

Investigación

Trabajo de Grado

**IDENTIFICACIÓN DE MACROHONGOS CON ENZIMAS
EXTRACELULARES Y CAPACIDAD BIODEGRADATIVA SOBRE
PLANTAS LEÑOSAS COLECTADO EN ZONAS ARBÓREAS EN
PUEBLO BELLO CESAR.**



Universidad
Popular del Cesar

Departamento
de Microbiología



Universidad
Popular del Cesar

**IDENTIFICACIÓN DE MACROHONGOS CON ENZIMAS EXTRACELULARES Y
CAPACIDAD BIODEGRADATIVA SOBRE PLANTAS LEÑOSAS COLECTADO EN
ZONAS ARBÓREAS EN PUEBLO BELLO CESAR.**

**ANDREA MARGARITA ATENCIA TOVAR
ANDREA VALENTINA QUINTERO MONTOYA**

Presentado al

Departamento de Microbiología
Facultad de Ciencias Básicas

Línea de Investigación
Bioprospección

Dalia Blanchard Martínez
Yeneiris Villero Wolf

Universidad Popular del Cesar, Colombia
Valledupar, Colombia.
Septiembre
2025



Universidad
Popular del Cesar

**IDENTIFICACIÓN DE MACROHONGOS CON ENZIMAS EXTRACELULARES Y
CAPACIDAD BIODEGRADATIVA SOBRE PLANTAS LEÑOSAS COLECTADO EN
ZONAS ARBÓREAS EN PUEBLO BELLO CESAR**

Presentado al

Departamento de Biología, Microbiología y afines
Facultad de Ciencias Básicas
Universidad Popular del Cesar

Línea de Investigación
Bioprospección

Valledupar, Colombia.
septiembre
2025

NOTA DE ACEPTACION

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Valledupar, _____ de _____ 2025

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi fortaleza en los momentos difíciles y por llenar mi camino de luz y propósito.

A mi madre Lourdes, por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A ti Carlos Julio, por estar darme palabras de aliento, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, tu paciencia en los días de cansancio, compañía en los momentos difíciles y por recordarme siempre de lo que soy capaz.

Esta tesis es fruto del esfuerzo conjunto de todos los que caminaron conmigo en este viaje. A ustedes, les dedico este logro con profunda gratitud.

Con cariño

Andrea Valentina Quintero Montoya.

DEDICATORIA

Hay un profundo agradecimiento en mi corazón por la infinita bondad y misericordia de Dios. Sin Su ayuda y fortaleza, este logro no habría sido posible. Gracias por guiarme y ser luz en los momentos difíciles; en este logro veo reflejado Su amor por mí.

A mis padres, por su sacrificio, amor y apoyo incondicional, por creer en mí y estar para mí cuando los he necesitado, por ser ese motor para seguir adelante, por enseñarme a nunca rendirme y luchar mis sueños. Este logro es de ustedes.

A mi hermana, por ser mi amiga y compañera de vida, por cada aventura compartida donde las risas no faltan, son recargas para mi vida que me impulsa seguir adelante.

A mi familia y amigos, por su apoyo y por cada palabra de motivación que me impulsó a seguir adelante. Gracias por estar presentes en este camino, por creer en mí y por impulsarme a alcanzar esta meta y culminar con éxito esta etapa de mi vida .

Con cariño

Andrea Margarita Atencia Tovar.

AGRADECIMIENTO

Primeramente sentimos gratitud hacia Dios por iluminarnos, ser nuestra guía y darnos la fortaleza necesaria para completar este proyecto. Su amor y apoyo han sido fundamentales en cada paso del camino. Sin Su dirección, este logro no habría sido posible.

Agradecemos inmensamente a Laboratorios BIOTECGEN Y CIDI por ofrecernos la posibilidad y disponibilidad de llevar a cabo este proyecto de investigación. Su apoyo continuo, recursos y ambiente propicio fueron fundamentales para el éxito de este trabajo. Gracias por la confianza depositada y por el invaluable aprendizaje que hemos adquirido durante este proceso. Sin su colaboración, este proyecto no habría alcanzado su pleno potencial.

Estamos profundamente agradecidas con nuestra docente tutora, Dalia Blanchard Martínez, y con nuestra codirectora, Yeneiris Villero Wolf, por su dedicación y guía a lo largo de todo este proceso de aprendizaje. Su paciencia y entrega marcaron una gran diferencia en nuestro crecimiento personal y académico. Gracias por todo: por sus consejos oportunos, por cada corrección que nos ayudó a mejorar y por impulsarnos siempre a dar lo mejor de nosotras.

Es importante para nosotros reconocer el papel fundamental que jugaron nuestras familias y amigos cercanos en el avance de este proyecto, brindándonos su apoyo emocional que nos impulsó a culminar este gratificante proceso. A ustedes, mil gracias.

Contenido

1. Resumen	3
2. Introducción	4
3. Problema	6
4. Justificación	7
5. Objetivos	9
5.1. General	9
5.2. Específicos	9
6. Marco Referencial	10
6.1. Antecedentes	10
6.2. Marco teórico	12
6.2.1. Hongos Basidiomicetos	12
6.3.1. Material lignocelulósico de las plantas	13
6.3.2 Celulosa	14
6.3.3 Hemicelulosa.	15
6.3.4 Lignina	16
6.4. Hongos degradadores de compuestos vegetales	16
6.5 Enzimas degradadoras de celulosa	17
6.5.1 Endoglucanasa	17
6.5.2 Exoglucanasa	17
6.5.3 β -glucosidasa	17
6.6. Aplicaciones en la degradación de residuos	18
7. Marco legal	18
7.1. Decreto 1376 del 27 de Junio de 2013	18
7.2. Resolución Número 1348 de 2014	18
8. Metodología	19
8.1. Diseño metodológico y características del estudio	19
8.1.4. Universo, población y muestra	19
8.2. Técnicas y procedimientos experimentales	19
8.2.1. Preparación de la muestra	19
8.3. Fase de laboratorio	20
8.3.2.Siembra y subcultivo	20
8.3.3. Descripción macroscópica y microscópica del micelio	20
8.3.4. Sustratos lignocelulósicos	21
8.4. Determinación cuantitativa enzimática	21
8.4.1. Producción de los extractos enzimáticos	21

8.4.2 Determinación de la actividad celulolítica mediante hidrólisis de CMC	22
8.4.3. Determinación de la actividad oxidativa tipo lacasa mediante ABTS	23
8.5. Curva de calibración o cinética de consumo de la glucosa	23
9. Resultados y discusión	26
9.1. Identificación taxonómica de los macrohongos colectados	26
9.2. Categorización taxonómica	28
9.3. Actividad endoglucanasa	29
9.4. Actividad lacasa	35
9.5. Determinación de peso seco	40
9.6. Revisión bibliográfica	42
10. Conclusiones	44
11. Recomendaciones	45
12. Bibliografía	46
13. Anexos	59

1. Resumen

Los hongos se destacan por su eficiencia en la producción de enzimas extracelulares, entre las que se incluyen la lacasa, la peroxidasa manganeso y la lignina peroxidasa, las cuales desempeñan un papel fundamental en la descomposición de compuestos lignocelulolíticos y otros componentes de la materia orgánica. El objetivo de esta investigación fue identificar y evaluar macrohongos con potencial enzimático sobre residuos lignocelulolíticos, recolectados en zonas arbóreas del municipio de Pueblo Bello, Cesar. Los hongos se colectaron e identificaron a partir de claves dicotómicas que incluyen características macroscópicas y microscópicas. La capacidad biodegradadora de residuos agroindustriales, fue evaluada en tres tipos de sustratos vegetales: bagazo de caña, tamo de arroz y aserrín. Se obtuvieron extractos enzimáticos a partir de los cultivos, y se evaluó la actividad celulolítica utilizando carboximetilcelulosa (CMC) como sustrato y la actividad ligninolítica mediante el sustrato ABTS. Los datos se analizaron mediante ANOVA ($p < 0.05$), aplicando Tukey HSD para comparar medias en los factores significativos, utilizando el software estadístico R. Se identificaron cuatro especies fúngicas: *Auricularia polytricha*, *Pleurotus sp*, *Trametes betulina* y *Lentinus sp*. El análisis estadístico de los datos obtenidos reveló variaciones altamente significativas ($p < 0,001$), para los factores hongo, tiempo de incubación y su interacción, en todos los sustratos evaluados. La prueba de comparación múltiple (Duncan y Tukey) estableció que, en la enzima endoglucanasa, en el subproducto de caña *Trametes betulina* mostró la mayor actividad enzimática promedio (4,37 UI/g), seguido *Pleurotus pulmonarius* en el sustrato tamo (4,40 UI/g), y *Trametes betulina* en aserrín (4,30 UI/g). La actividad de la enzima lacasa de *Pleurotus pulmonarius* presentó mayor actividad promedio máximo el día 24 en aserrín (54,79 UI/g) y en tamo (48,22 UI/g) con una actividad máxima al día 24. En el caso de *Auricularia polytricha* se observó mayor actividad en aserrín, con un promedio de (65,70 UI/g). Estos resultados evidencian el valor biotecnológico de estas cepas para procesos de aprovechamiento de residuos agroindustriales, con posibles aplicaciones en áreas como la biorremediación, el compostaje y la producción de enzimas.

.Palabras claves: Macrohongos, enzimas ligninolíticas, degradación de residuos, *Pleurotus pulmonarius*, biotecnología ambiental

Introducción

Los hongos son considerados los mayores descomponedores de materia orgánica del planeta y contribuyen con la salud de los bosques (Piepenbring *et al.*, 2016). Esta característica se atribuye a la producción de las enzimas lignocelulolíticas que son esenciales para la descomposición de la biomasa vegetal y de las maderas duras (Arias, 2024). Las enzimas lignocelulolíticas además de jugar un papel fundamental dentro de la cadena trófica, al convertir los desechos lignocelulósicos en compuestos más simples y asimilables para otros organismos biológicos, tienen usos industriales extensos, como en el área textil, farmacéutico, papel, alimentos, belleza, ambiental, biotecnología y sectores de limpieza (Sánchez-Corzo *et al.*, 2021).

Los hongos de podredumbre blanca son notables por su distintivo sistema enzimático extracelular, altamente eficiente, que les permite degradar componentes estructurales de la madera a través de las enzimas como la lacasa, peroxidasa manganesa y la lignina peroxidasa (Camacho *et al.*, 2017). Sin embargo, existe poca información sobre la biodiversidad de macrohongos presentes en los ecosistemas forestales, sobre su papel de descomponedores, el tipo y la eficiencia de sus enzimas, y su comportamiento en la degradación de material lignocelulósico (Chaparro *et al.*, 2009). La falta del conocimiento sobre la biodiversidad, y sus posibles aplicaciones biotecnológicas, limita la comprensión de las operaciones de estos ecosistemas y obstruye la formulación de estrategias eficaces para la preservación, sostenibilidad y utilización biotecnológica de estos recursos naturales (Montoya, 2012).

De acuerdo con lo anteriormente descrito, es fundamental realizar investigaciones que contribuyan a la caracterización de la biodiversidad de los hongos (*Basidiomycetes*), reconocidos por su capacidad para producir enzimas ligninolíticas y sus posibles aplicaciones en sectores industriales. En este sentido, la identificación de macrohongos con enzimas extracelulares y capacidad biodegradativa en sustratos vegetales en Pueblo Bello, Cesar, no solo permite su caracterización taxonómica y funcional, sino que también evidencia su potencial biotecnológico para aplicaciones que promuevan el desarrollo sostenible y la valorización de la biodiversidad local.

3. Problema

Los hongos de pudrición blanca producen enzimas extracelulares especializadas que ayudan a la descomposición completa de la madera. Estos organismos tienen la habilidad de sintetizar enzimas lignocelulolíticas como la lacasa, manganoso peroxidasa y la lignina peroxidasa (Camacho-Morales *et al.*, 2017), las cuales, desempeñan un papel ecológico importante en la degradación de la biomasa lignocelulósica y el reciclaje de nutrientes en los ecosistemas (Sánchez-Corzo *et al.*, 2021).

Los hongos ejercen una influencia significativa sobre la descomposición de la materia orgánica del suelo (MOS). Este proceso permite la liberación de nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo, que son reciclados y reutilizados por otras formas de vida (Mayer *et al.*, 2021). La ausencia o disminución de hongos descomponedores podría generar una acumulación de materia orgánica resistente, retrasando el ciclo del carbono, reduciendo la fertilidad del suelo, afectando la productividad vegetal y la pérdida de biodiversidad. Este desequilibrio impactaría negativamente el flujo energético y la estructura de las comunidades ecológicas, comprometiendo la sostenibilidad de los ecosistemas (Bai *et al.*, 2017).

En diferentes zonas, como en Pueblo Bello, la ausencia de conocimiento e información precisa sobre la biodiversidad de macrohongos que componen los bosques, su posición en la escala de descomponedores, los tipos de enzimas que producen, la tasa y velocidad de degradación, conduce a que, en algunos ecosistemas naturales, se desconozca su funcionalidad, sus posibles usos y aplicaciones en la biotecnología (Niego *et al.*, 2023).

Por tanto, se hace necesario identificar y caracterizar los macrohongos presentes en los ecosistemas arbóreos de esta región, con el fin de cuantificar su potencial para producir enzimas extracelulares y su capacidad de degradación de sustratos vegetales (Arias, 2024). Esta información no solo contribuiría a la conservación de la biodiversidad fúngica local, sino que también sentaría las bases para su aplicación en soluciones ambientales sostenibles con el fin de contribuir al reconocimiento y demostrar la utilidad que estos tienen en diferentes campos a nivel industrial y medio ambiental (Garg, 2025).

Por consiguiente surge la siguiente pregunta de investigación ¿La actividad biodegradativa de las enzimas de los macrohongos identificados en plantas leñosas en

descomposición podrán ser utilizados con fines industriales resaltando aspectos de interés económicos y ambientales?

4. Justificación

Los macrohongos, han demostrado tener una notable capacidad para degradar materia lignocelulósica gracias a su producción de enzimas extracelulares como lacasas, celulasas, manganeso peroxidasas y peroxidasas versátiles, que poseen un alto potencial óxido reducción y una baja especificidad de sustrato, permitiéndoles actuar sobre una amplia variedad de compuestos aromáticos (Camacho-Moral *et al.*, 2017). Estas enzimas cumplen la función de la descomposición de residuos lignocelulósicos, lo cual es de particular interés en procesos industriales sostenibles.

En zonas como Pueblo Bello, Cesar, se generan residuos vegetales producto de las actividades agrícolas, y por la inmensa variedad de vegetación que la rodea, no se han realizado estudios que documenten la diversidad fúngica ni su actividad enzimática. La ausencia de información limita el desarrollo de estrategias para el aprovechamiento de los hongos como recursos biológicos y dificulta la implementación de soluciones ambientales basadas en procesos de biodegradación (Torres, 2018).

Este estudio, no solo busca generar conocimiento sobre la diversidad fúngica local, sino también aportar datos sobre la actividad enzimática de macrohongos con capacidad de degradar, permitiendo su aplicación en la biotecnología, compostaje, biorremediación y valorización de residuos vegetales. Cabe destacar que, en la actualidad, los países industrializados reconocen el valor de la micología por el potencial biotecnológico derivado de la diversidad metabólica de los hongos (Serrano *et al.*, 2021).

Conocer la dinámica funcional del complejo enzimático de estos organismos podría facilitar su integración en procesos industriales verdes, destacando su viabilidad como alternativa para el tratamiento de residuos y su contribución al desarrollo económico y ambiental.

5. Objetivos

5.1. General

- Evaluar el potencial enzimático y biodegradativo de macrohongos presentes en zonas arbóreas del municipio de Pueblo Bello, Cesar.

5.2. Específicos

- Identificar taxonómicamente los macrohongos colectados mediante el uso de claves dicotómicas.
- Evaluar la actividad enzimática y biodegradativa de los macrohongos colectados, utilizando residuos agroindustriales como sustrato.
- Comparar los resultados obtenidos con reportes previos sobre enzimas ligninolíticas de macrohongos, a fin de establecer su potencial en aplicaciones biotecnológicas.

6. Marco Referencial

6.1. Antecedentes

Diversos estudios han resaltado la importancia de los macrohongos en la producción de enzimas extracelulares y su potencial biotecnológico, Kuswinanti *et al.* (2019) en Indonesia, evidenciaron la importancia de macrohongos como *Trametes sp.* y *Pleurotus ostreatus* en la producción de enzimas extracelulares y en la degradación de residuos agrícolas, resaltando su potencial biotecnológico y su valor en estrategias sostenibles de biocontrol y aprovechamiento de subproductos lignocelulósicos. De manera complementaria, Rahim *et al.* (2019), realizó una investigación que tuvo como objetivo determinar la diversidad de hongos de pudrición que tienen cuerpo fructífero y crecen en plantaciones de cacao, se llevó a cabo en la aldea de Bila, Pitu Riase, Sidrap Regency, South Sulawesi, los cuerpos fructíferos fueron esterilizados y cultivados en medio PDA. Posteriormente, los aislados se caracterizaron morfológicamente y se evaluaron en medio sólido Czapek dox con diferentes fuentes de carbono (lignina, quitina, celulosa y pectina), donde los basidiomicetos de pudrición mostraron su capacidad de síntesis enzimática. Reportaron una elevada actividad de enzimas como ligninasa, celulasa y amilasa en especies como *Tremella sp.* y *Lycoperdon sp.*, reforzando el papel de los macrohongos en procesos de degradación lignocelulósica.

