang Q, Chang J-S, Lee D-J. Heterotrophic cultivation of microalgae for pigment production: A review. *Biotechnol Adv*. 2018;36(1):54–67.
9. Ray A, Nayak M, Ghosh A. A review on co-culturing of microalgae: A greener strategy towards sustainable biofuels production. *Sci Total Environ* [Internet]. 2022;802:149765. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721048403>
10. García G, Sosa-Hernández JE, Rodas-Zuluaga LI, Castillo-Zacarias C, Iqbal H, Parra-Saldívar R. Accumulation of PHA in the Microalgae *Scenedesmus* sp. under Nutrient-Deficient Conditions. *Polymers* (Basel). 2021;13(1).
11. Rueda E, García J. Optimization of the phototrophic *Cyanobacteria* polyhydroxybutyrate (PHB) production by kinetic model simulation. *Sci Total Environ* [Internet]. 2021;800:149561. Disponible en:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721046362>
12. Liao Q, Chang H-X, Fu Q, Huang Y, Xia A, Zhu X, et al. Physiological-phased kinetic characteristics of microalgae *Chlorella vulgaris* growth and lipid synthesis considering synergistic effects of light, carbon and nutrients. *Bioresour Technol.* 2018;250:583–90.
13. Hernández-García A, Velásquez-Orta SB, Novelo E, Yáñez-Noguez I, Monje-Ramírez I, Orta Ledesma MT. Wastewater-leachate treatment by microalgae: Biomass, carbohydrate and lipid production. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2019 Jun;174:435–44.
14. Zapata D, Arroyave C, Cardona L, Aristizábal A, Poschenrieder C, Llugany M. Phytohormone production and morphology of *Spirulina platensis* grown in dairy wastewaters. *Algal Res* [Internet]. 2021;59:102469. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926421002885>
15. Chang H, Quan X, Zhong N, Zhang Z, Lu C, Li G, et al. High-efficiency nutrients reclamation from landfill leachate by microalgae *Chlorella vulgaris* in membrane photobioreactor for bio-lipid production. *Bioresour Technol.* 2018 Oct;266:374–81.
16. Dogaris I, Loya B, Cox J, Philippidis G. Study of landfill leachate as a sustainable source of water and nutrients for algal biofuels and bioproducts using the microalga *Picochlorum oculatum* in a novel scalable bioreactor. *Bioresour Technol.* 2019 Jun;282:18–27.
17. Nair AT, Senthilnathan J, Nagendra SMS. Application of the phycoremediation process for tertiary treatment of landfill leachate and carbon dioxide mitigation. *J Water Process Eng* [Internet]. 2019;28:322–30. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85065594891&doi=10.1016%2Fj.jwpe.2019.02.017&partnerID=40&md5=dec4046feedef122e36525ad9e95ebef>
18. Fan Z, Qin L, Zheng W, Meng Q, Shen C, Zhang G. Oscillating membrane photoreactor combined with salt-tolerated *Chlorella pyrenoidosa* for landfill leachates treatment. *Bioresour Technol.* 2018;269:134–42.
19. 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;703:135468. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719354610>
20. Gonçalves AL, Pires JCM, Simões M. A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment. *Algal Res.* 2017;24:403–15.
21. Khanzada ZT, Övez S. Microalgae as a sustainable biological system for improving leachate quality. *Energy.* 2017 Dec;140:757–65.
22. Kumari M, Ghosh P, Thakur IS. Landfill leachate treatment using bacto-algal co-culture: An integrated approach using chemical analyses and toxicological assessment. *Ecotoxicol Environ Saf* [Internet]. 2016;128:44–51. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651316300409>
23. Edmundson SJ, Wilkie AC. Landfill leachate – a water and nutrient resource for algae-based biofuels. *Environ*

- Technol [Internet]. 2013 Jul 1;34(13–14):1849–57. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.826256>
24. Hu D, Zhang J, Chu R, Yin Z, Hu J, Kristianto Nugroho Y, et al. Microalgae *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus dimorphus* co-cultivation with landfill leachate for pollutant removal and lipid production. *Bioresour Technol* [Internet]. 2021;342:126003. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852421013456>
25. Nawaz T, Rahman A, Pan S, Dixon K, Petri B, Selvaratnam T. A Review of Landfill Leachate Treatment by Microalgae: Current Status and Future Directions. *Processes*. 2020;8(4).
