

## Biorreactores: Análisis bibliométrico de sustratos y biomasa

## Bioreactors: Bibliometric analysis of substrates and biomass

J. J. A. Flores Cuautle <sup>a, b</sup>, G. M. González Guerra <sup>c, d</sup>, F. I. Gómez Castro <sup>d</sup>, G. Lara Hernández <sup>b, \*</sup>

<sup>a</sup> Investigadores e Investigadoras x México, Secihti- I.T. Orizaba, 94320, Orizaba, Veracruz, México.

<sup>b</sup> División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/I.T. Orizaba, 94320, Orizaba, Veracruz, México.

<sup>c</sup> Investigadores e Investigadoras x México, Secihti - Universidad de Guanajuato, 36050, Guanajuato, Guanajuato, México.

<sup>d</sup> Ingeniería Química DCN, Universidad de Guanajuato, 36050, Guanajuato, Guanajuato, México.

### Resumen

Un biorreactor es un sistema diseñado para replicar condiciones y reacciones biológicas en un ambiente controlado, con la finalidad de aprovechar la actividad química y bioquímica de organismos vivos. La interacción física y química entre la biomasa y la población microbiana permite estudiar y replicar las reacciones biológicas ocurridas al interior de los biorreactores. En este trabajo se presenta una revisión de tipo narrativa, elaborada mediante análisis bibliométrico, sobre el funcionamiento de los biorreactores, así como de las propiedades de los sustratos empleados y finalmente se presentan los desafíos técnicos asociados a la implementación de esta tecnología con la finalidad de fomentar una discusión sobre las líneas de investigación a este respecto.

### Palabras clave:

Biorreactores, Análisis bibliométrico, Bioprocesos, Interacción biomasa-sustrato, desafíos tecnológicos.

### Abstract

A bioreactor is a system designed to replicate biological conditions and reactions in a controlled environment to harness the chemical and biochemical activity of living organisms. The physical and chemical interactions between the bacteria and the employed biomass enables the study and replication of the biological reactions that occur in the bioreactor. This work presents a narrative review, based on a bibliometric analysis, of bioreactor working principles and substrate properties, and introduces the forthcoming technical challenges to promote discussion of research paths in this respect.

### Keywords:

Bioreactors, Bibliometric analysis, bioprocess, Biomass-substrate interaction, Technological challenges.

### 1. Introducción. Descripción general de reactores y biorreactores

Un biorreactor es un sistema versátil diseñado para soportar y mantener ambientes biológicamente activos, incluyendo sistemas naturales, manufacturados y creados artificialmente. Su principal función es operar como un reactor químico que reproduce condiciones y reacciones biológicas, permitiendo el desarrollo controlado de procesos químicos y bioquímicos relacionados con organismos vivos.

En general, los biorreactores presentan una geometría cilíndrica vertical, ya que esta configuración favorece la distribución homogénea del flujo, la transferencia de masa y la resistencia mecánica frente a las presiones generadas durante la operación. Dependiendo de la aplicación y de las condiciones de trabajo, los biorreactores pueden fabricarse con materiales como acero inoxidable, vidrio, acrílico, PVC o polietileno de alta densidad, seleccionados por su resistencia química, estabilidad mecánica y baja interacción con los procesos biológicos y

químicos desarrollados en el sistema. Por otro lado, sus dimensiones pueden variar considerablemente, desde reactores de laboratorio con capacidades de algunos litros hasta sistemas industriales de varios metros cúbicos. Al respecto, parámetros dimensionales como la relación altura-diámetro (H/D), el volumen útil y la superficie específica del medio soporte representan factores importantes para optimizar la hidrodinámica, la transferencia de nutrientes y la formación de biopelículas a partir de microorganismos dentro del reactor (Palladino et al., 2024; Matos et al., 2011). Los biorreactores se pueden clasificar en dos tipos de sistemas principales: activos y pasivos; los reactores de tratamiento pasivo incluyen los reactores de agitación continua, los de contacto anaeróbico y los de filtro anaeróbico de flujo ascendente. Por otro lado, los de tratamiento activo emplean técnicas que incluyen la inyección de sustrato, así como la implementación de barreras reactivas permeables (Bagheri Novair et al., 2024).

