

Edición especial 25 años del doctorado en ingeniería

Análisis bibliométrico del ciclo de vida aplicado a procesos de tratamientos de agua residual con microalgas

Bibliometric analysis of the life cycle applied to wastewater treatment processes with microalgae

Cómo citar: Becerra-Moreno, D., Rubio-Gómez, Y.M., Barajas-Solano, A.F., Ramírez Ríos, L.F., Machuca-Martínez, F. Ingeniería y Competitividad. 25(4), e-30111626. doi: 10.25100/iyv.v25i4.11626

Michael E. Pérez-Roa¹, 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.

². Departamento de Ciencias del medio ambiente, Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia

³ Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia

Resumen

Este trabajo realizó un análisis bibliométrico de correlación entre palabras claves relacionadas al análisis de ciclo de vida (ACV) y sistemas de tratamiento de agua residual, buscando identificar la relevancia del tratamiento con microalgas. La biomasa de estos microorganismos permite la valorización del efluente residual ya que puede ser empleada en la obtención de energía a través del biogás generado en la digestión de reactores anaerobios y también como fuente potencial para la producción de metabolitos de alto valor industrial. La mayoría de los ACV obtenidos en la búsqueda emplean flujos de referencia como la cantidad de biomasa producida, volumen de agua tratada y equivalentes producidos por persona. Las unidades funcionales más reportadas corresponden a 1m³ de agua residual tratada y aguas residuales producidas por equivalente poblacional. La herramienta predominante para el desarrollo de los ACV correspondió al software SimaPro, aplicando la metodología de impactos ReCiPe.

Palabras clave: Análisis de ciclo de vida, microalgas, tratamiento de aguas residuales

Abstract

This work carried out a bibliometric correlation analysis between keywords related to life cycle analysis (LCA) and wastewater treatment systems, seeking to identify the relevance of treatment with microalgae. The biomass of these microorganisms allows the valorization of the residual effluent since it can be used to obtain energy through the biogas generated in the digestion of anaerobic reactors and as a potential source to produce metabolites of high industrial value. Most of the LCAs obtained in the search use reference flows such as the amount of biomass produced, the volume of water treated, and the equivalents produced per person. The most frequently reported functional units are 1 m³ of treated wastewater and produced wastewater per population equivalents. The predominant tool for developing LCAs corresponded to the SimaPro software, applying the ReCiPe impact methodology.

Keywords: Life cycle analysis, microalgae, wastewater treatment

Introducción

Las aguas residuales son líquidos complejos cuya composición biológica y fisicoquímica varía dependiendo de su fuente de origen, generalmente poseen altas cantidades de compuesto orgánicos disueltos, microorganismos, sólidos suspendidos y metales pesados entre otros contaminantes(1), por esta razón, los efluentes residuales no tratados representan un riesgo ambiental para los ecosistemas, sus servicios ecosistémicos e influyen directamente en la disponibilidad del agua, agravando el estrés hídrico a razón del cambio climático(2,3).

Las tecnologías de tratamiento de aguas residuales oscilan entre la mezcla de sistemas biológicos y fisicoquímicos, los criterios de implementación están intrínsecamente relacionados a la composición del efluente residual y los requerimientos de remoción. Recientemente se evidencia la investigación y mejoramiento constante de todos los sistemas tradicionales, así como la implementación de sistemas de tratamiento híbridos para mejorar la calidad del caudal de forma eficiente buscando la mitigación de impactos ambientales.

El uso de tratamientos fisicoquímicos como la coagulación-floculación se reporta para el tratamiento de efluentes en la producción de aceite de palma (4), aguas residuales de lavandería (5) y separación de iones metálicos en aguas residuales industriales y municipales (6,7); la adsorción y el intercambio iónico, estrechamente relacionados, se proyectan con efectividad para separar iones de Au(III), Cu(II), Co(II) y Ni(II) en aguas residuales (8,9) y remover de colorantes orgánicos tóxicos en efluentes residuales de industria textil (10,11); las membranas, actualmente son objeto de desarrollo tecnológico y se investigan como superficies capaces de soportar la oxidación catalítica de compuestos orgánicos (12); los tratamientos electro-químicos han sido empleados como un método eficiente y de bajo costo para el mejoramiento de cuerpos de agua eutrofizados (13), remoción de antibióticos residuales (14), tratamiento de aguas residuales de matadero, productos lácteos (15) entre otros.

Los tratamientos biológicos generalmente se enfocan en mantener una concentración adecuada de oxígeno disuelto a través de la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos que pueden ser directamente tóxicos para los ecosistemas acuáticos y todas las formas de vida que se abastecen de estos (16). En estudios recientes para estos tratamientos, se reporta la capacidad de remoción del RNA de coronavirus respiratorio agudo severo 2 (SARS-CoV-2) con sistemas de lodos activados convencionales (17) y sinergia con otras tecnologías y/o procesos para la remoción de fósforo y nitrógeno (18), producción de ácidos grasos volátiles (19), solubilización de la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos volátiles (SSV) y compuestos macromoleculares refractarios (20), otros sistemas de tratamiento como las lagunas, han sido empleados en el mejoramiento de la calidad de aguas residuales de matadero (21) y remoción de fósforo de aguas residuales domésticas en unión con humedales artificiales (22), los cuales involucran los procesos fotosintéticos realizados por plantas macrófitas para apoyar la técnica de biorremediación.

Los microorganismos fotosintéticos, como microalgas y cianobacterias, también han sido objeto de estudio en procesos de fitorremediación, logrando altas eficiencias de remoción de la carga contaminante en varios tipos de efluentes de aguas residuales y demostrando capacidad de adsorción de metales pesados (23). Las microalgas eventualmente podrían estar involucradas en todos los tratamientos de aguas residuales gracias a sus capacidades de aliviar la carga contaminante de difícil degradación, sin embargo, las desventajas de su implementación yacen en los costos de cultivo, es por esto que se estudia la forma de subsanarlos empleando aguas residuales como fuente nutricional, adicionalmente la biomasa de las microalgas puede ser refinada para la obtención de varios bio-productos de alto interés industrial (24). Actualmente se plantean sistemas de biorremediación que buscan simultáneamente la remoción de carga contaminante y la producción de biomasa para la extracción de metabolitos de alto valor agregado (25). La producción lipídica de las microalgas se propone como una forma alternativa de fabricación de biodiesel, ya que, no solo los requerimientos de suelo y de agua son flexibles, sino que también la eficiencia de transformación de energía solar en biomasa es más rápida comparada con cultivos de semillas oleaginosas, ubicando a estos microorganismos como materia prima sustentable para

la producción de biodiesel con potencial de contribución al mercado de los combustibles, sin embargo, el costo de producción aún sigue siendo elevado en comparación con sus competidores fósiles (26). La biomasa de microalgas también cuenta con aplicaciones en la industria alimentaria, puesto que, tiene potencial como suplemento nutricional debido a su contenido de proteínas, aminoácidos, minerales, ácidos grasos poliinsaturados y vitaminas (27), así mismo, ha sido usada como materia prima de alimento para la producción ganadera y avícola (28). La industria farmacéutica y cosmética también ha puesto su interés en otros bio-productos derivados de las microalgas, ya que estas son capaces de producir polisacáridos y pigmentos con potencial antialérgico, cicatrizante y antioxidante (29).

A partir de la segunda década de los años 2000, las biorrefinerías de biomasa de microalgas han surgido como una forma exitosa de optimizar los cultivos y así maximizar la producción de los valiosos contenidos celulares para disminuir los costos y mejorar la rentabilidad (30), es por esto que su uso a escala industrial propone soluciones a la demanda creciente de combustibles y la contaminación del recurso hídrico, contribuyendo a mitigar los impactos ambientales generados por el calentamiento global (31).