26. van Eck NJ, Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics* [Internet]. 2010;84(2):523–38. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
27. Anbalagan A, Schwede S, Nehrenheim E. Influence of Light Emitting Diodes on Indigenous Microalgae Cultivation in Municipal Wastewater. *Energy Procedia* [Internet]. 2015;75:786–92. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215008930>
28. Christenson L, Sims R. Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. *Biotechnol Adv* [Internet]. 2011;29(6):686–702. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-80053435484&doi=10.1016%2Fj.biotechadv.2011.05.015&partnerID=40&md5=1139997161e1a2d14ad5aed89467798f>
29. Su Y. Revisiting carbon, nitrogen, and phosphorus metabolisms in microalgae for wastewater treatment. *Sci Total Environ* [Internet]. 2021;762:144590. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720381213>
30. de Farias Silva CE, Sforza E. Carbohydrate productivity in continuous reactor under nitrogen limitation: Effect of light and residence time on nutrient uptake in *Chlorella vulgaris*. *Process Biochem* [Internet]. 2016;51(12):2112–8. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359511316304378>
31. Fazal T, Rehman MSU, Javed F, Akhtar M, Mushtaq A, Hafeez A, et al. Integrating bioremediation of textile wastewater with biodiesel production using microalgae (*Chlorella vulgaris*). *Chemosphere* [Internet]. 2021;281:130758. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521012297>
32. Ferreira A, Melkonyan L, Carapinha S, Ribeiro B, Figueiredo D, Avetisova G, et al. Biostimulant and biopesticide potential of microalgae growing in piggery wastewater. *Environ Adv* [Internet]. 2021;4:100062. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666765721000338>
33. Narindri Rara Winayu B, Tung Lai K, Ta Hsueh H, Chu H. Production of phycobiliprotein and carotenoid by efficient extraction from *Thermosynechococcus* sp. CL-1 cultivation in swine wastewater. *Bioresour Technol* [Internet]. 2021;319:124125. Disponible en:

34. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852420313997>
Wu J-Y, Lay C-H, Chiong M-C, Chew KW, Chen C-C, Wu S-Y, et al. Immobilized *Chlorella* species mixotrophic cultivation at various textile wastewater concentrations. *J Water Process Eng* [Internet]. 2020;38:101609. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714420304876>
35. Gao F, Yang H-L, Li C, Peng Y-Y, Lu M-M, Jin W-H, et al. Effect of organic carbon to nitrogen ratio in wastewater on growth, nutrient uptake and lipid accumulation of a mixotrophic microalgae *Chlorella* sp. *Bioresour Technol* [Internet]. 2019;282:118–24. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852419303578>
36. Znad H, Al Ketife AMD, Judd S, AlMomani F, Vuthaluru HB. Bioremediation and nutrient removal from wastewater by *Chlorella vulgaris*. *Ecol Eng* [Internet]. 2018;110:1–7. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857417305669>
37. Evans L, Hennige SJ, Willoughby N, Adeloye AJ, Skroblin M, Gutierrez T. Effect of organic carbon enrichment on the treatment efficiency of primary settled wastewater by *Chlorella vulgaris*. *Algal Res* [Internet]. 2017;24:368–77. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926416305057>
38. Nayak M, Karemore A, Sen R. Performance evaluation of microalgae for concomitant wastewater bioremediation, CO₂ biofixation and lipid biosynthesis for biodiesel application. *Algal Res* [Internet]. 2016;16:216–23. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926416300996>
39. Wang Y, Guo W, Yen H-W, Ho S-H, Lo Y-C, Cheng C-L, et al. Cultivation of *Chlorella vulgaris* JSC-6 with swine wastewater for simultaneous nutrient/COD removal and carbohydrate production. *Bioresour Technol* [Internet]. 2015;198:619–25. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852415013462>