Las características más importantes con las que debe de contar un biorreactor son: alta porosidad y gran superficie específica,

\*Autor para la correspondencia: larag\_139@hotmail.com

Correo electrónico: jlflores\_cuautle@hotmail.com (José de Jesús Agustín Flores Cuautle), gm.gonzalezguerra@ugto.mx (Guillermo M. González Guerra), fgomez@ugto.mx (Fernando I. Gómez Castro)

estas propiedades permiten la colonización microbiana y la formación de una biopelícula, características esenciales para una operación eficiente del biorreactor (Barla et al., 2025; Ramírez-López et al., 2003). Respecto al sustrato, una densidad aparente baja y una alta fracción de huecos facilitan el flujo de agua y el transporte de nutrientes, con el consecuente beneficio para la actividad microbiana (Ramírez-López et al., 2003). La estabilidad mecánica y térmica permiten que el material presente en el biorreactor soporte las temperaturas de trabajo, así como las fluctuaciones de temperatura sin degradarse (Barooah et al., 2024). En este trabajo se presenta una breve introducción al funcionamiento de los biorreactores, las propiedades requeridas para los sustratos, así como los principales desafíos técnicos asociados a la implementación de estas tecnologías. Dado que se trata de una revisión de tipo narrativa, no se aplicó una metodología PRISMA (Page et al., 2021), sin embargo, si se emplearon técnicas bibliométricas para llevar a cabo este análisis.

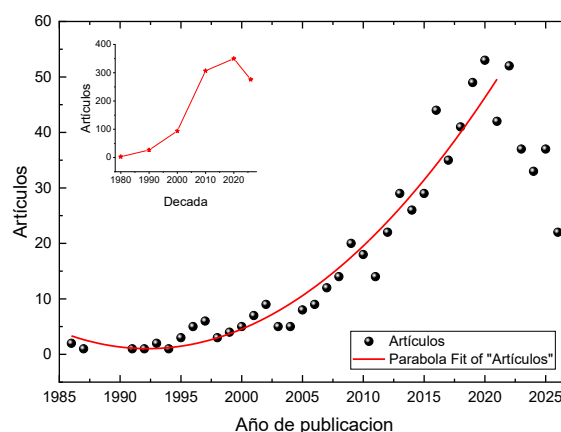
## 2. Revisión y análisis bibliométrico

Esta revisión se hizo a partir de una búsqueda estructurada en donde se emplearon las siguientes palabras clave: *Reactor*, *bioreactor*, *organic*, y *residues*, empleando operadores Booleanos con lo cual la cadena de búsqueda quedó de la siguiente forma: *bioreactor\* AND organic AND residue\**. La búsqueda fue llevada a cabo sobre los metadatos, en tanto que las bases de datos empleadas fueron Web of Science (WOS) y SCOPUS. Con la finalidad de evitar cualquier sesgo no se incluyó ningún otro filtro. Los resultados de las búsquedas se procesaron para evitar duplicidad de datos, esto se llevó a cabo empleando el paquete de Bibliometrix bajo ambiente R® (Aria & Cuccurullo, 2017). A partir de la búsqueda estructurada se identificaron 901 trabajos (750 scopus, 151 WOS), los cuales se redujeron a 791 después de eliminar duplicados y finalmente a 706 al eliminar artículos no disponibles.

El análisis bibliométrico realizado no tiene únicamente un propósito descriptivo, sino interpretativo. En la literatura sobre biorreactores, un gran número de los estudios se enfoca en el empleo de biomasa y residuos orgánicos como sustratos para procesos de biodegradación, producción de energía y tratamiento de aguas. Esta heterogeneidad en la diversidad de materiales empleados, así como las diferencias en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, dificultan establecer relaciones claras entre el tipo de sustrato, el desempeño microbiano y la eficiencia del biorreactor. Por ello, mediante el análisis de frecuencia de términos y el mapeo de proximidades, se busca identificar los principales enfoques relacionados con las propiedades del sustrato, la interacción biomasa-microorganismo y las aplicaciones más recurrentes de los biorreactores.

