EIEI ACOFI 2025
5º Congreso Latinoamericano de Ingeniería
Más Información: www.acofi.edu.co/eiei
Ingeniería de impacto para cuidar y transformar la vida
ACOFI: 50 años por la excelencia de la educación en ingeniería.

Biorrefinería de células fúngicas: un paso hacia adelante en la economía circular aprovechando el potencial de hongos endófitos nativos

Laura V. Hoyos, Nelson H. Caicedo

Universidad Icesi
Cali, Colombia

Resumen

A pesar de las nuevas tendencias de consumo de productos de origen biológico, la industria química sigue dominando el mercado porque resulta más competitiva, en términos de rendimientos y productividad. Cuando se emplean células microbianas como biofábricas, las desviaciones metabólicas se traducen en la formación de co-productos que suelen ser desaprovechados y vistos como interferencia en la pureza del producto final. Esta anticuada concepción de las células como mono-productores limita el crecimiento de la industria de base-bio. Además, cuando se trata de fermentaciones en sumergido, se suelen emplear medios de cultivo formulados a partir de sustratos simples y, por lo general, costosos. Como alternativa, este trabajo presenta una propuesta de **Biorrefinería Celular Circular** de hongos endófitos aprovechando residuos agroindustriales como materia prima. El bioproceso contempla dos fermentaciones fúngicas secuenciales, en las que se aprovechan las corrientes residuales generadas en la primera etapa para alimentar la segunda, con el objetivo de obtener al menos tres corrientes bioactivas: **Extracto rico en lacasas, extracto antifúngico y extracto antioxidante.** En esta fase inicial, se han centrado los esfuerzos en la primera etapa de transformación empleando a *Pheblia floridensis*, un hongo endófito nativo del Valle del Cauca. Hasta el momento, se ha propuesto determinar el efecto de la harina de cáscara de plátano, harina de semilla *Kernel* de mango y harina de cáscara de mesocarpio de mango en la producción de enzimas lacasa. De acuerdo con un análisis del perfil de la velocidad de oxígeno transferido (OTR), el rendimiento biomasa-oxígeno ($Y_{X/O2}$) y la actividad enzimática, se ha encontrado que la harina de semilla *Kernel* de mango es la mejor fuente de carbono para la producción de lacasas. Esta preselección servirá de base para posteriores experimentos, donde se determinarán las mejores condiciones de cultivo. Con ello, se espera demostrar la viabilidad técnica de una estrategia que permita aprovechar múltiples corrientes resultantes de una fermentación para la obtención de un portafolio diversificado de productos naturales. De esta manera se estaría contribuyendo a una concepción de las células fúngicas como biorrefinerías microscópicas con potencial de proveer metabolitos de interés industrial.

DOI: https://doi.org/10.26507/paper.4642

Palabras clave: biorrefinería; hongos endófitos; lacasa; antifúngicos; residuos agroindustriales

Abstract

Despite new trends in the consumption of bio-based products, the chemical industry continues to dominate the market because it is more competitive in terms of yields and productivity. When microbial cells are used as biofactories, metabolic deviations result in the formation of co-products that are often wasted and seen as interfering with the purity of the final product. This outdated conception of cells as mono-producers limits the growth of the bio-based industry. In addition, when it comes to submerged fermentations, culture media formulated from simple and usually expensive substrates are used. As an alternative, this work presents a proposal for a ***Circular Cell Biorefinery*** *of endophytic fungi using agro-industrial wastes as raw material. The bioprocess contemplates two sequential fungal fermentations, in which the waste streams generated in the first stage are used to feed the second stage, with the objective of obtaining at least three bioactive streams:* ***Laccase-rich extract, antifungal extract and antioxidant extract****. In this initial phase, efforts have been focused on the first stage of transformation using Pheblia floridensis, an endophyte fungus native to the Valle del Cauca. So far, it has been proposed to determine the effect of banana peel flour, mango Kernel flour and mango mesocarp peel flour on the production of laccase enzymes. Based on an analysis of the oxygen transferred rate (OTR) profile, biomass-to-oxygen yield ($Y_{X/O2}$) and enzyme activity, mango Kernel flour has been found to be the best carbon source to produce laccases. This pre-selection will provide the basis for further experiments, where the best growing conditions will be determined. With this, it is expected to demonstrate the technical feasibility of a strategy that allows taking advantage of multiple streams resulting from fermentation to obtain a diversified portfolio of natural products. This would contribute to the conception of fungal cells as microscopic biorefineries with the potential to provide metabolites of industrial interest.*