La evaluación de estos impactos ambientales generalmente se realiza a través de los análisis de ciclo de vida (ACV), ya que permiten determinar las alteraciones procedentes de cada una de las transformaciones que recibe la materia prima hasta convertirse en el producto final (32). Los ACV son considerados una herramienta dinámica que varía en función de las condiciones actuales del área de investigación, no obstante, el análisis generalmente abarca 4 etapas; la primera corresponde a la delimitación del alcance y objetivo del análisis; la segunda es la etapa de inventario, la cual recopila la descripción de todos los flujos de materia y energía que entran y salen del sistema de producción, así como su posible interacción con el medio ambiente; la tercera es la etapa de evaluación de impactos ambientales y la cuarta es la interpretación y reporte de resultados del ciclo de vida (33). De esta forma es posible estimar los efectos positivos y adversos derivados del cultivo y refinamiento de biomasa de microalgas, ya que, en general se reporta la elevada demanda energética y de agua en el sistema, aun cuando se hace uso de aguas residuales para mitigar el requerimiento nutricional. La aplicación de los ACV a estos sistemas propone un área de investigación relevante que aporta información valiosa a la hora de tomar decisiones y formular escenarios adecuados para hacer usufructo de las microalgas. En literatura, los ACV relacionados a esta tecnología, aunque nueva, es relativamente amplia y con tendencia creciente, sin embargo, los resultados del estudio pueden variar dependiendo de la ubicación geoespacial y de aspectos económicos tanto nacionales como internacionales. Es por eso por lo que la producción bibliográfica se analiza en relación con su producción en el tiempo y por territorio, ahondando en las temáticas de tratamiento de agua residual mediante cultivos de microalgas.

Este análisis bibliométrico examina la producción de bibliografía respecto a estudios ciclo de vida para procesos de tratamientos de agua mediante microalgas, identificando la moda de aspectos metodológicos como los flujos de referencia, unidad funcional, metodología de impactos y software.

Metodología

La metodología empleada fue la propuesta por (34,35). En este estudio se usó la base de datos Scopus para recolectar la información bibliográfica, la cual fue filtrada desde el año 2000 hasta el 2021 con la siguiente búsqueda:

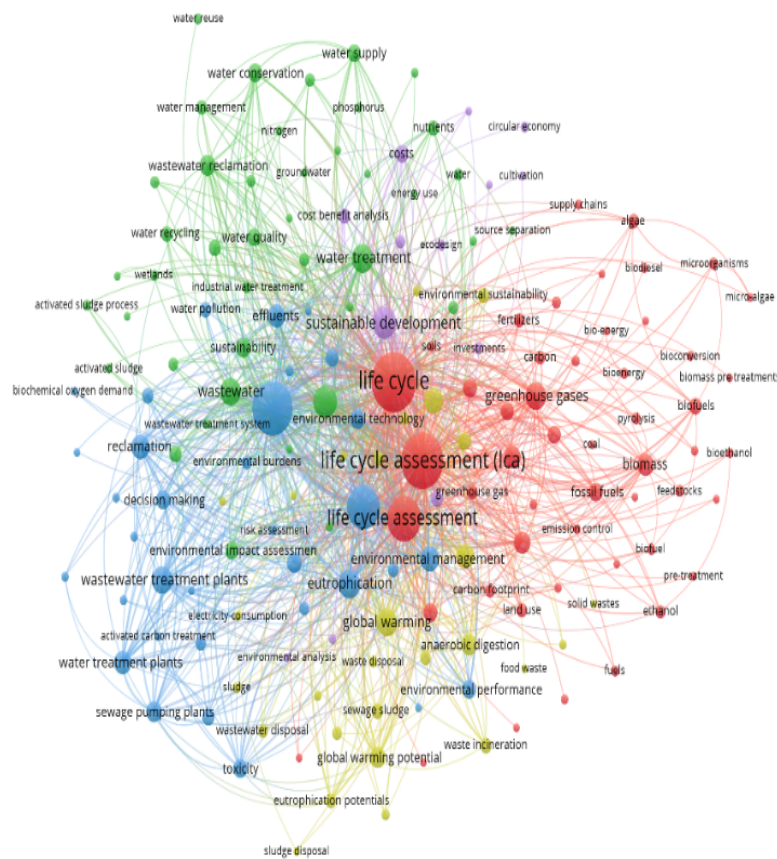
TITLE-ABS-KEY ((lca) AND (biomass OR algae OR microalgae OR biorefinery OR "secondary products" OR pigments OR wastewater OR "domestic wastewater" AND treatment))

Se depuraron las palabras claves, eliminándose términos no relacionados a la temática, como "terapia genética", "vida artificial" y "retina" entre otros. Finalmente se obtuvieron 592 artículos, a los cuales se les extrajo la información bibliográfica en archivo CSV para su posterior análisis en el software VOSviewer versión 1.6.17. (36) y los indicadores bibliométricos reportados son: Documentos por año, país y área de estudio.

Resultados y discusión

El análisis de correlación de palabras clave realizado con el programa VOSviewer (figura 1), se observa el interés de determinar el desempeño ambiental de los tratamientos de aguas residuales e intentan aplicar el enfoque de economía circular con recuperación de energía a partir de biogás o biomasa y la generación de bioproductos. Las ocurrencias de palabras clave arrojó cinco conglomerados (figura 4. a) , todos enlazados por el ACV: el primero y más grande (rojo) interconecta conceptos de biomasa, microalgas y bioproductos; el siguiente (verde) hace referencia al manejo y tratamiento de agua residual; el tercer agrupamiento de palabras (azul) correlaciona conceptos de impacto ambiental con tratamientos de agua residual; el cuarto (amarillo) introduce nociones de manejo y disposición de residuos así como uso de energía y el último grupo (morado) complementa la búsqueda con criterios de economía circular y desarrollo sostenible.

(a)



b.