## 3. Resultados

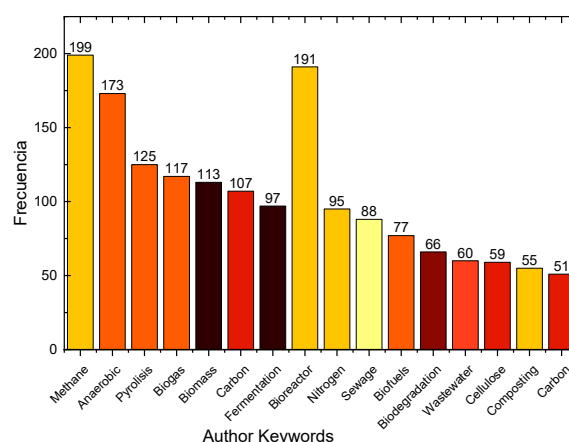
En este sentido, la Figura 1 muestra la evolución del número de artículos publicados respecto al tema de investigación dentro de las bases de datos mencionadas, siendo las primeras apariciones en el año 1986. Respecto al número de publicaciones, es posible notar que el tema sigue en crecimiento con una tasa estimada aproximada del 7%.



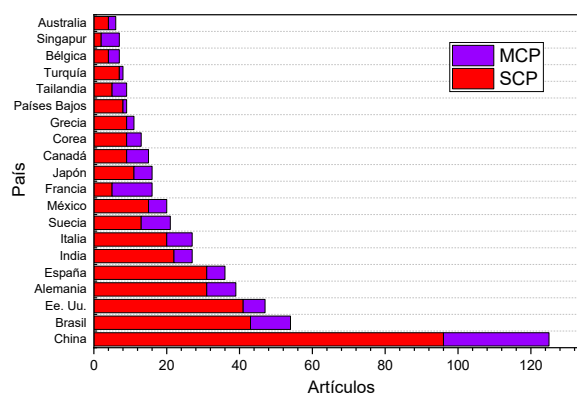
**Figura 1:** Evolución de número de publicaciones relacionadas con biorreactores a través del tiempo, la línea roja muestra la tendencia del número de publicaciones.

Con los 706 artículos incluidos en el análisis se llevó a cabo un análisis de frecuencia de términos, esto se presenta en la Figura 2, este análisis se llevó a cabo mediante las palabras clave propuestas por los autores. En este análisis se retiraron términos comunes tales como “artículo”, “review” entre otras. De igual forma se fusionaron datos con la misma raíz como en el caso de “bioreactor” y “bioreactors”.

Adicionalmente se determinaron los países con mayor número de publicaciones al respecto del tema, esto se puede ver en la Figura 3 donde es posible observar que China es el país con mayor número de publicaciones sobre el tema con 125 trabajos publicados, en tanto que México se encuentra en la novena posición con 20 trabajos publicados.



**Figura 2:** Palabras clave más frecuentes.



**Figura 3:** Número de artículos publicados por país, SCP: Artículos publicados por autores de un mismo país, MCP: Artículos publicados mediante colaboración de múltiples países.



colonias microbianas y permiten que las enzimas tengan contacto con el sustrato (Vavilin et al., 2008). En el caso de los reactores anaeróbicos, los poros son importantes para la difusión de oxígeno en el sustrato. Una baja porosidad puede resultar en una baja eficiencia, producción de sulfuro de hidrógeno, o metano.

La porosidad del sustrato también desempeña un papel importante en la estabilidad hidrodinámica del biorreactor. Una estructura con una adecuada fracción de huecos favorece el paso de fluidos y gases, reduciendo la formación de gradientes de presión y disminuyendo la tendencia a la compactación del material. Por el contrario, una baja porosidad puede favorecer la compactación progresiva del sustrato, limitando el contacto entre los microorganismos, los nutrientes y la fase fluida, además de propiciar la formación de rutas preferenciales de flujo que reducen la eficiencia del proceso (Kaparaju et al., 2009). Lo que conlleva a una estructura porosa estable contribuye a mantener una distribución más uniforme de los fluidos dentro del biorreactor.

La materia prima con las características deseables para emplearse en un biorreactor debe presentar una elevada porosidad y una amplia área superficial específica, ya que estas características favorecen la colonización microbiana y la transferencia de masa. Diversos materiales soporte utilizados en biorreactores presentan porosidades que pueden variar desde aproximadamente 58% hasta más de 97%, mientras que las áreas superficiales específicas reportadas oscilan desde 16.4 m<sup>2</sup>/g hasta valores superiores a 20,000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, dependiendo de la naturaleza y geometría del material empleado (Tong et al., 2021; Deena et al., 2022).