Keywords*: biorefinery; endophytic fungi; laccase; antifungals; agro-industrial wastes*

1. Introducción

Actualmente, existe una creciente demanda de productos de base-bio como alternativa a los derivados petroquímicos (Nejadrezaei et al., 2024). En este sentido, los hongos endófitos han emergido como biofábricas prometedoras por sus ricos metabolomas, integrados por moléculas bioactivas de gran interés como flavonoides, terpenoides, esteroides, fenoles, fenilpropanoides, quininas, derivados de indol, aminas, alcaloides, amidas, péptidos, ácidos fenólicos, metabolitos clorados, compuestos alifáticos, entre otros (Dasauni et al., 2023). Sin embargo, aunque se han identificado estos interesantes bioactivos, su producción ha sido poco explorada. Para que las biofábricas fúngicas sean atractivas, no sólo se deben aumentar los rendimientos y productividades, sino que, además, se requiere valorizar más de un co-producto generado en la fermentación (Liang y Qi, 2014).

Otro de los puntos débiles de las fermentaciones fúngicas, en especial de los cultivos en sumergido, son los sustratos empleados. Por lo general, se preparan medios con sustratos simples, como la

glucosa o sacarosa, o se basan en formulaciones disponibles en el mercado. Si bien estos sustratos a escala de laboratorio pueden resultar atractivos, sobre todo en etapas tempranas del diseño del bioproceso, cuando se incrementan volúmenes y se escalan las fermentaciones, el costo de las materias primas puede convertirse en un problema (Sánchez, 2009; Koutinas et al., 2014). Fuentes más económicas y con mayor disponibilidad, como los residuos agroindustriales son una opción prometedora, aunque poco estudiada en medios líquidos.

Para allanar el camino hacia biofábricas fúngicas más competitivas, este trabajo propone un modelo de **Biorrefinería Celular Circular,** inspirado en las refinerías petroleras, donde se obtengan al menos tres corrientes bioactivas. La propuesta considera el uso de harinas obtenidas a partir de residuos agroindustriales como materias primas para dos fermentaciones fúngicas secuenciales. En esta etapa inicial, el enfoque se centra en evaluar el efecto de diferentes sustratos lignocelulósicos sobre la producción de lacasas por *Phlebia floridensis*, empleando herramientas como la respirometría para analizar el comportamiento del cultivo.

2. Antecedentes y Marco Conceptual

2.1. Definición de Biorrefinería de Única Célula

El concepto de biorrefinería de una única célula fue propuesto en 2014 por Liang Q. y Qi Q., quienes definen esta estrategia como una fábrica unicelular integrada que aprovecha componentes de la biomasa para producir múltiples compuestos con valor agregado (Liang y Qi, 2014). A diferencia de los bioprocesos tradicionales, las biorrefinerías de una única célula permiten construir un portafolio diversificado de productos a partir de una sola fermentación (Liang y Qi, 2015). Esto es posible gracias al amplio e intrincado metabolismo microbiano, el cual además de sustentar el crecimiento celular, conduce a la síntesis de diversos metabolitos esenciales para su supervivencia.