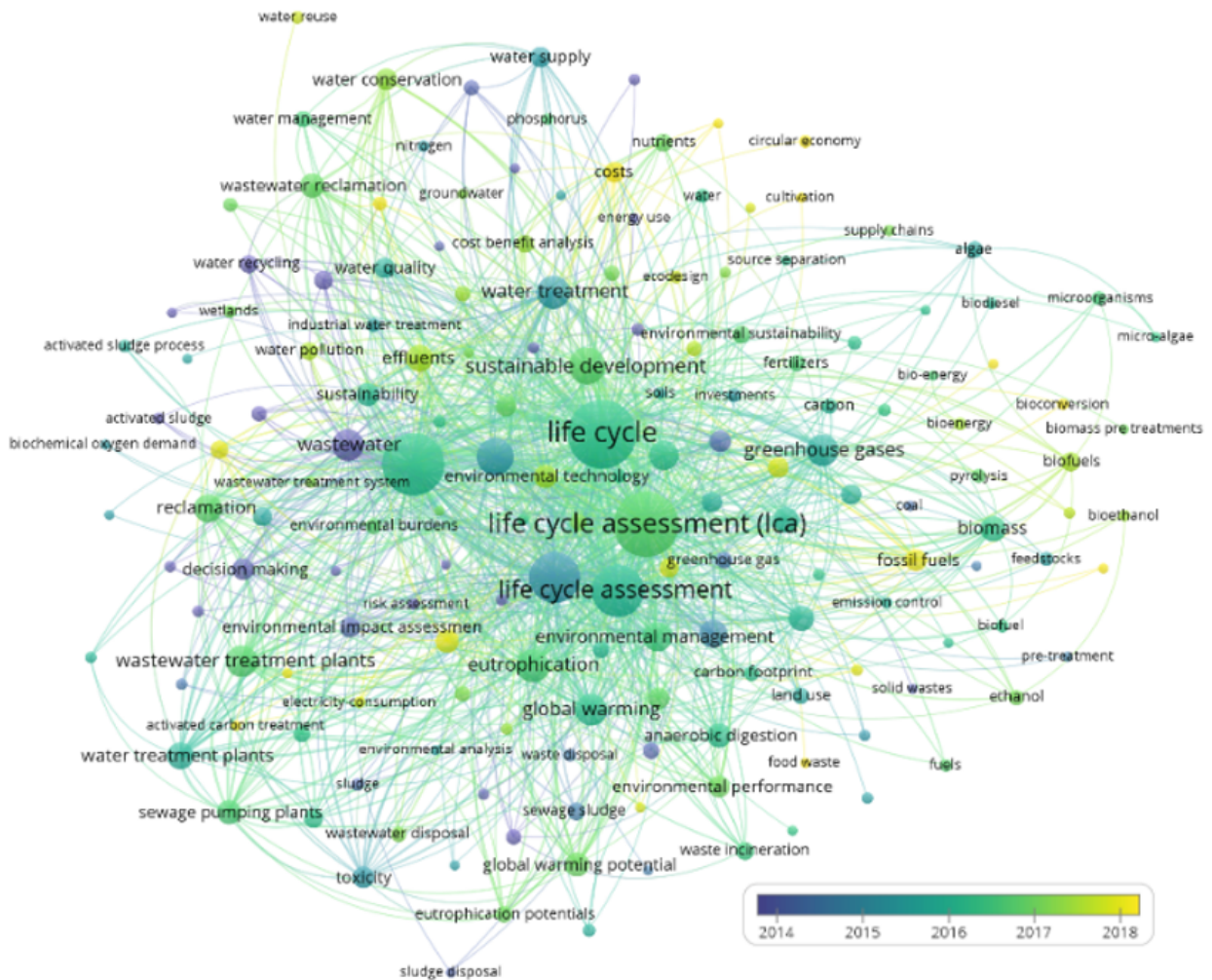


Figura 1. Red de conexiones bibliométricas con relación a LCA, tratamiento de aguas residuales y microalgas, entre los años 2000 y 2021. (a) Temática de búsqueda (b) temática de búsqueda en el tiempo. El número mínimo de ocurrencias por palabra clave es nueve

Se observa que la palabra clave más frecuente es el ACV, seguido de tratamiento de agua residual y conceptos relacionados a categorías de impacto ambiental (Tabla 1)

Tabla 1. Top 10 de las palabras claves con más ocurrencias en la búsqueda

Palabra clave	Frecuencia
Life cycle assessment	716
Life cycle	413
Wastewater treatment	331
Environmental impact	220
Sustainable development	123
Eutrophication	99
Water treatment	93
Global warming	92
Wastewater	87
Greenhouse gases	86

Producción bibliográfica y su comportamiento en el tiempo

En la figura 2, se observa una tendencia creciente de la cantidad de documentos publicados por año, la mayor cantidad de publicaciones se registra para el año 2020 con 86 publicaciones relacionadas a la búsqueda. El documento con más citas corresponde al ACV y análisis tecno-económico (o techno-economic assessment -TEA) para la valorización de la tecnología de licuefacción hidrotermal, pues esta posee potencial en la extracción de aceite biocrudo a partir de biomasa húmeda, con potencial para la extracción de nutrientes y otros recursos energéticos que podrían valorizarse (37), la temática general de los artículos de interés gira en torno a la valorización y análisis de otras tecnologías para la producción de biomasa, tratamiento de aguas residuales y de los lodos producidos en estos sistemas (38–42). Los documentos publicados en la primera década de los 2000 se interesan en establecer mediciones para los impactos generados en la ecósfera debido los cambios tecnológicos inducidos por el concepto de desarrollo sostenible, donde el ACV se propone como una herramienta para evaluar y comparar sistemas de tratamiento de agua potable y residual (43,44), así mismo, se reporta la estimación de consumos energéticos e impactos derivados de aplicar tecnologías convencionales de tratamiento de aguas residuales como, lodos activados y filtración de baja velocidad, en comunidades descentralizadas, pequeñas y rurales (45,46) y en general los inconvenientes de la implementación tecnológica para la recuperación, reciclaje y reutilización de agua (47), los cuales van en aumento debido a que el ACV varía dependiendo de la región en la cual se aplica y las condiciones económicas que le afecten.

Para el año 2021 el curso de los documentos reportados está enfocados en sistemas de tratamiento para efluentes residuales industriales (48) o comparación de tecnologías basadas en su viabilidad tecno económica y ambiental (49), biorrefinerías para la obtención de bioproductos a partir de residuos (50–52), como la implementación de microalgas en aguas residuales para la obtención de metabolitos de interés industrial y simultanea remoción de carga contaminante(53).

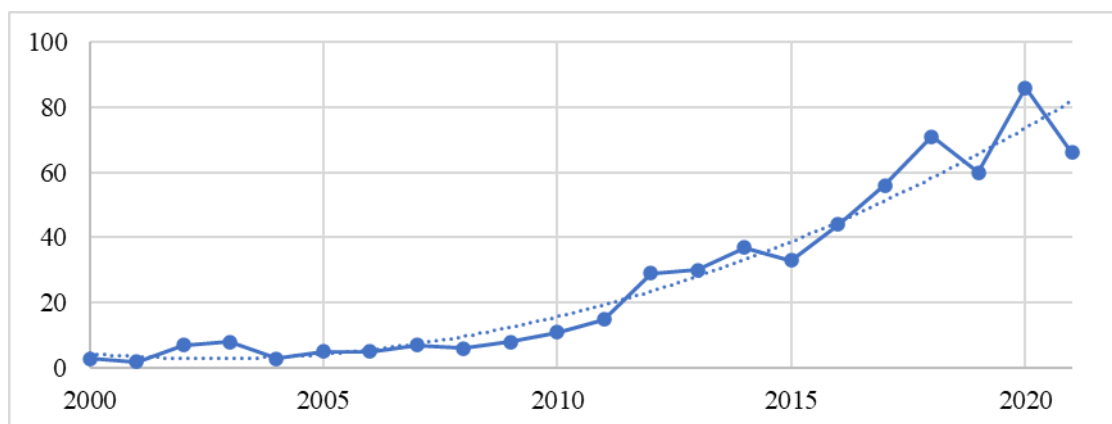


Figura 2. Cantidad de documentos publicados con relación a LCA, tratamiento de aguas residuales y microalgas, entre los años 2000 y 2021.

Las áreas de conocimiento involucradas están representadas en la figura 3, de las cuales la temática que posee mayor porcentaje de registro es la ciencia medioambiental con un 27% del total evaluado, seguida por energía con 19% e ingeniería con 18%, lo cual corresponde con la esencia misma de los ACV. La categoría "otros" involucra áreas como Ciencias de la Computación, Matemáticas, Economía, Inmunología y microbiología, Multidisciplinario, Artes y Humanidades, Profesiones de la salud.

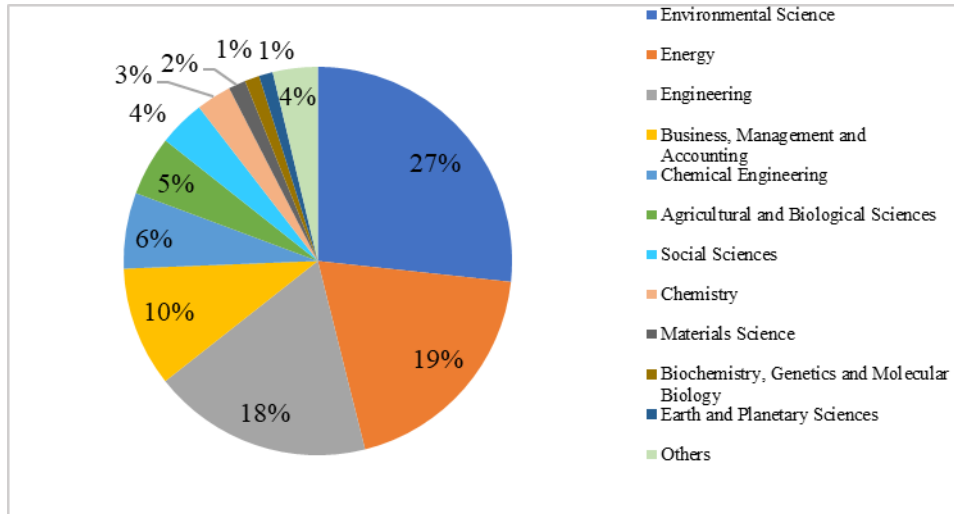


Figura 3. Áreas temáticas con relación a LCA, tratamiento de aguas residuales y microalgas, entre los años 2000 y 2021

Producción bibliográfica de acuerdo con territorio o país

El país que lidera la información publicada es Estados Unidos, seguido de España y China, mientras que Colombia se ubica en el treintavo puesto con solo 6 publicaciones relacionados en las últimas dos décadas (figura 4).

