



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA

CARRERA DE BIOTECNOLOGÍA

Tema: Evaluación del potencial biotecnológico de la cáscara de plátano verde (*Musa spp.*) como sustrato alternativo para el cultivo de hongos comestibles y medicinales melena de león (*Hericium erinaceus*) y cola de pavo (*Trametes versicolor*).

Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previo a la obtención del Título de Ingeniero Biotecnólogo, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Autor: Jonathan Mateo Mayorga Salazar

Tutora: Dra. Mirari Yosune Arancibia Soria

Ambato – Ecuador

Julio – 2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

Dra. Mirari Yosune Arancibia Soria

CERTIFICA:

Que el presente Informe Final del Trabajo de Titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto, autorizo la presentación de este Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, el mismo que responde a las normas establecidas en el Reglamento de Títulos y Grados de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Ambato, 5 de junio de 2026.



Dra. Mirari Yosune Arancibia Soria

18XXXXXXX61

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jonathan Mateo Mayorga Salazar, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniero Biotecnólogo son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas bibliográficas.



Jonathan Mateo Mayorga Salazar

18XXXXXX20

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga uso de este Informe Final del Trabajo de Titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Informe Final del Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando los derechos de autor.



Jonathan Mateo Mayorga Salazar

18XXXXXX20

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos Profesores Calificadores, aprueban el presente Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencias e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:



Presidente del Tribunal



Dra. Liliana Alexandra Cerda Mejía

18XXXXXXX86



Dra. Liliana Paulina Lalaleo Córdova

18XXXXXXX53

Ambato, 19 de junio de 2026

DEDICATORIA

*A mis padres, **Álvaro Frutos y Myriam Salazar**, quienes con su amor incondicional y su esfuerzo diario sembraron en mí los valores, la disciplina y la perseverancia necesarios para enfrentar cada reto que se presentó a lo largo de este camino. Cada sacrificio silencioso que hicieron, cada noche de desvelo preocupándose por mi bienestar y cada palabra de aliento en los momentos más difíciles quedaron grabados en cada página de este trabajo. No existe manera de retribuir todo lo que han dado por verme crecer y alcanzar mis sueños, pero espero que este logro sea un pequeño reflejo del orgullo que siento de ser su hijo. Este título es tan suyo como mío.*

*A mis amigos **Martha, Alejandro y Joselyn**, quienes estuvieron presentes en los momentos de mayor incertidumbre y celebraron conmigo cada pequeño avance como si fuera el más grande de los triunfos. Su amistad genuina y desinteresada fue uno de los regalos más valiosos que me dejó esta etapa universitaria. Gracias por las conversaciones que me devolvieron la calma, por las risas que aligeraron la carga y por recordarme, cada vez que lo necesité, que era capaz de llegar hasta aquí. Su compañía hizo más humano y memorable este recorrido, también a **M.C.B.C.**, por estar presente a su manera en este recorrido y dejar una huella que, sin hacer ruido, formó parte de este proceso.*

A todos ustedes, que de una forma u otra iluminaron este camino con su presencia, su cariño y su apoyo, les dedico este trabajo con la más profunda gratitud. Cada logro que venga de aquí en adelante también llevará algo de ustedes, porque las personas que nos acompañan en los momentos que más importan nunca dejan de ser parte de quienes somos. Gracias por creer en mí, incluso cuando yo no lo hacía.

AGRADECIMIENTO

Al concluir esta etapa que representa uno de los mayores retos de mi vida académica y personal, siento la necesidad y el deber de expresar mi más sincero y profundo agradecimiento a quienes, de manera directa o indirecta, fueron parte esencial de este proceso y contribuyeron a hacer posible la culminación de este trabajo.

A mi tutora, la Dra. Mirari Yosune Arancibia Soria, por su invaluable guía, su paciencia y su compromiso a lo largo de todo este proceso investigativo. Su capacidad para orientar con claridad en los momentos de mayor confusión, su exigencia académica y su disposición permanente para resolver cada duda fueron determinantes para darle forma, coherencia y rigor a este trabajo.

A los docentes que acompañaron mi formación a lo largo de estos años de carrera universitaria, por compartir su conocimiento con generosidad, vocación y entrega. Sus enseñanzas no solo me prepararon para enfrentar los desafíos académicos, sino que también me dotaron de herramientas y perspectivas que trascendieron las aulas y se convirtieron en parte de mi forma de pensar y de actuar. A cada uno de ellos, mi respeto y admiración.

A mi familia, pilar fundamental en cada etapa de este recorrido, por ser el respaldo incondicional que necesité en los momentos de duda y cansancio. Su confianza en mis capacidades, su apoyo constante y su amor sin condiciones fueron la fuerza que me impulsó a continuar cuando el camino se tornó difícil. Saber que contaba con ellos detrás de cada paso que daba me dio la seguridad y la motivación necesarias para no detenerme y dar siempre lo mejor de mí.

A todas las personas que, de una u otra forma, aportaron su granito de arena para que este sueño se convirtiera en realidad, mi más sincero reconocimiento y gratitud. Este logro no es solo mío; es también el reflejo del apoyo, la dedicación y el cariño de quienes me rodearon durante este camino.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

Contenido

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
RESUMEN EJECUTIVO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO	1
1.1. Antecedentes Investigativos.....	1
1.1.1. Justificación del problema	1
1.1.2. Biomasa lignocelulósica y valorización de residuos.....	2
Residuos agroindustriales como recurso biotecnológico	3
Problemática ambiental y aprovechamiento sostenible	3
1.1.3. <i>Musa spp.</i> como sustrato lignocelulósico.....	4
Generación de residuos de <i>Musa spp.</i>	4
Composición fisicoquímica de la cáscara de plátano.....	4
1.1.4. Limitaciones y acondicionamiento del sustrato	5
1.1.5. Formulación de sustratos para cultivo de hongos	5
Principios de formulación de sustratos	5
1.1.5.1. Uso de aserrín de madera como material estructurante.....	6
1.1.5.2. Balance nutricional y relación C/N	6
Parámetros fisicoquímicos óptimos	7

1.1.6.	Hongos lignocelulolíticos y degradación de biomasa	8
1.1.6.1.	Características de los hongos de pudrición blanca.....	8
1.1.6.2.	Mecanismos de degradación de lignina y polisacáridos	9
1.1.6.3.	Sistema enzimático	10
1.1.7.	Especies fúngicas (<i>Hericiu m erinaceus</i> y <i>Trametes versicolor</i>)	11
1.1.7.1.	Características biológicas y taxonomía.....	12
1.1.7.2.	Requerimientos de crecimiento.....	13
1.1.7.3.	Capacidad degradadora lignocelulósica	14
1.1.7.4.	Importancia	15
1.2.	Objetivos	15
1.2.1.	Objetivo general.....	15
1.2.2.	Objetivos Específicos.....	16
CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA		17
2.1.	Materiales.....	17
2.2.	Métodos.....	17
2.2.1.	Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y estructurales de la cáscara de plátano verde (<i>Musa spp.</i>) para determinar su potencial como sustrato en el cultivo de hongos.	17
2.2.1.1.	Diseño experimental	17
2.2.1.2.	Caracterización fisicoquímica inicial	18
2.2.1.3.	Preparación del sustrato	19
2.2.2.	Comparación y evaluación del crecimiento micelial de <i>Hericiu m erinaceus</i> y <i>Trametes versicolor</i> en sustratos con cáscara de plátano como sustrato alternativo.	20
2.2.2.1.	Preparación del inóculo.....	20
2.2.2.2.	Inoculación del sustrato	20
2.2.2.3.	Fructificación	21
2.2.3.	Ensayos in vitro.....	21
2.2.4.	Eficiencia biológica y rendimiento productivo de los hongos cultivados en el sustrato experimental.....	22
2.2.5.	Análisis de resultados.....	22
CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN		24