En Asia, Osono (2020), realizó en Japón una evaluación cuantitativa sobre la capacidad ligninolíticas de más de 1.232 cultivos puros, que incluyó 218 especies de Basidiomycota, Ascomycota y Mucoromycotina de diversos ecosistemas. Se identificó actividad ligninolítica principalmente en familias como Mycenaceae, Marasmiaceae, Rhytismataceae y Xylariaceae. Donde mostraron que los hongos son fundamentales en la descomposición de la hojarasca al degradar lignina y otros compuestos recalcitrantes. Sin embargo, su capacidad ligninolítica varía según el taxón, el sustrato y las condiciones ambientales. Los resultados destacan la importancia de la diversidad fúngica en los procesos de descomposición y su relación con factores ambientales y la calidad de la hojarasca.

En China, Cai *et al.* (2021) evaluaron y compararon las características de crecimiento y enzimas extracelulares de *Morchella importuna* cultivada en glucosa, paja de arroz, aserrín, grano de trigo y una mezcla de proporciones iguales de los tres últimos sustratos vegetales, las

actividades enzimáticas se detectaron durante el cultivo continuo de *M. importuna* en medio MIX, y la expresión relativa de los genes correspondientes se detectó por PCR cuantitativa en tiempo real. Los resultados demostraron que el medio más adecuado para *M. importuna* fue el medio rico en trigo, seguido de glucosa, paja de arroz y aserrín, Asimismo, se evidenció una capacidad limitada para degradar lignocelulosa, aunque con una buena actividad enzimática sobre almidón y hemicelulosa, además de una producción reducida de enzimas ligninolíticas.

Por otra parte, en México, Sanchez *et al.* (2021) efectuó la evaluación de la producción de enzimas lignocelulolíticas a partir de hongos recolectados y analizaron su crecimiento sobre material lignocelulósico. El estudio consideró 18 especies identificadas mediante técnicas taxonómicas y moleculares, encontrando 11 familias diferentes. Las tasas de crecimiento de cada aislado se obtuvieron en medios de cultivo con cáscara de palma africana (PH), cáscara de café (CH), aserrín de pino (PS) y glucosa como control, midiendo el crecimiento diario, encontrando la mayor tasa de crecimiento en el medio CH. Se determinó el índice de potencia de las actividades de celulasa, xilanasas y lignina peroxidasa donde fueron especialmente altas en cepas como *Phlebiopsis flavidoalba*, *Phanerochaete sordida* y *Trametes sanguinea*, lo que confirma su potencial para descomponer compuestos complejos como la lignina.

En Colombia, Bermudez *et al.* (2023) Realizó la evaluación de la biodegradación de residuos agrícolas como pulpa de café y cáscara de cacao, analizando parámetros como bioconversión, eficiencia biológica, relación C/N y cambios en la composición inicial y final. Se observaron reducciones notables en cafeína, fibra bruta, C/N, lignina y polifenoles. Los resultados resaltan que la biodegradación depende tanto de la especie de *Pleurotus* utilizada como de la composición química y física de los residuos, aunque ningún factor actúa como condicionante absoluto. El cultivo de *Pleurotus spp.* se presenta como un proceso biotecnológico con gran potencial para la valorización de residuos y la generación de productos de valor añadido, contribuyendo así a la economía circular.

En Colombia, Orozco *et al.* (2023) realizaron en el departamento del Cesar, investigación con el objetivo de aislar e identificar hongos lignocelulolíticos con capacidad biodegradadora de subproductos de palma de aceite. Los hongos fueron aislados en agar papa dextrosa e identificados según sus características macroscópicas y microscópicas. Se evaluó la actividad lacasa (Oxidación ABTS) y endoglucanasa (CMCasa) durante 13 días por fermentación de estado sólido de 3 subproductos: torta de palmiste, cuesco y fibra. Como resultado la actividad de

endoglucanasa alcanzó 0,12 UI/mL sin diferencias significativas entre los hongos evaluados ($p > 0,05$), mientras que la lacasa presentó 203,33 UI/g con diferencias significativas ($p < 0,05$), confirmando el potencial de estos microorganismos para mejorar de forma sostenible la biodegradabilidad de los subproductos de palma de aceite.

Finalmente, Portella (2024) en la ciudad de Tingo María desarrolló una investigación que tuvo como objetivo la elaboración de biomateriales a partir del micelio de hongos basidiomicetos recolectados en la quebrada Cocheros. Se estudiaron veinte especies, destacándose *Auricularia auricula*, *Crysothlyptis aurantiaca*, *Trametes polyzona* y *Flaviporus brownii* por su alto crecimiento micelial. De estas, *T. polyzona* fue cultivada en aserrín durante tres meses y posteriormente transferida a moldes para la fabricación de biomateriales. Aunque el micelio no presentó un desarrollo adicional en la fase final, las muestras obtenidas mostraron propiedades físicas relevantes, con una densidad promedio de 0,5 g/cm³ y una inflamabilidad del 88,45%.

6.2. Marco teórico

6.2.1. Hongos Basidiomicetos

Los hongos son organismos eucariotas clasificados dentro del reino Fungi, caracterizados por su nutrición heterótrofa, reproducción por esporas y por poseer estructuras filamentosas llamadas hifas, que forman el micelio. Su papel ecológico es fundamental, debido a que son descomponedores primarios de la materia orgánica (Muñoz, 2024).

Dentro de este reino, los basidiomicetos (filo Basidiomycota) representan un grupo clave donde su reproducción es sexualmente mediante la formación de basidios, estructuras especializadas que generan esporas. Muchos de ellos desarrollan cuerpos fructíferos visibles, como las setas. Este grupo incluye especies de gran importancia ecológica y biotecnológica como *Pleurotus ostreatus*, *Ganoderma lucidum* y *Trametes versicolor*, conocidas por su capacidad de degradar compuestos lignocelulósicos (Quintero-Díaz *et al.*, 2006).

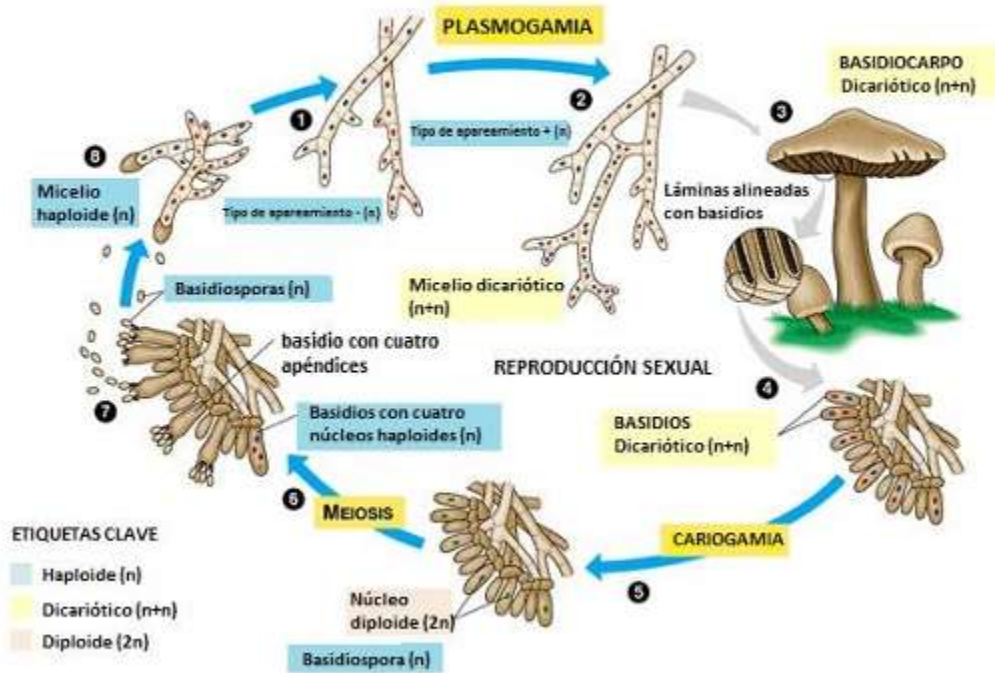


Figura 1. Ciclo de vida de un hongo Basidiomiceto. Tomado de Hernández (2020).

6.3.1. Material lignocelulósico de las plantas

Las plantas terrestres dirigen la mayor parte del carbono fijado fotosintéticamente a lignocelulosa, durante la vida de la planta, esta matriz compleja proporciona integridad estructural y resistencia a herbívoros y patógenos (Matallana *et al.*, 2022).

La lignocelulosa es un compuesto de polímeros de celulosa, hemicelulosa, pectina y lignina. Estos compuestos forman estructuras únicas y complejas en la madera (Tarasov *et al.*, 2018). En general, la lignocelulosa se compone principalmente de una gran fracción de celulosa (40-50%), seguida de hemicelulosa (25-30%) y lignina (15-25%) (Houfani *et al.*, 2020).

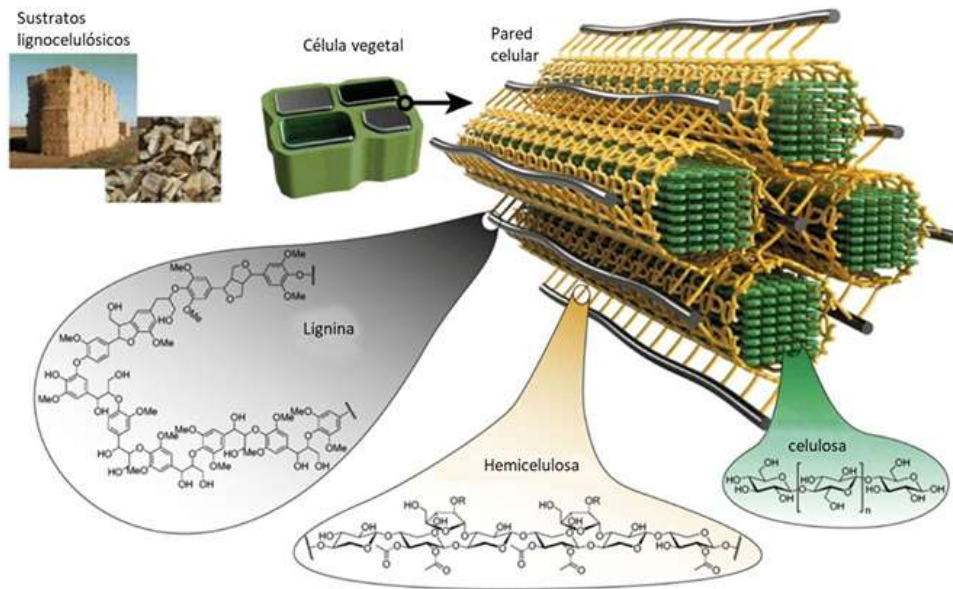


Figura 2. Composición de la biomasa ligno celulolítica. Tomado de García (2024).

6.3.2 Celulosa

La celulosa, el elemento microfibrilar que conforma las paredes primarias de las células. Es un polímero natural que se compone de los enlaces glucosídicos de 1,4 - β . Posee una estructura semicristalina que puede fluctuar en función del tipo de fuente de la que se ha aislado. (Dadwal *et al.*, 2022; Gu *et al.*, 2021). Las microfibrillas de celulosa son los principales componentes estructurales de la madera y las plantas (Molnár *et al.*, 2018). El ejemplo más puro de celulosa es el algodón con un 90% de celulosa en su composición, pero no son menos importantes, la madera que contiene un 50% de celulosa, mientras que la pared de las células vegetales jóvenes tiene un aproximado del 40%.

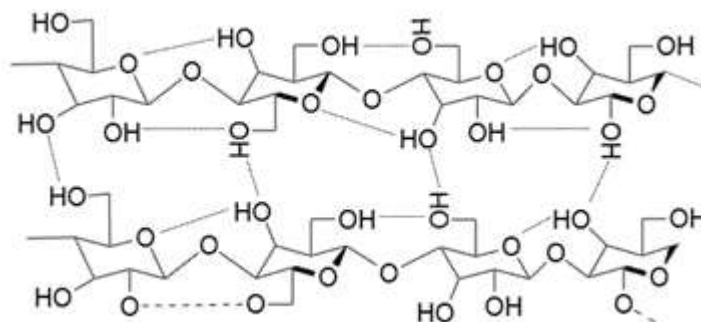


Figura 3. Estructura de la celulosa y enlaces inter e intra-cadenas de la celulosa. Tomado de Matallana *et al.* (2022).

6.3.3 Hemicelulosa.

La hemicelulosa es una parte de las fracciones de madera que consisten en polímeros de polisacáridos con un menor grado de polimerización en comparación con la celulosa y su contenido principal de azúcares D-xilopiranososa, D-glucopiranososa, D-galactopiranososa, L-arabinofuranosa, D-manopiranososa, D-ácido glucopiranosilurónico y ácido D-galactopiranosilurónico (Mansor *et al.*, 2019). Se cree que la complejidad estructural, la interacción de la hemicelulosa con otros polímeros de la pared celular y la interferencia de la hemicelulosa con la accesibilidad de la enzima son los principales factores responsables de la recalcitrancia de la bioenergía (Qaseem *et al.*, 2021). Por otro lado, los xilanos y glucananos constituyen las principales hemicelulosas en los tejidos leñosos (Li *et al.*, 2022). Cabe mencionar que, las hemicelulosas son bastante accesibles al agua, esta característica, que se expande con facilidad, resulta muy beneficiosa en la fabricación de papel, ya que funciona como un adhesivo entre las fibras celulósicas, incrementando así la resistencia del papel.

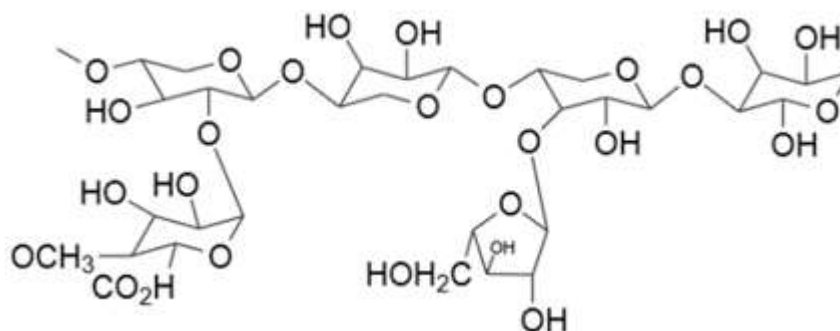


Figura 4. Estructura de la hemicelulosa. Fuente tomada de Matallana *et al.* (2022).

6.3.4 Lignina

La lignina es un polímero complejo de tres dimensiones cuyas subunidades aromáticas se sintetizan mediante el método de los fenilpropanoides. Además, es un elemento que fortalece y otorga rigidez a los tejidos de las plantas (Kijpornyongpan *et al.*, 2022). Al unirse o incrustarse con otros biopolímeros (celulosa y hemicelulosa), la lignina fortalece la integridad y rigidez de la pared celular de la planta produciendo un complejo ensamblaje macromolecular (Li *et al.*, 2016). Por lo general, el 20-30% de la composición seca de las plantas, es decir, la biomasa

lignocelulósica, está formada por ligninas (Tobimatsu & Schuetz, 2019). La lignina interviene como puente de unión entre las células de la madera, generando un material que es señalado de manera resistente a los impactos y flexiones.

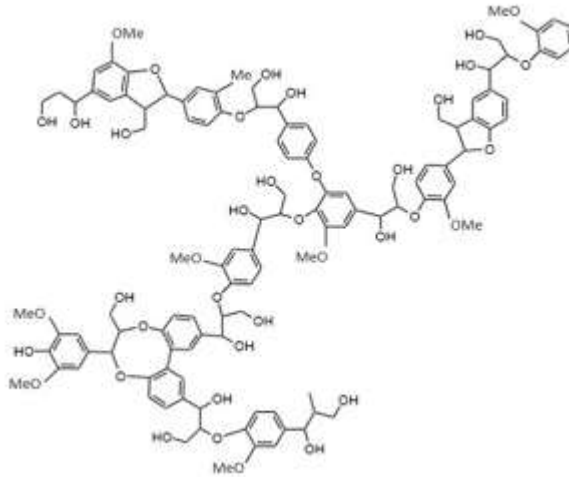


Figura 5. Estructura de la lignina. Tomado de Matallana *et al.* (2022).

6.4. Hongos degradadores de compuestos vegetales

Los hongos son los descomponedores forestales dominantes de la tierra y liberan carbono de nuestra mayor reserva de biomasa aérea (Schilling *et al.*, 2020). Los hongos de la pudrición, como los basidiomicetos, causan podredumbre blanca y parda y pueden degradar la pared celular, alterando las propiedades físicas y mecánicas de la madera (de Castro *et al.*, 2019). Estos hongos pueden clasificarse en dos tipos según el mecanismo mediante el cual degradan la madera (hongos de descomposición blanca y hongos de descomposición parda).

Algunos hongos responsables de la pudrición blanca son: *Trametes versicolor*, *Schizophyllum commune*, *Pleurotus ostreatus*, *Lentinus tigrinus*, *Lentinula edodes*, *Daedalea quercina*, *Bjerkandera adusta*, *Armillaria* spp. Estos hongos se han distinguido por su habilidad para descomponer y mineralizar la lignina mediante un sistema de enzimas extracelulares. Principalmente está formado por tres enzimas, Lignina Peroxidasa (LiP), Manganeso Peroxidasa (MnP) y Lacasa (Quintero Díaz, 2011). Los hongos responsables de pudrición castaña producen el tipo de deterioro más agresivo. Éstos alteran la estructura de la madera producto de la descomposición de la holocelulosa (Murace *et al.*, 2010).