El aporte de Estados Unidos al estado del arte se relaciona a la investigación y análisis de tecnologías para la producción de energía a base de biocarbon (54,55) y biocombustibles (56) al igual que España (57) y China (58). Colombia, registra información relacionada a sistemas de tratamiento de aguas residuales (59,60) así como mejoras ambientales derivadas del tratamiento anaeróbico enfocado en la obtención de energía (61).

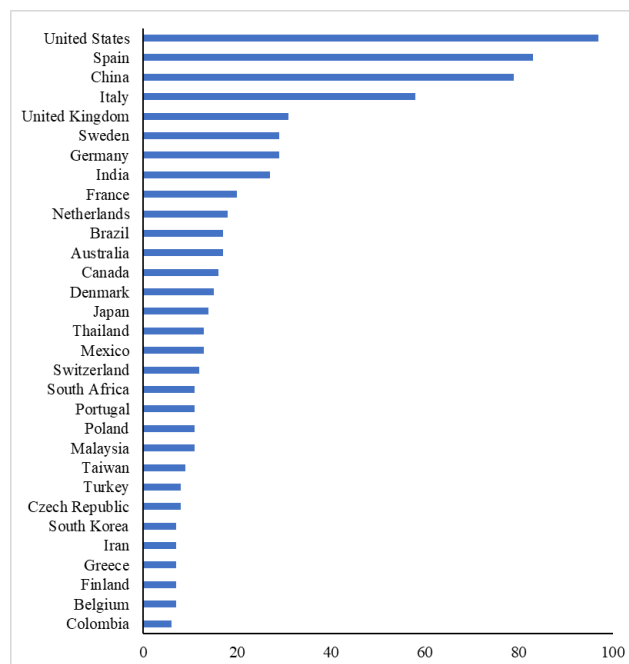


Figura 4. Documentos publicados por territorio o país con relación a LCA, tratamiento de aguas residuales y microalgas, entre los años 2000 y 2021.

Producción bibliográfica para el tratamiento de aguas residuales municipales

El análisis de ciclo de vida de varios tratamientos de aguas residuales domésticas municipales reporta que la tecnología de lodos activados puede ser modificada para mejorar la remoción de diferentes tipos de contaminantes, y el aspecto de mayor carga para los impactos ambientales fue el consumo de energía eléctrica (62).

La implementación de tecnologías sanitarias reduce el daño a la salud humana en más del 50% cuando se aplican tratamientos biológicos secundarios como lodos activados, y una reducción adicional del 20% cuando se implementan tratamientos terciarios, como la ozonización o carbón activado (63).

Los impactos ambientales de tratamientos con lodos activados en la fase de operación son más altos que en la de construcción, debido al aumento del consumo de energía eléctrica necesaria para oxigenación y los requerimientos de remoción de fósforo, por otro lado, los humedales artificiales generan mayores impactos ambientales en la etapa de construcción y son relativamente menos contaminantes durante la operación, sin embargo, el tipo de filtración puede modificar significativamente este resultado (65). También se demostró que biorreactores de membrana presentan mejor rendimiento ambiental en comparación con sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales domésticas municipales(66).

Para comunidades pequeñas, los sistemas de tratamiento de tierras con vegetación y humedales artificiales son medioambientalmente más sostenibles que los lodos activados, no obstante, este último debería ser usado para centros poblados más grandes(67). Otro estudio soporta esta afirmación ya que reporta impactos ambientales entre 2 a 5 veces más altos para lodos activados en comparación con "tecnologías basadas en la naturaleza" como los humedales artificiales y los sistemas de estanques de algas de alta tasa (68). Los sistemas de humedales artificiales son la mejor opción como sistemas pequeños in-situ para el tratamiento de agua residual, y los impactos de los sistemas de lodos activados pueden reducirse al implementar tecnología fotovoltaica.(45,69).

Para comunidades descentralizadas se menciona que los biorreactores anaeróbicos de membrana son la tecnología más aconsejable, puesto que estos sistemas permiten la recuperación de energía como biogás y el consumo de electricidad es nulo, la calidad del efluente por otro lado depende de las regulaciones nacionales, es por esto que al seleccionar el tipo de tratamiento deben considerarse aspectos como la normatividad ambiental vigente, percepción social de los beneficios y factores de localización (70). Se estudió que el tratamiento anaerobio termofílico de lodos activados representa menos impactos ambientales (71) y también la recuperación de materia orgánica de tratamientos primarios e implementación del proceso parcial de nitrificación-anammox en reactores anaerobios como tratamiento secundario es medioambientalmente favorable(72) ya que las alternativas anaerobias generan 38% menos de lodos y requiere 50% menos oxígeno(73,74).

Producción bibliográfica de microalgas cultivadas en aguas residuales

La investigación de las implicaciones ambientales de los sistemas de cultivo de microalgas aún está en desarrollo, y la evaluación de escenarios para comparar los mejores sistemas, empleando residuos como fuente nutricional, propone un área de exploración necesaria para soportar la definición de economía circular. Los ACV establecen que, en comparación con tecnologías convencionales, los impactos ambientales de los sistemas de cultivo de microalgas pueden ser reducidos en un 30% al emplear aguas residuales como fuente nutricional y 56% al usar CO₂ proveniente de la combustión de gasolina como fuente carbono (75). La implementación de efluentes residuales de la producción de aceite de oliva (almazara) en cultivos de *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus quadricauda* ha probado ser medioambientalmente beneficioso ya que se valoriza el efluente y se evita el impacto del tratamiento, sin embargo, la distancia de transporte de las aguas residuales influye en la optimización del sistema (76). La integración del manejo de efluentes residuales con cultivos de *Chlorella vulgaris* en estanques de conductos abiertos, puede ayudar a superar las desventajas reportadas en el cultivo de esta microalga, también el uso de la biomasa puede aumentar su competitividad económica en plantas de biogás al aprovechar lodo de aguas residuales y heces de bovinos y porcinos como materia prima para la digestión anaerobia (77). El estudio de la simbiosis entre microalgas y bacterias aún está en etapas tempranas, pero se considera que los tratamientos secundarios y terciarios pueden ser reemplazados por estos consorcios.

Por otro lado, los ACV sobre la producción de biocombustibles a partir de biomasa microalgal reportan que este enfoque no es sustentable debido a los altos costos de nutrientes y energía, sin embargo, la perspectiva de su cultivo en efluentes residuales representa una solución a ese problema, además, estos microorganismos pueden remover una gran cantidad de contaminantes y su biomasa se puede emplear para la generación de biogás, compostaje, suplemento alimentario y producción de biocompuestos (53)

Otros estudios indican que, emplear aguas pretratadas en lagunas algales de alta tasa, satisface la demanda de lípidos derivados de microalgas, mejorando el impacto ambiental del proceso de producción de biocombustible (78). El proceso de producción de biodiesel a partir de biomasa de *Chlorella vulgaris* cultivada en lagunas abiertas usando aguas residuales domésticas requiere menos energía y es una opción sustentable para reemplazar cultivos en agua fresca, sin embargo, se requiere un pretratamiento para eliminar partículas sólidas en el caudal residual que alimenta el sistema. La fase de extracción posee los impactos ambientales más altos debido a los requerimientos químicos (ciclo-hexano) y energéticos, y el rendimiento en la producción de biodiesel también es dependiente de la cepa cultivada (79). Datos experimentales de la producción de biometano en lagunas microalgales a escala piloto, empleadas en el tratamiento de aguas residuales municipales, ofrece beneficios para la protección del clima, recursos fósiles y agotamiento de la capa de ozono, sin embargo, los impactos en otras categorías son negativos, debido a la demanda en el uso de tierra y las tecnologías empleadas en la producción del biogás. El concepto de biorrefinería de algas puede reducir en un 40% las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación al tratamiento convencional de agua residual (80).