40. Mahapatra DM, Chanakya HN, Ramachandra T V. Bioremediation and lipid synthesis through mixotrophic algal consortia in municipal wastewater. *Bioresour Technol* [Internet]. 2014;168:142–50. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852414004350>
41. Zhu L, Wang Z, Shu Q, Takala J, Hiltunen E, Feng P, et al. Nutrient removal and biodiesel production by integration of freshwater algae cultivation with piggery wastewater treatment. *Water Res* [Internet]. 2013;47(13):4294–302. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135413004077>
42. Shashirekha V, Sridharan MR, Swamy M. Bioremediation of Tannery Effluents Using a Consortium of Blue-Green Algal Species. *Clean - Soil, Air, Water* [Internet]. 2011;39(9):863–73. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-80052917272&doi=10.1002%2Fclen.201000548&partnerID=40&md5=a002006388ce2e14f78614fbbbad60c4>

43. Jiang L, Luo S, Fan X, Yang Z, Guo R. Biomass and lipid production of marine microalgae using municipal wastewater and high concentration of CO₂. *Appl Energy* [Internet]. 2011;88(10):3336–41. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-79957991062&doi=10.1016%2Fj.apenergy.2011.03.043&partnerID=40&md5=f4bb641eba4ff3089dc4d272a8337fea>
44. Mennaa FZ, Arbib Z, Perales JA. Urban wastewater treatment by seven species of microalgae and analgal bloom: Biomass production, N and P removal kinetics and harvestability. *Water Res* [Internet]. 2015;83:42–51. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84936791599&doi=10.1016%2Fj.watres.2015.06.007&partnerID=40&md5=26857843d493696311fb864ff097f9bb>
45. Ghosh P, Thakur IS, Kaushik A. Bioassays for toxicological risk assessment of landfill leachate: A review. *Ecotoxicol Environ Saf* [Internet]. 2017;141:259–70. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651317301562>
46. Pereira SFL, Gonçalves AL, Moreira FC, Silva TFCV, Vilar VJP, Pires JCM. Nitrogen removal from landfill leachate by microalgae. *Int J Mol Sci* [Internet]. 2016;17(11). Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84996508234&doi=10.3390%2Fijms17111926&partnerID=40&md5=b5f320eaf4bf48b940b32f2959d155fc>
47. Cheung KC, Chu LM, Wong MH. Toxic effect of landfill leachate on microalgae. *Water, Air, Soil Pollut* [Internet]. 1993;69(3–4):337–49. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0027643246&doi=10.1007%2FBBF00478169&partnerID=40&md5=f85dc1d43da09af82e692f8e8617e6d1>
48. Lambolez L, Vasseur P, Ferard JF, Gisbert T. The environmental risks of industrial waste disposal: An experimental approach including acute and chronic toxicity studies. *Ecotoxicol Environ Saf* [Internet]. 1994;28(3):317–28. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0028162686&doi=10.1006%2Feesa.1994.1056&partnerID=40&md5=6baffa600f5365ae6a5959b4e6baa682>
49. Bernard C, Guido P, Colin J, Anne LD-D. Estimation of the hazard of landfills through toxicity testing of leachates. I. Determination of leachate toxicity with a battery of acute tests. *Chemosphere* [Internet]. 1996;33(11):2303–20. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0030428447&doi=10.1016%2F0045-6535%2896%2900322-0&partnerID=40&md5=b93ea076c594eae8f7dc990f92da8073>
50. Bernard C, Colin JR, Anne LD-D. Estimation of the hazard of landfills through toxicity testing of leachates. Comparison of physico-chemical characteristics of landfill leachates with their toxicity determined with a battery of tests. *Chemosphere* [Internet]. 1997;35(11):2783–96. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

- 0343907193&doi=10.1016%2FS0045-6535%2897%2900332-9&partnerID=40&md5=2a4d2a1e843d8d47dbcfad40cf88f00f
51. Sallenave R, Fomin A. Some advantages of the duckweed test to assess the toxicity of environmental samples. *Acta Hydrochim Hydrobiol* [Internet]. 1997;25(3):135–40. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0031295794&doi=10.1002%2Faeh.19970250304&partnerID=40&md5=d1ad14b144a7384cdefc99e82cf28d76>