6.5 Enzimas degradadoras de celulosa

Las enzimas que participan en la descomposición de la celulosa se denominan celulasas. Estas actúan de manera conjunta y se clasifican en tres tipos principales: las endoglucanasas, que rompen la cadena de celulosa en puntos internos; las exoglucanasas, que liberan fragmentos más pequeños a partir de los extremos de la cadena; y las β -glucosidasas, que transforman esos fragmentos en moléculas de glucosa (Chen *et al.*, 2020).

6.5.1 Endoglucanasa

La endoglucanasa es la principal enzima para la descomposición de la celulosa ya que comienza la hidrólisis de la celulosa y acelera la tasa de hidrólisis en múltiples pliegues (Boggione *et al.*, 2020); sobre la cadena de celulosa ataca aleatoriamente y divide β - (1,4) - enlaces glicosídicos, celobiohidrolasas, que separan celobiosa y glucosa del extremo no reductor de la celulosa, y β -glucosidasa, que hidroliza la celobiosa y otras celodextrinas solubles en agua (Karnchanatat *et al.*, 2008).

6.5.2 Exoglucanasa

Las exoglucanasas desempeñan muchas funciones importantes en las plantas y son uno de los conjuntos de enzimas más críticos para la degradación de la biomasa (Prawisut *et al.*, 2020). Las exoglucanasas trabajan tanto en los extremos reductores como no reductores de las cadenas de polisacáridos de celulosa, generando así derivados o productos que conducen a glucosa (glucanohidrolasas) o celobiosa (celobiohidrolasa) (Biswas *et al.*, 2020).

6.5.3 β -glucosidasa

La β -glucosidasa es un grupo diverso de enzimas con amplia distribución en bacterias, hongos, plantas y animales y tiene el potencial de ser utilizado en varios procesos biotecnológicos tales como producción de biocombustible, hidrólisis de isoflavonas, mejora del sabor y síntesis de alquil / aril β -D-glucósido y oligosacáridos (Ahmed *et al.*, 2017). Las β -glucosidasas están implicadas en la inducción de la celulasa (debido a sus actividades de transglicosilación) y en la hidrólisis de la celulosa (Zang *et al.*, 2018). Esta enzima hidroliza la celobiosa en dos monómeros de glucosa.

6.6. Aplicaciones en la degradación de residuos

El aprovechamiento biotecnológico de los hongos ligninolíticos se ha explorado para tratar residuos agrícolas y urbanos. En un estudio realizado en San José de Cúcuta, Colombia, *Stereum hirsutum* logró deslignificar residuos vegetales de podas hasta en un 74,2%, donde se evidencia

la capacidad de los extractos enzimáticos fúngicos para el tratamiento de residuos sólidos (Bermón Bayona & Buitrago Fernández, 2018).

Además, Muñoz (2024), estudió la fermentación de residuos agrícolas como el marlo de maíz y los tallos de trigo con *Pleurotus ostreatus* y *Ganoderma lucidum*, observando un aumento significativo en el contenido de proteínas y azúcares reductores, lo que sugiere aplicaciones también en la producción de forraje o biofertilizantes.

7. Marco legal

7.1. Decreto 1376 del 27 de Junio de 2013

El Decreto 1376 del 27 de Junio de 2013 “Por el cual se reglamenta el permiso de recolección de especímenes de especies silvestres de la diversidad biológica con 31 fines de investigación científica no comercial”, en su Artículo 6°, define a las “autoridades ambientales competentes para el otorgamiento del Permiso de Recolección”, a saber, las Corporaciones Autónomas Regionales o de desarrollo sostenible, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA, y los Parques Nacionales Naturales de Colombia.

7.2. Resolución Número 1348 de 2014

La Resolución 1348 de 2014 “por la cual se establecen las actividades que configuran acceso a los recursos genéticos y sus productos derivados para la aplicación de la Decisión Andina 391 de 1996 en Colombia y se toman otras determinaciones”, establece en su Artículo 2° que dichas actividades incluyen, entre otras, “las que pretendan el aislamiento de una o varias moléculas, entendidas estas como micro y macromoléculas, producidas por el metabolismo de un organismo”.

8. Metodología

8.1. Diseño metodológico y características del estudio

8.1.1. Tipo de investigación: Se realizó un estudio descriptivo con enfoque experimental, orientado a la identificación taxonómica de macrohongos y a la evaluación de su potencial enzimático y biodegradativo en sustratos vegetales, con proyección en aplicaciones biotecnológicas.

8.1.2. Línea de investigación: Bioprospección

8.1.3. Enfoque : Experimental

8.1.4. Universo, población y muestra

La recolección de los macrohongos se llevó a cabo en áreas arbóreas del municipio de Pueblo Bello, Cesar, localizado a 1.200 m s. n. m. en la Sierra Nevada de Santa Marta. Este municipio limita al norte, sur y oriente con Valledupar. Los procesos de aislamiento y evaluación de la actividad enzimática se realizaron en el laboratorio de investigación BIOTECGEN, ubicado en la Universidad Popular del Cesar, sede Sabanas.

8.2. Técnicas y procedimientos experimentales

8.2.1. Preparación de la muestra

Se recolectaron 4 macrohongos en troncos de madera en descomposición en el bosque húmedo montano de la vereda Las Delicias, siguiendo la metodología de Murillo (2023). La extracción se realizó con ayuda de una navaja, evitando dañar estructuras subterráneas ; cada carpóforo se retiró cuidadosamente hasta aproximadamente dos centímetros por debajo. Se colectaron aquellos cuerpos jóvenes y adultos en buen estado, envolviéndolos en papel parafinado y cerrando los extremos sin producir daños, con el fin de mantener la humedad. Se transportaron en un recipiente de plástico, hasta el laboratorio de BIOTECGEN de la Universidad Popular del Cesar.

8.3. Fase de laboratorio

8.3.1. Descripción Taxonómica de los cuerpos fructíferos o carpóforos

La identificación taxonómica se realizó por medio del uso de claves dicotómicas de acuerdo a la metodología establecida por Damus *et al.* (2018), donde establece varios parámetros en la identificación 1) tipo de cuerpo fructífero; 2) tipo de carpóforo; 3) tipo, color, forma, superficie, tamaño y presencia o ausencia de escamas en el sombrero; 4) tipo, color, forma superficie, tamaño y presencia o ausencia de anillo o volva del estipe/pie, 5) color y presencia de laminillas o poro en el himenóforo y 6) contexto. Adicionalmente, se empleó la guía de biodiversidad de Pegler (1999), que permitió corroborar la identificación de los macrohongos recolectados mediante imágenes ilustrativas.

8.3.2. Siembra y subcultivo

Se realizó la desinfección de los cuerpos fructíferos descrita por Damus *et al.* (2018), empleando inicialmente hipoclorito de sodio al 5% (v/v) durante 1 minuto y luego alcohol etílico al 70% (v/v) durante 1 minuto, posteriormente se utilizó agua destilada estéril durante 2 minutos y para finalizar se dejaron sobre papel absorbente (Anexo 1). Luego se sembraron porciones de los 4 carpóforos de hongos colectados previamente cortados con una cuchilla estéril en agar papa dextrosa (PDA)(Anexo 2) con antibiótico (cloranfenicol 500 mg/L), para inhibir el crecimiento bacteriano. Las cajas fueron selladas con vinipel y se incubaron a temperatura ambiente durante 5 a 8 días.

Luego de 8 días se realizaron repiques en bloques por duplicados a partir de los 4 hongos previamente inoculados en el medio PDA transfiriendo cuadros de 4 a 5 mm a medios frescos. Se incubaron durante 72 horas a temperatura ambiente. Transcurrido este tiempo se examinaron con un microscopio y se observó su estructura micelial (Ríos *et al.*, 2017).

8.3.3. Descripción macroscópica y microscópica del micelio

La descripción macro y microscópica del micelio se realizó conforme a la metodología definida por Romero *et al.* (2017) Para la descripción macroscópica se realizaron observaciones de su color y apariencia del micelio. Las características microscópicas se visualizaron mediante el método de cinta adhesiva transparente, el cual consiste en depositar en una lámina portaobjetos una gota de lactofenol, con ayuda de la cinta adhesiva se fijó una muestra de hongo

y se observaron en el microscopio, identificando las hifas, esporas y estructuras especializadas como esporangióforos (Pérez-Espitia & Pacheco-Martínez, 2022).

8.3.4. Sustratos lignocelulósicos

Se utilizaron tres sustratos lignocelulósicos maderables y agrícolas: bagazo de caña, tamo de arroz y aserrín de roble siguiendo la metodología empleada por Montoya (2014). Cada sustrato fue previamente triturado (Anexo 3) y posteriormente, se pesaron 30 gramos utilizando una balanza analítica. Las muestras se depositaron en envases de vidrio de 237 mL, los cuales fueron cubiertos con papel kraft y se llevaron a esterilizar en autoclave a 121°C por 15 lb/pulg² por 30 minutos .

8.3.5. Producción de los extractos enzimáticos

Los sustratos fueron inoculados con discos de 5 mm del micelio de los 4 hongos colectados y se incubaron durante cinco días en condiciones de oscuridad para favorecer un crecimiento óptimo del micelio a temperatura ambiente (Cruz, 2017). Este experimento se realizó por duplicado. La obtención de los extractos enzimáticos (celulolíticos y ligninolíticos) se realizó siguiendo la metodología descrita por Montoya (2014). En un falcon de 15 mL se incorporaron 10 mL de agua destilada estéril a 1 g de los sustratos previamente inoculados y se centrifugaron a 1000 rpm durante 12 minutos (Anexo 4). El sobrenadante obtenido se empleó para la determinación de la actividad enzimática. Las lecturas se efectuaron en un espectrofotómetro UV-VIS (Mapada, Shanghai, China) (Anexo 5).

8.3.6. Determinación de la actividad celulolítica mediante hidrólisis de CMC

Para la determinación de la actividad celulolítica se utilizó la metodología descrita por Montoya *et al.* (2014). En primer lugar, se preparó un buffer de acetato de sodio con un pH 4,5, compuesto por ácido cítrico, citrato de sodio y agua destilada. Una vez preparado el buffer, se adicionaron 250 µL de carboximetilcelulosa (CMC) al 0,5%, utilizada como sustrato específico. En un tubo falcon se le adicionaron 250 µL del extracto enzimático y 250 µL de buffer de acetato de sodio, luego se llevó al baño maría a 50 °C durante 30 minutos. Posteriormente, se añadieron 1 mL de reactivo DNS y la mezcla se calentó en baño maría a 90 °C durante 5 minutos.

Transcurrido este tiempo, las muestras se retiraron y se enfriaron en agua con hielo. Finalmente, a cada tubo se le adicionaron 6 mL de agua destilada y se homogeneizó suavemente mediante inversión manual cinco veces (Anexo 5).

La reacción con DNS para los azúcares reductores se mantuvo, calculando la absorbancia a una longitud de onda de 540 nm Molina *et al.* (2014).

La actividad de celulolítica se determinó mediante la fórmula descrita por Peccini *et al.* (2019):

$$Actividad \left(\frac{UI}{ml} \right) = \frac{Ca \left(\frac{mg}{ml} \right) + Vr (ml)}{PMa \left(\frac{mg}{\mu mol} \right) \times Ve \times minuto}$$

Donde,

Ca:concentración de azúcar (glucosa)

Vr:volumen de la reacción

PMa:peso molecular del azúcar (glucosa)

Ve: volumen de enzima purificada o sobrenadante de cultivo

minutos: 30 minutos

8.3.7 Determinación de la actividad oxidativa tipo lacasa mediante ABTS

La determinación de la actividad lacasa fue realizada de acuerdo con la metodología descrita por Montoya *et al.* (2014), utilizando 50 µL del extracto enzimático y 950 µL de ABTS (ácido 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico), preparado en tampón acetato de sodio 0,1 M como sustrato. La reacción se llevó a cabo a 30 °C, registrándose el incremento en la absorbancia a 436 nm después de 1 minuto de iniciada la reacción y durante un período total de 10 minutos.

8.3.8. Curva de calibración o cinética de consumo de la glucosa

Para la determinación de la curva de calibración de glucosa se hizo una solución patrón de glucosa a una concentración de 2% , se diluyó 20 gramos de glucosa en 1000 ml de agua destilada estéril. A partir de esta solución, se ejecutaron diluciones seriadas en tubos de ensayo en las siguientes proporciones: 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} y 10^{-5} . Cada una de las diluciones fue transferida a cubetas de cuarzo y posteriormente se tomó la lectura de su absorbancia a una longitud de onda de 541 nm utilizando un espectrofotómetro. Este procedimiento permitió establecer la curva estándar de glucosa para la posterior cuantificación en las muestras experimentales.(Anexo 6)

La curva de calibración de glucosa se construyó midiendo la absorbancia de diferentes soluciones de glucosa a concentraciones que oscilaron entre 0,02 a 0,1 mg/mL.

8.3.9. Determinación de materia seca o peso seco (*ms*) de los sustratos utilizados.

Se procedió a pesar las cajas de Petri vacías utilizando una balanza analítica. Posteriormente, se tomaron 5 gramos de cada uno de los sustratos sin inocular y se colocaron cuidadosamente en las cajas de Petri previamente taradas. Estas muestras pasaron por un proceso de desecación en un horno natural (Anexo 7), a una temperatura constante de 121 °C por una 1 hora. Finalizado el tiempo de exposición al calor, las cajas se retiraron de la estufa y se trasladaron inmediatamente a un desecador, donde permanecieron hasta alcanzar la temperatura ambiente. Una vez enfriadas, se realizó una nueva pesada con el propósito de determinar la desecación por evaporación.

Este mismo procedimiento fue replicado para los sustratos que previamente habían sido inoculados con los 4 aislamientos fúngicos seleccionados. De esta manera, se buscó establecer comparaciones entre el contenido de humedad de los sustratos antes y después del proceso de inoculación, y así evaluar el efecto del crecimiento fúngico sobre la pérdida de agua en cada materia (Sarmiento, 2024). Esta se determinó por medio de la siguiente fórmula:

$$\%MS = 100 - \%H$$

$$\%MS = \frac{\text{Peso de la muestra seca}}{\text{Peso muestra antes del secado}} \times 100$$

H = humedad de la muestra.

Figura 6. Fórmula para la determinación del peso seco fuente tomada de Sarmiento (2014).

8.4. Análisis estadísticos

Con el objetivo de evaluar los factores cepa y sustrato sobre la variable respuesta (actividad enzimática) los datos obtenidos se analizaron mediante ANOVA multifactorial y el Test de media (Tukey), con un grado de confianza del 95% mediante el software estadístico R studio.

8.5. Revisión bibliográfica

La búsqueda de información se llevó a cabo en bases de datos académicas de amplio reconocimiento, tales como Scopus, ScienceDirect y Google Scholar, seleccionadas por su pertinencia en la difusión de investigaciones en microbiología, biotecnología y micología aplicada. Además, se emplearon términos de búsquedas y conectores booleanos como “Basidiomycetes” OR “Fungi”, “Macromycetes”, OR “Pleurotus ostreatus” OR “Lentinus”, “Trametes” OR “Laccase”, en los campos título, resumen y palabras claves. La estrategia de búsqueda filtró artículos originales y de revisión en un periodo comprendido entre los años 2019-2025, seleccionando aquellos con información más relevante para el estudio. Posteriormente, los resultados de la revisión bibliográfica se contrastaron con los registros de macrohongos colectados en campo, considerando sus características morfológicas y ecológicas. Este análisis permitió inferir los posibles grupos de enzimas extracelulares presentes en las especies locales, tomando como referencia los estudios revisados.

9. Resultados y discusión

9.1. Identificación taxonómica de los macrohongos colectados

Durante la presente investigación se colectaron cuatro muestras de macrohongos en el bosque húmedo montano de la vereda Las Delicias, municipio de Pueblo Bello (Cesar). Estas fueron caracterizadas tanto macroscópica como microscópicamente, lo cual permitió su identificación hasta el nivel de especie, correspondiendo a: *Auricularia polytricha*, *Trametes betulina*, *Lentinus* sp. y *Pleurotus pulmonarius*.

Tabla 1. Descripción macroscópica microscópica de los macrohongos utilizados.

Macrohongos	Identificación macroscópica	Identificación microscópica
<i>Auricularia polytricha</i>	Carpóforo presenta forma semicircular, con superficie ondulada e irregular, y un tamaño aproximado de 4 cm. La parte superior es de color marrón violáceo, con textura suave y finamente vellosa, lo que le confiere un aspecto aterciopelado. La superficie inferior es de color marrón grisáceo, con una textura seca y quebradiza. El carpóforo emite un olor suave y posee un estípote corto o apenas desarrollado. (Anexo 8).	Se observaron hifas hialinas, delgadas, septadas (con tabiques transversales) y ramificadas con esporas alantoides con forma de salchicha. En el centro se observa una estructura esférica en forma de halo pequeño redondo verdoso. (Anexo 9).
<i>Trametes betulina</i>	Carpóforo presenta forma de abanico y crece adherido lateralmente a la madera. Tiene un tamaño aproximado de 8 cm y una consistencia dura. La superficie superior muestra tonalidades entre marrón claro y oscuro, con textura rugosa. La superficie inferior es de color crema	Se observaron hifas hialinas, delgadas, septadas (con tabiques transversales) y ramificadas. Esporas cilíndricas lisas, basidios claviformes.

	pálido y presenta himenio poroide pequeños, uniformes y laminas anastomosadas.	
<i>Lentinus sp.</i>	Carpóforo con píleo de forma plano-convexa, tamaño aproximado de 5 cm de diámetro, el borde está envuelto hacia dentro, superficie seca escamosa sin pelos de color pardo rojizo, el pie puede ser corto o proporcionado, láminas decurrentes, estrechas, muy densas, de color rojizo y de olor muy intenso. Estípite central de color amarillo rojizo, interior semisólido.	Se observan hifas fibuladas, esporas cilíndricas con basilio tetraesporulado, numerosas estructuras ovaladas (Morfología predominantemente ovoide) a elipsoidales, con contornos bien definidos y tamaños similares entre ellas, sin agrupaciones específicas, lisas, no amiloides de tamaño uniforme y color marrón. .
<i>Pleurotus pulmonarius</i>	Carpóforo presenta forma de ostra, con bordes ondulados y un tamaño aproximado de 7 cm. Su color es blanco grisáceo, con una textura lisa en la superficie superior. La parte inferior contiene láminas bien desarrolladas, de color crema pálido, dispuestas de forma densa y decurrentes hacia el estípite. El estípite es corto, lateral y aplanado. El carpóforo emite un olor agradable.	Se evidencian hifas hialinas, septadas y ramificadas. Algunas zonas muestran una mayor densidad micelial, compatible con restos del himenio. Presencia de basilio y esporas lisas hialinas tetraesporulado.