De acuerdo con la revisión realizada, la herramienta para el desarrollo del ACV corresponde a un software capaz de procesar datos de los flujos de entrada y salida en procesos productivos o servicios, empleando bases de datos para transformar la información en impactos ambientales de acuerdo con la metodología de impacto seleccionada. Estos modelados permiten determinar el desempeño ambiental a través de la cuantificación de impactos ambientales. La metodología de impacto depende del enfoque del ACV y responde a los requerimientos del estudio. En la Tabla 2 se puede apreciar que en general el software más utilizado para realizar ACVs relacionados al tratamiento de aguas residuales y cultivos de microalgas es SimaPro, junto con la metodología de impacto ReCiPe de punto medio, que permite evaluar un total de 18 indicadores o categorías. El flujo de referencia en general está relacionada al volumen de agua residual tratada o producida, lo que se traduce en unidades funcionales de 1m³ de agua residual tratada y/o cantidad de agua residual producida por equivalente poblacional. *Chlorella vulgaris* y los consorcio microalga-bacteria son los microorganismos más usados para cultivos en aguas residuales.

[Tabla 2. información de los ACV desarrollados en torno a tratamiento de aguas residuales y microalgas](#)

Conclusión

Se evidencia que, durante las dos últimas décadas, ha ido en aumento el interés científico por determinar los impactos ambientales generados en la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, empleando la metodología del ACV para aplicar el concepto de economía circular y la mitigación de impactos ambientales. El interés por evaluar alternativas de recuperación de energía dentro del sistema o generar un beneficio económico, permite el surgimiento de los prospectos más sostenibles de acuerdo con los estudios de ACV, como la generación de biogás proveniente de digestiones anaerobias de biomasa microalgal o de lodos residuales, y la recirculación o reúso de efluentes pretratados de aguas residuales para mitigar los impactos generados por los requerimientos nutricionales y energéticos en las biorrefinerías de microalgas, específicamente para aquellas enfocadas en la obtención de lípidos para la producción de biocombustibles. Las lagunas se reportan como la forma más sostenible para el cultivo de microalgas.

La mayoría de los ACV emplearon como herramienta de análisis el software SimaPro en conjunto con la metodología ReCiPe de punto medio, ya que permite el análisis de los impactos a través de 18 categorías de impacto, así mismo, las unidades funcionales mayormente empleadas son el metro cúbico de agua tratada o la cantidad de agua residual producida por equivalente poblacional.

Referencias bibliográficas

1. Mogens Henze, Yves Comeau. Wastewater Characterization. In: Biological Wastewater Treatment. 2008. p. 33, 34.
2. IPCC. Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, [Internet]. Vol. 2, Ipcc - Sr15. 2018. Available from: www.environmentalgraphiti.org
3. Haddeland I, Heinke J, Biemans H, Eisner S, Flörke M, Hanasaki N, et al. Global water resources affected by human interventions and climate change. Proc Natl Acad Sci [Internet]. 2014 Mar 4;111(9):3251 LP – 3256. Available from: <http://www.pnas.org/content/111/9/3251.abstract>
4. Zhao C, Zhou J, Yan Y, Yang L, Xing G, Li H, et al. Application of coagulation/flocculation in oily wastewater treatment: A review. Sci Total Environ [Internet]. 2021;765. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85093947771&doi=10.1016%2Fj.scitotenv.2020.142795&partnerID=40&md5=0c58c28ad429a7b7dc801ddea5a54600>
5. de Oliveira Cardoso Nascimento C, Veit MT, Palácio SM, da Cunha Gonçalves G. Use of Natural Coagulants in the Removal of Color and Turbidity from Laundry Wastewater. Water Air Soil Pollut [Internet]. 2021;232(7). Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85109641518&doi=10.1007%2Fs11270-021-05253-6&partnerID=40&md5=6331ce5153b2cef98ea4bf534a8fa8c8>
6. López-Maldonado EA, Oropeza-Guzmán MT. Nejayote biopolyelectrolytes multifunctionality (glucurono feruloylated arabinoxylans) in the separation of hazardous metal ions from industrial wastewater. Chem Eng J [Internet]. 2021;423. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85106252888&doi=10.1016%2Fj.cej.2021.130210&partnerID=40&md5=5538d0963fcdab3218b4599545d4dd6>
7. Ida S, Eva T. Removal of heavy metals during primary treatment of municipal wastewater and possibilities of enhanced removal: A review. Water (Switzerland) [Internet]. 2021;13(8). Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85105077476&doi=10.3390%2Fw13081121&partnerID=40&md5=1124498ed69b444fdc20179bb044c2f7>
8. Guo J, Fan X, Wang J, Yu S, Laipan M, Ren X, et al. Highly efficient and selective recovery of Au(III) from aqueous solution by bithiourea immobilized UiO-66-NH₂:

- Performance and mechanisms. *Chem Eng J* [Internet]. 2021;425. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85107435124&doi=10.1016%2Fj.cej.2021.130588&partnerID=40&md5=1c687acc650cbc23892aeb1a714cd0d8>
9. Zhang X, Liu Y. Concurrent removal of Cu(II), Co(II) and Ni(II) from wastewater by nanostructured layered sodium vanadosilicate: Competitive adsorption kinetics and mechanisms. *J Environ Chem Eng* [Internet]. 2021;9(5). Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85109439793&doi=10.1016%2Fj.jece.2021.105945&partnerID=40&md5=927b3622126e903e892775d5c982e757>
 10. Mondal S, Das S, Gautam UK. Defect-rich, negatively-charged SnS₂ nanosheets for efficient photocatalytic Cr(VI) reduction and organic dye adsorption in water. *J Colloid Interface Sci* [Internet]. 2021;603:110–9. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85111067213&doi=10.1016%2Fj.jcis.2021.06.092&partnerID=40&md5=33e0a4981fc3e57313f81cfb8d77bcc6>
 11. Nakhate PH, Moradiya KK, Patil HG, Marathe K V, Yadav GD. Case study on sustainability of textile wastewater treatment plant based on lifecycle assessment approach. *J Clean Prod* [Internet]. 2020;245. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85075355259&doi=10.1016%2Fj.jclepro.2019.118929&partnerID=40&md5=5b22f4c6958011c6aad705de2d9a5923>
 12. Li P, Miao R, Wang P, Sun F, Li X-Y. Bi-metal oxide-modified flat-sheet ceramic membranes for catalytic ozonation of organic pollutants in wastewater treatment. *Chem Eng J* [Internet]. 2021;426. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85110408580&doi=10.1016%2Fj.cej.2021.131263&partnerID=40&md5=2a7dbde5d87121d444ba70e73de4210f>
 13. Chen M, Li X, Zhang Q, Wang C, Hu H, Wang Q, et al. Phosphate removal from aqueous solution by electrochemical coupling siderite packed column. *Chemosphere* [Internet]. 2021;280. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85105743476&doi=10.1016%2Fj.chemosphere.2021.130805&partnerID=40&md5=7f777e0e25674003522e7f5ea796e206>
 14. Choudhary V, Vellingiri K, Thayyil MI, Philip L. Removal of antibiotics from aqueous solutions by electrocatalytic degradation. *Environ Sci Nano* [Internet]. 2021;8(5):1133–76. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85106560509&doi=10.1039%2Fd0en01276a&partnerID=40&md5=166fdab1f36bd45e4bb68ec13b40e2e8>
 15. Sandoval MA, Salazar R. Electrochemical treatment of slaughterhouse and dairy wastewater: Toward making a sustainable process. *Curr Opin Electrochem* [Internet]. 2021;26. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85098111017&doi=10.1016%2Fj.coelec.2020.100662&partnerID=40&md5=4c0328ebe7d86b8f456d7bb43b32fc16>
 16. Grady CPL, Daigger GT, Love NG, Filipe CDM. Classification of Biochemical Operations. In: *Biological Wastewater Treatment* [Internet]. CRC Press; 2011. p. 3,4. Available from: <https://books.google.com.co/books?id=stjLBQAAQBAJ>
 17. Kumar M, Kuroda K, Joshi M, Bhattacharya P, Barcelo D. First comparison of conventional activated sludge versus root-zone treatment for SARS-CoV-2 RNA removal from wastewaters: Statistical and temporal significance. *Chem Eng J* [Internet]. 2021;425. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85107778189&doi=10.1016%2Fj.cej.2021.130635&partnerID=40&md5=2124a2ad88b73f1cbcd0b7e80e5b90e9>
 18. Xu X, Liu G-H, Li Q, Wang H, Sun X, Shao Y, et al. Optimization nutrient removal at different volume ratio of anoxic-to-aerobic zone in integrated fixed-film activated sludge (IFAS) system. *Sci Total Environ* [Internet]. 2021;795. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85109212828&doi=10.1016%2Fj>