3.1.	Análisis y discusión de los resultados	24
3.1.1.	Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y estructurales de la cáscara de plátano verde (<i>Musa spp.</i>) para determinar su potencial como sustrato en el cultivo de hongos.	24
3.1.2.	Comparar el crecimiento micelial de <i>Hericium erinaceus</i> y <i>Trametes versicolor</i> en sustratos con cáscara de plátano como sustrato alternativo	27
3.1.3.	Determinar la eficiencia biológica y el rendimiento productivo de los hongos cultivados en el sustrato experimental	33
3.1.3.1.	<i>Hericium erinaceus</i>	33
3.1.3.2.	<i>Trametes versicolor</i>	34
3.1.4.	Análisis estadístico	34
CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		38
4.1	Conclusiones	38
4.2.	Recomendaciones	38
BIBLIOGRAFÍA		39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos óptimos para las especies fúngicas.....	8
Tabla 2. Productos obtenidos de la degradación de la biomasa lignocelulósica	10
Tabla 3. Comparación de los principales sistemas enzimáticos involucrados en la degradación lignocelulósica	11
Tabla 4. Comparación taxonómica.....	13
Tabla 5. Requerimientos de crecimiento.....	14
Tabla 6. Materiales, equipos y reactivos	17
Tabla 7. Tratamientos experimentales	18
Tabla 8. Características fisicoquímicas de los materiales empleados en la formulación del sustrato ..	24
Tabla 9. Características fisicoquímicas del sustrato.....	25
Tabla 10. Colonización porcentual micelial de <i>Hericiium erinaceus</i>	28
Tabla 11. Colonización micelial previa a la fructificación de <i>Trametes versicolor</i> en sustratos formulados con cáscara de plátano verde	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Colonización micelial de <i>Hericiium erinaceus</i> en medios formulados con diferentes proporciones de cáscara de plátano verde (<i>Musa spp.</i>) posterior al tratamiento de hidrólisis. T1: 25 % de <i>Musa spp.</i> , T2: 50 % de <i>Musa spp.</i> , T3: 75 % de <i>Musa spp.</i>	29
Figura 2. Desarrollo micelial (%) de <i>Trametes versicolor</i> en sustratos formulados con diferentes proporciones de cáscara de plátano verde (<i>Musa spp.</i>). T1: 25 % de <i>Musa spp.</i> , T2: 50 % de <i>Musa spp.</i> , T3: 75 % de <i>Musa spp.</i>	32
Figura 3. Desarrollo micelial (%) de <i>Hericiium erinaceus</i> durante 10 días de incubación en sustratos formulados con T1: 25 %, T2: 50 % y T3: 75 % de cáscara de plátano verde (<i>Musa spp.</i>).	33
Figura 4. Análisis de varianza para el porcentaje de colonización micelial al séptimo día de incubación.	35
Figura 5. Efecto de la interacción entre la especie fúngica (<i>Hericiium erinaceus</i> y <i>Trametes versicolor</i>) y la concentración de cáscara de plátano verde sobre el porcentaje de colonización micelial.	36

RESUMEN EJECUTIVO

El aprovechamiento de los residuos agroindustriales se ha convertido en una necesidad debido al impacto ambiental que genera su acumulación y disposición inadecuada. Entre estos materiales, la cáscara de plátano verde (*Musa spp.*) destaca por su contenido de compuestos lignocelulósicos que podrían ser utilizados como materia prima en diferentes procesos biotecnológicos. Por esta razón, el presente trabajo tuvo como finalidad evaluar su potencial como sustrato alternativo para el cultivo de los hongos *Hericium erinaceus* (melena de león) y *Trametes versicolor* (cola de pavo). Para ello se formularon sustratos con diferentes proporciones de cáscara de plátano verde y aserrín, los cuales fueron caracterizados, acondicionados y posteriormente inoculados con micelio de ambas especies. A lo largo del ensayo se realizó el seguimiento del crecimiento fúngico mediante la evaluación de la velocidad y porcentaje de colonización, así como de la capacidad de adaptación de cada hongo a las distintas formulaciones estudiada. Los resultados obtenidos demostraron que la cáscara de plátano verde puede emplearse como componente del sustrato para el crecimiento de ambas especies, aunque se observaron diferencias en el comportamiento de colonización según la proporción utilizada y la especie evaluada. Estas respuestas estuvieron relacionadas con las características propias de cada hongo y con la composición del material lignocelulósico empleado. En general, los tratamientos evaluados permitieron comprobar que este residuo agroindustrial posee características favorables para ser aprovechado en procesos de cultivo fúngico.

Palabras clave: cáscara de plátano verde, *Hericium erinaceus*, *Trametes versicolor*, residuos agroindustriales, crecimiento micelial, biomasa lignocelulósica, biotecnología fúngica, economía circular.

ABSTRACT

The utilization of agro-industrial waste has become a necessity due to the environmental impact of its accumulation and improper disposal. Among these materials, green banana peel (*Musa* spp.) stands out for its lignocellulosic compound content, which could be used as raw material in various biotechnological processes. Therefore, this study aimed to evaluate its potential as an alternative substrate for cultivating the fungi *Herichium erinaceus* (lion's mane) and *Trametes versicolor* (turkey tail). To this end, substrates were formulated with different proportions of green banana peel and sawdust. These substrates were characterized, conditioned, and subsequently inoculated with mycelium of both species. Throughout the experiment, fungal growth was monitored by evaluating the rate and percentage of colonization, as well as the adaptability of each fungus to the different formulations studied. The results obtained demonstrated that green banana peel can be used as a substrate component for the growth of both species, although differences in colonization behavior were observed depending on the proportion used and the species evaluated. These responses were related to the characteristics of each fungus and the composition of the lignocellulosic material used. In general, the treatments evaluated confirmed that this agro-industrial waste has favorable characteristics for use in fungal cultivation processes.

Keywords: green banana peel, *Herichium erinaceus*, *Trametes versicolor*, agro-industrial waste, mycelial growth, lignocellulosic biomass, fungal biotechnology, circular economy.

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes Investigativos

1.1.1. Justificación del problema

La agroindustria ecuatoriana, específicamente la de plátano verde, genera grandes cantidades de desperdicios entre ellos cáscara, las cuales en su mayoría son desechadas como residuos orgánicos sin un destino productivo definido. Esta situación contribuye a la contaminación ambiental y representa una pérdida de recursos potencialmente aprovechables.

El problema central identificado consiste en el limitado aprovechamiento biotecnológico de residuos agroindustriales para el cultivo de hongos en Ecuador, situación que restringe el aprovechamiento del potencial biotecnológico del país y limita la generación de valor agregado dentro de las cadenas productivas. Esta problemática evidencia una brecha entre la disponibilidad de recursos naturales y la capacidad de transformarlos en aplicaciones biotecnológicas con impacto productivo.

Según la FAO (Food and Agriculture Organization), Ecuador es uno de los principales exportadores de plátano verde a nivel mundial, constituyendo este cultivo en uno de los pilares de la economía nacional. La producción anual alcanza aproximadamente 6.5 millones de toneladas, de las cuales entre el 30 y el 40 % corresponde a cáscaras y otros residuos que, en la mayoría de los casos, son descartados sin recibir ningún tipo de aprovechamiento posterior (Tarigan et al., 2023).

El manejo inadecuado de estos residuos genera diversos problemas ambientales, entre ellos la emisión de malos olores durante su descomposición, la producción de gases efecto invernadero y la proliferación de organismos que pueden actuar como vectores biológicos (Alzate Acevedo et al., 2021). Frente a esta problemática, desde el ámbito biotecnológico se han planteado diferentes alternativas para la valorización de estos materiales, fundamentadas en los principios de la economía circular. En este contexto, los residuos agroindustriales pueden ser utilizados como sustrato para la producción de hongos comestibles y medicinales, reduciendo de esta manera el impacto ambiental asociado a su disposición final y aprovechando la generación de productos de alto valor agregado a partir de desechos. (Zou et al., 2022).

Las causas que originan este problema son diversas y pueden agruparse en tres componentes principales. En el ámbito técnico-científico, se observa una limitada caracterización de los residuos agroindustriales particularmente en aspectos relacionados con su composición química y nutricional, así como la escasez de cepas adaptadas a estos materiales y de protocolos estandarizados para su cultivo. En el ámbito institucional, destacan la débil articulación entre el sector productivo y académico, así

como la limitada disponibilidad de financiamiento para el desarrollo de proyectos piloto que permitan evaluar la viabilidad tecnológica. Finalmente, en la dimensión regulatoria y social, persisten vacíos que dificultan la consolidación de iniciativas orientadas al aprovechamiento biotecnológico de los recursos disponibles.

Particularmente, *Hericium erinaceus* es una especie conocida por la producción de compuestos con propiedades neuro protectoras, antioxidantes e inmunomoduladores, lo que le confiere un importante potencial de investigación y aplicación comercial (Friedman, 2015a; Wasser, 2017). A pesar de ello, el cultivo de este hongo en Ecuador aún es limitado y continúa dependiendo principalmente de sustratos tradicionales como aserrín, cascarilla y otros materiales lignocelulósicos. En este sentido, la incorporación de residuos agroindustriales, como la cáscara de plátano verde representa una alternativa que podría contribuir al aprovechamiento sostenible de recursos y a la reducción de la cantidad de residuos generados por la agroindustria (Hikal et al., 2022).

De acuerdo con lo expuesto, la problemática identificada no se limita únicamente al ámbito ambiental, sino que también involucra aspectos productivos y sociales. El escaso aprovechamiento de residuos agroindustriales restringe el desarrollo de nuevas cadenas de valor dentro del sector biotecnológico, limita la generación de productos innovadores y dificulta el avance hacia modelos productivos basados en los principios de la economía circular.

En consecuencia, el bajo desarrollo de la bioprospección fúngica sobre residuos agroindustriales no constituye un fenómeno aislado, sino el resultado de múltiples factores interrelacionados. Sin embargo, esta situación también representa una oportunidad para impulsar procesos de innovación mediante la caracterización de nuevos sustratos, la evaluación de especies fúngicas de interés biotecnológico y el desarrollo de estrategias de aprovechamiento sostenible. De esta manera, los residuos agroindustriales, podrían transformarse en una fuente de materias primas para la obtención de productos biotecnológicos con potencial impacto científico, económico y ambiental.