52. Lin L, Chan GYS, Jiang BL, Lan CY. Use of ammoniacal nitrogen tolerant microalgae in landfill leachate treatment. *Waste Manag* [Internet]. 2007;27(10):1376–82. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-34547112819&doi=10.1016%2Fj.wasman.2006.09.001&partnerID=40&md5=cd23dcd8adf099ab893b016d9c283f40>
53. Chang H, Fu Q, Zhong N, Yang X, Quan X, Li S, et al. Microalgal lipids production and nutrients recovery from landfill leachate using membrane photobioreactor. *Bioresour Technol* [Internet]. 2019;277:18–26. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85059904911&doi=10.1016%2Fj.biortech.2019.01.027&partnerID=40&md5=a611ac9fec38a0a901b6d63eba6479f7>
54. Quan X, Hu R, Chang H, Tang X, Huang X, Cheng C, et al. Enhancing microalgae growth and landfill leachate treatment through ozonization. *J Clean Prod* [Internet]. 2020;248. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85075330537&doi=10.1016%2Fj.jclepro.2019.119182&partnerID=40&md5=701969be83d85a7a919b0d32409d6643>
55. Chang H, Feng H, Wang R, Zhang X, Wang J, Li C, et al. Enhanced energy recovery from landfill leachate by linking light and dark bio-reactions: Underlying synergistic effects of dual microalgal interaction. *Water Res* [Internet]. 2023;231. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85146306248&doi=10.1016%2Fj.watres.2023.119578&partnerID=40&md5=47312cca99eb17079bb23a96a3ef8012>
56. Paskuliakova A, Tonry S, Touzet N. Phycoremediation of landfill leachate with chlorophytes: Phosphate a limiting factor on ammonia nitrogen removal. *Water Res* [Internet]. 2016;99:180–7. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84964967659&doi=10.1016%2Fj.watres.2016.04.029&partnerID=40&md5=45dfc62db1fc3ddf39036668c7701409>
57. Paskuliakova A, McGowan T, Tonry S, Touzet N. Phycoremediation of landfill leachate with the chlorophyte *Chlamydomonas* sp. SW15aRL and evaluation of toxicity pre and post treatment. *Ecotoxicol Environ Saf* [Internet]. 2018;147:622–30. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029531875&doi=10.1016%2Fj.ecoenv.2017.09.010&partnerID=40&md5=b5de337dc6982ea0f82fe5976e79d84>

a

58. Paskuliakova A, McGowan T, Tonry S, Touzet N. Microalgal bioremediation of nitrogenous compounds in landfill leachate – The importance of micronutrient balance in the treatment of leachates of variable composition. *Algal Res* [Internet]. 2018;32:162–71. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85044965300&doi=10.1016%2Fj.algal.2018.03.010&partnerID=40&md5=04a8f173ffb56e83b2d046e91766f734>
59. Saldarriaga LF, Almenglo F, Ramírez M, Cantero D. Kinetic characterization and modeling of a microalgae consortium isolated from landfill leachate under a high CO₂ concentration in a bubble column photobioreactor. *Electron J Biotechnol* [Internet]. 2020;44:47–57. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85079897076&doi=10.1016%2Fj.ejbt.2020.01.006&partnerID=40&md5=3b3375eaddf4491247eb914523af7d06>
60. Callejo-López JA, Ramírez M, Cantero D, Bolívar J. Versatile method to obtain protein- and/or amino acid-enriched extracts from fresh biomass of recalcitrant microalgae without mechanical pretreatment. *Algal Res* [Internet]. 2020;50. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85088126385&doi=10.1016%2Fj.algal.2020.102010&partnerID=40&md5=eebc512db0cb3b7ebe658f83fed6b885>
61. Saldarriaga LF, Almenglo F, Cantero D, Ramírez M. Influence of leachate and nitrifying bacteria on photosynthetic biogas upgrading in a two-stage system. *Processes* [Internet]. 2021;9(9). Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85114019766&doi=10.3390%2Fpr9091503&partnerID=40&md5=cc4153606544c0047317de39931477e4>
62. Elmaadawy K, Hu J, Guo S, Hou H, Xu J, Wang D, et al. Enhanced treatment of landfill leachate with cathodic algal biofilm and oxygen-consuming unit in a hybrid microbial fuel cell system. *Bioresour Technol* [Internet]. 2020;310. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85083650526&doi=10.1016%2Fj.biortech.2020.123420&partnerID=40&md5=4de5e9387e8065c4019eb6286b8ac1b7>