- scitotenv.2021.148824&partnerID=40&md5=299cbe2b6160bd9eacabd9e7b7221e15
19. He Z-W, Jin H-Y, Ren Y-X, Yang W-J, Tang C-C, Yang C-X, et al. Stepwise alkaline treatment coupled with ammonia stripping to enhance short-chain fatty acids production from waste activated sludge. *Bioresour Technol* [Internet]. 2021;341. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85113408488&doi=10.1016%2Fj.biortech.2021.125824&partnerID=40&md5=9aac46c370bb0570f779135a5f6163cb>
 20. Mohammad Mirsoleimani Azizi S, Dastyar W, Meshref MNA, Maal-Bared R, Ranjan Dhar B. Low-temperature thermal hydrolysis for anaerobic digestion facility in wastewater treatment plant with primary sludge fermentation. *Chem Eng J* [Internet]. 2021;426. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85107944946&doi=10.1016%2Fj.cej.2021.130485&partnerID=40&md5=b052a0b6fc34beef46a37ce27bbc51cf>
 21. Musa MA, Idrus S. Physical and biological treatment technologies of slaughterhouse wastewater: A review. *Sustain* [Internet]. 2021;13(9). Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85105375312&doi=10.3390%2Fsu13094656&partnerID=40&md5=4a84d5bd781d2efdb46aef3560d09369>
 22. Omidinia-Anarkoli T, Shayannejad M. Improving the quality of stabilization pond effluents using hybrid constructed wetlands. *Sci Total Environ* [Internet]. 2021;801. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85113309473&doi=10.1016%2Fj.scitotenv.2021.149615&partnerID=40&md5=7b2392a47470205a0023c7427c4534d0>
 23. Liu T, Wang Y, Zeng Y, Li J, Yu Q, Wang X, et al. Effects from fe, p, ca, mg, zn and cu in steel slag on growth and metabolite accumulation of microalgae: A review. *Appl Sci* [Internet]. 2021;11(14). Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85111319589&doi=10.3390%2Fapp11146589&partnerID=40&md5=e8172cf2ca1601d6f7c97f393a30ab5e>
 24. Kholssi R, Ramos P V, Marks EAN, Montero O, Rad C. Biotechnological uses of microalgae: A review on the state of the art and challenges for the circular economy. *Biocatal Agric Biotechnol* [Internet]. 2021;36. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85112746646&doi=10.1016%2Fj.bcab.2021.102114&partnerID=40&md5=2d6f1095a573258db53a95aba136b280>
 25. Su Y, Jacobsen C. Treatment of clean in place (CIP) wastewater using microalgae: Nutrient upcycling and value-added byproducts production. *Sci Total Environ* [Internet]. 2021;785. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85105698125&doi=10.1016%2Fj.scitotenv.2021.147337&partnerID=40&md5=48729304cb3ef7865dd5e3fdb7c522d>
 26. Chia SR, Chew KW, Show PL, Yap YJ, Ong HC, Ling TC, et al. Analysis of Economic and Environmental Aspects of Microalgae Biorefinery for Biofuels Production: A Review. *Biotechnol J* [Internet]. 2018;13(6). Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85041506595&doi=10.1002%2Fbiot.201700618&partnerID=40&md5=74aec2dc32ad1ad7f031ed2476597678>
 27. Siahbalaee R, Kavooosi G, Noroozi M. Protein nutritional quality, amino acid profile, anti-amylase and anti-glucosidase properties of microalgae: Inhibition and mechanisms of action through in vitro and in silico studies. *LWT* [Internet]. 2021;150. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85109198023&doi=10.1016%2Fj.lwt.2021.112023&partnerID=40&md5=750dfac6d9612ca6da434f3a4ed1d88e>
 28. Saadaoui I, Rasheed R, Aguilar A, Cherif M, Al Jabri H, Sayadi S, et al. Microalgal-based feed: promising alternative feedstocks for livestock and poultry production. *J Anim Sci Biotechnol* [Internet]. 2021;12(1). Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85108162061&doi=10.1186%2Fs40104-021-00593-z&partnerID=40&md5=433b1f16612bbc1581e ce862be2e3052>

29. Tseng: C-C, Yeh H-Y, Liao Z-H, Hung S-W, Chen B, Lee P-T, et al. An in vitro study shows the potential of *Nostoc commune* (Cyanobacteria) polysaccharides extract for wound-healing and anti-allergic use in the cosmetics industry. *J Funct Foods* [Internet]. 2021;87. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85114956383&doi=10.1016%2Fj.jff.2021.104754&partnerID=40&md5=a85471d568f949527aeecaa6936cda84>
30. Tejada Carbajal EM, Martínez Hernández E, Fernández Linares L, Novelo Maldonado E, Limas Ballesteros R. Techno-economic analysis of *Scenedesmus dimorphus* microalgae biorefinery scenarios for biodiesel production and glycerol valorization. *Bioresour Technol Reports* [Internet]. 2020;12. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85096646972&doi=10.1016%2Fj.biteb.2020.100605&partnerID=40&md5=268f7f951bd077f31b6ded18527872a6>
31. Arun J, Gopinath KP, SundarRajan P, Felix V, JoselynMonica M, Malolan R. A conceptual review on microalgae biorefinery through thermochemical and biological pathways: Bio-circular approach on carbon capture and wastewater treatment. *Bioresour Technol Reports* [Internet]. 2020;11. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85086655241&doi=10.1016%2Fj.biteb.2020.100477&partnerID=40&md5=d9a85db9398aa63e8da94c0b06bec6de>
32. Muralikrishna I V, Manickam V. Chapter Five - Life Cycle Assessment. In: Muralikrishna I V, Manickam VBT-EM, editors. Butterworth-Heinemann; 2017. p. 57–75. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128119891000051>
33. Normalització OI per a la Normalisatie-Instituut N. International Standard ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment- Principles and Framework (ISO 14040:2006, IDT). [Internet]. Nederlands Normalisatie-Instituut; 2006. Available from: https://books.google.com.co/books?id=C_xSygEACAAJ
34. Natalia A, Adriana J-E, Howard R-M. Bibliometric analysis of bacterial resistance on periodontal disease. *J Appl Pharm Sci* [Internet]. 2021 Apr 5; Available from: https://www.japsonline.com/abstract.php?article_id=3357&sts=2
35. Gómez-Ríos D, Ramirez-Malule H. Bibliometric analysis of recent research on multidrug and antibiotics resistance (2017–2018). *J Appl Pharm Sci* [Internet]. 2019 May;9(5):112–6. Available from: https://www.japsonline.com/abstract.php?article_id=2917&sts=2
36. Centre of Science and Technology. VOSviewer : visualizing scientific landscapes [Internet]. VOSviewer. 2019. Available from: <https://www.vosviewer.com/>
37. Watson J, Wang T, Si B, Chen W-T, Aierzhati A, Zhang Y. Valorization of hydrothermal liquefaction aqueous phase: pathways towards commercial viability. *Prog Energy Combust Sci* [Internet]. 2020;77. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85076501340&doi=10.1016%2Fj.peccs.2019.100819&partnerID=40&md5=c93bc0e6ab772c25b20c4e8aeb29a751>
38. Medina-Martos E, Istrate I-R, Villamil JA, Gálvez-Martos J-L, Dufour J, Mohedano ÁF. Techno-economic and life cycle assessment of an integrated hydrothermal carbonization system for sewage sludge. *J Clean Prod* [Internet]. 2020;277. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85089189249&doi=10.1016%2Fj.jclepro.2020.122930&partnerID=40&md5=a62ca48a6d06671344f13263b12c1ed6>
39. Diaz-Elsayed N, Rezaei N, Ndiaye A, Zhang Q. Trends in the environmental and economic sustainability of wastewater-based resource recovery: A review. *J Clean Prod* [Internet]. 2020;265. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084082816&doi=10.1016%2Fj.jclepro.2020.121598&partnerID=40&md5=d211a899fa5aaf8faf30e05af0a93e26>
40. Pesqueira JFJR, Pereira MFR, Silva AMT. Environmental impact assessment of advanced