9.2. Categorización taxonómica

La descripción permitió la categorización de las especies en el Reino Fungi, todas ellas vinculadas al Phylum Basidiomycota y a la Clase Agaricomycetes, conjunto que comprende a la mayoría de los hongos macroscópicos con cuerpos fructíferos altamente desarrollados.

Tabla 2. Identificación taxonómica de los 4 macrohongos

Macrohongo	<i>Auricularia polytricha</i>	<i>Trametes betulina</i>	<i>Lentinus sp.</i>	<i>Pleurotus pulmonarius</i>
Reino	Fungi	Fungi	Fungi	Fungi
Phylum	Basidiomycota	Basidiomycota	Basidiomycota	Basidiomycota
Clase	Agaricomycetes	Agaricomycetes	Agaricomycetes	Agaricomycetes
Orden	Auriculariales	Polyporales	Polyporales	Agaricales
Familia	Auriculariaceae	Polyporaceae	Polyporaceae	Pleurotaceae
Género	<i>Auricularia</i>	<i>Trametes</i>	<i>Lentinus</i>	<i>Pleurotus</i>
Especie	<i>Auricularia polytricha</i>	<i>Trametes betulina</i>	<i>Lentinus sp.</i>	<i>Pleurotus pulmonarius</i>

Los macrohongos de pudrición blanca analizados presentaron características morfológicas que coinciden ampliamente con lo reportado en la literatura. En *Auricularia polytricha* se observaron cuerpos fructíferos semicirculares, de superficie ondulada e irregular, textura aterciopelada y coloración marrón violáceo en la parte superior y marrón grisáceo en la inferior, con un estípite corto. Estas descripciones concuerdan con lo señalado por Wu *et al.* (2021) y con la documentación del Instituto de Biología de la UNAM. A nivel microscópico, se apreciaron hifas hialinas, delgadas, septadas (con tabiques transversales) y ramificadas con esporas alantoides con forma de salchicha. En el centro se observa una estructura esférica en forma de halo pequeño redondo verdoso.

En el caso de *Lentinus sp.*, los carpóforos presentaron un sombrero convexo a plano, con superficie escamosa y seca, un estípite fibroso, color pardo rojizo y un olor intenso característico, lo que permitió situar con seguridad dentro de este género, en concordancia con lo descrito por Ishaq *et al.* (2022). Microscópicamente, se observaron esporas elipsoidales, uniformes y no

amiloides, dispersas en el campo visual, lo que confirma su ubicación dentro del orden Polyporales.

Por su parte, *Pleurotus pulmonarius*, conocido comúnmente como “hongo ostra”, mostró carpóforos en forma de concha, con bordes ondulados, superficie lisa, color blanco crema y láminas bien desarrolladas en la parte inferior, coincidiendo con las descripciones de Putra *et al.* (2024). Aunque no se observaron esporas bajo el microscopio, se evidenció un micelio con abundantes ramificaciones, rasgo característico de esta especie.

Finalmente, *Trametes betulina* se identificó por sus carpóforos en forma de abanico, de consistencia dura y superficie superior rugosa con tonalidades que varían del marrón claro al oscuro. La región inferior presentó un himenóforo laminar de color blanquecino, rasgo característico de la especie (Gilbertson & Ryvarden, 1987; Justo & Hibbett, 2011). En el análisis microscópico se observaron hifas delgadas, septadas y ramificadas, además de estructuras globulares posiblemente asociadas a la producción de esporas o vesículas reproductivas, en concordancia con lo descrito en la literatura.

9.3. Actividad celulolítica

Se evidenció actividad celulolítica (UI/g) en los cuatro géneros de macrohongos (*Auricularia polytricha*, *Lentinus* sp., *Pleurotus pulmonarius* y *Trametes betulina*), a lo largo de un período de fermentación comprendido entre 7 y 24 días en sustrato agrícola de caña de azúcar (figura 7). En este sustrato, de acuerdo al efecto de interacción entre días y tipo de cepa de hongo existieron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.001$), observándose el mayor pico de actividad en *Lentinus* sp. al día 16 (Tabla 4), lo que evidencia su alto potencial enzimático en la fase intermedia del proceso de fermentación. Por su parte, *Auricularia polytricha* y *Trametes betulina* presentaron una producción continua y estable de endoglucanasas hasta el día 24, lo que refleja su capacidad de mantener niveles sostenidos de actividad enzimática. En contraste, *Pleurotus pulmonarius* mostró el desempeño más bajo, con valores de actividad endoglucanasa inferiores a 4,2 UI/g luego de 12 días de fermentación.

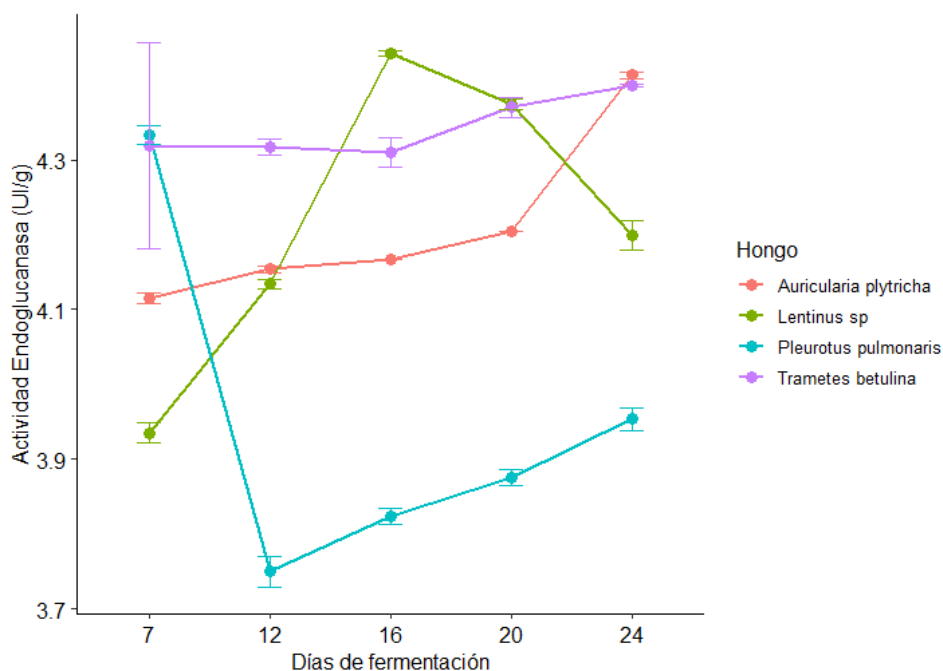


Figura 7. Detección de la actividad celulolítica (UI/g) en *Auricularia polytricha*, *Lentinus sp.*, *Pleurotus pulmonarius* y *Trametes betulina* cultivados en residuos de caña de azúcar, durante un periodo de fermentación de 7 a 24 días.

Tabla 4. Efectos principales y comparaciones múltiples de la actividad celulolítica en residuo agroindustrial de caña. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas según el test de Duncan $p < 0.001$.

Factor	Niveles	Media (UI/g)	Grupo Tukey/Duncan
Hongo	<i>Trametes betulina</i>	4.34	A
Hongo	<i>Lentinus sp.</i>	4.22	B
Hongo	<i>Auricularia polytricha</i>	4.21	D
Hongo	<i>Pleurotus pulmonarius</i>	3.95	C
Días	24	4.24	A
Días	20	4.21	AB
Días	16	4.19	D
Días	7	4.18	D
Días	12	4.09	C

En la figura 8 se representa la actividad celulolítica (UI/g) de los cuatro macrohongos en sustrato agroindustrial de tamo. En este sustrato, el hongo *Pleurotus pulmonarius* fue el hongo con mayor capacidad inicial de producción de endoglucanasas, alcanzando el valor más alto en fases iniciales (día 7–16), con valores de 4,32 UI/g hallándose diferencias estadísticas significativas entre los grupos (Tabla 5). En general todos los macrohongos mostraron eficiencia de producción de enzimas endoglucanasas con un rango entre 4,2 y 4,4 UI/g de sustrato. Sin embargo, *Auricularia polytricha* y *Lentinus sp.* destacaron por su incremento progresivo y sostenido, llegando a igualar a *Pleurotus* hacia el final de la fermentación, lo que refleja buena eficiencia en periodos largos.

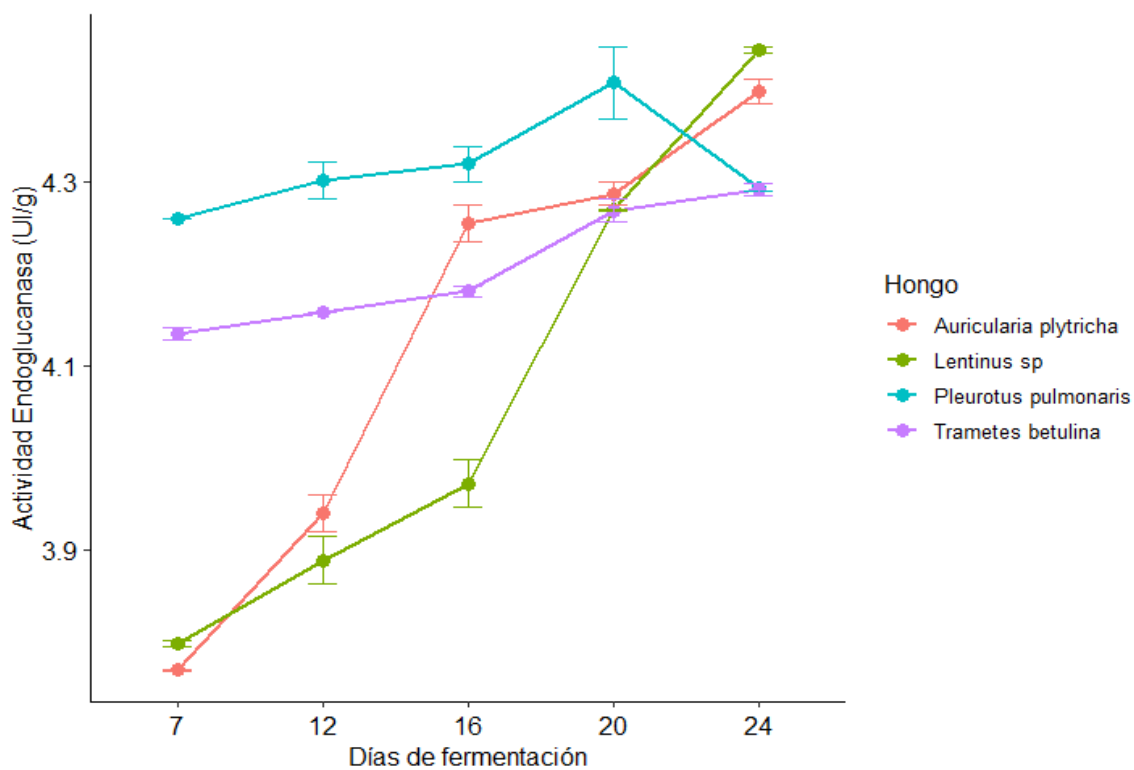


Figura 8. Detección de la actividad celulolítica (UI/g) en *Auricularia polytricha*, *Lentinus sp.*, *Pleurotus pulmonarius* y *Trametes betulina* cultivados en residuo agroindustrial de tamo, durante un periodo de fermentación de 7 a 24 días.

Tabla 5. Efectos principales y comparaciones múltiples de actividad celulolítica en residuo agroindustrial de tamo. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas según el test de Tukey/Duncan $p < 0.001$.

Factor	Niveles	Media (UI/g)	Grupo Tukey/Duncan
Hongo	<i>Pleurotus pulmonarius</i>	4.32	A
Hongo	<i>Trametes betulina</i>	4.21	B
Hongo	<i>Auricularia plytricha</i>	4.13	C
Hongo	<i>Lentinus sp</i>	4.07	D
Días	24	4.36	A
Días	20	4.31	B
Días	16	4.18	C
Días	7	4.07	D
Días	12	3.99	E

La actividad celulolítica mostró variaciones de acuerdo de la especie fúngica y del tiempo de fermentación en el sustrato de aserrín (Figura 9). *Auricularia polytricha* presentó un incremento continuo y sostenido durante todo el periodo, logrando una de las mayores actividades enzimáticas en la última fase de la fermentación (≈ 4.4 UI/g) y una media de 4.28 UI/g con diferencias estadísticas significativas ($p < 0.001$) según las pruebas de Tukey/Duncan (Tabla 6). De manera similar, *Lentinus sp.* exhibió un aumento progresivo aunque más moderado. En contraste, *Pleurotus pulmonarius* alcanzó un pico temprano en el día 12 (4.4 UI/g), seguido de un descenso pronunciado hacia el día 20, con ligera recuperación posterior al final del proceso. Por su parte, *Trametes betulina* mostró un incremento constante hasta el día 16, estabilizándose sin descensos notables en los días siguientes.

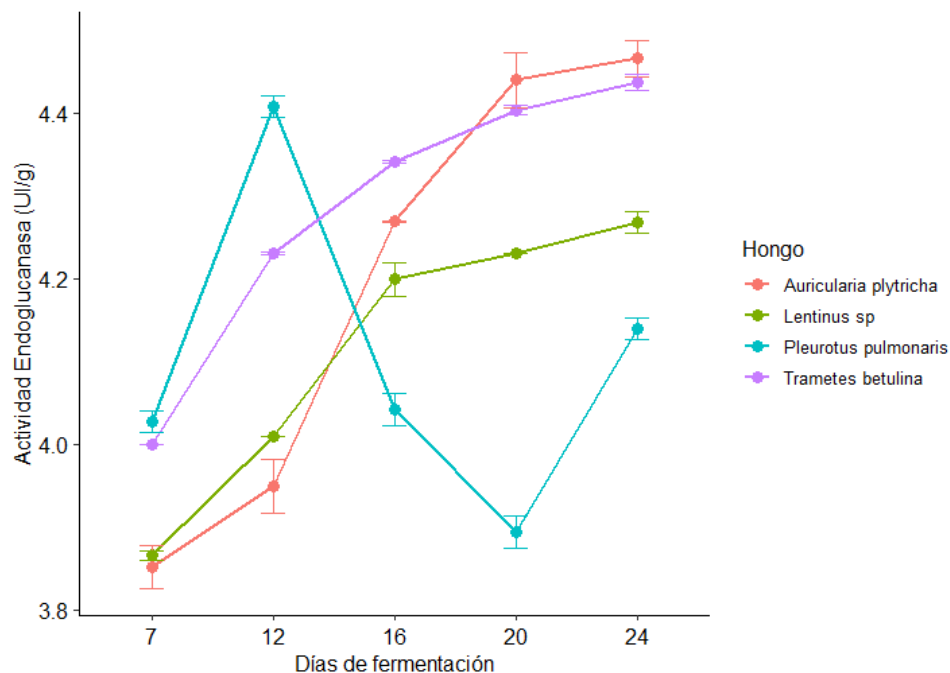


Figura 9. Detección de la actividad celulolítica (UI/g) en *Auricularia polytricha*, *Lentinus sp.*, *Pleurotus pulmonarius* y *Trametes betulina* cultivados en residuo agroindustrial de aserrín, durante un periodo de fermentación de 7 a 24 días.

Tabla 6. Efectos principales y comparaciones múltiples de actividad celulolítica en residuo agroindustrial aserrín. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas según el test de Tukey/Duncan $p < 0.001$.