2.2. Bioprocesos Circulares

Los bioprocesos circulares suelen ser escasos, dada su complejidad. Más aún cuando contienen dos etapas de transformación que se alimentan entre sí. Por ejemplo, en 2023, Shrivastava A. y Sharma R. K. propusieron un pretratamiento de la biomasa lignocelulósica, empleando un hongo endófito (*Phlebia floridensis*) para la producción de electricidad y la liberación de azúcares simples. Posteriormente, estos monómeros fueron empleados en la producción de etanol gracias a la acción metabólica de *Pichia fermentans* (Shrivastava et al., 2023). Sin embargo, mientras no se realicen estudios sobre cómo reintegrar la electricidad generada al proceso, como propone Tong K. T. X. y colaboradores (Tong et al., 2023) , este enorme esfuerzo investigativo sigue siendo lineal. En otro caso, Schmitz L. M. et. al. emplearon *Thermoanaerobacter kivui* y *Saccharomyces cerevisiae* para producir en serie proteína microbiana, pero recirculando el medio de cultivo (Schmitz et al., 2024) . El gran reto detrás de esta estrategia de recirculación consiste en considerar el efecto de las limitaciones de sustratos para que el medio desgastado no represente un escenario nutricional significativamente diferente al inicial. En general, los bioprocesos actuales distan mucho de modelos circulares, ya que existen continuas salidas, sin que éstas se reintroduzcan exitosamente al proceso. Lo anterior representa una dependencia continua a las materias prima de entrada y un

desaprovechamiento de las corrientes generadas. Como consecuencia, aún continúan en papel las propuestas de procesos que se alineen con los principios de la economía circular.

3. Metodología

3.1. Selección de los Candidatos a Biofábricas

Este trabajo se desarrolla a partir de dos agentes de transformación nativos de las regiones del Valle del Cauca y Risaralda: *Phebia floridensis* y *Thrichothecium sp.,* respectivamente. Gracias a una estrategia de tamizaje sistemático, previamente publicada por los autores, *P. floridensis* fue seleccionada como la cepa candidata más promisoria para la producción de enzimas lacasas en fermentaciones en sumergido (Hoyos et al., 2023). En el caso de *Thrichothecium sp.*, ensayos preliminares -datos no mostrados- revelaron una potente actividad antifúngica contra *Candida albicans* ATCC 10231 y *Moniliopthora roreri*, causante de la Moniliasis del cacao. De manera que ambas cepas fúngicas fueron elegidas por las prometedoras bioactividades de sus extractos extracelulares.

La etapa de desarrollo de inóculo de ambas cepas ha consistido en la preparación de una suspensión miceliar en Tween 80 al 0.01%, que posteriormente es adicionada a un Erlmenyer de 125 mL con medio YMG. El volumen de trabajo es de 50 mL con 4% v/v de la suspensión. Las condiciones de esta etapa han sido fijadas a 29 °C, pH 5.5 o 6.3 (para *P. floridensis y Thrichothecium sp.,* respectivamente*)*, 120 rpm y 7 días. Pasado el tiempo de cultivo, se remueve el medio exhausto, para *P. floridensis* con una centrifugación y para *Thrichothecium sp.* por decantación. La biomasa colectada es lavada y resuspendida en solución salina 0.9%.

3.2. Formulación Preliminar del Medio de Cultivo

Esta investigación ha sido dividida en dos fases: La primera corresponde a la definición de las condiciones de cultivo que favorezcan la producción de enzimas lacasas por *P. floridensis,* aprovechando sustratos provenientes de residuos agroindustriales. En la segunda, se espera producir extractos antifúngicos a partir de la fermentación del medio exhausto de *P. floridensis*, empleando al hongo *Thrichothecium sp.* Los resultados que se mostrarán en la siguiente sección corresponden a los avances realizados dentro de la primera fase de la investigación.

Para la fermentación de *P. floridensis* se decidió probar el efecto de tres residuos agroindustriales y sus mezclas sobre la actividad lacasa, la formación de biomasa, el perfil de OTR y el rendimiento biomasa-oxígeno consumido. El diseño de experimentos consistió en la evaluación de harina de cáscara de plátano, harina de semilla *Kernel* de mango y harina de cáscara del endocarpio de mango, como se indica en la tabla 1.

Tabla 1. Medios de cultivo evaluados en la fermentación del hongo endófito *P. floridensis.*

Nombre del tratamiento	Harina de cáscara de plátano (g L^{-1})	Harina de semilla *Kernel* de mango (g L^{-1})	Harina de cáscara del endocarpio de mango (g L^{-1})
CP	11.8	-	-
CK	-	11.8	-
CK-E	-	5.9	5.9
CP-K -1	3.9	2.0	-
CP-K +1	11.8	5.9	-
CP-K-E	3.9	2.0	0.5

Este ensayo se realizó en el equipo RAMOS® (HiTec ZangGmbH, Herzogenrath, Alemania), con el cual se monitoreó el perfil de OTR, durante el tiempo de fermentación. Además de la materia prima correspondiente a cada tratamiento, se adicionaron 2.1 g L^{-1} de cloruro de amonio. En Erlenmeyers de 250 mL, con 80 mL de volumen de trabajo, se inició la fermentación al inocular (7.5% v/v) la suspensión de *P. floridensis*. La agitación se fijó en 200 rpm, el pH inicial en 5.5, la temperatura en 29 °C, el flujo de aireación en 40 mL min^{-1} y el ciclo de medición en 30 min. La fermentación se detuvo cuando la OTR decayó.