- urban wastewater treatment technologies for the removal of priority substances and contaminants of emerging concern: A review. *J Clean Prod* [Internet]. 2020;261. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85082389742&doi=10.1016%2Fj.jclepro.2020.121078&partnerID=40&md5=0656690a823e7871d88a201a4f05b04e>
41. Baaqel H, Díaz I, Tulus V, Chachuat B, Guillén-Gosálbez G, Hallett JP. Role of life-cycle externalities in the valuation of protic ionic liquids-a case study in biomass pretreatment solvents. *Green Chem* [Internet]. 2020;22(10):3132–40. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85086032391&doi=10.1039%2Fd0gc00058b&partnerID=40&md5=365f27986d9e7779a5110b65ada6ce68>
 42. Lee M, Lin Y-L, Chiueh P-T, Den W. Environmental and energy assessment of biomass residues to biochar as fuel: A brief review with recommendations for future bioenergy systems. *J Clean Prod* [Internet]. 2020;251. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85076572660&doi=10.1016%2Fj.jclepro.2019.119714&partnerID=40&md5=51f96791f53f456be28fe3a6d82c0ac6>
 43. Halleux H, Lassaux S, Germain A. Comparison of life cycle assessment methods, application to a wastewater treatment plant. In: *Proceedings of the 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, LCE 2006* [Internet]. Université de Liège, Laboratory of Industrial Chemistry, Belgium; 2006. p. 93–6. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85031951479&partnerID=40&md5=628df859c8527dc632c42ebfdef26d70>
 44. Tangsubkul N, Beavis P, Moore SJ, Lundie S, Waite TD. Life cycle assessment of water recycling technology. *Water Resour Manag* [Internet]. 2005;19(5):521–37. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-27744555398&doi=10.1007%2Fs11269-005-5602-0&partnerID=40&md5=904bb6c14250ceeac875a04c756ee0de>
 45. Machado AP, Urbano L, Brito AG, Janknecht P, Salas JJ, Nogueira R. Life cycle assessment of wastewater treatment options for small and decentralized communities [Internet]. Vol. 56, *Water Science and Technology*. University of Minho, Institute of Biotechnology and Bioengineering, Centre of Biological Engineering, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal; 2007. p. 15–22. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-34548261343&doi=10.2166%2Fwst.2007.497&partnerID=40&md5=707d1f575a13bf1640ba0571fcb35f8e>
 46. Ortiz M, Raluy RG, Serra L. Life cycle assessment of water treatment technologies: wastewater and water-reuse in a small town. *Desalination* [Internet]. 2007;204(1-3 SPEC. ISS.):121–31. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33846604654&doi=10.1016%2Fj.desal.2006.04.026&partnerID=40&md5=de749777bd272c84733ff1af4f70bb2c>
 47. Salgot M. Water reclamation, recycling and reuse: implementation issues. *Desalination* [Internet]. 2008;218(1–3):190–7. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-36549019538&doi=10.1016%2Fj.desal.2006.09.035&partnerID=40&md5=326d702440cb18e130a94ff4a6668841>
 48. Giri A, Khandayataray P, Murthy MK, Samal D. Biochemical and molecular identification of lipolytic bacteria isolated from beverage industrial wastewater and optimization of lipase-secreting bacteria. *Biomass Convers Biorefinery* [Internet]. 2021; Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85114164456&doi=10.1007%2Fs13399-021-01890-3&partnerID=40&md5=1cf4417486f41920a0359f76a86305be>
 49. Ferreira ACD, Oliveira S, Benassi RF. Comparison of alternative wastewater treatment plants using life cycle assessment (lca) [Internet]. Vol. 198 *SIST, Smart Innovation, Systems and Technologies*. Universidade Federal do ABC, Santo André, SP 09210-580, Brazil; 2021. p. 437–46. Available from: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85089716572&doi=10.1007%2F978-3-030-55374-6_43&partnerID=40&md5=9b0adcfee0259437725cbcb0e2b6e7d

50. Sarkar O, Katakojwala R, Venkata Mohan S. Low carbon hydrogen production from a waste-based biorefinery system and environmental sustainability assessment. *Green Chem* [Internet]. 2021;23(1):561–74. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85097101652&doi=10.1039%2Fd0gc03063e&partnerID=40&md5=c8fa5758a656222e11602f9782251ea4>
51. Calicioglu O, Femeena P V, Mutel CL, Sills DL, Richard TL, Brennan RA. Techno-economic Analysis and Life Cycle Assessment of an Integrated Wastewater-Derived Duckweed Biorefinery. *ACS Sustain Chem Eng* [Internet]. 2021;9(28):9395–408. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85111216920&doi=10.1021%2Facsuschemeng.1c02539&partnerID=40&md5=dc25e2ab3d1e7a721a7dacd34ee42462>
52. Satayavibul A, Ratanatamskul C. Life Cycle Assessment of a Novel Zero Organic-Waste Model Using the Integrated Anaerobic Digester and Oxidation-Ditch Membrane Bioreactor for High-rise Building Application. *Waste and Biomass Valorization* [Internet]. 2021;12(10):5425–36. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85102581218&doi=10.1007%2Fs12649-021-01418-w&partnerID=40&md5=0004ea245aba9d3bd25124fbcdd9bed0>
53. Kumar A. Current and Future Perspective of Microalgae for Simultaneous Wastewater Treatment and Feedstock for Biofuels Production. *Chem Africa* [Internet]. 2021;4(2):249–75. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85112477046&doi=10.1007%2Fs42250-020-00221-9&partnerID=40&md5=8d7289ee4cc5d4982c720a2b3da8537e>
54. Miller-Robbie L, Ulrich BA, Ramey DF, Spencer KS, Herzog SP, Cath TY, et al. Life cycle energy and greenhouse gas assessment of the co-production of biosolids and biochar for land application. *J Clean Prod* [Internet]. 2015;91:118–27. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84923116294&doi=10.1016%2Fj.jclepro.2014.12.050&partnerID=40&md5=496992db7ab542498ffef02b59bec659>
55. Puettmann M, Sahoo K, Wilson K, Oneil E. Life cycle assessment of biochar produced from forest residues using portable systems. *J Clean Prod* [Internet]. 2020;250. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85076498030&doi=10.1016%2Fj.jclepro.2019.119564&partnerID=40&md5=7b9a1e851927ac101adf079ad8aec486>
56. Roostaei J, Zhang Y. Spatially Explicit Life Cycle Assessment: Opportunities and challenges of wastewater-based algal biofuels in the United States. *Algal Res* [Internet]. 2017;24:395–402. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84994078658&doi=10.1016%2Fj.algal.2016.08.008&partnerID=40&md5=3fe53a22a71a1fff65d2997a76d06567>
57. Iribarren D, Peters JF, Dufour J. Life cycle assessment of transportation fuels from biomass pyrolysis. *Fuel* [Internet]. 2012;97:812–21. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84861198137&doi=10.1016%2Fj.fuel.2012.02.053&partnerID=40&md5=15ae33d4595d4751b0056fcf59d4eeec>
58. Huang X, Bai S, Liu Z, Hasunuma T, Kondo A, Ho S-H. Fermentation of pigment-extracted microalgal residue using yeast cell-surface display: Direct high-density ethanol production with competitive life cycle impacts. *Green Chem* [Internet]. 2020;22(1):153–62. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85077548080&doi=10.1039%2Fc9gc02634g&partnerID=40&md5=14b0005cd23d6f8052a2ff2f0b8b70e8>
59. Meneses-Jácome A, Diaz-Chavez R, Velásquez-Arredondo HI, Cárdenas-Chávez DL, Parra R, Ruiz-Colorado AA. Sustainable Energy from agro-industrial wastewaters in Latin-America. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 2016;56:1249–62. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84952361496&doi=10.1016%2Fj.rser.2015.12.036&partnerID=40&md5=8faaa7e1b466c0f1a089f4a4733ebb6b>