Factor	Niveles	Media (UI/g)	Grupo Tukey/Duncan
Hongo	<i>Trametes betulina</i>	4.28	A
Hongo	<i>Auricularia polytricha</i>	4.19	B
Hongo	<i>Lentinus sp</i>	4.11	C
Hongo	<i>Pleurotus pulmonarius</i>	4.10	C
Días	24	4.33	A
Días	20	4.24	B
Días	16	4.21	C
Días	7	4.15	D
Días	12	3.93	E

En este estudio se demostró que la producción de la actividad celulolítica en fermentación en estado sólido (SSF), varía según la especie de macrohongo, el tipo de sustrato agroindustrial y el tiempo de incubación. De manera similar, Kim *et al.* (2024) reportaron que en fermentación sólida de soya en distintos hongos exhibieron perfiles enzimáticos diferenciados tras 10 días de cultivo. En general, los hongos de pudrición blanca, como *Pleurotus* y *Trametes*, destacan por su capacidad de degradar residuos lignocelulósicos (paja, bagazo de caña, aserrín, entre otros) mediante la secreción de celulasas, hemicelulasas y ligninasas (Murrieta *et al.*, 2002), siendo el sustrato y la duración del cultivo factores determinantes en la actividad enzimática (Escudero *et al.*, 2013). En los resultados obtenidos, *Lentinus sp.* mostró un alto potencial en la degradación de residuos agroindustriales de caña, con un comportamiento comparable al de *Pleurotus pulmonarius*, lo que respalda el uso de ambos géneros en procesos de pretratamiento de biomasa lignocelulósica (Fasiku, 2021). Por su parte, *Auricularia polytricha* y *Trametes betulina* mantuvieron una producción sostenida de endoglucanasas durante la fermentación. Esto concuerda con lo descrito por Coniglio *et al.* (2022), quienes observaron que *Auricularia* coloniza de manera estable el bagazo de caña y libera enzimas celulolíticas de forma progresiva en periodos prolongados, además de presentar una alta eficiencia biológica en aserrín y salvado de arroz (Kumla *et al.*, 2020). De manera consistente, el comportamiento estable de *Trametes*

coincide con lo señalado en otras especies del género, reconocidas por su fuerte capacidad ligninolítica y eficacia en el pretratamiento biológico del bagazo (Khan *et al.*, 2024).

El análisis comparativo entre sustratos mostró patrones diferenciados. En tamo, *Pleurotus pulmonarius* presentó el mayor rendimiento promedio (4,32 UI/g), coincidiendo con lo señalado por Olagunju *et al.* (2023), quienes destacaron que la duración del cultivo influye críticamente en la producción enzimática de *Pleurotus ostreatus* en tallos de maíz, con un rango óptimo de 2 a 4 semanas. En este mismo sustrato, *Lentinus* sp. alcanzó su máxima actividad enzimática a los 24 días (4,44 UI/g), coincidiendo con el pico global (4,36 UI/g). En contraste, en aserrín, *Trametes betulina* obtuvo el mejor desempeño promedio (4,28 UI/g), mientras que *A. polytricha* registró la mayor actividad absoluta al final del periodo (día 24), con 4,47 UI/g, valor que también representó el mayor promedio global del sustrato (4,33 UI/g). Estos resultados reafirman lo señalado por Chilakamarry *et al.* (2022) y Behera & Ray (2016), quienes subrayan que la eficiencia de la fermentación sólida depende no solo de la cepa, sino también de su compatibilidad con el sustrato y del tiempo de incubación.

En conjunto, los hallazgos demuestran que la selección de cepa debe ajustarse al sustrato específico: *Trametes* mostró un mejor desempeño en caña y aserrín, mientras que *Pleurotus* lo hizo en tamo; además, el día 24 se identificó como el punto óptimo general de actividad, excepto para *Lentinus* sp. en caña, que alcanzó su máximo a los 16 días. Esto confirma que las interacciones hongo-sustrato-tiempo son críticas, pues incluso especies con menor rendimiento promedio, como *A. polytricha*, pueden alcanzar máximos absolutos en condiciones específicas. En consecuencia, la optimización de fermentaciones sólidas debe considerar simultáneamente la elección de la cepa, tipo de sustrato, tamaño del inóculo y variables de crecimiento (Perwez & Al Asheh, 2024). La consistente expresión máxima observada al final del periodo en la mayoría de condiciones sugiere que los tiempos prolongados favorecen la actividad endoglucanasa, aunque las excepciones encontradas resaltan la importancia de diseñar procesos ajustados a cada combinación de factores.

9.4. Actividad lacasa

A partir de las 168 horas se registró la absorbancia generada por la oxidación de ABTS a 436 nm, empleando su coeficiente de extinción molar ($\epsilon = 29.300 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) para convertir los cambios de absorbancia por minuto en unidades de actividad (μmol de ABTS oxidados/minuto). La evaluación de la actividad lacasa (UI/g) durante la SSF de caña, tamo y aserrín con cuatro cepas fúngicas (*Pleurotus pulmonarius*, *Trametes betulina*, *Lentinus* sp. y *Auricularia polytricha*), mostró diferencias significativas ($p < 0,05$), tanto por el efecto individual de la cepa como por el tiempo de fermentación y la interacción de estos factores en cada uno de los sustratos evaluados.

En el sustrato de caña (Figura 10), *Pleurotus pulmonarius* registró la mayor actividad lacasa promedio (26,33 UI/g) (Tabla 7), alcanzando su punto máximo en el día 12 de fermentación, con un valor de 31,17 UI/g ($p < 0,001$). Esta cepa mostró niveles elevados desde el día 7, aunque al día 24 la actividad descendió hasta 21,46 UI/g. Estudios recientes, como el de Silva *et al.* (2025), señalan que *P. pulmonarius* puede alcanzar altos niveles de actividad enzimática al cultivarse en sustratos lignocelulósicos, presentando un patrón de incremento progresivo. Estos resultados respaldan la influencia conjunta de la especie fúngica y el tiempo de fermentación en la eficiencia enzimática, en concordancia con lo reportado por Zulet *et al.* (2016), quienes reafirman que la actividad enzimática depende de manera significativa de la interacción entre el hongo empleado y el periodo de cultivo.

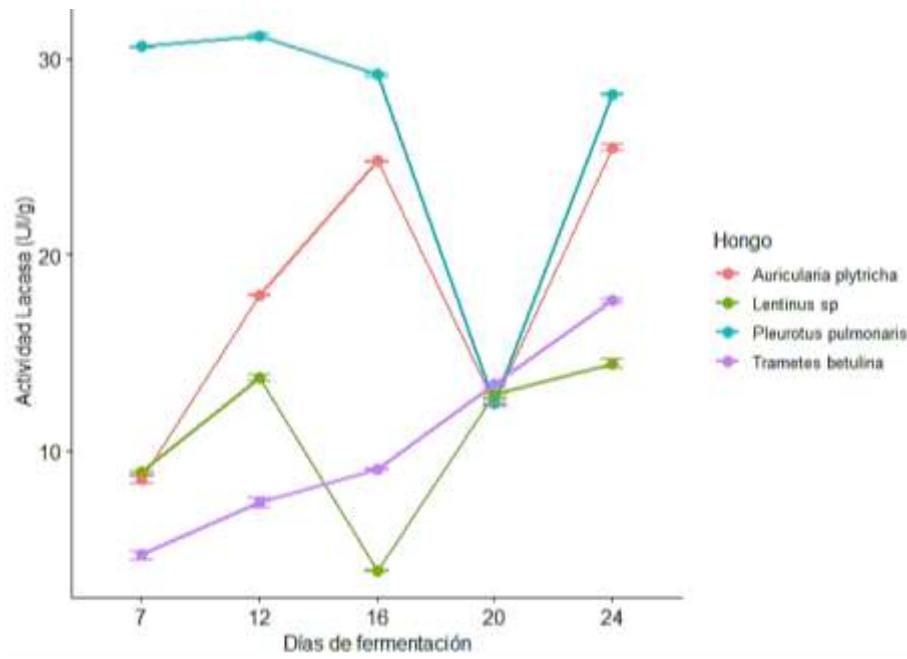


Figura 10. Detección de la actividad lacasa (UI/g) en *Auricularia polytricha*, *Lentinus sp.*, *Pleurotus pulmonarius* y *Trametes betulina* cultivados en residuo agroindustrial de caña, durante un periodo de fermentación de 7 a 24 días.

Tabla 7. Efectos principales y comparaciones múltiples de actividad lacasa en caña. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas según el test de Tukey/Duncan $p < 0.001$.

Factor	Niveles	Media (UI/g)	Grupo Tukey/Duncan
Hongo	<i>Trametes betulina</i>	10.45	D
Hongo	<i>Lentinus sp.</i>	10.78	C
Hongo	<i>Auricularia polytricha</i>	17.85	C
Hongo	<i>Pleurotus pulmonarius</i>	26.33	A
Días	24	21.46	A
Días	20	12.79	E
Días	16	16.75	C
Días	7	13.20	D
Días	12	17.57	B

En el subproducto tamo, la cepa con mayor actividad lacasa promedio fue *Pleurotus pulmonarius* (16,21 UI/g) evidenciando diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) (Tabla 8).

De forma similar, Aimable *et al.* (2025), reportaron que *Pleurotus ostreatus* alcanzó su máxima actividad (13,8 UI/g), a los 20 días de fermentación, seguida de una disminución durante la fase de crecimiento del micelio, lo que sugiere que la lacasa desempeña un papel clave en la eficiencia biotecnológica de diferentes cepas. Este comportamiento resalta la importancia de considerar no solo el efecto individual de cada factor, sino también sus interacciones. En general, el pico global de actividad en el tamo se presentó al día 16 (21,54 UI/g), lo que evidencia una dinámica de producción más temprana en comparación con la caña.

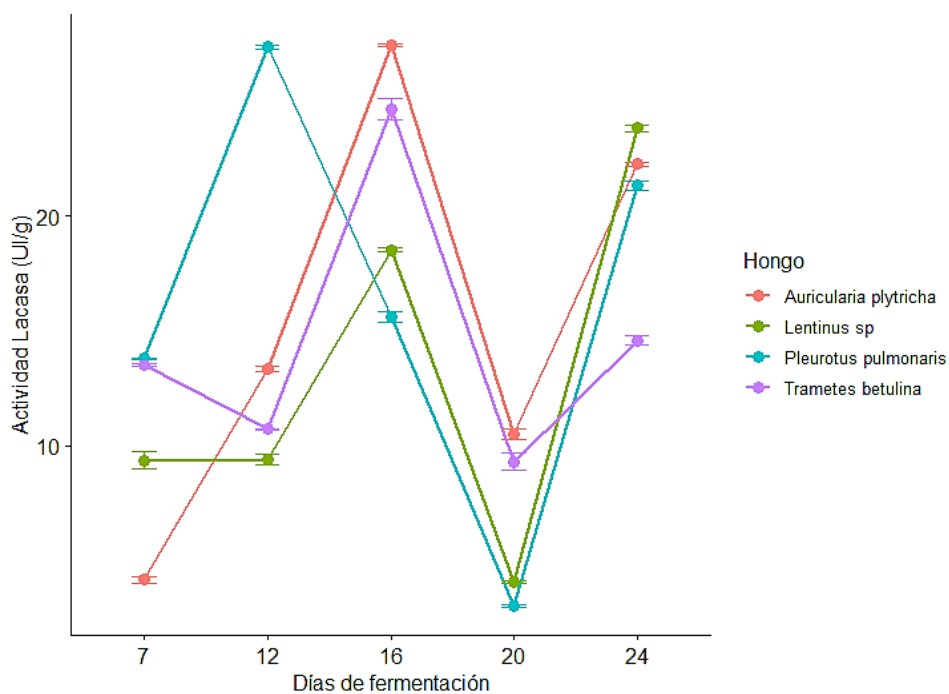


Figura 11. Detección de la actividad lacasa (UI/g) en *Auricularia polytricha*, *Lentinus sp.*, *Pleurotus pulmonarius* y *Trametes betulina* cultivados en residuo agroindustrial de tamo, durante un periodo de fermentación de 7 a 24 días.

Tabla 8. Efectos principales y comparaciones múltiples de actividad lacasa en residuo agrícola de tamo. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas según el test de Tukey/Duncan $p < 0.05$.

Factor	Niveles	Media (UI/g)	Grupo Tukey/Duncan
Hongo	<i>Trametes betulina</i>	14.55	C
Hongo	<i>Lentinus</i> sp.	13.04	D
Hongo	<i>Auricularia polytricha</i>	15.54	B
Hongo	<i>Pleurotus pulmonarius</i>	16.21	A
Días	24	20.48	B
Días	20	6.74	E
Días	16	21.53	A
Días	7	10.22	D
Días	12	15.21	C

En el aserrín, *Auricularia polytricha* fue la cepa más sobresaliente (Figura 12), tanto en promedio (23,01 UI/g) como en combinación con el día 24 de fermentación, cuando alcanzó una actividad máxima de 65,20 UI/g, superando significativamente al resto de tratamientos ($p < 0,05$) (Tabla 9). De manera consistente, este mismo día presentó la mayor producción promedio en el sustrato (32,14 UI/g), lo que indica que, a diferencia del tamo, el aserrín requiere periodos de fermentación más prolongados para inducir una elevada actividad enzimática.

Estos hallazgos confirman que el tipo de sustrato, la especie fúngica y el tiempo de fermentación son factores determinantes en la expresión de la lacasa. De acuerdo con Han *et al.* (2022), esta enzima es la ligninolítica más eficaz y mejor estudiada en la oxidación de lignina por hongos de pudrición blanca. Su elevada actividad se relaciona con la capacidad de especies como *Pleurotus pulmonarius* y *A. polytricha* para colonizar y degradar polímeros de lignina recalcitrante, aunque con respuestas diferenciales según el residuo lignocelulósico. La marcada superioridad de *A. polytricha* en aserrín (65,20 UI/g a los 24 días), resalta la necesidad de optimizar la interacción cepa–sustrato–tiempo para maximizar la producción enzimática.

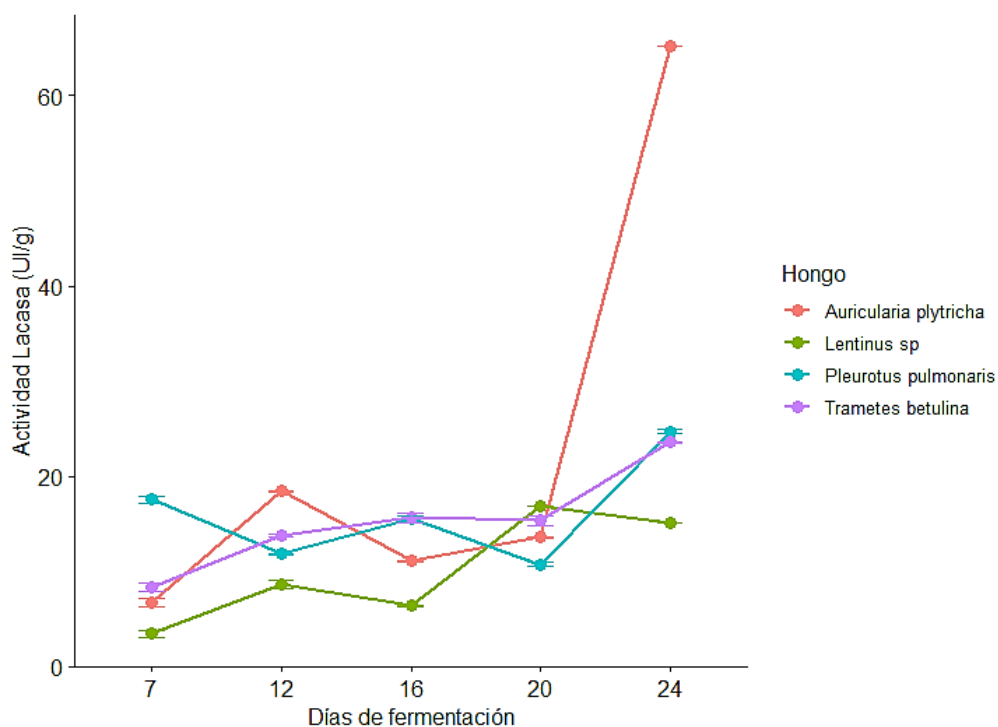


Figura 12. Detección de la actividad lacasa (UI/g) en *Auricularia polytricha*, *Lentinus sp.*, *Pleurotus pulmonarius* y *Trametes betulina* cultivados en residuo agroindustrial de aserrín, durante un periodo de fermentación de 7 a 24 días.

Tabla 9. Efectos principales y comparaciones múltiples de actividad lacasa en residuo agroindustrial de aserrín. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas según el test de Tukey/Duncan $p < 0.05$

Factor	Niveles	Media (UI/g)	Grupo Tukey/Duncan
Hongo	<i>Trametes betulina</i>	15.32	C
Hongo	<i>Lentinus sp</i>	10.08	D
Hongo	<i>Auricularia polytricha</i>	23.00	A
Hongo	<i>Pleurotus pulmonarius</i>	16.06	B
Días	24	32.13	A
Días	20	14.14	B
Días	16	12.15	D
Días	7	9.00	E
Días	12	13.15	C

9.5. Determinación de peso seco

El análisis del contenido de humedad de los sustratos evaluados en interacción con las cepas fúngicas, presentaron variaciones significativas entre el inicio y el final del proceso estas diferencias reflejan procesos de absorción de agua, retención y actividad metabólica de los hongos sobre cada uno de los subproductos.

En el sustrato de tamo, el contenido de humedad inicial osciló entre 36,53 % (*P. pulmonarius*) y 56,49 % (*Auricularia*). Al final del proceso, todos los tratamientos mostraron un incremento significativo en los niveles de humedad, alcanzando valores entre 72,71 % y 99,95%. (Tabla 10). El tratamiento con *Trametes betulina* presentó el mayor porcentaje de humedad final (81,99 %), lo que sugiere una mayor capacidad del micelio para retener agua o posiblemente una mayor producción de agua metabólica durante su desarrollo. Este comportamiento puede estar asociado con una alta colonización fúngica del sustrato, como lo han reportado Singh *et al.* (2020), quienes observaron un aumento en la humedad final en residuos lignocelulósicos sometidos a fermentación sólida con cepas basidiomicetos.

Tabla 10. Determinación del porcentaje de humedad inicial y final en los cuatro macrohongos y tres sustratos lignocelulósicos evaluados.