3.3. Propiedades químicas y biológicas

Las propiedades químicas y bioquímicas de la materia prima son consideradas entre los factores más importantes para determinar el rendimiento de los biorreactores, así como los productos obtenidos. A partir de las propiedades químicas se determina la tasa de degradación, la composición de los productos finales, la ruta metabólica, así como una potencial inhibición de los compuestos de entrada.

La composición elemental de los productos de entrada y en particular el contenido de nitrógeno y carbono determina la tasa de crecimiento microbiano, así como el rendimiento de la biomasa. Por otro lado, el contenido de lignina, celulosa, hemicelulosa, lípidos y proteínas determina la complejidad de la reacción, así como el tipo de bacteria o enzima necesaria para degradar el material de entrada. La composición química también determina la actividad microbiana, esto tomando en cuenta que algunos compuestos inhibidores pueden estar presentes en el material de entrada.

En particular, la razón Carbono/Nitrógeno (C/N) determina la eficiencia del metabolismo microbiano (Choi et al., 2008). Cuando la relación C/N es superior a 30, el nitrógeno puede convertirse en un nutriente limitante, reduciendo la velocidad de degradación del sustrato y provocando que parte del carbono disponible no sea incorporado a la biomasa microbiana. Como consecuencia, pueden acumularse compuestos intermedios de degradación y prolongarse los tiempos requeridos para la bioconversión de la materia orgánica dentro del biorreactor.

Por lo tanto, el desempeño de un biorreactor no depende de un solo factor, sino de la interacción entre propiedades físicas, químicas y biológicas en el sistema. Parámetros como la porosidad del sustrato, su biocompatibilidad, la disponibilidad de nutrientes y la estabilidad del medio influyen directamente en la colonización microbiana, la formación de biopelículas y la eficiencia global del proceso.

En la Tabla 2 se resumen las principales características que deben considerarse en el diseño y operación de biorreactores, así como su impacto sobre la actividad microbiana y el rendimiento en los biorreactores. Lo anterior nos permite identificar la importancia de cada propiedad y su contribución para crear un ambiente favorable para los microorganismos responsables de la bioconversión.

Tabla 2: Principales propiedades físicas, químicas y biológicas de los sustratos y materiales soportes empleados en biorreactores (elaboración propia).

| Característica                   | Importancia en biorreactores                                    | Referencia                                                 |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Alta porosidad/Área superficial  | Favorece la formación de biopelículas y crecimiento microbiano. | (Barla et al., 2025; Ramírez-López et al., 2003)           |
| Biocompatibilidad / No toxicidad | Previene la inhibición de la actividad microbiana.              | (Li et al., 2020; Tandon et al., 2013; Kiaie et al., 2017) |
| Biodegradabilidad                | Permite el consumo gradual por parte de los microbios.          | (Li et al., 2020; Alkarim et al., 2023)                    |
| Nutrientes suplementarios        | Favorecen la proliferación microbiana                           | (Barla et al., 2025; Ramírez-López et al., 2003)           |
| Estabilidad mecánica/Térmica     | Permite soportar las condiciones experimentales.                | (Barooh et al., 2024; Li et al., 2020)                     |
| Propiedades superficiales        | Facilitan la formación y adhesión de biopelículas               | (Barla et al., 2025; Alkarim et al., 2023)                 |
| pH y capacidad tampón            | Mantiene un ambiente microbiano estable                         | (Ramírez-López et al., 2003)                               |

3.4. Tipos de sustrato

Los sustratos pueden clasificarse en varias formas, la primera es atendiendo al estado de agregación que presentan. Con base en este criterio suelen dividirse en: líquidos (glucosa, sacarosa, lactosa, glicerol, aceites, etc.) (Tomotani et al., 2005; Lima et al., 2013), sólidos (cáscara de arroz, trigo entre otros) (Gutiérrez-Quirós et al., 2024; Fu et al., 2014; Piedrahita Aguirre, 2013), gases (metano, dióxido de carbono, hidrógeno entre otros) y mezclas de dos o más fases. Por otro lado, los sustratos pueden clasificarse tomando en cuenta los grupos funcionales de los

cuales están formados, esta clasificación proporciona información para entender la ruta metabólica durante la fermentación.