Una vez detenida la fermentación, se separó la biomasa por filtración al vacío, empleando filtros de celulosa de 20-25 µm (FAST 101, Ø 12.5 cm; Chicago, Estados Unidos). El sobrenadante se reservó para posteriores análisis, mientras que el retenido se llevó a secado en horno de convección a 100 °C hasta alcanzar un peso constante. Tal como propusieron los autores en un trabajo previo, a partir del valor de biomasa formada y el oxígeno total transferido al medio (TOT), se estimó el rendimiento biomasa-oxígeno consumido o $Y_{X/O2}$ (Hoyos et al., 2024).

3.3. Análisis de la Actividad de Interés

La actividad enzimática específica se evaluó usando el sustrato ABTS [ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico)] como referencia. Mediante una prueba por espectrofotometría (lector de microplacas multimodo Thermo Scientific™ Varioskan™ LUX, Massachusetts, Estados Unidos) con un coeficiente de extinción molar de 36000 L mol^{-1} cm^{-1} y una longitud de onda de 420 nm, se midió la oxidación del sustrato como resultado de la actividad lacasa. Los resultados se expresaron como 1 µmol de ABTS oxidado por minuto por cada litro de sobrenadante evaluado.

3.4. Propuesta de Acoplamiento de las Fermentaciones

Una vez que se seleccione el medio de cultivo para la producción de enzima lacasa, el medio exhausto, tras la precipitación de las enzimas, suplementará la fermentación de *Thrichothecium sp* (fig. 1). Por lo tanto, en posteriores experimentos, se formulará un medio de cultivo que aproveche los azúcares residuales provenientes de la primera fermentación y que a su vez supla las necesidades nutricionales del hongo, para obtener extractos crudos con actividad antifúngica.

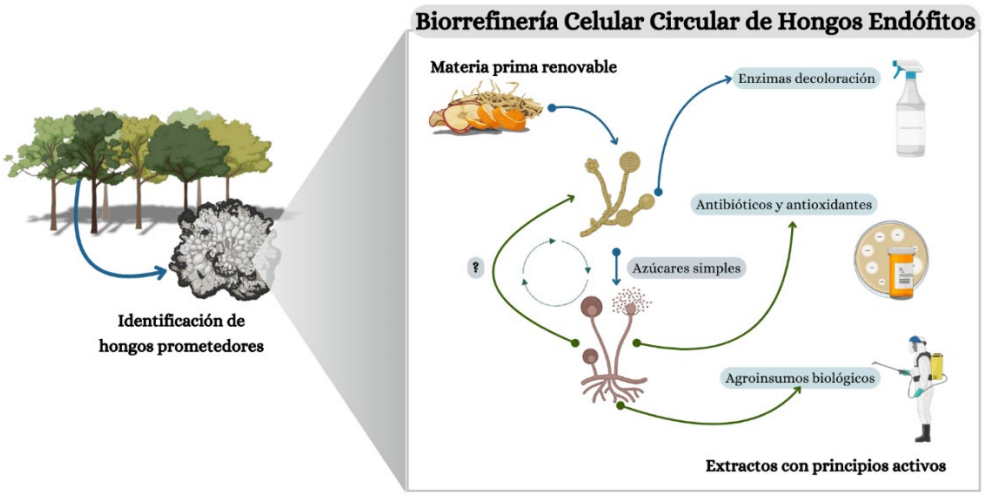

Figura 1. Representación gráfica de la integración de las dos fermentaciones propuestas con agentes de transformación diferentes (*Pheblia floridensis* y *Thrichothecium sp.*) para la validación de un modelo de Biorrefinería Celular Circular de hongos endófitos.