1.1.2. Biomasa lignocelulósica y valorización de residuos

La biomasa lignocelulósica es una de las fuentes de biomasa más abundantes disponibles y es considerada la cuarta fuente de combustible más importante después del carbón, el petróleo y el gas. Se trata de un material de origen vegetal que no se destina a la alimentación humana o animal y que se obtiene principalmente a partir de residuos agrícolas, cultivos, residuos forestales y procesos de poda. Su composición se caracteriza por un elevado contenido de carbohidratos estructurales, principalmente celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que hace que su biodegradación sea más lenta en comparación con otros residuos orgánicos (Xu & Li, 2017).

Esta biomasa lignocelulósica puede clasificarse de acuerdo con su origen en agrícolas, como rastrojos y bagazos; residuos forestales correspondientes a podas y aserrín, cultivos energéticos y otros residuos vegetales. Su estructura está conformada por tres polímeros principales celulosa (40 a 50%), hemicelulosa (20 a 30%) y lignina (10 a 25%)(**Xu & Li, 2017**).

Residuos agroindustriales como recurso biotecnológico

El incremento sostenido de residuos agroindustriales constituye uno de los principales desafíos ambientales asociados al desarrollo del sector agroalimentario, especialmente en países con economías basadas en la producción y exportación de materias primas. Estos residuos, generados durante las etapas de cosecha, procesamiento y comercialización, suelen presentar una elevada carga orgánica y una composición rica en compuestos lignocelulósicos, lo que los convierte en una fuente potencial de biomasa susceptible de ser transformada mediante procesos biotecnológicos en productos con valor agregado.

La capacidad de los hongos filamentosos para producir enzimas hidrolíticas y oxidativas permite la conversión de residuos agroindustriales en biomasa fúngica, metabolitos bioactivos y otros productos de interés industrial, reduciendo simultáneamente el impacto ambiental asociado a la acumulación de desechos(**Kumla et al., 2020; Montoya et al., 2021; Tišma et al., 2021**).

En este contexto, el aprovechamiento biotecnológico de residuos agroindustriales puede definirse como el uso controlado de sistemas biológicos para transformar desechos orgánicos en productos útiles, mediante procesos de bioconversión, valorización o revalorización. A diferencia de los métodos convencionales de disposición final, estas estrategias se alinean con los principios de la economía circular, promoviendo ciclos productivos más sostenibles y de menor impacto ambiental (**Atta et al., 2026**).

Problemática ambiental y aprovechamiento sostenible

La gestión inadecuada de los residuos agroindustriales genera graves consecuencias ambientales, entre las cuales se incluyen la emisión de gases de efecto invernadero, la producción de lixiviados que contaminan fuentes hídricas superficiales y subterráneas, la proliferación de vectores biológicos y la contaminación visual ocasionada por su acumulación. Estas problemáticas se hacen más evidentes en zonas con alta actividad agroindustrial, donde la generación de residuos ocurre de manera constante (**Alzate Acevedo et al., 2021**).

Desde una perspectiva económica y ambiental, la economía circular y la revalorización de residuos representan alternativas sostenibles que permiten generar nuevos ciclos productivos, reducir la generación neta de desechos y obtener productos con valor agregado a partir de materiales que, de otra manera, constituirían una carga ambiental y económica (**Zou et al., 2022**).

1.1.3. *Musa spp.* como sustrato lignocelulósico

Generación de residuos de *Musa spp.*

Ecuador se posiciona como uno de los principales productores y exportadores de plátano verde (*Musa spp.*) a nivel mundial, constituyéndose en un pilar estratégico de la economía nacional. De acuerdo con datos documentados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la producción anual de *Musa spp.* en el país alcanza varios millones de toneladas, de las cuales entre el 30 % y el 40 % corresponde a subproductos y residuos vegetales, principalmente cáscaras, pseudotallos y raquis (Tarigan et al., 2023).

La cáscara de plátano verde representa uno de los residuos más abundantes y menos aprovechados dentro de la cadena productiva. En la mayoría de los casos, este material es descartado sin tratamiento previo en vertederos, suelos descubiertos o cuerpos de agua, generando problemas ambientales como la emisión de malos olores, la producción de lixiviados, la liberación de gases de efecto invernadero y la proliferación de microorganismos patógenos. Estas prácticas evidencian la necesidad de desarrollar alternativas sostenibles para la gestión de estos residuos, especialmente en regiones con alta concentración de agroindustrias procesadoras. Desde una perspectiva biotecnológica, la elevada disponibilidad de cáscara de plátano verde en Ecuador constituye una oportunidad para su valorización como sustrato en procesos productivos basados en microorganismos, particularmente en el cultivo de hongos comestibles y medicinales (Alzate Acevedo et al., 2021).

Composición fisicoquímica de la cáscara de plátano

La cáscara de plátano verde (*Musa spp.*) presenta una composición fisicoquímica favorable para su uso como sustrato lignocelulósico. Diversos estudios han documentado que este residuo contiene porcentajes apreciables de celulosa (20–30 %), hemicelulosa (10–25 %) y lignina (10–15 %), además de minerales como potasio, calcio y magnesio, así como un contenido moderado de nitrógeno que contribuye a una relación carbono/nitrógeno adecuada para el crecimiento microbiano (Karigar, 2025; Hikal et al., 2022).

Además de estos componentes estructurales, la cáscara de plátano contiene compuestos con actividad antioxidante y antimicrobiana, entre los que destacan la galocatequina, alcaloides, flavonoides, taninos y saponinas. Estos metabolitos han sido asociados con la capacidad de neutralizar radicales libres y participar en diversos mecanismos de protección biológica descritos en la literatura científica (Hikal et al., 2022).

1.1.4. Limitaciones y acondicionamiento del sustrato

La cáscara de plátano verde (*Musa spp.*) presenta una composición fisicoquímica favorable para su utilización como sustrato lignocelulósico. Entre sus principales características destaca su relación carbono / nitrógeno, la cual favorece el crecimiento microbiano. Desde la perspectiva micológica, se ha documentado que la cáscara de *Musa spp.* ha sido ampliamente utilizada como sustrato para el desarrollo de hongos filamentosos y mohos industriales, principalmente de los géneros *Aspergillus* y *Rhizopus*. Sin embargo, su aplicación como sustrato principal o parcial para el cultivo de hongos macroscópicos comestibles y medicinales ha sido menos estudiada. No obstante, investigaciones previas han demostrado su viabilidad como componente suplementario en mezclas lignocelulósicas, evidenciando una adecuada colonización micelial y degradación estructural del sustrato. Estas características justifican la evaluación experimental de diferentes proporciones de cáscara de plátano verde en la formulación de sustratos, con el fin de determinar su influencia sobre el crecimiento micelial, la productividad y la eficiencia biológica de hongos de interés biotecnológico (**Karigar, 2025**).

A pesar de sus ventajas, esta misma composición puede representar ciertas limitaciones para su uso como sustrato. Sin un tratamiento previo adecuado, la cáscara puede experimentar procesos fermentativos espontáneos que alteran sus características fisicoquímicas y nutricionales, lo que podría afectar el crecimiento y desarrollo de los hongos. Por esta razón, suele complementarse con materiales estructurantes, como el aserrín de madera, que contribuyen a mejorar las propiedades físicas del sustrato. La incorporación de materiales estructurantes favorece el desarrollo micelial y la formación de cuerpos fructíferos, ya que mejora la aireación, la estructura física y la disponibilidad de nutrientes dentro del sustrato. Asimismo, el aporte adicional de carbono y nitrógeno contribuye a generar condiciones más favorables para el crecimiento y desarrollo de los hongos (**Elkanah et al., 2022a**).

1.1.5. Formulación de sustratos para cultivo de hongos

Principios de formulación de sustratos

En micología aplicada, el sustrato se define como el material sólido que proporciona soporte físico y nutrientes esenciales para el crecimiento micelial y la formación de cuerpos fructíferos. La formulación adecuada del sustrato es un factor crítico que influye directamente en la velocidad de colonización, el rendimiento productivo y la eficiencia biológica del cultivo.

Los sustratos lignocelulósicos presentan ventajas significativas debido a su disponibilidad, bajo costo y compatibilidad con hongos degradadores de lignina y celulosa. Variables como la relación carbono/nitrógeno, la porosidad, la capacidad de retención de humedad y la composición estructural determinan la idoneidad del sustrato para el desarrollo fúngico (**Yildiz et al., 2002**).

Para la formulación de un sustrato a base de materiales lignocelulósicos destinados al cultivo de hongos, es necesario considerar factores claves como son el porcentaje de celulosa, hemicelulosa, lignina y la relación carbono nitrógeno de los residuos empleados. Estos aspectos son relevantes debido a que la mayoría de los hongos utilizados en cultivo son de naturaleza saprofita, es decir, obtienen los nutrientes necesarios para su crecimiento a partir de la degradación de materia orgánica. Mediante la acción de enzimas extracelulares, estos organismos degradan los componentes lignocelulósicos del sustrato y utilizan los compuestos resultantes como fuente de carbono y energía para su crecimiento y desarrollo. En este proceso, la disponibilidad de nitrógeno constituye uno de los factores nutricionales más importantes, ya que suele encontrarse en concentraciones limitadas dentro de los residuos lignocelulósicos. Por esta razón, es común complementar los sustratos mediante la incorporación de materiales estructurantes o suplementos nitrogenados, tales como salvado de cereal, cascarillas, fuentes minerales de nitrógeno y otros aditivos que favorecen el desarrollo micelial (Kumla et al., 2020).