La Tabla 3 muestra algunos ejemplos y aplicaciones típicas de sustratos en biorreactores, la tabla está basada en el grupo funcional principal. Los alcoholes se caracterizan por contar con uno o más grupos hidroxilos, los cuales son oxidados por gran variedad de microorganismos. Por otro lado, los ácidos orgánicos se distinguen por la presencia del grupo funcional carboxilo (-COOH). Este tipo de sustratos puede contribuir a la reducción de sulfatos, al control del pH y al suministro de carbono para diversas comunidades microbianas. Finalmente, los carbohidratos constituyen uno de los grupos de sustratos ampliamente utilizados en biorreactores. Se caracterizan por presentar múltiples grupos hidroxilo y un grupo carbonilo en forma de aldehído o cetona. Los carbohidratos simples, comúnmente denominados azúcares, incluyen monosacáridos y disacáridos, mientras que los polisacáridos corresponden a estructuras de mayor complejidad como el almidón y la celulosa.

**Tabla 3:** Grupo funcional principal en el sustrato (elaboración propia).

| Tipo de sustrato   | Grupo funcional | Ejemplos                                                       | Aplicaciones típicas                                     |
|--------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Alcoholes          | -OH             | Etanol, metanol, glicerol                                      | Reducción de sulfatos                                    |
| Ácidos orgánicos   | -COOH           | Lactato, acetato, propionato, butirato                         | Reducción de sulfatos, celdas de combustible microbianas |
| Carbohidratos      | -OH, -CHO, -CO- | Glucosa, fructuosa, sacarosa, maltosa                          | Celdas de combustible microbianas                        |
| Esteres            | -COO-           | Aceite de soya                                                 | Fuente de carbono                                        |
| Sólidos orgánicos  |                 | Madera, materiales lignocelulósicos                            | Desnitrificación                                         |
| Residuos complejos |                 | Residuos alimenticios, lodos, estiércol, residuos industriales | Digestión anaerobia                                      |
| Sustratos gaseosos |                 | H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>                               | Reducción de sulfatos                                    |

En la Tabla 4 se presenta un resumen de las principales características de los sustratos y materiales soporte empleados en biorreactores, así como su influencia sobre la actividad microbiana y los procesos de bioconversión. Debido la diversidad de aplicaciones, condiciones de operación y potenciales productos, no existe un sustrato universalmente óptimo para todos los sistemas. Sin embargo, ciertas características pueden favorecer el desempeño del proceso. En general, los sustratos que pueden ser metabolizados directamente por los microorganismos tienden a presentar mayores eficiencias de conversión, ya que disminuyen la formación de productos secundarios y reducen la necesidad de etapas metabólicas adicionales. Por otro lado, la selección del

sustrato debe considerar las rutas metabólicas involucradas en la formación del producto de interés, debido a que algunos compuestos pueden favorecer vías alternativas que disminuyen el rendimiento deseado. Finalmente, ciertos sustratos pueden actuar como precursores directos de los productos finales, simplificando las rutas de transformación biológica y favoreciendo una mayor eficiencia en la conversión del sustrato.

**Tabla 4:** Influencia de las propiedades de los sustratos y materiales soporte en el desempeño de los biorreactores.

| Propiedad                 | Efecto en el desempeño del biorreactor                    | Referencia                         |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Tamaño/Tipo de partícula  | Influye en la retención y la desnitrificación             | (López-Ponnada et al., 2017)       |
| Contracción del portador  | Reduce la superficie específica y disminuye la eficiencia | (Alitaleshi et al., 2024)          |
| Estructura química        | Determina solubilidad                                     | (Abdelhamid, 2025)                 |
| Composición de la biomasa | Afecta la eficiencia de la bioconversión                  | (Jofre et al., 2025)               |
| Biodegradabilidad         | Influye en los flujos y el material residual              | (Grard et al., 2025; Taylor, 2001) |
| Solubilidad/Afinidad      | Controla las tasas de transferencia de masa               | (Abdelhamid, 2025; Soreanu, 2016)  |