4. Resultados y Discusión

De acuerdo con el perfil de OTR obtenido para cada tratamiento (fig. 2), las materias primas empleadas como aportantes de carbono (*i.e.*, harina de cáscara de plátano, harina de semilla *Kernel* de mango y harina de cáscara de mesocarpio de mango) suplementaron más de un sustrato al medio. Debido a la aparición de diferentes picos a lo largo de la fermentación, se puede considerar que el consumo de dichos sustratos fue secuencial. Esto ocurre cuando los hongos asimilan preferiblemente una fuente de carbono hasta agotarla (Demain, 1977; Sánchez et al., 2010), antes de consumir la siguiente.

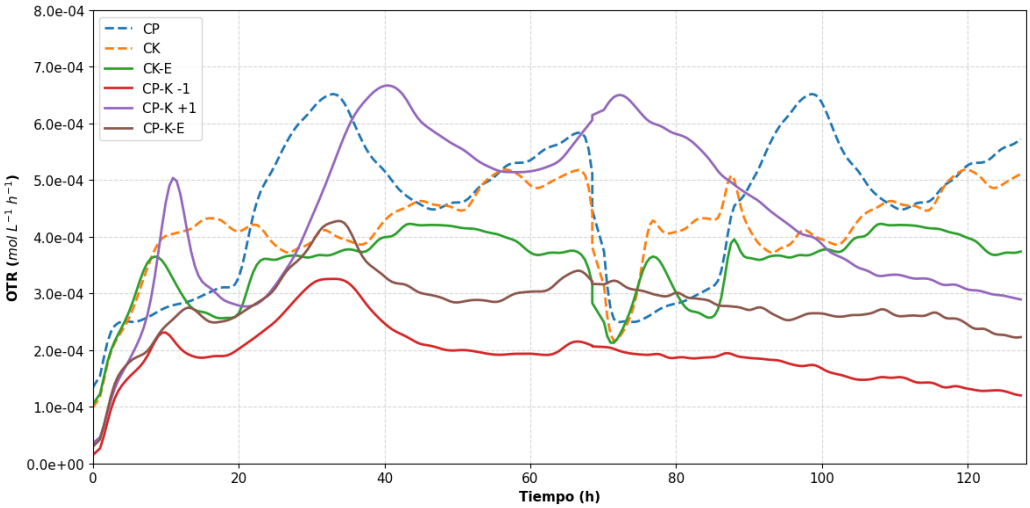

Figura 2. Cambios en la velocidad de oxígeno transferido al medio de cultivo (OTR, por sus siglas en inglés) durante el tiempo de fermentación de *P. floridensis* para los seis tratamientos evaluados. Líneas continuas indican tratamientos con mezclas de los residuos agroindustriales.

Salvo en CP (harina de cáscara de plátano), los demás tratamientos presentaron un pico dentro de las primeras 20 horas de cultivo. Esto quiere decir que, para los tratamientos en mezcla, este primer pico podría estar asociado al sustrato aportado por la harina de semilla *Kernel* de mango. Este residuo agroindustrial es rico en carbohidratos (74.12% ± 0.84) y presenta un bajo contenido de fibra, con aproximadamente 2.58% ± 0.71 en peso húmedo (Das et al., 2022), por lo que el carbono es más accesible en esta biomasa. En contraste, la cáscara de plátano contiene un 25.7% de lignina y un 46.5% de holocelulosa (Igbokwe et al., 2016), polímeros más complejos que podrían tardar más en ser metabolizados. Por otra parte, a las 70 horas, los tratamientos CP y CK, presentaron un decrecimiento considerable (32.12% y 23.44%) en los valores de OTR. Dado que estos tratamientos sólo disponían de una materia prima es posible que, en este momento de la fermentación, se agotaran los principales sustratos, es decir, los más asimilables. En cambio, los demás tratamientos en mezcla (CK-E, CP-K -1, CP-K +1 y CP-K-E) pudieron aportar niveles basales de carbono, favoreciendo una fase de desaceleración más prolongada.