63. Casazza AA, Rovatti M. Reduction of nitrogen content in landfill leachate using microalga. *Desalin Water Treat* [Internet]. 2018;127:71–4. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85055709541&doi=10.5004%2Fdwt.2018.22537&partnerID=40&md5=dbe7e49e52f1ecd1afb8d55e7112857f>
64. Sforza E, Khairallah Al Emara M-H, Sharif A, Bertucco A. Exploitation of urban landfill leachate as nutrient source for microalgal biomass production. S. P, J.J. K, editors. *Chem Eng Trans* [Internet]. 2015;43:373–8. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84946021648&doi=10.3303%2FCET1543063&partnerID=40&md5=21949171eb57ade78b1d1f6f0f8253f1>
65. Cheah WY, Ling TC, Show PL, Juan

- JC, Chang J-S, Lee D-J. Cultivation in wastewaters for energy: A microalgae platform. *Appl Energy* [Internet]. 2016;179:609–25. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84978863683&doi=10.1016%2Fj.apenergy.2016.07.015&partnerID=40&md5=abc2d784f5c4f6c1f998f1732fe827ce>
66. Zhao X, Zhou Y, Huang S, Qiu D, Schideman L, Chai X, et al. Characterization of microalgae-bacteria consortium cultured in landfill leachate for carbon fixation and lipid production. *Bioresour Technol* [Internet]. 2014;156:322–8. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84893833503&doi=10.1016%2Fj.biortech.2013.12.112&partnerID=40&md5=5f24d45d6fd6cb4d145d1c488021ecd0>
67. Nordin N, Yusof N, Samsudin S. Biomass Production of *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp., and *Oscillatoria* sp. in Nitrified Landfill Leachate. *Waste and Biomass Valorization* [Internet]. 2017;8(7):2301–11. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85001555307&doi=10.1007%2Fs12649-016-9709-8&partnerID=40&md5=bce9621c5c9f0a19493455d79a01978d>
68. Paiva ALP, Gonçalves da Fonseca Silva D, Couto E. Recycling of landfill leachate nutrients from microalgae and potential applications for biomass valorization. *J Environ Chem Eng* [Internet]. 2021;9(5). Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85109012482&doi=10.1016%2Fj.jece.2021.105952&partnerID=40&md5=e1db533ef71620d16eb80d60f64cf1d0>
69. Abdel-Shafy HI, Mansour MSM. Phytoremediation for the elimination of metals, pesticides, PAHs, and other pollutants from wastewater and soil. In: *Phytobiont and Ecosystem Restitution* [Internet]. Water Research and Polluted Control Department, National Research Centre, Cairo, Egypt: Springer Singapore; 2018. p. 101–36. Disponible en: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85077652891&doi=10.1007%2F978-981-13-1187-1_5&partnerID=40&md5=6234114c88adbc7a925fb16d2ba9b54e
70. Callegari A, Bolognesi S, Cecconet D, Capodaglio AG. Production technologies, current role, and future prospects of biofuels feedstocks: A state-of-the-art review. *Crit Rev Environ Sci Technol* [Internet]. 2020;50(4):384–436. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85068171731&doi=10.1080%2F10643389.2019.1629801&partnerID=40&md5=c911d25160592fac32e2cb185cdb12ca>
71. Shaari AL, Sa SNC, Surif M, Zolkarnain N, Ghazali R. Growth of marine microalgae in landfill leachate and their ability as pollutants removal. *Trop Life Sci Res* [Internet]. 2021;32(2):133–46. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85110511014&doi=10.21315%2Ftlsr2021.32.2.9&partnerID=40&md5=8e493d280da24a5c996c88721c873f9d>
72. Sardi-Saavedra A, Peña-Salamanca EJ,

- Madera-Parra CA, Cerón-Hernández VA. Diversity of algal communities associated with a photosynthetic high rate algal system for bioremediation landfill leachate . *Lat Am J Aquat Res* [Internet]. 2016;44(1):113–20. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84969980399&doi=10.3856%2Fvol44-issue1-fulltext-11&partnerID=40&md5=f5311a999159103615c0c4ea6d0f910b>