1.1.5.1. Uso de aserrín de madera como material estructurante

El aserrín de madera es uno de los materiales estructurantes más utilizados en cultivo de hongos, ya que constituye un componente esencial del sustrato al proporcionar soporte físico, aireación y porosidad, características que favorecen la colonización y el desarrollo del micelio. La estructura del aserrín genera espacios que facilitan la expansión micelial y mejoran el intercambio gaseoso dentro del sustrato. Este material está compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, compuestos que pueden servir como fuente de nutrientes para diversas especies fúngicas. Sin embargo, la selección del tipo de madera es un aspecto importante, ya que algunos aserrines pueden contener resinas u otras sustancias con efectos inhibitorios sobre el crecimiento del hongo. Por esta razón, suele recomendarse el uso de aserrín proveniente de maderas como el pino, abeto, cedro, balsa, álamo y eucalipto. Asimismo, la composición química del aserrín puede influir en la velocidad de colonización y en el tiempo requerido para la formación de cuerpos fructíferos. Materiales con una elevada proporción de compuestos estructurales suelen requerir periodos más prolongados de degradación, mientras que aquellos con una mayor disponibilidad de nutrientes pueden favorecer el establecimiento del micelio. En consecuencia, una formulación homogénea y adecuadamente balanceada contribuye a optimizar los procesos de colonización, desarrollo y fructificación del cultivo (Akçay et al., 2023; Schoder et al., 2024).

1.1.5.2. Balance nutricional y relación C/N

La composición del sustrato influye directamente sobre la calidad y cantidad de la producción fúngica. Por esta razón, es necesario proporcionar fuentes adecuadas de carbono, nitrógeno y otros nutrientes que favorezcan el crecimiento micelial y la formación de cuerpos fructíferos. Dependiendo de la formulación empleada, pueden incorporarse suplementos nutricionales como salvado de arroz, estiércol animal, granos o diferentes aditivos utilizados para complementar las necesidades nutricionales del

cultivo. Para obtener rendimientos adecuados, es necesario controlar la relación carbono/nitrógeno (C/N) del sustrato, además de considerar la proporción de componentes estructurales como celulosa, hemicelulosa y lignina. Estas características no solo influyen en la disponibilidad de nutrientes para el hongo, sino también en las interacciones que se establecen entre el micelio y las comunidades microbianas presentes en el sustrato. Diversos estudios han señalado que estas interacciones pueden influir en la disponibilidad de nutrientes, la producción de metabolitos y el desarrollo general del cultivo (Suwannarach et al., 2022; Atila, 2019).

En general los hongos de pudrición blanca presentan un mejor desarrollo en sustratos con relaciones C/N relativamente elevadas, debido a su capacidad degradadora de compuestos ricos en carbono. Dependiendo de la especie y de la composición del sustrato, se han documentado valores óptimos comprendidos entre 25:1 o 40:1 y 30:1, especialmente en formulaciones complementadas con aserrín de madera. Una adecuada formulación y un balance apropiado de C/N favorecen la síntesis de proteínas, enzimas y otros compuestos esenciales para el crecimiento fúngico. Por el contrario, concentraciones excesivas de nitrógeno pueden alterar el equilibrio nutricional del sustrato, favorecer el desarrollo de microorganismos competidores y afectar negativamente la colonización micelial y la eficiencia biológica del cultivo (Lu et al., 2024; Tišma et al., 2021).

Parámetros fisicoquímicos óptimos

Los parámetros fisicoquímicos del sustrato determinan de manera directa la viabilidad y velocidad del proceso de colonización micelial. El contenido de humedad debe situarse entre el 60 % y el 70 %, rango que garantiza la disponibilidad de agua necesaria para los procesos metabólicos del micelio sin generar condiciones anaeróbicas que favorezcan la proliferación de microorganismos competidores (Akca et al., 2023).

El pH del sustrato debe mantenerse en un rango de 5,0 a 7,0, considerándose óptimos valores entre 6,0 y 7,0 para la mayoría de los hongos basidiomicetos cultivados sobre residuos lignocelulósicos. El ajuste del pH se realiza frecuentemente mediante la adición de carbonato de calcio (CaCO_3), que actúa como agente tamponante y fuente de calcio para el organismo fúngico (Villani et al., 2025).

La temperatura, el potencial de hidrógeno (pH) y la humedad constituyen algunos de los parámetros más importantes durante las etapas de inoculación, colonización y fructificación. El control adecuado de estas variables permite optimizar el crecimiento micelial, mejorar la eficiencia del cultivo y favorecer la formación de cuerpos fructíferos (Hřebečková et al., 2024).

Como podemos evidenciar en la **Tabla 1** la caracterización de todas estas variables nos da una idea más clara de la composición y características del sustrato que se va a utilizar para de esta manera tener una idea más clara de que tan eficiente será la utilidad de este en base a todo lo antes mencionado.

Tabla 1. *Parámetros fisicoquímicos óptimos para las especies fúngicas*

Parámetro	<i>Hericium erinaceus</i>	<i>Trametes versicolor</i>	Función
Temperatura de colonización	24 – 26 °C	22 – 27 °C	Regula la actividad enzimática y la velocidad metabólica del hongo. Temperaturas superiores o inferiores a las caracterizadas como óptimas pueden reducir la actividad fisiológica del micelio, retrasar la colonización del sustrato y favorecer el desarrollo de microorganismos competidores (Lu et al., 2024; Suwannarach et al., 2022; Tišma et al., 2021)
Temperatura de fructificación	18 – 24 °C		
pH	5,5 – 6,5	5,0 – 6,5	Influye directamente en la disponibilidad de nutrientes y en la actividad enzimática del hongo. Los hongos lignocelulósicos suelen desarrollarse adecuadamente en ambientes ligeramente ácidos, ya que muchas de sus enzimas degradativas presentan una mayor estabilidad y eficiencia catalítica bajo estas condiciones (Jahedi et al., 2024; La et al., 2023; Lu et al., 2024)
Humedad	65 – 70 %		Es uno de los parámetros más críticos en el cultivo de hongos ya que de este parámetro depende la disponibilidad de agua para los procesos metabólicos del mismo, el transporte de nutrientes y la expansión micelial. Una humedad insuficiente limita el crecimiento y la actividad metabólica, mientras que un exceso reduce la aireación del sustrato, favorece la proliferación de contaminantes y dificulta el intercambio gaseoso necesario para el desarrollo del micelio (Hřebečková et al., 2024b; Tišma et al., 2021).

1.1.6. Hongos lignocelulolíticos y degradación de biomasa

1.1.6.1. Características de los hongos de pudrición blanca

Los hongos de pudrición blanca constituyen un grupo funcional de basidiomicetos caracterizados por su capacidad para degradar eficientemente los principales componentes de la lignocelulosa vegetal. Como resultado de este proceso, la madera y otros residuos vegetales adquieren una coloración

blanquecina debido a la degradación progresiva de la lignina, característica que da origen a su denominación. Estos organismos producen un complejo sistema enzimático extracelular que incluye lacasas, manganeso peroxidasas (MnP), lignina peroxidasas (LiP) y peroxidasas versátiles (VP), responsables de la oxidación de la lignina y de facilitar el acceso a los polisacáridos estructurales de la pared vegetal. (Lu et al., 2024)

La versatilidad metabólica de estos hongos les permite colonizar una amplia variedad de sustratos lignocelulósicos, incluyendo residuos agrícolas, forestales e industriales. Esta capacidad los diferencia de los hongos de pudrición parda, los cuales degradan principalmente la celulosa y la hemicelulosa mediante mecanismos oxidativos asociados a la reacción de Fenton (degradación de peróxido de hidrógeno y hierro en radicales hidroxilo para la destrucción de las paredes celulares). Gracias a su capacidad para degradar los tres principales componentes de la lignocelulosa (celulosa, hemicelulosa y lignina) los hongos de pudrición blanca desempeñan un papel importante en procesos de valorización, biorremediación y producción de biomasa fúngica con aplicaciones alimentarias y medicinales (Friedman, 2015)

Entre las especies más relevantes dentro de este grupo se encuentran *Trametes versicolor* (Cola de pavo), *Phanerochaete chrysosporium*, *Pleurotus ostreatus* (Hongo ostra) y *Hericiium erinaceus* (Melena de león) las cuales han demostrado una elevada capacidad de producción de enzimas lignolíticas y una eficiente degradación de materiales lignocelulósicos (Mäkelä et al., 2021).