Hongo	Sustrato	% humedad inicial	% humedad final
<i>Lentinus sp.</i>	Tamo	55,3	77,38
<i>P. pulmonarius</i>	Tamo	36,53	72,71
<i>A. polytricha</i>	Tamo	56,52	70,41
<i>T. betulina</i>	Tamo	56,47	81,99
<i>Lentinus sp.</i>	Caña	65,96	79,2
<i>P. pulmonarius</i>	Caña	54,12	71,38
<i>A. polytricha</i>	Caña	54,4	72,23
<i>T. betulina</i>	Caña	57,05	69,32
<i>Lentinus sp.</i>	Aserrín	43,03	56,86
<i>P. pulmonarius</i>	Aserrín	46,92	99,95
<i>A. polytricha</i>	Aserrín	49,77	68,94
<i>T. betulina</i>	Aserrín	38,6	57,17

En cuanto al sustrato de caña, los valores iniciales de humedad oscilaron entre 54,12 % (*P. pulmonarius*) y 65,96 % (*Lentinus* sp.), mostrando una retención intermedia comparada con el tamo. Al finalizar el proceso fermentativo, los valores aumentaron hasta un rango de 69,32 % a 79,20 %, siendo nuevamente la cepa *Lentinus* sp. la que alcanzó el valor más alto. A pesar de este aumento, los cambios fueron menos marcados que en el sustrato de tamo, lo que sugiere que la caña tiene una menor capacidad de absorción o que los hongos mostraron menor actividad sobre este sustrato, posiblemente por su composición más rica en azúcares solubles y menor contenido lignocelulósico complejo.

Por otro lado, el aserrín presentó los porcentajes de humedad inicial más bajos, con valores entre 38,60 % (*Trametes*) y 50,59 % (*Auricularia*). Al término de la fermentación, se observó un incremento moderado en todos los tratamientos, alcanzando entre 56,86 % y 68,94 %. El tratamiento con *Auricularia polytricha* mostró el mayor aumento de humedad (68,94 %), lo que podría estar asociado a una mayor degradación de la lignina presente en este sustrato, favoreciendo la retención hídrica por parte del micelio, como ha sido sugerido por Zhang *et al.* (2019), en estudios similares con basidiomicetos y residuos maderables.

De forma general, el análisis comparativo entre las etapas sugiere que todos los sustratos incrementaron su humedad durante la fermentación, siendo más notable en el tamo y menos pronunciado en el aserrín. Esto puede deberse tanto a las propiedades fisicoquímicas de cada sustrato como a la capacidad enzimática diferencial de cada cepa. La retención de humedad es un factor crítico en procesos SSF, ya que influye directamente en el crecimiento fúngico, la producción enzimática y la eficiencia de degradación del material lignocelulósico. Estos resultados respaldan la importancia de seleccionar adecuadamente tanto el sustrato como la cepa fúngica, considerando las interacciones entre ambos para maximizar el rendimiento biotecnológico del proceso.

9.6. Revisión bibliográfica

De acuerdo con la revisión bibliográfica, se ha reportado que los macrohongos *Auricularia polytricha*, *Trametes betulina*, *Lentinus* sp. y *Pleurotus pulmonarius* poseen la capacidad de sintetizar diversas enzimas extracelulares involucradas en la degradación de compuestos lignocelulósicos. Entre ellos se encuentra la lignina, un complejo heteropolímero aromático tridimensional que resulta de la polimerización deshidrogenasa de los alcoholes cumarílico, coniferílico y sinapílico (Hou *et al.*, 2020). Debido a su compleja estructura, la lignina es difícil de degradar, ya que su masa molecular oscila entre 600 y 1000 kDa, lo que la hace demasiado grande para ser absorbida por los hongos e incorporada a un ataque intracelular. Los macrohongos basidiomicetos secretan enzimas extracelulares clave para la degradación de biomasa lignocelulósica. Estas incluyen enzimas oxidativas (lacasas, manganeso peroxidasas y lignina peroxidasas), que actúan sobre la lignina, y enzimas hidrolíticas (celulasas y hemicelulasas), que rompen celulosa y hemicelulosa. Estudios recientes destacan que la producción de celulasas y xilanasas en estos hongos está regulada por condiciones fisiológicas y ambientales, lo que los convierte en biocatalizadores con gran potencial en procesos de biorefinería y aprovechamiento de residuos agrícolas (Elisashvili *et al.*, 2023).

Los hongos de pudrición blanca son capaces de mineralizar la lignina, un polímero fenilpropanoico extremadamente resistente a la hidrólisis tradicional. Esto se logra a través de enzimas extracelulares que permiten la formación de radicales libres y actúan con alta especificidad y sin esteriores (radicales H•, OH•), ejecutando mecanismos oxidativos no estereoselectivos (Torres *et al.*, 2024). Su eficacia en la degradación de lignina y compuestos aromáticos derivados se debe a su repertorio de enzimas ligninolíticas —incluyendo peroxidasas, lacasas y monooxigenasas— que funcionan en colaboración con sistemas intracelulares de degradación (Wu *et al.*, 2023), adaptándose eficazmente a sustratos diversos y ambientales cambiantes.

En *Auricularia polytricha* se ha reportado la producción de lacasas y manganeso peroxidasas en condiciones de bajo contenido nutricional, así como la secreción de celulasas y xilanasas durante la fermentación de residuos agrícolas, lo que confirma su capacidad lignocelulolítica versátil (Jiang *et al.*, 2020). Por su parte, en *Trametes betulina* se ha evidenciado un sistema ligninolítico muy eficiente, respaldado por la producción simultánea de lacasas, manganeso peroxidasas y lignina peroxidasas, enzimas clave en la descomposición de

compuestos aromáticos complejos. Estudios recientes con cepas de *Trametes* aisladas de hojarasca amazónica reflejan que sobresalen por su elevada actividad en estas enzimas y su capacidad para decolorar colorantes recalcitrantes, lo que demuestra su gran potencial en estrategias de degradación ambiental y biorremediación (De Sousa *et al.*, 2024).

Pleurotus pulmonarius se reconoce por su capacidad de producir un amplio conjunto de enzimas extracelulares, entre las que destacan las lacasas y manganoso peroxidases, además de enzimas hidrolíticas como celulasas y hemicelulasas. Esta combinación enzimática le permite descomponer de manera eficiente los componentes lignocelulósicos, abarcando tanto la lignina como los polisacáridos estructurales. Gracias a estas propiedades, la especie se ha convertido en un referente en estudios de aprovechamiento de residuos agrícolas y en estrategias de biorremediación ambiental (Chourasia *et al.*, 2021).

En conjunto, estas especies demuestran que los macrohongos no solo cumplen una función ecológica esencial en la descomposición de la biomasa lignocelulósica, sino que también representan una fuente valiosa de biocatalizadores extracelulares con amplias aplicaciones en procesos industriales sostenibles. Esta dualidad no solo garantiza su papel ecológico como descomponedores primarios en los ecosistemas forestales, sino que también los convierte en herramientas prometedoras para aplicaciones biotecnológicas en biorefinería, bioenergía y remediación ambiental.

10. Conclusiones

La evaluación de la actividad enzimática evidenció que la producción de endoglucanasas y lacasas varía según la especie de macrohongo, el sustrato y el tiempo de fermentación. *Lentinus* sp. mostró alto potencial en caña, *Pleurotus pulmonarius* destacó en tamo y *Auricularia polytricha* en aserrín, mientras que *Trametes betulina* presentó un comportamiento estable y significativo en varios sustratos.

Respecto a la actividad lacasa, *P. pulmonarius* mostró un desempeño superior en caña y tamo, alcanzando valores de hasta 31,17 UI/g al día 12, mientras que *A. polytricha* se consolidó como la cepa más eficiente en aserrín, con una producción máxima de 65,20 UI/g al día 24, lo que evidencia la importancia de periodos prolongados de fermentación en sustratos maderables.

La revisión de literatura permitió establecer que los macrohongos *Auricularia polytricha*, *Trametes betulina*, *Lentinus* sp. y *Pleurotus pulmonarius* poseen un repertorio enzimático extracelular diverso y especializado en la degradación de biomasa lignocelulósica. Se destacan enzimas oxidativas como lacasas, manganeso peroxidasas y lignina peroxidasas, así como enzimas hidrolíticas como celulasas y hemicelulasas, cuya acción sinérgica les confiere alta eficacia en la descomposición de lignina y polisacáridos estructurales.

11. Recomendaciones

Evaluar combinaciones de residuos lignocelulósicos (mezclados entre bagazo, tamo y aserrín) como sustratos alternativos, con el fin de aprovechar sinérgicamente sus propiedades fisicoquímicas y determinar si existen mejoras en la eficiencia de los cultivos.

Realizar la caracterización molecular por medio de secuenciación de cada una de las cepas de macrohongos con el propósito de confirmar género y especie.

Realizar análisis enzimático específicos de celulasas y lacasa, manganeso peroxidasa y lignina peroxidasa, para caracterizar el perfil enzimático completo de cada cepa, y así seleccionar la especie más adecuada según el tipo de residuo o el objetivo biotecnológico (biopulpaje, bioremediación, compostaje, etc.).

Para fortalecer el análisis en futuros estudios, se recomienda complementar la determinación de la actividad enzimática con técnicas de identificación y caracterización específicas de enzimas presentes en los extractos; como zimografía (SDS-PAGE), cromatografía (HPLC o de exclusión molecular) y espectrometría de masas (LC-MS-MS). Estas metodologías permitirían relacionar con mayor precisión las enzimas presentes en los extractos con la actividad observada, optimizando así su aplicación biotecnológica.

12. Bibliografía

- Ahmed, A. Nasim, F, Batool, K. y Bibi, A. (2017). β -glucosidasa microbiana: Fuentes, producción y aplicaciones. *Revista de Microbiología Aplicada y Ambiental* , 5 (1), 31-46.<https://www.researchgate.net/publication/317932652>
- Aimable. N, Mediatrice, H. Claude, I. Biregeya, J. Hu, Y. Zhou, H. Liu, P. Li, J. Lin, Z. Lu, G. Lin, D. (2025) Evaluación de la actividad enzimática y el perfil de nutrientes de tres especies de *Pleurotus* bajo el cultivo pasteurizado de *Cenchrus fungigraminus*. Ediciones Curr Mol Biol. 47(3):143. doi: 10.3390/cimb47030143. PMID: 40136397; PMCID: PMC11941170.
- Arias, B. (2024). *Producción y caracterización de las enzimas lignocelulolíticas del hongo de pudrición blanca de la madera Bjerkandera adusta en cocultivo con el hongo de pudrición parda Gloeophyllum trabeum.*
- Ashokkumar, V. Venkatkarthick, R. Jayashree, S. Chuetor, S. Dharmaraj, S. Kumar, G. Chen, H. Ngamcharussrivichai, C. (2022). Advances in integrated fungal biorefineries for lignocellulosic waste valorization. *Biotechnology Advances*. DOI:10.1016/j.biortech.2021.126195
- Bai, Z., Ma, Q., Dai, Y., Yuan, H., Ye, J., & Yu, W. (2017). Spatial Heterogeneity of SOM Concentrations Associated with White-rot Versus Brown-rot Wood Decay. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14181-7>
- Barrantes, I. Marín, E. Murillo, M. Rojas, D. & Vallecillo, S. (2021). Micorremediación: el caso de *Pleurotus ostreatus* sobre polímeros sintéticos como el acetato de celulosa. *Revista Tecnología en Marcha*, 34(1), 1-10. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/6478

- Behera, S. & Ray, R. (2016). Solid-state fermentation for production of microbial cellulases: Recent advances and improvement strategies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 84, 287–293. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.12.025>
- Berglund, J. Angles, T. Vilaplana, F. Widmalm, G. Bergenstråhle, M. Lawoko, M. Henriksson, G. Lindström, M. & Wohler, J. (2016). A molecular dynamics study of the effect of glycosidic linkage type in the hemicellulose backbone on the molecular chain flexibility. *Plant Journal*, 88(1), 56–70. <https://doi.org/10.1111/tpj.13259>
- Bermón, Y. & Buitrago, K. (2018). Evaluación de la degradación de los residuos vegetales de las podas arbóreas de la ciudad de San José de Cúcuta utilizando extractos enzimáticos obtenidos de hongos de la pudrición blanca [Trabajo de grado, Universidad Francisco de Paula Santander]. Repositorio UFPS. <https://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/2690>
- Bermúdez, R. García, N. Aguilera, I. & Mendoza, L. (2023). Biodegradación de residuos lignocelulósicos secundarios por *Pleurotus* spp. *Tecnología Química*, 43(1), 157-172. Epub 25 de enero de 2023
- Biswas, S. Saber, M. Tripty, I. Karim, M. Islam, A. Hasan, S. Alam, A. S. Jahid, M. & Hasan, N. (2020). Molecular characterization of cellulolytic (endo- and exoglucanase) bacteria from the largest mangrove forest (Sundarbans), Bangladesh. *Annals of Microbiology*, 70(1). <https://doi.org/10.1186/s13213-020-01606-4>
- Boggione, J. Allasia, M. Aguilar, C. & Farruggia, B. (2020). Valorization of corn cob for the obtention and purification of endoglucanase produced by SSF. *Process Biochemistry*, 88(June 2019), 106–112. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.09.026>
- Cai, Y. Ma, X. Zhang, Q. Yu, F. Zhao, Q. Huang, W. Song, J. & Liu, W. (2021). Physiological Characteristics and Comparative Secretome Analysis of *Morchella importuna* Grown on Glucose, Rice Straw, Sawdust, Wheat Grain, and MIX Substrates. *Frontiers in Microbiology*, 12(May), 1–17.

- Camacho R. Gerardo, J. Guillén, K. & Sánchez, J. (2017). Ligninolytic enzyme production by white rot fungi during paraquat (herbicide) degradation. *Revista Argentina de Microbiología*, 49(2), 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2016.11.004>
- Campi, M. Grassi, E. & Armoa, J. (2016). Evaluación del crecimiento de macrohongos de interes biotecnológico en residuos agroindustriales y madereros. *Steviana*, Vol. 8(2)(December), 59–67.
- Chaparro, D. Rosas, D. y Varela, A. (2009) Aislamiento y evaluación de la actividad enzimática de hongos descomponedores de madera (Quindío, Colombia) S1130140609000114 (3).pdf
- Chen, S. Sun, S. Zhong, C. Wang, T. Zhang, Y. & Zhou, J. (2020). Bioconversion of lignocellulose and simultaneous production of cellulase, ligninase and bioflocculants by *Alcaligenes faecalis*-X3. *Process Biochemistry*, 90(November 2019), 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.11.008>
- Chourasia, V. Pandey, A.Pantalón, K. & Henry, R. (2021). Improving enzymatic digestibility of sugarcane bagasse from different varieties of sugarcane using deep eutectic solvent pretreatment. *Bioresource Technology*, 337, 125480. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125480>
- Coniglio, R., Santana, E., Andrade, A., & Souza, C. (2022). *Solid-state bioprocessing of sugarcane bagasse by *Auricularia* spp. for enzyme production and phenolic compounds release*. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101092. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101092>
- Cragg, S. Beckham, G. Bruce, N. Bugg, T. Distel, D. Dupree, P. Etxabe, A. Goodell, B. Jellison, J. McGeehan, J. McQueen-Mason, S. Schnorr, K. Walton, P. Watts, J. & Zimmer, M. (2015). Lignocellulose degradation mechanisms across the Tree of Life. *Current Opinion in Chemical Biology*, 29, 108–119. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2015.10.018>

- Cruz, A. (2017). Degradación de jardinera de la AUM-A mediante hongos ligninolíticos <http://espartaco.azc.uam.mx/tesis/X18415.pdf>
- Dadwal, A., Sharma, S. & Satyanarayana, T. (2020). Progress in Ameliorating Beneficial Characteristics of Microbial Cellulases by Genetic Engineering Approaches for Cellulose Saccharification. *Frontiers in microbiology*, 11, 1387. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01387>
- Damus, M. Gonzalez, J. Castrillo, M. (2018) Hongos de pudrición blanca de la Reserva de San Rafael, Paraguay; Universidad Nacional de Itapúa; Revista sobre Estudios e Investigaciones del Saber Académico; 12; 12; 12-2018; 60-652078-5577 <http://hdl.handle.net/11336/114550>
- De Castro, V. de Castro, M. Zanuncio, A. Zanuncio, J. Surdi, P. Carneiro, A. & Vital, B. (2019). Resistance of in natura and torrefied wood chips to xylophage fungi. *Scientific Reports*, 9(1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47398-9>
- De Sousa, I. Boari, A. & Santos, A. (2024). Ligninolytic enzyme potential of *Trametes* spp. associated with leaf litter in riparian forest of the Amazônia region. *Brazilian Journal Of Biology*, 84. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.282099>
- Elisashvili, V. Metreveli, E. Khardziani, T. Sokhadze, K. Kobakhidze, A. & Kachlishvili, E. (2023). Review of Recent Advances in the Physiology of the Regulation of Cellulase and Xylanase Production by Basidiomycetes. *Energies*, 16(11), 4382. <https://doi.org/10.3390/en16114382>
- Escudero, J., Daza, Zunny., Gil, Nicolás., & Mora, Oscar. (2013). Evaluación de las enzimas celulolíticas producidas por hongos nativos mediante fermentación en estado sólido (SSF) utilizando residuos de cosecha de caña de azúcar. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 15 (1), 108-117. Recuperado el 18 de septiembre de 2025, de

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752013000100011&lng=en&tlng=es.