73. Sardi Saavedra A, Madera Parra C, Peña Salamanca EJ, Cerón VA, Mosquera J. Grupos funcionales fitoplanctónicos en una laguna algal de alta tasa usada para la biorremediación de lixiviados de rellenos sanitarios . *Acta Biol Colomb* [Internet]. 2018;23(3):295–303. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85056380435&doi=10.15446%2Fabc.v23n3.69537&partnerID=40&md5=55fa60eb9f07d0e00b3975678fae1728>
74. Mustafa E-M, Phang S-M, Chu W-L. Use of an algal consortium of five algae in the treatment of landfill leachate using the high-rate algal pond system. *J Appl Phycol* [Internet]. 2012;24(4):953–63. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84864118449&doi=10.1007%2Fs10811-011-9716-x&partnerID=40&md5=524d6ad6c31ddf9ccaa669a0b8ee03ea>
75. Sniffen KD, Sales CM, Olson MS. Nitrogen removal from raw landfill leachate by an algae-bacteria consortium. *Water Sci Technol* [Internet]. 2016;73(3):479–85. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84959019783&doi=10.2166%2Fwst.2015.499&partnerID=40&md5=9e805d765845c08109bdab5173c461d3>
76. El Ouaer M, Kallel A, Kasmi M, Hassen A, Trabelsi I. Tunisian landfill leachate treatment using *Chlorella* sp.: effective factors and microalgae strain performance. *Arab J Geosci* [Internet]. 2017;10(20). Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85032485563&doi=10.1007%2Fs12517-017-3241-4&partnerID=40&md5=779d6c9f35317bb80ed431369a9c7184>
77. Nguyen HTH, Min B. Leachate treatment and electricity generation using an algae-cathode microbial fuel cell with continuous flow through the chambers in series. *Sci Total Environ* [Internet]. 2020;723:138054. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720315679>
78. García P. Manejo y tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios: revisión bibliográfica y experiencia en Planta de Tratamiento de Lixiviados de Navarro [Internet]. Especialización Especialista en Gerencia Ambiental y Desarrollo Sostenible Empresarial. Especialización en Gerencia Ambiental y Desarrollo Sostenible Empresarial, Universidad Santiago de Cali; 2019. Disponible en: <https://repository.usc.edu.co/handle/20.500.12421/677>
79. Canizales S, Castro C, Saldarriaga J, Molina F. Evaluation of mature landfill leachates Treatment systems: the case of the landfill Curva de Rodas (Medellín-Colombia) [Internet].

- Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. Universidad de Antioquia; 2013. p. 300–16. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302013000400024&lng=en&nrm=iso&tlng=en
80. Donneys-Victoria D, Marriaga-Cabrales N, Camargo-Amado RJ, Machuca-Martínez F, Peralta-Hernández JM, Martínez-Huitle CA. Treatment of landfill leachate by a combined process: Iron electrodisolution, iron oxidation by H₂O₂ and chemical flocculation. *Sustain Environ Res* [Internet]. 2018;28(1):12–9. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468203917300298>
81. Gomez AM, Yannarell AC, Sims GK, Cadavid-Restrepo G, Moreno Herrera CX. Characterization of bacterial diversity at different depths in the Moravia Hill landfill site at Medellín, Colombia. *Soil Biol Biochem* [Internet]. 2011;43(6):1275–84. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003807171100109X>
82. Madera-Parra CA, Peña-Salamanca EJ, Peña MR, Rousseau DPL, Lens PNL. Phytoremediation of Landfill Leachate with *Colocasia esculenta*, *Gynerum sagittatum* and *Heliconia psittacorum* in Constructed Wetlands. *Int J Phytoremediation* [Internet]. 2015 Jan 2;17(1):16–24. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.828014>
83. Becerra D, Soto J, Villamizar S, Machuca-Martínez F, Ramírez L. Alternative for the Treatment of Leachates Generated in a Landfill of Norte de Santander–Colombia, by Means of the Coupling of a Photocatalytic and Biological Aerobic Process. *Top Catal* [Internet]. 2020;63(11):1336–49. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11244-020-01284-1>