1.1.6.2. Mecanismos de degradación de lignina y polisacáridos

Los hongos de pudrición blanca, a diferencia de otros microorganismos degradadores poseen sistemas oxidativos extracelulares capaces de actuar sobre compuestos aromáticos y estructuras fenólicas altamente recalcitrantes. Esta capacidad les permite colonizar una amplia variedad de residuos agroindustriales y materiales lignificados, lo que los convierte en organismos de interés para diversos procesos biotecnológicos de transformación y valorización de residuos. La degradación de la biomasa lignocelulósica constituye un proceso complejo que involucra reacciones oxidativas e hidrolíticas capaces de modificar la estructura química de la lignina, celulosa y hemicelulosa (La et al., 2023)

Los hongos lignocelulósicos son capaces de producir enzimas oxidativas estructurales las cuales generan radicales libres que a su vez fragmentan la lignina y modifican su estructura química para incrementar la porosidad del material vegetal y de esta manera facilitar el acceso del organismo hacia la celulosa y la hemicelulosa lo cual posteriormente facilitará el trabajo de las enzimas hidrolíticas degradando los polisacáridos en azúcares simples que a su vez serán utilizados en la actividad metabólica del micelio proporcionando de esta manera soporte, respiración y reproducción (Civzele et al., 2023).

La eficiencia de estos mecanismos degradativos depende de diversos factores, entre ellos las características físicoquímicas del sustrato. Variables como la humedad, el pH, la temperatura y la composición química pueden influir en la producción y actividad de las enzimas ligninolíticas e hidrolíticas, afectando directamente la capacidad de degradación y el desarrollo del hongo sobre el sustrato.

Tabla 2. *Productos obtenidos de la degradación de la biomasa lignocelulósica*

Componente	Función estructural	Enzima degradativa	Productos principales
Lignina	Rigidez y resistencia mecánica	Lacasas, lignina peroxidasa (LiP), manganeso peroxidasa (MnP)	Fenoles y compuestos aromáticos
Celulosa	Soporte estructural de la pared vegetal	Celulasas	Glucosa
Hemicelulosa	Matriz estructural amorfa asociada a la celulosa	Xilanasas	Xilosa y otros azúcares simples

Nota: Obtenido de (Datta, 2024; La et al., 2023).

1.1.6.3. Sistema enzimático

El sistema enzimático es un conjunto de catalizadores biológicos que trabajan de manera coordinada para acelerar y controlar reacciones bioquímicas en los organismos. En los hongos lignocelulolíticos, este sistema está conformado principalmente por enzimas oxidativas e hidrolíticas que actúan de manera sinérgica sobre la biomasa vegetal, permitiendo la degradación de sus componentes estructurales (La et al., 2023).

En la **tabla 3** podemos ver como cada una de estas enzimas desempeña funciones específicas dentro del proceso degradativo. Las lacasas catalizan la oxidación de compuestos fenólicos utilizando oxígeno como aceptor final de electrones, mientras que las peroxidasas intervienen en la ruptura de enlaces aromáticos presentes en la lignina. Por otra parte, las enzimas hidrolíticas, como las celulasas y xilanasas, actúan sobre los polisacáridos estructurales, liberando azúcares simples que posteriormente son utilizados por el micelio como fuente de carbono y energía para su crecimiento y desarrollo. La actividad de estos sistemas enzimáticos depende en gran medida de la composición química y de las

características fisicoquímicas del sustrato, ya que estas condiciones determinan la disponibilidad de nutrientes y la eficiencia de los procesos metabólicos involucrados en el crecimiento fúngico (Tišma et al., 2021).

Tabla 3. Comparación de los principales sistemas enzimáticos involucrados en la degradación lignocelulósica

Enzima	Función principal	Tipo de reacción
Lacasa	Oxidación de compuestos fenólicos	Oxidativa
Lignina peroxidasa	Fragmentación de lignina	Oxidativa
Manganeso peroxidasa	Oxidación de lignina	Oxidativa
Celulasas	Hidrolisis de celulosa	Hidrolítica
Xilanasas	Degradación de hemicelulosa	hidrolítica

Nota: Información obtenida de (Benavides et al., 2024; Gałazka et al., 2025)

1.1.7. Especies fúngicas (*Hericium erinaceus* y *Trametes versicolor*)

Hericium erinaceus, conocido comúnmente como melena de león, es un hongo basidiomiceto comestible y medicinal que tradicionalmente se cultiva sobre sustratos amaderados, tales como troncos, aserrín y mezclas lignocelulósicas suplementadas. Este hongo se clasifica como degradador de madera dura, presentando una preferencia por sustratos con alto contenido de celulosa y una relación carbono/nitrógeno equilibrada.

Desde el punto de vista biotecnológico, *Hericium erinaceus* es reconocido por la producción de metabolitos bioactivos con propiedades neuro protectoras, antioxidantes e inmunomoduladores, lo que ha despertado un creciente interés en su cultivo tanto a escala experimental como industrial. Estudios recientes han demostrado que este hongo puede adaptarse a sustratos alternativos derivados de residuos agrícolas, siempre que estos presenten una estructura física adecuada, buena aireación y un aporte nutricional suficiente (Friedman, 2015; Wasser, 2017; Lu et al., 2024).

Por su parte, *Trametes versicolor*, conocido como cola de pavo, es un hongo de pudrición blanca ampliamente estudiado debido a su elevada capacidad enzimática y su versatilidad metabólica. Esta

especie produce un amplio espectro de enzimas ligninolíticas, lo que le permite colonizar eficientemente residuos agrícolas y forestales con alto contenido de lignina.

Además de sus aplicaciones en procesos de biorremediación, *Trametes versicolor* ha demostrado poseer metabolitos con actividad inmunomodulador y antioxidante, lo que sustenta su uso en el ámbito medicinal y nutracéutico. Diversos estudios han reportado resultados favorables en términos de colonización y eficiencia biológica cuando este hongo es cultivado sobre mezclas de residuos lignocelulósicos, alcanzando valores significativos de degradación y aprovechamiento del sustrato. **(Borràs et al., 2011; Desisa et al., 2024; Montoya et al., 2021)**

1.1.7.1. Características biológicas y taxonomía

Hericium erinaceus comúnmente conocido como melena de león, es un hongo comestible y medicinal que se desarrolla preferentemente sobre madera muerta o en proceso de descomposición. Perteneciente al filo *Basidiomycota* y a la familia *Hericiaceae*. Se caracteriza por presentar una estructura globosa de coloración blanca a crema formada por numerosas espinas colgantes que le confieren una apariencia característica. Desde el punto de vista nutricional, este hongo presenta una composición rica en carbohidratos, con valores cercanos al 57 %, además de aproximadamente un 22 % de proteínas y un 4 % de lípidos. Su importancia medicinal radica en la presencia de compuestos terpénicos conocidos como erinacinas y hericenonas, a los cuales se les atribuyen actividades neurotróficas y neuro protectoras reportadas en diversos estudios **(Sevindik et al., 2024; Sun et al., 2025)**

Por otra parte, *Trametes versicolor*, conocido comúnmente como cola de pavo, es un hongo basidiomiceto perteneciente al filo *Basidiomycota* y a la familia *Polyporaceae*. Se considera una de las especies de pudrición blanca más estudiadas debido a su capacidad degradadora y a su amplio potencial biotecnológico. Morfológicamente, se distingue por presentar cuerpos fructíferos con forma de abanico y bandas concéntricas de tonalidades variables que van desde el marrón oscuro hasta el blanco, características que recuerdan a las plumas de la cola de un pavo, de donde deriva su nombre común. Esta especie produce elevadas concentraciones de enzimas oxidativas extracelulares, así como polisacáridos bioactivos, entre los que destacan el polisacárido-K o krestina (PSK) y los polisacáridos-péptidos (PSP). Estos compuestos han sido ampliamente estudiados debido a sus propiedades antioxidantes, inmunomoduladores y antitumorales, lo que ha incrementado el interés por su aplicación en los campos médico y nutracéutico **(Fabros et al., 2023)**.

Tabla 4. Comparación taxonómica

Característica	<i>Hericium erinaceus</i>	<i>Trametes versicolor</i>
Filo	Basidiomycota	Basidiomycota
Orden	Russuales	Polyporales
Familia	Hericiaceae	Polyporaceae
Nutrición	Saprofítico	Saprofítico
Degradación	Pudrición blanca	Pudrición blanca
Interés	Medicinal y comestible	Medicinal y biotecnológico

1.1.7.2. Requerimientos de crecimiento

Hericium erinaceus presenta requerimientos ambientales específicos en cada etapa de su ciclo de desarrollo. Durante la fase de colonización micelial, requiere temperaturas comprendidas entre 24 y 28 °C, condiciones de oscuridad y una humedad relativa del 85 al 90 %. Por otra parte, la fase de fructificación demanda una reducción de la temperatura hasta valores cercanos a 16–18 °C, un incremento de la humedad relativa por encima del 90 %, iluminación difusa con fotoperiodos de 10 a 12 horas y una ventilación adecuada que evite la acumulación de dióxido de carbono (CO₂), ya que concentraciones elevadas pueden inhibir el desarrollo de los cuerpos fructífero.

Por su parte, *Trametes versicolor* requiere sustratos con contenidos de humedad comprendidos entre el 60 y el 70 %, así como relaciones carbono/nitrógeno relativamente elevadas. Debido a estas características, se recomienda el empleo de sustratos complementados con aserrín u otros materiales lignocelulósicos que aporten porosidad y reduzcan la compactación, favoreciendo el intercambio gaseoso y el metabolismo aeróbico del micelio.