3.5. Discusión: Aplicaciones emergentes y desafíos técnicos

Actualmente, la ingeniería de biorreactores desempeña un papel fundamental en la transición hacia modelos de economía circular orientados a la gestión de residuos y al tratamiento de aguas residuales, donde los flujos de contaminación son transformados en recursos con valor agregado. Sin embargo, el éxito de estas tecnologías depende en gran medida de las características físicas, químicas y biológicas de los sustratos empleados. Propiedades como el tamaño de partícula, la biodegradabilidad, la composición química, la solubilidad y la disponibilidad de nutrientes influyen directamente en la actividad microbiana y, por consiguiente, en la eficiencia de los procesos de bioconversión. En este contexto, tecnologías como los digestores anaerobios, los biorreactores de lecho móvil (MBBR), los sistemas de membranas biológicas (MBR) y los sistemas bioelectroquímicos han demostrado una elevada capacidad para la remoción de contaminantes, recuperación de nutrientes y aprovechamiento energético, contribuyendo al cumplimiento de diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente los ODS 6, 7, 9 y 11 (Wada et al., 2026).

La relación entre las propiedades del sustrato y el desempeño del biorreactor es especialmente importante en los sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales. Los materiales soporte con elevada área superficial y porosidad favorecen la formación de biopelículas estables, mejorando la transferencia de masa y el

contacto entre los microorganismos y los contaminantes presentes en el medio. Asimismo, la biodegradabilidad y composición química de los sustratos determinan la velocidad de degradación y la estabilidad de los consorcios microbianos responsables del tratamiento. Por ejemplo, los sistemas de acuicultura con recirculación integrados a biorreactores, combinados con tecnologías basadas en biopelículas o microalgas, han demostrado reducir significativamente el consumo de agua y la descarga de efluentes al ambiente (Alebachew, 2025). Sin embargo, aún existen desafíos relacionados al elevado consumo energético de ciertas tecnologías, particularmente en los procesos de limpieza y regeneración de sistemas MBR, así como a la necesidad de optimizar su operación en regiones con recursos limitados (Gao et al., 2025).

Por otro lado, los residuos agroalimentarios constituyen uno de los grupos de sustratos con mayor potencial para la producción de biocombustibles y bioproductos. Su aprovechamiento depende directamente de propiedades como la composición de la biomasa, la biodegradabilidad y la presencia de compuestos fácilmente metabolizables. Los residuos de frutas y vegetales suelen presentar contenidos elevados de carbohidratos y otros compuestos orgánicos susceptibles de ser transformados por microorganismos en bioetanol, ácidos orgánicos, biogás y otros productos de interés. En este sentido, Villagómez-Ibarra et al. (2023) demostraron el potencial de mezclas de residuos agroalimentarios procedentes de mercados y centrales de abasto para la producción simultánea de biocombustibles y ácidos orgánicos, señalando además la importancia de integrar estos residuos dentro de esquemas de valorización y aprovechamiento sustentable.

Con lo anterior, se puede resaltar cómo las características del sustrato condicionan las aplicaciones finales y permiten transformar corrientes residuales en productos de valor agregado. De esta manera, la correcta selección del sustrato, junto con la optimización de las condiciones de operación, constituye uno de los principales retos tecnológicos para maximizar la eficiencia de los procesos de bioconversión. Aunque siguen persistiendo desafíos relacionados con la transferencia tecnológica, la optimización de procesos y el establecimiento de políticas que impulsen la valorización de residuos, los biorreactores continúan posicionándose como una de las alternativas más prometedoras para avanzar hacia sistemas productivos más sostenibles y alineados con los principios de la economía circular.

#### 4. Conclusiones

Tal como se ha mencionado, los biorreactores ofrecen significativas ventajas en términos de control, productividad, versatilidad en aplicaciones industriales y medioambientales. Sin embargo, su uso está asociado a desventajas insalvables, hasta el momento, como lo son los altos costos en su puesta en marcha, elevados costos de mantenimiento, así como una compleja operación. Respecto al uso de biorreactores en generación energética a partir de material orgánico, el elevado consumo energético plantea una disyuntiva, así como la necesidad de un análisis sobre la eficiencia y costos finales de la energía obtenida por este tipo de métodos. Si bien es cierto que el uso de biorreactores puede representar una solución en el tratamiento de residuos orgánicos, así como en el tratamiento de aguas, sobre todo de uso residual, no es menos cierto que la complejidad del proceso, los altos costos de mantenimiento, así como la estabilidad a largo plazo son factores que limitan su uso extensivo o a gran

escala. El solventar estos inconvenientes para reducirlos es pues el objetivo que se debe plantear en las futuras investigaciones al respecto.

#### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

#### Referencias

- Abdelhamid, H. N., (2025). Organic-based nanostructure for chemosensors and biosensors: a review. *Microchemical Journal* 215, 114383. DOI: 10.1016/j.microc.2025.114383
- Alitalashi, F., Daghbandan, A., Pendashteh, A., (2024). Performance of rice husk biocarrier on ammonia nitrogen removal in the MBBR treating aquaculture wastewater using biological attached growth process: Performance and kinetic study. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 12, 111446. DOI: 10.1016/j.jece.2023.111446
- Alebachew, M., (2025). Advances in bioreactor technologies for sustainable aquaculture water treatment. *American Journal of Bioscience and Bioengineering* 13, 92–98. DOI: 10.11648/j.bio.20251305.11
- Alkarim, I., Wong, F. W. F., Mohamed, M. S., Halim, M., Ariff, A. B., (2023). A review on the application of biofilm-based bioreactors in the removal of pharmaceutically active compounds (PhACs) from wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 11, 110226. DOI: 10.1016/j.jece.2023.110226
- Aria, M., Cuccurullo, C., (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics* 11, 959–975. DOI: 10.1016/j.joi.2017.08.007
- Bagheri Novair, S., Biglari, Z., Asgari Lajayer, B., Shu, W., Price, G. W., (2024). The role of sulphate-reducing bacteria (SRB) in bioremediation of sulphate-rich wastewater: focus on the source of electron donors. *Process Safety and Environmental Protection* 184, 190–207. DOI: 10.1016/j.psep.2024.01.103
- Barla, R. J., Gupta, S., Raghuvanshi, S., (2025). Industrial scale-up of flue gas bio-mitigation with chemolithotrophs in packed bed reactors: exploring metabolite synthesis, mass transfer, and techno-economic analysis. *Chemosphere* 372, 144089. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144089
- Barooah, M., et al., (2024). New generation mixed matrix membrane for CO<sub>2</sub> separation: transition from binary to quaternary mixed matrix membrane. *Chemosphere* 354, 141653. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.141653
- Chen, S., et al., (2014). Promoting interspecies electron transfer with biochar. *Scientific Reports* 4, 5019. DOI: 10.1038/srep05019
- Choi, C., Lee, J., Lee, K., Kim, M., (2008). The effects on operation conditions of sludge retention time and carbon/nitrogen ratio in an intermittently aerated membrane bioreactor (IAMBR). *Bioresource Technology* 99, 5397–5401.
- Deena, S. R., et al., (2022). Efficiency of various biofilm carriers and microbial interactions with substrate in moving bed-biofilm reactor for wastewater treatment: A review. *Bioresource Technology*, 359, 127421. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127421
- Fu, D., Kai, H., Singh, R. P., Ducoste, J. J., (2014). Enhanced nitrogen removal by rice husk amended dynamic membrane bioreactors. *Journal of Environmental Engineering* 140, 04014035.
- Gao, T., Jin, Y., Xiao, K., (2025). Techno-economic and environmental impact assessment of membrane bioreactors for wastewater treatment: A Review. *Engineering*. DOI: 10.1016/j.eng.2025.05.001
- Grard, B. J. P., Barrier-Guillot, A., Chenu, C., (2025). Early pedogenesis of a young Technosol made from organic wastes. *Geoderma* 459, 117343. DOI: 10.1016/j.geoderma.2025.117343
- Gutiérrez-Quirós, et al., (2024). Improved productivity and dye removal performance of *Trametes versicolor* pellets using rice husk as a co-substrate. *Journal of Microbiological Methods* 223, 106976.