Si bien las curvas de OTR pueden revelar las fases de crecimiento del hongo, es necesario acompañar este análisis de una variable de respuesta que dé cuenta del producto de interés. En este caso, el tratamiento con mayor actividad lacasa correspondió a CK (tabla 2). Mientras que el tratamiento con mayor TOT, mayor biomasa formada y, por tanto, mayor $Y_{X/O2}$ fue CP-K +1. Esta diferencia ya ha sido observada en hongos del género *Phlebia,* donde la producción de enzimas lacasas no está directamente relacionada con el crecimiento celular (Arora y Sandhu, 2002).

Tabla 2. Recopilación de los resultados obtenidos del oxígeno total transferido (TOT), la biomasa formada, el rendimiento biomasa-oxígeno consumido ($Y_{X/O2}$) y la actividad lacasa alcanzada luego de la fermentación de *P. floridensis.*

Tratamiento	TOT (µmol L^{-1})	Biomasa formada (g L^{-1})	$Y_{X/O2}$ (g g^{-1})	Actividad enzimática (µmol L^{-1} min^{-1})
CP	59.75 ± 8.98	2.12 ± 0.11	1.12 ± 0.11	0.07 ± 0.02
CK	54.40 ± 0.00	2.37 ± 0.25	1.26 ± 0.00	**3.00 ± 0.57**
CK-E	48.30 ± 0.00	2.91 ± 0.84	1.49 ± 0.00	0.06 ± 0.00
CP-K -1	37.05 ± 0.49	0.15 ± 0.00	0.13 ± 0.00	0.06 ± 0.00
CP-K +1	**83.50 ± 1.83**	**5.45 ± 1.79**	**2.05 ± 0.72**	0.16 ± 0.03
CP-K-E	52.95 ± 4.60	0.26 ± 0.06	0.15 ± 0.05	0.00 ± 0.00

Además, la producción de lacasas no ha sido asociada con una fase específica de crecimiento (Arora y Sandhu, 2002; Saha et al., 2017). Por ello, en posteriores experimentos deberá establecerse cuándo detener la fermentación, teniendo como criterio de parada una alta actividad enzimática, acompañada de un contenido considerable de azúcares libres, que puedan ser aprovechados en la siguiente etapa de transformación. También, se considera a la temperatura como un factor crucial de evaluación futura, ya que hay evidencia de que afecta drásticamente la actividad (Arora y Sandhu, 2002). Los hallazgos obtenidos hasta el momento permiten seleccionar una materia prima, en este caso, harina de semilla *Kernel* de mango, por lo que a partir de este tratamiento puede expandirse el universo experimental considerando los nuevos factores mencionados.

5. Conclusión

El análisis respirométrico, particularmente a través del perfil de la velocidad de oxígeno transferido (OTR), resulta crucial en la formulación de medios de cultivo, en especial cuando se busca valorizar residuos agroindustriales como sustratos para fermentaciones fúngicas. En este estudio, se han propuesto variables de respuesta directas e indirectas que abarcan tanto el metabolismo primario como el secundario con el fin de identificar el medio de cultivo más adecuado para la fermentación. Para *Phlebia floridensis*, los resultados obtenidos destacan a la harina de semilla *Kernel* de mango como la mejor fuente de carbono para la producción de enzimas lacasas. No obstante, se han identificado otros factores críticos como la temperatura, que parece incidir significativamente en la actividad enzimática. Cuando se definan las condiciones de cultivo, se continuará con la validación del modelo de **Biorrefinería Celular Circular** de hongos endófitos para demostrar la viabilidad técnica de un bioproceso que considera la obtención de al menos tres corrientes bioactivas a partir de residuos agroindustriales.