Los requerimientos de crecimiento de ambas especies pueden variar en función de la composición del sustrato y de las condiciones de cultivo; sin embargo, el control de parámetros como temperatura, pH, humedad y relación carbono/nitrógeno resulta fundamental para optimizar la colonización y el desarrollo fúngico.

Tabla 5. *Requerimientos de crecimiento*

Parámetro	<i>Hericiium erinaceus</i>	<i>Trametes versicolor</i>
Temperatura	24 – 26 °C	22 – 27 °C
pH	5,5 – 6,5	5,0 – 6,5
Humedad	65 – 70%	60 – 70%
Relación C/N	25:1 – 40:1	20:1 – 35:1

Nota: información obtenida de (Fabros et al., 2023; Hřebečková et al., 2024; La et al., 2023e; Tišma et al., 2021)

1.1.7.3. Capacidad degradadora lignocelulósica

Hericiium erinaceus es capaz de degradar y utilizar componentes lignocelulósicos como lignina, celulosa y hemicelulosa durante su crecimiento sobre diferentes sustratos. Este proceso ocurre principalmente durante la fase de colonización micelial, en la que el hongo produce enzimas capaces de modificar y aprovechar los componentes estructurales del material vegetal. Debido a estas características, la especie suele desarrollarse favorablemente en sustratos con contenido significativo de compuestos lignocelulósicos. La actividad de enzimas como lacasas, celulasas y xilanasas le permite utilizar una amplia variedad de materiales vegetales, siempre que estos proporcionen las condiciones físicas y nutricionales necesarias para su crecimiento y desarrollo (Atila, 2019a, 2019c; Lu et al., 2024).

Por su parte, *Trametes versicolor* posee un sistema enzimático ligninolítico altamente eficiente, caracterizado por la producción de lacasas, manganeso peroxidasas y otras enzimas accesorias que actúan de manera sinérgica en la degradación de la lignina. Diversos estudios han reportado resultados favorables en términos de colonización y eficiencia biológica cuando esta especie es cultivada sobre mezclas de residuos lignocelulósicos, incluyendo aserrín de chopo, paja de trigo y bagazo de dátil (Borràs et al., 2011; Desisa et al., 2024; Montoya et al., 2021).

La lacasa producida por *Trametes versicolor* ha sido reconocida como una de las más activas entre los hongos de pudrición blanca. Se ha reportado que la suplementación del sustrato con cobre puede incrementar significativamente la actividad de esta enzima en comparación con tratamientos sin adición del metal, lo que representa una alternativa de interés para la optimización de procesos biotecnológicos basados en esta especie (La et al., 2023).

1.1.7.4. Importancia

Hericium erinaceus es reconocido a nivel mundial por la producción de metabolitos bioactivos con propiedades neuro protectoras, antioxidantes e inmunomoduladores. Entre los compuestos más estudiados se encuentran las hericenonas, presentes principalmente en el cuerpo fructífero, y las erinacinas, producidas en el micelio. Ambas familias de terpenoides han demostrado estimular la síntesis del factor de crecimiento nervioso (NGF), lo que confiere a este hongo un importante potencial terapéutico en el estudio de enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer y el Parkinson.

Además de sus propiedades neuro protectoras, *Hericium erinaceus* contiene β -glucanos con actividad inmunomodulador, compuestos antioxidantes como polifenoles y ergotioneína, así como un perfil nutricional destacado caracterizado por contenidos proteicos que oscilan entre el 20 y el 30 % en base seca, fibra dietética y vitaminas del complejo B. Estudios recientes han documentado que la composición del sustrato de cultivo puede influir significativamente en el contenido de metabolitos bioactivos presentes en los cuerpos fructíferos obtenidos, incluyendo hericenonas y erinacinas (**Baran et al., 2023**).

Por su parte, *Trametes versicolor* constituye uno de los hongos medicinales más estudiados a nivel mundial debido a la producción de polisacárido-K (PSK o krestina), aprobado en Japón como tratamiento adyuvante en terapias oncológicas desde la década de 1970, y de polisacárido-péptido (PSP), ampliamente utilizado en China. Ambos compuestos presentan actividad inmunomodulador mediante mecanismos asociados a la activación de células dendríticas, linfocitos T y células NK a través de receptores tipo Toll (TLR-2), procesos ampliamente descritos en la literatura científica (**Tišma et al., 2021**).

En el ámbito industrial, las lacasas producidas por *Trametes versicolor* presentan aplicaciones en procesos de decoloración de efluentes textiles, blanqueamiento de pulpa de papel y degradación de contaminantes emergentes, como fármacos y pesticidas presentes en aguas residuales. Esta versatilidad confiere a la especie un valor biotecnológico que trasciende su uso como hongo medicinal y amplía sus posibilidades de aplicación en diferentes sectores productivos (**Tišma et al., 2021**).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar el potencial biotecnológico de la cáscara de plátano verde (*Musa spp.*) como sustrato alternativo para el cultivo de hongos comestibles y medicinales melena de león (*Hericium erinaceus*) y cola de pavo (*Trametes versicolor*).

1.2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y estructurales de la cáscara de plátano verde (*Musa spp.*) para determinar su potencial como sustrato en el cultivo de hongos.
- Comparar el crecimiento micelial de *Hericium erinaceus* y *Trametes versicolor* en sustratos con cáscara de plátano como sustrato alternativo.
- Determinar la eficiencia biológica y el rendimiento productivo de los hongos cultivados en el sustrato experimental.

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

2.1. Materiales

El presente trabajo de titulación se llevó a cabo en los laboratorios de la Unidad Operativa de Investigación (UODIDE) de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato, para lo cual utilizamos diferentes reactivos, material fungible y equipos, como se listan en la **tabla 6**.

Tabla 6. *Materiales, equipos y reactivos*

Reactivos	
• Carbonato de calcio	• Glucosa
• Agar	• Alcohol etílico
• Aserrín	• Carbonato de calcio
• Residuos de plátano verde	• Micelio de <i>Hericiium erinaceus</i>
• PDA	• Micelio de <i>Trametes versicolor</i>
Equipos	
• Incubadora	• Autoclave
• Germinador	• Balanza
• Cámara de flujo laminar tipo II	• Deshidratador
• Estufa	• Termohigrómetro

Nota: elaboración propia

2.2. Métodos

2.2.1. Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y estructurales de la cáscara de plátano verde (*Musa spp.*) para determinar su potencial como sustrato en el cultivo de hongos.

2.2.1.1. Diseño experimental

La investigación se desarrolló bajo un diseño completamente al azar (DCA) con un arreglo factorial 2×3 , con el propósito de evaluar el efecto de la especie fúngica y del porcentaje de cáscara de plátano

verde (*Musa spp.*) incorporado al sustrato sobre el crecimiento micelial, la eficiencia biológica y el rendimiento productivo de los hongos cultivados.

El factor A correspondió a la especie fúngica:

- A1: *Hericium erinaceus*
- A2: *Trametes versicolor*

El factor B correspondió a la proporción de cáscara de plátano verde utilizada en la formulación del sustrato:

- B1: 25 %
- B2: 50 %
- B3: 75 %

A partir de la combinación de ambos factores se establecieron seis tratamientos experimentales (Tabla 7).

Tabla 7. *Tratamientos experimentales*

Tratamiento	Especie fúngica	Porcentaje de <i>Musa spp.</i>
T1	<i>Hericium erinaceus</i>	25%
T2	<i>Hericium erinaceus</i>	50%
T3	<i>Hericium erinaceus</i>	75%
T4	<i>Trametes versicolor</i>	25%
T5	<i>Trametes versicolor</i>	50%
T6	<i>Trametes versicolor</i>	75%

Nota: autoría propia

Cada tratamiento se evaluó por triplicado, obteniéndose un total de 18 unidades experimentales..

2.2.1.2. Caracterización fisicoquímica inicial

La fase inicial consistió en la recolección de cáscaras de plátano verde provenientes de diferentes sectores productores de la provincia de Tungurahua. Con el fin de garantizar la calidad del material utilizado, se seleccionaron únicamente residuos frescos, libres de signos de deterioro, contaminación microbiana o descomposición.

Una vez recolectado el material, se registró el peso húmedo inicial y se tomó una muestra representativa para determinar el contenido de humedad mediante el método gravimétrico. Para ello, se colocaron 10 g de muestra en una estufa a 110 °C durante 24 horas, de acuerdo con la metodología descrita por **Akcay et al., (2023)**. De manera complementaria, se determinó el pH del material utilizando una suspensión preparada con 5 g de muestra seca y 50 mL de agua destilada. Las mediciones se realizaron mediante un potenciómetro previamente calibrado con soluciones buffer estándar antes de cada jornada de

análisis (Villani et al., 2025). Para complementar la caracterización fisicoquímica de los materiales evaluados, se tomaron muestras previamente trituradas y homogenizadas, las cuales fueron analizadas en los laboratorios de la Unidad Operativa de Investigación, Desarrollo e Innovación (UODIDE). El contenido de nitrógeno total se determinó mediante el método DUMAS, y a partir de este valor se estimó el contenido de proteína cruda utilizando el factor de conversión correspondiente. El contenido de cenizas se determinó mediante el método AOAC 942.05, mientras que el contenido de lípidos se cuantificó mediante extracción con solvente de acuerdo con los métodos AOAC 920.39 y AOAC 960.39. Los resultados obtenidos fueron integrados con los valores de humedad y pH para realizar una caracterización fisicoquímica integral de los sustratos utilizados en la investigación.