Fasiku, S.(2021). Pretratamiento de sustratos lignocelulosicos de especies de *Pleurotus* Y *Lentinus* para la producción de bioetanol utilizando *Saccharomyces cerevisiae*.
<http://140.105.46.132:8080/xmlui/handle/123456789/1309>

Fernández, E. Ruiz, F. López, M. Pérez, M. Rencoret, J. Gutiérrez, A. Pisabarro, A. Ramírez, L. & Martínez, A. (2016). A secretomic view of woody and nonwoody lignocellulose degradation by *Pleurotus ostreatus*. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1), 1–18.
<https://doi.org/10.1186/s13068-016-0462-9>

Fernández, V. (2022). Evaluación de actividad Ligninolítica en Macrohongos de bosque húmedo tropical, Chocó, Colombia. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Cundinamarca.

Ferrer, M. Rodríguez, M. Michelena, G. Dustet, J. Duque, A. Ibañez, M. & Tortoló, K. (2011). Selección de hongos aislados de bagazo de caña con actividad celulasa sobre celulosa cristalina para posibles aplicaciones industriales. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, 45(1), 3–12.

Gañán, P., Zuluaga, R., Castro, C. & Osorio, A. (2017). Celulosa: Un polímero de siempre con mucho futuro. *Revista Colombiana de Materiales*, 110(9), 1689–1699.

Garg, S. (2025). La importancia de la biotecnología fúngica para aplicaciones sostenibles. *Trends in Biotechnology*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2025.06.010>

Ghosh, S. Sengupta, S. Maiti, T. & Das, P. (2013). Production and characterization of extracellular cellulase and xylanase from *Auricularia auricula* and *Auricularia polytricha*. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 72, 719–725.

González, C. (2018). Estudio de la actividad enzimática de *Pleurotus ostreatus* en la deslignificación de cascarilla de arroz en cultivo semisólido. Universidad de los Andes. Disponible en: <https://hdl.handle.net/1992/38806>

- Grassi, E. (2017). Prospección de cepas nativas del género *Polyporus* s.l. para la producción de enzimas lignocelulolíticas y su potencial aplicación en biopulpado y bioblanqueo. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires
- Gu, X., Lu, H., Zhang, L., Meng, X. (2021). Una endoglucanasa termofílica GH5 de *Aspergillus fumigatus* y su hidrólisis sinérgica de polisacáridos que contienen manano. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/catal11070862>.
- Hernández, N. (2020). Evaluación del crecimiento del hongo *Pleurotus ostreatus* (basidiomycota) en distintos sustratos lignocelulósicos capacho de maíz, hoja de almendro y aserrín de madera en la Estación Ecológica Las Guartinajas en el municipio de Tierralta-Córdoba-Colombia. Facultad de ciencias básicas.
- Houfani, A. Anders, N. Spiess, A. Baldrian, P. & Benallaoua, S. (2020). Insights from enzymatic degradation of cellulose and hemicellulose to fermentable sugars– a review. Biomass and Bioenergy. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105481>
- Ishaq, M. Galappaththi, M. Khan, M. Ullah, S. Fiaz, M. & Khalid, A. (2022). *Lentinus squarrosulus* an edible macro-fungus reported from Pakistan. *Studies In Fungi*, 7(1), 1-3. <https://doi.org/10.48130/sif-2022-0006>
- Jiang, S. Li, L. Li, L. Zheng, X. Li, Z., & Song, X. (2020). The products from fermentation of wheat bran fiber by *Auricularia polytricha* strain and the effects of the products on rheological properties of dough sheet. *Food Science & Nutrition*, 8(3), 1345-1354. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1366>
- Kameshwar, A. K. S., & Qin, W. (2016). *Lignin degrading fungal enzymes*. Applied Microbiology and Biotechnology, 100(20), 8555–8567.
- Karnchanatat, A., Petsom, A., Sangvanich, P., Piapukiew, J., Whalley, A., Reynolds, C., Gadd, G., & Sihanonth, P. (2008). A novel thermostable endoglucanase from the wood-decaying

- fungus *Daldinia eschscholzii* (Ehrenb.:Fr.) Rehm. *Enzyme and Microbial Technology*, 42(5), 404–413. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2007.11.009>
- Khan, M. A., Ullah, R., Imran, M., & Farooq, U. (2024). *Biotechnological processing of sugarcane bagasse: Advances, challenges and future perspectives*. *Fermentation*, 10(1), 12. <https://doi.org/10.3390/fermentation10010012>
- Kijpornyongpan, T. Schwartz, A. Yaguchi, A. & Salvachúa, D. (2022). Systems biology-guided understanding of white-rot fungi for biotechnological applications: A review. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104640>
- Kim, D., Chun, B., Lee, J., Kim, O., Hyun, J., Han, D., Jeon, C., Lee, S., Lee, S., Choi, Y., & Hong, S. (2024). Enzymatic Activity and Amino Acids Production of Predominant Fungi from Traditional Meju during Soybean Fermentation. *Journal of microbiology and biotechnology*, 34(3), 654–662. <https://doi.org/10.4014/jmb.2309.09008>
- Kumla, J., Suwannarach, N., Sujarit, K., Penkhrue, W., Kakumyan, P., Jatuwong, K., Vadthananat, S., & Lumyong, S. (2020). Cultivation of Mushrooms and Their Lignocellulolytic Enzyme Production Through the Utilization of Agro-Industrial Waste. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 25(12), 2811. <https://doi.org/10.3390/molecules25122811>
- Kuswinanti, T., Junaid, M., Melina, Surapati, U. & Ratnawaty. (2019). A promising microbial use on cocoa: Decomposing cocoa waste and controlling *Lasiodiplodia theobromae* in-vitro. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/343/1/012256>
- Li, S., Bashline, L., Zheng, Y., Xin, X., Huang, S., Kong, Z., Kim, S. H., Cosgrove, D. J., & Gu, Y. (2016). Cellulose synthase complexes act in a concerted fashion to synthesize highly aggregated cellulose in secondary cell walls of plants. Recuperado de : <https://doi.org/10.1073/pnas.1613273113>
- Li, Y., Song, W., Han, X., Wang, Y., Rao, S., Zhang, Q., Zhou, J., Li, J., Liu, S., & Du, G. (2022). Recent progress in key lignocellulosic enzymes: Enzyme discovery, molecular

modifications, production, and enzymatic biomass saccharification. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127986>

Luna, L., Meneses, M., Mendoza, G., Montalvo, C., & Loera, O. (2013). Effect and enzyme activity of *pleurotus ostreatus* on cell wall of barley straw. <https://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd25/12/luna25223.html>

Mansor, A. M., Lim, J. S., Ani, F. N., Hashim, H., & Ho, W. S. (2019). Characteristics of cellulose, hemicellulose and lignin of MD2 pineapple biomass. Recuperado de : <https://doi.org/10.3303/CET1972014>

Matallana, G. A. S., Atahualpa, S. R. S., Riquez, A. L., & Zúñiga, U. F. R. (2022). Conceptos de biocatálisis de la lignocelulosa desde un enfoque de ingeniería de procesos y sistemas: una revisión. DOI: <https://doi.org/10.47187/perf.v1i28.179>

Mayer, M., Rewald, B., Matthews, B., Sandén, H., Rosinger, C., Katzensteiner, K., Gorfer, M., Berger, H., Tallian, C., Berger, T. W., & Godbold, D. L. (2021). Soil fertility relates to fungal-mediated decomposition and organic matter turnover in a temperate mountain forest. *New Phytologist*, 231(2), 777-790. <https://doi.org/10.1111/nph.17421>

Molnár, G., Rodney, D., Martoia, F., Dumont, P. J. J., Nishiyama, Y., Mazeau, K., & Orgéas, L. (2018). Cellulose crystals plastify by localized shear. Recuperado de : <https://doi.org/10.1073/pnas.1800098115>

Montoya, S., Sanchez, O., & Levin, L. (2014). Evaluación de actividades endoglucanasa, exoglucanasa, lacasa y lignina peroxidasa en diez hongos de pudrición blanca. *Biología En El Sector Agropecuario y Agroindustria*, 12(2), 115–124. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-35612014000200013&script=sci_arttext&lng=es

- Muñoz, A. (2024). Efecto de la fermentación con basidiomicetos en la producción de proteínas, azúcares reductores y fibra cruda a partir de residuos agrícolas. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/22030>
- Murace, M., Spavento, E., Keil, G., & Saparrat, M. (2010). Pudrición castaña: efectos sobre las propiedades de resistencia mecánica de la madera. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48118695004>
- Murillo, N. (2023). Guía ilustrada de macrohongos presentes en la Reserva Umbral Cultural Horizontes. Edu.co. <https://repository.udistrital.edu.co/items/1a4df3e1-5a74-4abc-95c7-adb716c3fb6c>
- Niego, A., Rapior, S., Thongklang, N., Hyde, K., & Mortimer, P. (2023). Revisión de las contribuciones de los macrohongos a los procesos y servicios de los ecosistemas forestales. *Fungal Diversity / ScienceDirect*. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2023.xxxxx>
- Olagunju, L., Isikhuemhen, O., Dele, P., Anike, F., Essick, B., Holt, N., Udombang, N., Ike, K., Shaw, Y., Brice, R., Anele, U., & Wuaku, M. (2023). *Pleurotus ostreatus* can significantly improve the nutritive value of lignocellulosic crop residues. *Agriculture*,
- Onyango, B., Mbaluto, C., Mutuku, C., Otieno D. (2016). Molecular characterization of wood ear mushrooms *Auricularia* sp. from Kakamega Forest in Western Kenya. DOI: 10.5943/crema/6/1/6
- Osono, T. (2020). Functional diversity of ligninolytic fungi associated with leaf litter decomposition. *Ecological Research*, 35(1), 30–43. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12063>
- Pérez-Espitia, K., & Pacheco-Martinez, L. (2022). Diversidad de macrohongos xilófagos (basidiomicetos y ascomicetos) en la estación ecológicas las guartinajas, Tierralta-Córdoba.
- Piepenbring, M., López, F., & Cáceres, O. (2016). Colaboradores escondidos: La importancia de los hongos en los ecosistemas. *Información para la educación ambiental*.

- Portella, K. (2024). Producción de biomateriales a partir de micelio de hongos basidiomicetos. *Ingeniería Ambient.* <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2815>
- Prawisut, A., Choknud, S., & Ketudat Cairns, J. R. (2020). Expression of rice β -exoglucanase II (OsExoII) in *Escherichia coli*, purification, and characterization. *Protein Expression and Purification.* <https://doi.org/10.1016/j.pep.2020.105708>
- Putra, I., Nurhaya, O., Sibero, M., Hermawan, R., (2024). First Report on Wild Occurrences of Phoenix Mushroom (*Pleurotus pulmonarius* Fr. Qué.) in Indonesia. *Journal Of Tropical Biodiversity And Biotechnology*, 9(1), 86455. <https://doi.org/10.22146/jtbb>.
- Qaseem, M. F., Shaheen, H., & Wu, A. M. (2021). Cell wall hemicellulose for sustainable industrial utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110996>
- Quintero, J. (2011). Revisión: Degradación de plaguicidas mediante hongos de la pudrición blanca de la madera. *Redalyc.org.* <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179922364012>
- Rahim, I., Suherman, S. y Nasaruddin, A. (2019). Diversidad de hongos de pudrición en plantaciones de cacao y su capacidad para crecer en medios carboníferos. *Planta Tropika, Revista de Agrociencia* , 7 (2). <https://doi.org/10.18196/pt.2019.102.125-129>
- Ríos, W., Valdez, R. & Jiménez, J. (2017). Aislamiento, propagación y crecimiento de hongos comestibles nativos en residuos agroindustriales. *Scientia Agropecuaria*, 8(4), 327-335. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.04.04>
- Romero, E., Perez, K., & Tamara, L. (2017). Características macroscópicas y microscópicas de hongos. https://www.academia.edu/40049017/Informe_9_MICROBIOLOGIA_CARACTER%C3%8DSTICAS_MACROSC%C3%93PICAS_Y_MICROSC%C3%93PICAS_DE_HONGOS

- Sarmiento, S. (2024) Caracterización fisicoquímica del bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) para uso en la alimentación animal. <https://dspace.unl.edu.ec/server/api/core/bitstreams/9ca55ef8-5a75-4f64-9326-93a0c9314b7e/content>
- Sánchez, L., Álvarez, P., Meza, R., Villalobos, J., Enciso, S., & Enciso, S. (2021). Lignocellulolytic enzyme production from wood rot fungi collected in chiapas, mexico, and their growth on lignocellulosic material. *Journal of Fungi*, 7(6). <https://doi.org/10.3390/jof7060450>
- Schilling, J., Kaffenberger, J., Held, B., Ortiz, R., & Blanchette, R. (2020). Using Wood Rot Phenotypes to Illuminate the “Gray” Among Decomposer Fungi. *Frontiers in Microbiology*, 11(June), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01288>
- Serrano, S. & Charris, I. (2019). El papel de los hongos degradadores de celulosa presente en el bagazo de caña de azúcar como alternativa industrial en la producción de bioetanol de segunda generación. *Microciencia*, Vol.7. <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/microciencia/article/view/5617>
- Silva, A., Neves, K., Freitas, R., Chagas, T., Salay, L., da Silva, E., Uetanabaro, A., & da Costa, A. (2025). Valorization of Cocoa and Peach-Palm Wastes for the Production of Amylases by *Pleurotus pulmonarius* CCB19 and Its Application as an Additive in Commercial Detergents. *Applied Biochemistry And Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s12010-024-05147-3>
- Costa, M., Costa, R., Santos. M., Nascimento, J., Silva, A., Nunes, J., Santos, M., Gomes, F., Luz, J., Grillo, L., & Pereira, H. (2025). Purification and Functional Characterization of a New Endoglucanase from *Pleurotus djamor* PLO13 Produced by Solid-State Fermentation of Agro-Industrial Waste. *Fermentation*, 11(4), 182. <https://doi.org/10.3390/fermentation11040182>

- Sunardi, S., Istikowati, W. T., Ishiguri, F., & Yokota, S. (2018). FTIR spectroscopy and color change of wood for assessment and monitoring of softwood degradation by white-rot fungus *Porodaedalea pini*. *AIP Conference Proceedings*, 2026(November). <https://doi.org/10.1063/1.5064984>
- Tarasov, D., Leitch, M., & Fatehi, P. (2018). Lignin-carbohydrate complexes: Properties, applications, analyses, and methods of extraction: A review. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1), 1–28. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1262-1>
- Tobimatsu, Y., & Schuetz, M. (2019). Lignin polymerization: how do plants manage the chemistry so well? *Current Opinion in Biotechnology*, 56, 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2018.10.001>
- Torres, M. (2018). Modificación de la lignina por enzimas producidas por *Pleurotus ostreatus* en cultivo semisólido [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://hdl.handle.net/1992/39319>
- Torres, G. Thijs, S. Rineau, F. Guerra, G. & Vangronsveld, J. (2024). White Rot Fungi as Tools for the Bioremediation of Xenobiotics: A Review. *Journal of fungi (Basel, Switzerland)*, 10(3), 167. <https://doi.org/10.3390/jof10030167>
- Wu, F., Tohtirjap, A., Fan, L., Zhou, L., Alvarenga, R. L. M., Gibertoni, T. B., & Dai, Y. (2021). Global Diversity and Updated Phylogeny of *Auricularia* (Auriculariales, Basidiomycota). *Journal Of Fungi*, 7(11), 933. <https://doi.org/10.3390/jof7110933>
- Wu, F. Guo, Z. Cui, K. Dong, D. Yang, X. Li, J. Wu, Z. Li, L. Dai, Y. & Pan, T. (2023). Insights into characteristics of white rot fungus during environmental plastics adhesion and degradation mechanism of plastics. *Journal Of Hazardous Materials*, 448, 130878. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130878>

Yakin, E., Bachruddin, Z., Utomo, R., & Millati, R. (2017). Effect of Lignoselulolitic Fungus To Enzimatic Activity, Fiber Frction, and Digestibility on Fermentation Process of Cocoa Pod. Buletin Peternakan, 41(3), 250. <https://doi.org/10.21059/buletinpeternak.v41i3.22657>

Zang, X., Liu, M., Fan, Y., Xu, J., Xu, X., & Li, H. (2018). The structural and functional contributions of β -glucosidase-producing microbial communities to cellulose degradation in composting. Biotechnology for Biofuels, 11(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1045-8>

Han, M., Li, X., Zhang, C., Li, M., Zhang, M., An, M., Dou, X., Zhang, T., Yan, X., Bian, L., & An, Q. (2022). Effect of different lignocellulosic biomasses on laccase production by *Pleurotus*. BioResources, 17(3), 4921-4936. <https://doi.org/10.15376/biores.17.3.4921-4936>

13. Anexos

Anexo 1. Desinfección de los macrohongos



Anexo 2. Siembra de los macrohongos



Anexo 3. Sustratos lignocelulósicos

Aserrín Roble



Tamo



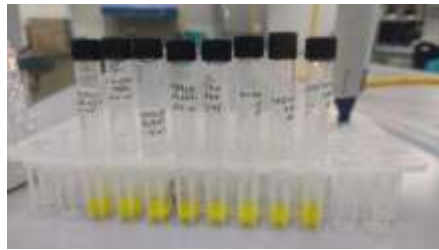
Bagazo de caña



Anexo 4. Determinación cuantitativa de actividades enzimáticas

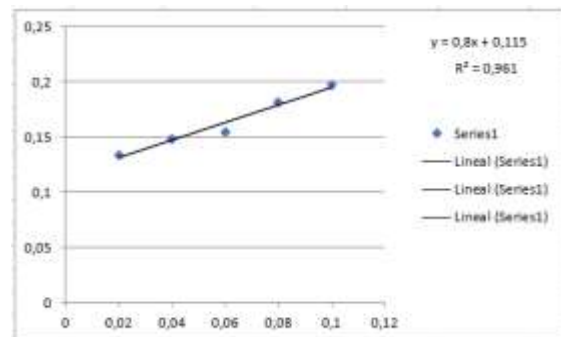


Anexo 5. Determinación de la actividad celulolítica mediante hidrólisis de CMC



Anexo 6. Curva de calibración o cinética del consumo glucosa

Columna1	X	Y	
Dilusion del estandar	Concentracion	Absorbancia	
1	0,02	0,134	
2	0,04	0,148	
3	0,06	0,154	
4	0,08	0,182	
5	0,1	0,197	



Anexo 7. Determinación de materia seca o peso seco (*ms*) de los sustratos utilizados



Anexo 8. Identificación macroscópica

<p><i>Auricularia polytricha</i></p>	
--------------------------------------	--

*Trametes
betulina*



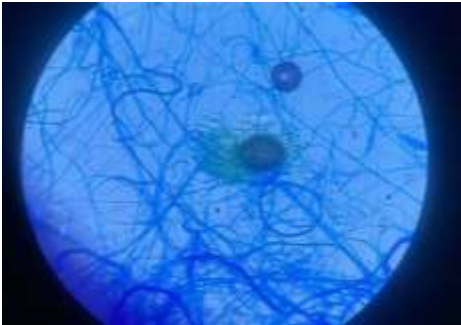

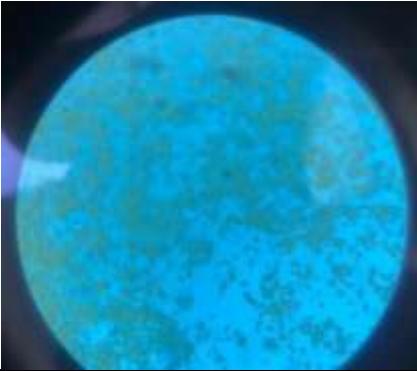
Lentinus sp.