60. Padrón Páez JI, Carvalho A, Prado-Rubio OA, Román-Martínez A. Assessment of sustainable wastewater treatment networks design applying LCA [Internet]. Vol. 40, Computer Aided Chemical Engineering. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias Químicas, Av. Dr. Manuel Nava No. 6, Zona Universitaria, San Luis Potosí, S.L.P. 78210, Mexico; 2017. p. 2707–12. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85041569854&doi=10.1016%2FB978-0-444-63965-3.50453-0&partnerID=40&md5=2b97c754fdd3290acb735697f5756d9f>
61. Meneses-Jácome A, Ruiz-Colorado A. Eco-lca of biological wastewater treatments focused on energy recovery [Internet]. Advances in Science, Technology and Innovation. Grupo de Investigación en Bioprocesos y Flujos Reactivos, Universidad Nacional de Colombia—Sede Medellín, Carrera 80 No. 65-223, Núcleo Robledo, Medellín, Colombia; 2020. p. 349–52. Available from: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85098003065&doi=10.1007%2F978-3-030-13068-8_87&partnerID=40&md5=16496b67858b2e79ff908eec0bedbc21
62. Singh SP, Pandey A, Sharma R, Sharma MK. Life cycle assessment on membrane bio-reactor and activated sludge systems. *Indian J Environ Prot* [Internet]. 2019;39(11):989–94. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85076767139&partnerID=40&md5=edc0038c07c70b299793ccba6b998800>
63. Papa M, Alfonsín C, Moreira MT, Bertanza G. Ranking wastewater treatment trains based on their impacts and benefits on human health: A “biological Assay and Disease” approach. *J Clean Prod* [Internet]. 2016;113:311–7. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84961680146&doi=10.1016%2Fj.jclepro.2015.11.021&partnerID=40&md5=59806be3cb3b6f6a9c5f03ca5f5a6ca8>
64. Tatiana F, Paula P, Vivian B, Rigoberto P, Jannet O, Paola A. Life cycle assessment to identify environmental improvements in an aerobic waste water treatment plant. *Chem Eng Trans* [Internet]. 2016;49:493–8. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84969514485&doi=10.3303%2FCET1649083&partnerID=40&md5=f80abbc3fb127e52bab8e2a94e5dc7d8>
65. Lopsik K. Life cycle assessment of small-scale constructed wetland and extended aeration activated sludge wastewater treatment system. *Int J Environ Sci Technol* [Internet]. 2013;10(6):1295–308. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84887450719&doi=10.1007%2Fs13762-012-0159-y&partnerID=40&md5=2ec390c19a6b4d6621de555f5b13ffe5>
66. Banti DC, Tsangas M, Samaras P, Zorpas A. LCA of a membrane bioreactor compared to activated sludge system for municipal wastewater treatment. *Membranes (Basel)* [Internet]. 2020;10(12):1–15. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85097827575&doi=10.3390%2Fmembranes10120421&partnerID=40&md5=86728dd7521bf41c7a4a58091b5d16cc>
67. Yildirim M, Topkaya B. Assessing environmental impacts of wastewater treatment alternatives for small-scale communities. *Clean - Soil, Air, Water* [Internet]. 2012;40(2):171–8. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84856350593&doi=10.1002%2Fclen.201000423&partnerID=40&md5=5cad9064d31de7e0d144444a0ebe92a9>
68. Garfí M, Flores L, Ferrer I. Life Cycle Assessment of wastewater treatment systems for small communities: Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds. *J Clean Prod* [Internet]. 2017;161:211–9. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85025455071&doi=10.1016%2Fj.jclepro.2017.05.116&partnerID=40&md5=7d0e56bf3a566cc5545d24c1376ea855>
69. De Feo G, Ferrara C. A procedure for evaluating the most environmentally sound alternative between two on-site small-scale wastewater treatment systems. *J Clean Prod* [Internet]. 2017;164:124–36. Available from: <https://www>.

scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85027530210&doi=10.1016%2Fj.jclepro.2017.06.205&partnerID=40&md5=a3f622ac76b8e96d9ee9c50fafa66c5e

70. Arias A, Feijoo G, Moreira MT. Environmental profile of decentralized wastewater treatment strategies based on membrane technologies. In: *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Advanced Membrane Separation Processes for Sustainable Water and Wastewater Management - Case Studies and Sustainability Analysis* [Internet]. Department of Chemical Engineering, Universidade de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, Galicia, Spain; 2020. p. 259–87. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85092656625&doi=10.1016%2FB978-0-12-819854-4.00011-3&partnerID=40&md5=533c1f92ca119171a6fd623114697f7c>
71. Lanko I, Flores L, Garfi M, Todt V, Posada JA, Jenicek P, et al. Life cycle assessment of the mesophilic, thermophilic, and temperature-phased anaerobic digestion of sewage sludge. *Water (Switzerland)* [Internet]. 2020;12(11):1–20. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85096358873&doi=10.3390%2Fw12113140&partnerID=40&md5=fd15a16e6315ee92709667785cb07a9b>
72. Arias A, Feijoo G, Moreira MT. Linking organic matter removal and biogas yield in the environmental profile of innovative wastewater treatment technologies. *J Clean Prod* [Internet]. 2020;276. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85091646331&doi=10.1016%2Fj.jclepro.2020.124292&partnerID=40&md5=21f7d5a10fbb7bde4e59225ed17d888c>
73. Bagley DM. Life cycle analysis of municipal wastewater treatment. In: *2000 Annual Conference Abstracts - Canadian Society for Civil Engineering* [Internet]. Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada; 2000. p. 93. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-21844431886&partnerID=40&md5=2c4905f33bea02d770609da3f4ff2826>
74. Pretel R, Robles A, Ruano M V, Seco A, Ferrer J. Economic and environmental sustainability of submerged anaerobic MBR-based (AnMBR-based) technology as compared to aerobic-based technologies for moderate-/high-loaded urban wastewater treatment. *J Environ Manage* [Internet]. 2016;166:45–54. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84944080739&doi=10.1016%2Fj.jenvman.2015.10.004&partnerID=40&md5=de44fa2de04fc00eb100242d1634e459>
75. Magalhães IB, Ferreira J, de Siqueira Castro J, Assis LR de, Calijuri ML. Technologies for improving microalgae biomass production coupled to effluent treatment: A life cycle approach. *Algal Res* [Internet]. 2021 Jul;57:102346. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221192642100165X>
76. De Benedetti B, Barbera AC, Freni P, Tecchio P. Wastewater valorization adopting the microalgae accelerated growth. *Desalin Water Treat* [Internet]. 2015;53(4):1001–11. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84922479081&doi=10.1080%2F19443994.2013.848412&partnerID=40&md5=4694820e3a6ee9aee353866ae90fe7e8>
77. Bussa M, Zollfrank C, Röder H. Life-cycle assessment and geospatial analysis of integrating microalgae cultivation into a regional economy. *J Clean Prod* [Internet]. 2020 Jan;243:118630. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85072762674&doi=10.1016%2Fj.jclepro.2019.118630&partnerID=40&md5=e454d77404b7a56dd8db6dc2a239eada>
78. Li P, Yuan X, Luo Y. Life Cycle Assessment for Carbon Balance of a Wastewater Treatment Integrated Microalgae Biofuel Production Process. In: *Computer Aided Chemical Engineering* [Internet]. 2020. p. 1699–704. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85092798590&doi=10.1016%2FB978-0-12-823377-1.50284-6&partnerID=40&md5=c52d7aec4419032e763d116a17ca9cd0>

79. Raghuvanshi S, Bhakar V, Chava R, Sangwan KS. Comparative Study Using Life Cycle Approach for the Biodiesel Production from Microalgae Grown in Wastewater and Fresh Water. In: Procedia CIRP [Internet]. Department of Chemical Engineering, Birla Institute of Technology and Science Pilani, Pilani Campus333031, India; 2018. p. 568–72. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85047055622&doi=10.1016%2Fj.procir.2017.11.030&partnerID=40&md5=8d860b5cbdb80bab8a0181a9b2fc0834>
80. Maga D. Life cycle assessment of biomethane produced from microalgae grown in municipal waste water. Biomass Convers Biorefinery [Internet]. 2017 Mar 13;7(1):1–10. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85013074796&doi=10.1007%2Fs13399-016-0208-8&partnerID=40&md5=9a8041359773f5c8fa0a6e01608563a5>