2.2.1.3. Preparación del sustrato

Las cáscaras de plátano verde recolectadas fueron fraccionadas en segmentos de aproximadamente 1 a 5 cm de longitud con el fin de facilitar su manipulación, homogenización y posterior colonización micelial. La formulación de los sustratos se realizó considerando la información obtenida durante la caracterización fisicoquímica, particularmente los parámetros relacionados con humedad, pH y composición nutricional.

Posteriormente, los materiales fueron mezclados de acuerdo con las proporciones establecidas para cada tratamiento experimental. La humedad del sustrato se ajustó mediante la adición de agua potable hasta alcanzar valores comprendidos entre 60 y 70 %, los cuales fueron verificados mediante determinaciones gravimétricas. El pH se ajustó a un rango de 6,0 a 7,0 mediante la adición de carbonato de calcio (CaCO_3), con el propósito de proporcionar condiciones favorables para el crecimiento micelial (Elkanah et al., 2022).

Una vez alcanzadas las condiciones deseadas de humedad y pH, los componentes fueron homogenizados manualmente utilizando espátulas previamente esterilizadas. Posteriormente, el sustrato se distribuyó en bolsas de polipropileno resistentes al calor, procurando una compactación uniforme que permitiera mantener una adecuada porosidad e intercambio gaseoso.

La esterilización del sustrato se realizó en autoclave a 121 °C durante 60 minutos. Finalizado el proceso, las bolsas fueron transferidas a un área estéril y se dejaron enfriar hasta alcanzar temperatura ambiente (24–26 °C) antes de la inoculación, siguiendo las recomendaciones descritas por Roblero-Mejía et al., (2021).

2.2.2. Comparación y evaluación del crecimiento micelial de *Hericiium erinaceus* y *Trametes versicolor* en sustratos con cáscara de plátano como sustrato alternativo.

2.2.2.1. Preparación del inóculo

Las cepas de *Hericiium erinaceus* y *Trametes versicolor* utilizadas en la investigación fueron obtenidas de un cepario micológico autorizado. El material de inoculación consistió en spawn previamente colonizado sobre grano, por lo que no fue necesario realizar una etapa adicional de preparación del inóculo.

Previo al proceso de inoculación, los materiales requeridos para la siembra fueron esterilizados y acondicionados bajo condiciones asépticas. Una vez enfriados los sustratos esterilizados, se procedió a la inoculación utilizando spawn comercial en una proporción del 10 % (p/p) respecto al peso húmedo del sustrato. Posteriormente, las unidades experimentales fueron incubadas bajo condiciones controladas hasta alcanzar la colonización micelial completa, siguiendo procedimientos reportados para el cultivo de hongos lignocelulolíticos s (**Krupodorova et al., 2024**)

2.2.2.2. Inoculación del sustrato

Una vez que los sustratos esterilizados alcanzaron la temperatura ambiente, se realizó la inoculación dentro de una cámara de flujo laminar para minimizar riesgos de contaminación. El spawn fue incorporado al sustrato utilizando material previamente esterilizado y distribuido homogéneamente en diferentes puntos de cada unidad experimental.

Cada bolsa de cultivo contenía aproximadamente 500 g de sustrato húmedo. Posteriormente, las bolsas fueron selladas y rotuladas de acuerdo con el tratamiento y la repetición correspondiente antes de ser trasladadas al área de incubación.

Durante la fase de colonización, las bolsas se mantuvieron en oscuridad, a una temperatura controlada entre 24 y 28 °C y una humedad relativa comprendida entre 85 y 90 %. Se favoreció una adecuada ventilación para evitar la acumulación excesiva de dióxido de carbono (CO₂), condición que puede afectar el crecimiento micelial.

El avance de la colonización fue monitoreado diariamente mediante observación visual, registrándose el porcentaje de cobertura del sustrato y la presencia de posibles contaminaciones. Las unidades experimentales que presentaron contaminación evidente fueron retiradas del ensayo y registradas como pérdidas experimentales.

El período de incubación tuvo una duración aproximada de 10 a 20 días, dependiendo de la especie fúngica y de la formulación del sustrato. El tiempo de colonización se determinó como el número de días requeridos para que el micelio cubriera completamente el sustrato (**Krupodorova et al., 2024**).

2.2.2.3. Fructificación

Una vez alcanzada la colonización completa del sustrato, se indujo la etapa de fructificación mediante la modificación controlada de las condiciones ambientales. La temperatura se redujo a un rango de 16 a 18 °C y la humedad relativa se mantuvo por encima del 90 %.

Adicionalmente, se proporcionó iluminación difusa con un fotoperiodo de 10 a 12 horas diarias y se incrementó la ventilación con el fin de favorecer la formación de primordios y el desarrollo de cuerpos fructíferos.

Las condiciones de fructificación fueron mantenidas durante un período de 7 a 10 días. Durante esta etapa se registró la aparición de primordios, el desarrollo de cuerpos fructíferos y cualquier respuesta biológica observada en los tratamientos evaluados. Cuando se obtuvo producción de cuerpos fructíferos, estos fueron cosechados manualmente y se determinó su peso fresco para el cálculo del rendimiento productivo y la eficiencia biológica (Schoder et al., 2024)

2.2.3. Ensayos in vitro

Con el propósito de complementar la evaluación del crecimiento micelial bajo condiciones controladas, se desarrollaron ensayos in vitro utilizando medios formulados a partir de cada uno de los tratamientos experimentales. Para ello, se prepararon suspensiones constituidas por 6 g de sustrato y 200 mL de agua destilada, a las cuales se adicionaron 1,8 g de agar y 0,5 g de glucosa. Esta metodología permitió conservar las características composicionales de cada tratamiento y facilitar el seguimiento del crecimiento micelial en condiciones de laboratorio (Jasińska et al., 2017)

Una vez esterilizados los medios y vertidos en placas Petri, se realizó la inoculación utilizando una porción de spawn previamente colonizado de *Hericiium erinaceus* o *Trametes versicolor*, colocada en el centro de cada placa bajo condiciones asépticas. Las placas fueron incubadas a 30 °C y evaluadas diariamente. El crecimiento micelial se determinó mediante la medición de los diámetros horizontal y vertical de la colonia, calculándose posteriormente el diámetro promedio como indicador del desarrollo radial del micelio. A partir de estos registros se establecieron curvas de crecimiento para cada tratamiento y especie fúngica.

Todos los ensayos se realizaron por triplicado. Los datos obtenidos fueron utilizados para comparar el comportamiento de crecimiento de ambas especies sobre las diferentes formulaciones de sustrato y analizar su capacidad de crecimiento y adaptación a las condiciones evaluadas.

2.2.4. Eficiencia biológica y rendimiento productivo de los hongos cultivados en el sustrato experimental.

El rendimiento productivo se evaluó a partir del peso fresco total de los cuerpos fructíferos obtenidos en cada unidad experimental. De forma complementaria, se registró el número de cuerpos fructíferos producidos, el peso promedio individual y parámetros morfológicos como el diámetro del píleo y la longitud del estipe. Para la determinación de materia seca, se tomaron muestras representativas de los cuerpos fructíferos y se secaron en estufa a 60 °C hasta alcanzar peso constante. El contenido proteico se determinó mediante el método DUMAS y se estimó utilizando el factor de conversión $N \times 6,25$.

La eficiencia biológica (EB) se calculó como la relación porcentual entre el peso fresco total de los cuerpos fructíferos obtenidos y el peso seco inicial del sustrato empleado, utilizando la siguiente ecuación:

$$EB (\%) = (\text{Peso fresco de hongos} / \text{Peso seco inicial del sustrato}) \times 100$$

En los tratamientos donde no se observó formación de cuerpos fructíferos, la eficiencia biológica fue registrada como nula y no fue posible determinar el rendimiento productivo correspondiente.

2.2.5. Análisis de resultados

Los datos obtenidos para las variables de respuesta, incluyendo crecimiento micelial, rendimiento productivo y eficiencia biológica, fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) bajo un diseño factorial 2×3 , considerando como factores la especie fúngica (*Hericiium erinaceus* y *Trametes versicolor*) y el porcentaje de cáscara de plátano verde incorporado al sustrato (25 %, 50 % y 75 %).

Los análisis se realizaron utilizando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Cuando se detectaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, se aplicó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey HSD para identificar las diferencias existentes entre los niveles de los factores evaluados.

Las hipótesis planteadas para la investigación fueron las siguientes:

Hipótesis general

H₁ (general): La especie fúngica (*Hericiium erinaceus* vs *Trametes versicolor*) y el porcentaje de cáscara de plátano verde (*Musa spp.*) en el sustrato (25%, 50%, 75%) influyen significativamente en el crecimiento micelial, el rendimiento productivo y la eficiencia biológica del cultivo.