6. Referencias

- Arora, D. S., & Sandhu, D. K. (2002). Laccase production by some *Phlebia* species. *Journal of Basic Microbiology*, Vol. 42, No. 5, pp. 295–301. https://doi.org/10.1002/1521-4028(200210)42:5<295::AID-JOBM295>3.0.CO;2-#
- Das, K., Pathak, K., & Baishya, S. (2022). Mango seed kernel: Nutrient composition and quality characteristics of oil. *Agricultural Research Journal*, 59(6), 1130–1136. https://doi.org/10.5958/2395-146X.2022.00157.0
- Dasauni, K., Singh, D., & Nailwal, T. K. (2023). Endophytes based nanoparticles: A novel source of biological activities. En M. P. Shah & D. Deka (Eds.), *Endophytic Association: What, Why and How* (pp. 223–236). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91245-7.00010-9
- Demain, A. L. (1977). Effect of primary metabolites on secondary metabolism. *Annual Review of Microbiology*, Vol. 31, pp. 31–50.
- Hoyos, L. V., Chaves, A., Grandezz, D., Medina, A., Correa, J., Ramírez-Castrillón, M., Valencia, D., & Caicedo-Ortega, N. H. (2023). Systematic screening strategy for fungal laccase activity of endophytes from *Otoba gracilipes* with bioremediation potential. Fungal Biology, 127(9), 1298–1311. https://doi.org/10.1016/j.funbio.2023.08.003
- Hoyos, L. V., Vásquez-Muñoz, L. E., Osorio, Y., Valencia-Revelo, D., Devia-Cometa, D., Große, M., Charria-Girón, E., & Caicedo-Ortega, N. H. (2024). Tailored culture strategies to promote antimicrobial secondary metabolite production in *Diaporthe caliensis*: a metabolomic approach. *Microbial Cell Factories*, 23(1), 1–17. https://doi.org/10.1186/s12934-024-02567-y
- Igbokwe, P. K., Idogwu, C. N., & Nwabanne, J. T. (2016). Enzymatic hydrolysis and fermentation of plantain peels: Optimization and kinetic studies. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 6(2), 216–235. https://doi.org/10.4236/aces.2016.62023
- Liang, Q., & Qi, Q. (2014). From a co-production design to an integrated single-cell biorefinery. *Biotechnology Advances*, Vol. 32, No. 7, pp. 1328–1335. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.08.004
- Liang, Q., & Qi, Q. (2015). Single-cell biorefinery. En A. Pandey, R. Höfer, M. Taherzadeh, K. M. Nampoothiri, & C. Larroche (Eds.), *Industrial Biorefineries and White Biotechnology* (pp. 369–388). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63453-5.00011-2

- Nejadrezaei, N., Henchion, M., & O'Neill, E. (2024). Consumers perspectives on biobased products: A scoping review. *Cleaner Production Letters*, Vol. 7, Artículo 100073. https://doi.org/10.1016/j.clpl.2024.100073
- Sánchez, S., Chávez, A., Forero, A., García-Huante, Y., Romero, A., Sánchez, M., Rocha, D., Sánchez, B., Ávalos, M., Guzmán-Trampe, S., Rodríguez-Sanoja, R., Langley, E., & Ruiz, B. (2010). Carbon source regulation of antibiotic production. *The Journal of Antibiotics*, Vol. 63, No. 8, pp. 442–459.
- Schmitz, L. M., Kreitli, N., Obermaier, L., Weber, N., Rychlik, M., & Angenent, L. T. (2024). Power-to-Vitamins: Producing folate (vitamin B9) from renewable electric power and CO_2 with a microbial protein system. *Trends in Biotechnology*, Vol. 42, No. 12, pp. 1691–1714. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2024.06.014
- Shrivastava, A., Pal, M., & Sharma, R. K. (2023). Conversion of lignocellulosic biomass: Production of bioethanol and bioelectricity using wheat straw hydrolysate in electrochemical bioreactor. *Heliyon*, Vol. 9, No. 3, e14014. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14014
- Tong, K. T. X., Tan, I. S., Foo, H. C. Y., Tao, Y., Lam, M. K., & Wong, M. K. (2023). Sustainable circular biorefinery approach for novel building blocks and bioenergy production from algae using microbial fuel cell. *Bioengineered*, Vol. 14, No. 1, pp. 246–289. https://doi.org/10.1080/21655979.2023.2236842

Sobre los autores

- **Laura V. Hoyos**: Ingeniera Bioquímica, Máster en Ingeniería, Estudiante de Doctorado en Ingeniería de la Universidad Icesi. laura.hoyos1@u.icesi.edu.co
- **Nelson H. Caicedo**: Ingeniero Químico, Máster en Ingeniería, Doctor en Ingeniería de la Universidad de Bremen. Profesor Asociado. nhcaicedo@icesi.edu.co

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2025 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)