- Hendriks, A. T. W. M., Zeeman, G., (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 100, 10–18. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.05.027
- Jofre, F. M., Prado, C. A., Shibukawa, V. P., Rodrigues, B. G., Sarangi, P. K., Chandel, A. K., (2025). Critical analysis of process parameters towards smart bioreactors development in biorefinery for biorenewables production. *International Journal of Biological Macromolecules* 305, 140957. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.140957
- Kaparaju, P., Ellegaard, L., Angelidaki, I., (2009). Optimisation of biogas production from manure through serial digestion: Lab-scale and pilot-scale studies. *Bioresource Technology* 100, 701–709. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.07.023
- Li, L., et al., (2020). Disintegration and bioresorption of a nacre-inspired graphene-silk film caused by the foreign-body reaction. *iScience* 23. DOI: 10.1016/j.isci.2020.101155
- Lima, D. M. F., Moreira, W. K., Zaiat, M., (2013). Comparison of the use of sucrose and glucose as a substrate for hydrogen production in an upflow anaerobic fixed-bed reactor. *International Journal of Hydrogen Energy* 38, 15074–15083.
- López-Ponnada, et al., (2017). Application of denitrifying wood chip bioreactors for management of residential non-point sources of nitrogen. *Journal of Biological Engineering* 11, 16. DOI: 10.1186/s13036-017-0057-4
- Matos, M., Alves, C., Campos, J., Brito, A., & Nogueira, R. (2011b). Sequencing batch biofilm reactor: from support design to reactor operation. *Environmental Technology*, 32(10), 1121–1129. DOI: 10.1080/09593330.2010.528043
- Page, M. J., et al., (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 372.
- Palladino, et al., (2024). Bioreactors: applications and innovations for a sustainable and healthy future—a critical review. *Applied Sciences*, 14(20), 9346. DOI: 10.3390/app14209346
- Piedrahita Aguirre, C. A., (2013). Study of the production of Iturin by *Bacillus subtilis* in solid state fermentation using as substrate soybean meal, rice meal, wheat bran and husk rice. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brazil.
- Ramírez-López, et al., (2003). Characterization of five agricultural by-products as potential biofilter carriers. *Bioresource Technology* 88, 259–263. DOI: 10.1016/S0960-8524(02)00315-2
- Soreanu, G., (2016). Biotechnologies for improving indoor air quality. In: Pacheco-Torgal, F., Rasmussen, E., Granqvist, C.-G., Ivanov, V., Kaklauskas, A., Makonin, S. (Eds.), *Start-Up Creation*. Woodhead Publishing, Ch. 12, 301–328.
- Taylor, G. T., (2001). Evaluation of the potential of biodegradation for the disposal of cutting fluid from the machining of uranium. *International Biodeterioration & Biodegradation* 47, 215–224. DOI: 10.1016/S0964-8305(01)00060-9
- Tandon, N., et al., (2013). Bioreactors for tissue engineering. In: Ratner, B. D., Hoffman, A. S., Schoen, F. J., Lemons, J. E. (Eds.), *Biomaterials Science (Third Edition)*. Academic Press, Ch. 6, 1178–1194.
- Tomotani, E. J., das Neves, L. C., & Vitolo, M. (2005). Oxidation of glucose to gluconic acid by glucose oxidase in a membrane bioreactor. *Appl Biochem Biotechnol*, 121-124(1), 149–162. DOI: 10.1385/abab:121:1-3:0149
- Tong, Q., Wang, G., Zheng, C., Chen, M., Chen, Y., & Guo, Y. (2020). Preparation and Biofilm Culturing Characteristics of a Novel Porous Carrier. *Environmental Engineering Science*, 38(1), 31–40. DOI: 10.1089/ees.2020.0184
- Vavilin, V. A., Fernandez, B., Palatsi, J., Flotats, X., (2008). Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview. *Waste Management* 28, 939–951. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.03.028
- Villagómez-Ibarra, et al., (2023). Co-producción de biocombustibles y ácidos orgánicos a partir de residuos de frutas y vegetales. *Jóvenes en la Ciencia* 21, 1–8. Available: <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/4004>
- Wada, O. Z., Ige, A. O., Egbewole, B. I., Olawade, D. B., (2026). Circular economy from wastewater resource recovery: A review of recent advances and global disparities. *Sustainable Chemistry One World* 9, 100187. DOI: 10.1016/j.scowo.2026.100187