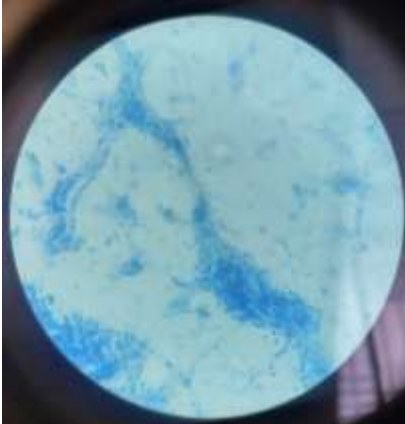


*Pleurotus
pulmonarius*



Anexo 9. Identificación microscópica

Características microscópicas	
<i>Auricularia polytricha</i>	
<i>Trametes betulina</i>	
<i>Lentinus sp.</i>	

Características microscópicas	
<i>Pleurotus pulmonarius</i>	

Anexo 10. Tablas de cuantificación de la actividad endoglucanasa

Hongo	Sustrato	Día	Actividad endoglucanasa (UI/ml)	Desviación estándar	Media \pm DE
<i>T. betulina</i>	Tamo	7	4,134	0,007	4,134 \pm 0,007
<i>T. betulina</i>	Tamo	12	4,157	0	4,157 \pm 0,000
<i>T. betulina</i>	Tamo	16	4,181	0,007	4,181 \pm 0,007
<i>T. betulina</i>	Tamo	20	4,269	0,013	4,269 \pm 0,013
<i>T. betulina</i>	Tamo	24	4,292	0,007	4,292 \pm 0,007
<i>T. betulina</i>	Caña	7	4,319	0,137	4,319 \pm 0,137
<i>T. betulina</i>	Caña	12	4,282	0,059	4,282 \pm 0,059
<i>T. betulina</i>	Caña	16	4,31	0,02	4,310 \pm 0,020
<i>T. betulina</i>	Caña	20	4,37	0,013	4,370 \pm 0,013
<i>T. betulina</i>	Caña	24	4,352	0,065	4,352 \pm 0,065
<i>T. betulina</i>	Aserrín	7	4,199	0,282	4,199 \pm 0,282
<i>T. betulina</i>	Aserrín	12	4,111	0,17	4,111 \pm 0,170
<i>T. betulina</i>	Aserrín	16	4,384	0,059	4,384 \pm 0,059
<i>T. betulina</i>	Aserrín	20	4,31	0,137	4,310 \pm 0,137
<i>T. betulina</i>	Aserrín	24	4,398	0,065	4,398 \pm 0,065

Hongo	Sustrato	Día	Actividad endoglucanasa (UI/ml)	Desviación estándar	Media ± DE
<i>A. polytricha</i>	Tamo	7	3.82	0.07	3.82 ± 0.07
<i>A. polytricha</i>	Tamo	12	3.94	0.02	3.94 ± 0.02
<i>A. polytricha</i>	Tamo	16	4.25	0.02	4.25 ± 0.02
<i>A. polytricha</i>	Tamo	20	4.29	0.01	4.29 ± 0.01
<i>A. polytricha</i>	Tamo	24	4.40	0.01	4.40 ± 0.01
<i>A. polytricha</i>	Caña	7	04.08	0.04	4.08 ± 0.04
<i>A. polytricha</i>	Caña	12	4.12	0.04	4.12 ± 0.04
<i>A. polytricha</i>	Caña	16	4.17	0.00	4.17 ± 0.00
<i>A. polytricha</i>	Caña	20	4.20	0.00	4.20 ± 0.00
<i>A. polytricha</i>	Caña	24	4.34	0.10	4.34 ± 0.10
<i>A. polytricha</i>	Aserrín	7	3.85	0.03	3.85 ± 0.03
<i>A. polytricha</i>	Aserrín	12	3.95	0.02	3.95 ± 0.02
<i>A. polytricha</i>	Aserrín	16	4.25	0.03	4.25 ± 0.03
<i>A. polytricha</i>	Aserrín	20	4.44	0.03	4.44 ± 0.03
<i>A. polytricha</i>	Aserrín	24	4.45	0.04	4.45 ± 0.04

Hongo	Sustrato	Día	Actividad endoglucanasa (UI/ml)	Desviación estándar	Media ± DE
<i>P. pulmonarius</i>	Tamo	7	4,222	0,052	4.222 ± 0.052
<i>P. pulmonarius</i>	Tamo	12	4,301	0,02	4.301 ± 0.02
<i>P. pulmonarius</i>	Tamo	16	4,319	0,02	4.319 ± 0.02
<i>P. pulmonarius</i>	Tamo	20	4,407	0,039	4.407 ± 0.039
<i>P. pulmonarius</i>	Tamo	24	4,282	0,02	4.282 ± 0.02
<i>P. pulmonarius</i>	Caña	7	4,333	0,013	4.333 ± 0.013
<i>P. pulmonarius</i>	Caña	12	3,75	0,021	3.75 ± 0.021
<i>P. pulmonarius</i>	Caña	16	3,824	0,01	3.824 ± 0.01
<i>P. pulmonarius</i>	Caña	20	3,876	0,01	3.876 ± 0.01

<i>P. pulmonarius</i>	Caña	24	3,954	0,016	3.954 ± 0.016
<i>P. pulmonarius</i>	Aserrín	7	4,028	0,013	4.028 ± 0.013
<i>P. pulmonarius</i>	Aserrín	12	4,407	0,013	4.407 ± 0.013
<i>P. pulmonarius</i>	Aserrín	16	4,042	0,02	4.042 ± 0.02
<i>P. pulmonarius</i>	Aserrín	20	3,894	0,02	3.894 ± 0.02
<i>P. pulmonarius</i>	Aserrín	24	4,139	0,013	4.139 ± 0.013

Hongo	Sustrato	Día	Actividad endoglucanasa (UI/ml)	Desviación estándar	Media ± DE
<i>Lentinus</i> sp.	Tamo	7	3.829	46	3.83 ± 0.05
<i>Lentinus</i> sp.	Tamo	12	3.889	26	3.89 ± 0.03
<i>Lentinus</i> sp.	Tamo	16	3.972	26	3.97 ± 0.03
<i>Lentinus</i> sp.	Tamo	20	4.227	59	4.23 ± 0.06
<i>Lentinus</i> sp.	Tamo	24	4.366	111	4.37 ± 0.11
<i>Lentinus</i> sp.	Caña	7	3.935	13	3.94 ± 0.01
<i>Lentinus</i> sp.	Caña	12	4.125	20	4.13 ± 0.02
<i>Lentinus</i> sp.	Caña	16	4.398	65	4.40 ± 0.07
<i>Lentinus</i> sp.	Caña	20	4.356	33	4.36 ± 0.03
<i>Lentinus</i> sp.	Caña	24	4.199	20	4.20 ± 0.02
<i>Lentinus</i> sp.	Aserrín	7	3.921	85	3.92 ± 0.09
<i>Lentinus</i> sp.	Aserrín	12	4.009	0	4.01 ± 0.00
<i>Lentinus</i> sp.	Aserrín	16	4.199	20	4.20 ± 0.02
<i>Lentinus</i> sp.	Aserrín	20	4.231	0	4.23 ± 0.00
<i>Lentinus</i> sp.	Aserrín	24	4.269	13	4.27 ± 0.01

Anexo 11. Tablas de cuantificación de la actividad lacasa

Hongo	Sustrato	Día	Actividad lacasa (UI/ml)	Desviación estándar	Media ± DE
<i>T. betulina</i>	Tamo	7	12,97	0,85	12,97±0,85
<i>T. betulina</i>	Tamo	12	8,77	2,80	8,77±2,80
<i>T. betulina</i>	Tamo	16	24,61	0,47	25,61±0,47
<i>T. betulina</i>	Tamo	20	5,98	4,36	5,98 ±4,36
<i>T. betulina</i>	Tamo	24	8,85	7,90	8,85±7,90
<i>T. betulina</i>	Caña	7	3,14	1,99	3,14±1,99
<i>T. betulina</i>	Caña	12	3,97	4,56	3,97±4,56
<i>T. betulina</i>	Caña	16	9,10	0,06	9,10±0,06
<i>T. betulina</i>	Caña	20	8,75	6,64	8,75±6,64
<i>T. betulina</i>	Caña	24	21,72	5,56	21,75±5,56
<i>T. betulina</i>	Aserrín	7	7,51	1,61	7,51±1,61
<i>T. betulina</i>	Aserrín	12	7,65	8,48	7,65±8,48
<i>T. betulina</i>	Aserrín	16	12,53	3,86	12,53±3,86
<i>T. betulina</i>	Aserrín	20	10,88	3,86	10,88±3,86
<i>T. betulina</i>	Aserrín	24	104,46	114,44	104,46±114,44

Hongo	Sustrato	Día	Actividad lacasa (UI/ml)	Desviación estándar	Media ± DE
<i>A. polytricha</i>	Tamo	7	4,20	0,15	4,20 ± 0,15
<i>A. polytricha</i>	Tamo	12	7,92	7,81	7,92±7,81
<i>A. polytricha</i>	Tamo	16	37,47	4,41	37,47±4,41
<i>A. polytricha</i>	Tamo	20	8,05	3,66	8,05±3,66
<i>A. polytricha</i>	Tamo	24	43,42	9,10	43,42±9,10
<i>A. polytricha</i>	Caña	7	7,03	1,99	7,03±1,99

<i>A. polytricha</i>	Caña	12	14,71	4,59	14,71±4,59
<i>A. polytricha</i>	Caña	16	25,40	0,88	25,40±0,88
<i>A. polytricha</i>	Caña	20	8,94	4,97	8,94±4,97
<i>A. polytricha</i>	Caña	24	25,07	0,76	25,07±0,76
<i>A. polytricha</i>	Aserrín	7	3,89	4,39	3,89±4,39
<i>A. polytricha</i>	Aserrín	12	33,43	21,12	33,43±21,12
<i>A. polytricha</i>	Aserrín	16	12,62	2,22	12,62±2,22
<i>A. polytricha</i>	Aserrín	20	17,81	6,06	17,81±6,06
<i>A. polytricha</i>	Aserrín	24	65,70	0,65	65,70±0,65

Hongo	Sustrato	Día	Actividad lacasa (UI/ml)	Desviación estándar	Media ± DE
<i>P. pulmonarius</i>	Tamo	7	20,81	9,30	20,81 ± 9,30
<i>P. pulmonarius</i>	Tamo	12	18,70	12,30	18,70 ± 12,30
<i>P. pulmonarius</i>	Tamo	16	14,07	2,40	14,07 ± 2,40
<i>P. pulmonarius</i>	Tamo	20	2,26	1,06	2,26 ± 1,06
<i>P. pulmonarius</i>	Tamo	24	48,22	37,88	48,22 ± 37,88
<i>P. pulmonarius</i>	Caña	7	31,42	1,20	31,42 ± 1,20
<i>P. pulmonarius</i>	Caña	12	47,47	22,90	47,47 ± 22,90
<i>P. pulmonarius</i>	Caña	16	30,91	2,32	30,91 ± 2,32
<i>P. pulmonarius</i>	Caña	20	9,35	4,27	9,35 ± 4,27
<i>P. pulmonarius</i>	Caña	24	51,74	33,31	51,74 ± 33,31
<i>P. pulmonarius</i>	Aserrín	7	18,02	1,08	18,02 ± 1,08
<i>P. pulmonarius</i>	Aserrín	12	7,34	6,23	7,34 ± 6,23
<i>P. pulmonarius</i>	Aserrín	16	10,22	7,14	10,22 ± 7,14
<i>P. pulmonarius</i>	Aserrín	20	9,08	2,19	9,08 ± 2,19
<i>P. pulmonarius</i>	Aserrín	24	54,79	42,80	54,79 ± 42,80

Hongo	Sustrato	Día	Actividad lacasa (UI/ml)	Desviación estándar	Media ± DE
<i>Lentinus sp.</i>	Tamo	7	4	0,24	4 ± 0,24
<i>Lentinus sp.</i>	Tamo	12	7	3,04	7 ± 3,04
<i>Lentinus sp.</i>	Tamo	16	41	3,22	41 ± 3,22
<i>Lentinus sp.</i>	Tamo	20	4	0,06	4 ± 0,06
<i>Lentinus sp.</i>	Tamo	24	18	9,45	18 ± 9,45
<i>Lentinus sp.</i>	Caña	7	10	3,28	10 ± 3,28
<i>Lentinus sp.</i>	Caña	12	11	3,34	11 ± 3,34
<i>Lentinus sp.</i>	Caña	16	3	0,67	3 ± 0,67
<i>Lentinus sp.</i>	Caña	20	8	6,34	8 ± 6,34
<i>Lentinus sp.</i>	Caña	24	14	0,23	14 ± 0,23
<i>Lentinus sp.</i>	Aserrín	7	2	2,25	2 ± 2,25
<i>Lentinus sp.</i>	Aserrín	12	5	4,36	5 ± 4,36
<i>Lentinus sp.</i>	Aserrín	16	6	0,35	6 ± 0,35
<i>Lentinus sp.</i>	Aserrín	20	10	9,19	10 ± 9,19
<i>Lentinus sp.</i>	Aserrín	24	13	2,60	13 ± 2,60

Anexo 12. Resumen de anova multifactorial en la actividad celulolítica

ANOVA multifactorial (Caña)

Factor	gl	SC	CM	F	p-valor	Significancia
Hongo	3	0.8305	0.2768	258.78	3.65e-16	***
Días	4	0.1025	0.0256	23.95	2.19e-07	***
Hongo × Días	12	0.7616	0.0635	59.33	6.14e-13	***
Residuales	20	0.0214	0.0011	-	-	-

Nota: gl = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = cuadrado medio.

ANOVA multifactorial (Tamo)

Factor	GI	SC	CM	F	p-valor	Significancia
Hongo	3	0.3292	0.10973	258.78	428.3 <2e-16	***
Días	4	0.7612	0.19030	23.95	742.7 <2e-16	***
Hongo × Días	12	0.4479	0.03732	59.33	145.7 <2e-16	***
Residuales	20	0.0051	0.00026	-	-	-

Nota: gl = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = cuadrado medio.*

ANOVA multifactorial (Aserrín)

Factor	GI	SC	CM	F	p-valor	Significancia
Hongo	3	0.2095	0.06984	261.3	3.32e-16	***
Días	4	0.6949	0.17372	650.1	< 2e-16	***
Hongo × Días	12	0.7179	0.05983	223.9	< 2e-16	***
Residuales	20	0.0053	0.00027	-	-	-

Nota: gl = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = cuadrado medio.*

Anexo 13. Resumen de anova multifactorial en endoglucanasa

ANOVA multifactorial (Caña)

Factor	gl	SC	CM	F	p-valor	Significancia
Hongo	3	1675.2	558.4	30733	<2e-16	***
Días	4	403.2	100.8	5548	<2e-16	***
Hongo × Días	12	898.3	74.9	4120	<2e-16	***
Residuales	20	0.4	0.0	-	-	-

Nota: gl = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = cuadrado medio.

ANOVA multifactorial (Tamo)

Factor	gl	SC	CM	F	p-valor	Significancia
Hongo	3	57.0	19.0	450.7	<2e-16	***
Días	4	1309.2	327.3	7764.4	<2e-16	***
Hongo × Días	12	830.9	69.2	1642.7	<2e-16	***
Residuales	20	0.8	0.0	-	-	-

Nota: gl = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = cuadrado medio.

ANOVA multifactorial (Aserrín)

Factor	gl	SC	CM	F	p-valor	Significancia
Hongo	3	845.6	281.9	3309	<2e-16	***
Días	4	2684.4	671.1	7879	<2e-16	***
Hongo × Días	12	2656.5	221.4	2599	<2e-16	***
Residuales	20	1.7	0.1	-	-	-

Nota: gl = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = cuadrado medio.