H₀ (general): La especie fúngica y el porcentaje de cáscara de *Musa spp.* no generan diferencias significativas en el crecimiento micelial, el rendimiento productivo ni la eficiencia biológica.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis y discusión de los resultados

3.1.1. Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y estructurales de la cáscara de plátano verde (*Musa* spp.) para determinar su potencial como sustrato en el cultivo de hongos.

Los resultados obtenidos durante la caracterización fisicoquímica de la cáscara de plátano verde y del material estructurante empleado en la formulación de los sustratos se presentan en la Tabla 8.

El contenido de humedad observado en la cáscara de *Musa* spp. en estado fresco fue de $85,54 \pm 0,30$ %, mientras que el material estructurante presentó un valor de $17,25 \pm 0,46$ %. Después del proceso de secado, la humedad residual disminuyó hasta $5,69 \pm 0,10$ % en la cáscara y $4,05 \pm 0,71$ % en el material estructurante.

Tabla 8. Características fisicoquímicas de los materiales empleados en la formulación del sustrato

Parámetro	Cáscara de <i>Musa</i> spp.	Material estructurante
Humedad (muestra fresca)	$85,54 \pm 0,3$	$17,25 \pm 0,46$
Humedad (muestra seca)	$5,69 \pm 0,1$	$4,05 \pm 0,71$
pH (muestra fresca)	$5,92 \pm 0,03$	$7,95 \pm 0,12$
pH (muestra seca)	$6,64 \pm 0,02$	$6,01 \pm 0,1$
Caracterización visual	Coloración verde en distintas tonalidades, se pueden observar ciertos puntos y zonas negras que se pueden deber a descomposición y daño en la cáscara, presenta una textura bastante lisa y cerosa además de una cierta homogeneidad entre pedazos.	Coloración amarillenta con ciertas partes en color café, presenta un olor bastante penetrante y una abundante cantidad de polvo además de que este se siente bastante fibroso y no presenta ningún tipo de uniformidad.
Imagen		

Nota: elaboración propia

Estos resultados evidencian la efectividad del proceso de secado aplicado, permitiendo obtener materiales con bajos contenidos de humedad que favorecen su conservación y reducen el riesgo de alteraciones microbiológicas durante el almacenamiento previo a la formulación de los sustratos. Diversos autores reportan que la humedad de la cáscara de plátano en estado fresco puede oscilar entre 70 y 80 %; sin embargo, variaciones asociadas a la variedad, estado de madurez y condiciones de almacenamiento pueden generar valores superiores a los documentados en la literatura (**Dhake et al., 2023**).

En el cultivo de hongos lignocelulolíticos, la reducción de la humedad inicial constituye una etapa importante, ya que permite ajustar posteriormente el contenido de agua del sustrato hasta los niveles requeridos para la colonización micelial. En general, la humedad final de los sustratos destinados al cultivo de hongos suele ajustarse entre 60 y 70 %, rango considerado adecuado para favorecer el crecimiento y desarrollo del micelio (Dhake et al., 2023).

Posteriormente, se realizó la evaluación de diferentes parámetros fisicoquímicos de la cáscara de plátano verde con el propósito de determinar sus principales características y establecer su potencial como componente de sustratos destinados al cultivo de hongos. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. *Características fisicoquímicas del sustrato*

Muestra	Grasa	Cenizas	Nitrógeno	Proteínas	Humedad	Carbohidratos*
Porcentaje (%)						
Plátano verde	7,678	11,56	1,07	6,73	5,69	67,26
Estructurante	0,407	1,49	0,31	1,93	4,05	91,80

Nota: * por diferencia

El contenido de cenizas de la cáscara de plátano verde fue de 11,56 %, valor que, al compararse con la literatura científica, presenta cierta variabilidad. Estas diferencias pueden estar asociadas a factores como el grado de madurez del fruto, las condiciones de cultivo, la variedad utilizada y el método de análisis empleado. Este resultado evidencia la presencia de una importante cantidad de minerales que podrían contribuir al metabolismo fúngico y al desarrollo micelial durante el cultivo (**Vu et al., 2025**). Por otra parte, el contenido de proteína determinado mediante el método DUMAS fue de 6,73%, asociado a un contenido de nitrógeno total de 1,07 %. Estos valores se encuentran dentro de los rangos reportados para materiales lignocelulósicos utilizados en la formulación de sustratos para hongos, considerando que el nitrógeno constituye uno de los nutrientes esenciales para la síntesis celular, la producción enzimática y el crecimiento micelial. Sin embargo, este parámetro debe analizarse juntamente con otros factores fisicoquímicos y estructurales que también influyen en el desempeño del cultivo.

La cuantificación de grasas y carbohidratos permitió complementar la caracterización nutricional de los materiales evaluados. En el caso de la cáscara de plátano verde, el contenido de grasa fue de 7,678 %, valor superior al reportado para otros sustratos lignocelulósicos de uso frecuente, como aserrín o paja de trigo, cuyos contenidos lipídicos suelen ser inferiores al 2 %. La presencia de lípidos puede representar una fuente energética complementaria para el micelio; sin embargo, concentraciones elevadas podrían modificar algunas propiedades físicas del sustrato e influir en el desarrollo del cultivo.

Los carbohidratos constituyen la principal fuente de carbono para el crecimiento de los hongos lignocelulolíticos. Estos compuestos incluyen polisacáridos estructurales y no estructurales que pueden ser degradados mediante la acción de enzimas hidrolíticas y oxidativas, generando compuestos más simples que posteriormente son utilizados en los procesos metabólicos del micelio. Los resultados obtenidos muestran un contenido de carbohidratos de 67,262 % en la cáscara de plátano verde y de 91,805 % en el material estructurante, valores que evidencian una importante disponibilidad de compuestos carbonados potencialmente aprovechables por los hongos durante su desarrollo.

El pH de la cáscara de plátano verde presentó un valor de $6,64 \pm 0,02$, correspondiente a un rango ligeramente ácido y cercano a la neutralidad. La baja desviación estándar obtenida indica una adecuada reproducibilidad de las mediciones realizadas. Este rango de pH es considerado favorable para el cultivo de numerosos hongos comestibles y medicinales, cuyos valores óptimos de crecimiento suelen encontrarse entre 5,5 y 7,0. Asimismo, condiciones ligeramente ácidas favorecen la actividad de diversas enzimas ligninolíticas y celulolíticas, entre ellas lacasas, manganeso peroxidasas y celulasas, involucradas en la degradación de materiales lignocelulósicos (Villani et al., 2025).

El contenido de nitrógeno total constituye un indicador relevante de la calidad nutricional del sustrato debido a su participación en la síntesis de proteínas, enzimas y otros compuestos celulares esenciales. El valor obtenido para la cáscara de plátano verde fue de 1,077 %, ubicándose dentro de los rangos reportados para sustratos lignocelulósicos utilizados en el cultivo de hongos basidiomicetos (Suwannarach et al., 2022). En contraste, el material estructurante presentó un contenido de nitrógeno considerablemente menor (0,31 %), lo que evidencia la importancia de combinar ambos materiales para obtener una formulación con características nutricionales más equilibradas (Yildiz et al., 2002).

De acuerdo con lo reportado por (Hikal et al., 2022) y Karigar, 2025) la composición química de la cáscara de plátano puede variar en función de la variedad, la región de cultivo, el grado de madurez y la metodología analítica empleada. Estos autores reportan contenidos de nitrógeno comprendidos entre 0,6 y 1,4 %, rango dentro del cual se encuentra el valor obtenido en la presente investigación. No obstante, la presencia de niveles adecuados de nitrógeno no garantiza por sí sola un desarrollo óptimo del cultivo, debido a la interacción de múltiples factores físicos, químicos y biológicos involucrados en el crecimiento fúngico.

Finalmente, el elevado contenido de carbohidratos observado en ambos materiales puede atribuirse a la presencia de compuestos estructurales como celulosa, hemicelulosa y lignina. Según lo reportado por (Montoya et al., 2021 y Zou et al, 2022) estos polímeros constituyen una importante fuente de carbono para los hongos lignocelulolíticos, ya que pueden ser degradados mediante la acción de enzimas específicas que transforman las estructuras complejas en compuestos más simples y fácilmente asimilables. De manera complementaria, (Karigar, 2025) reporta contenidos de celulosa y hemicelulosa en cáscara de plátano comprendidos entre 20–30 % y 10–25 %, respectivamente, valores que contribuyen significativamente al contenido total de carbohidratos determinado en esta investigación.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que la cáscara de plátano verde presenta características fisicoquímicas compatibles con su potencial utilización como componente de sustratos destinados al cultivo de hongos lignocelulolíticos. Los contenidos de nitrógeno, carbohidratos, minerales y el rango de pH observado sugieren condiciones nutricionales favorables para el desarrollo fúngico. Sin embargo, estas características deben complementarse con la evaluación biológica de las especies estudiadas, ya que los parámetros fisicoquímicos por sí solos no permiten determinar el éxito del cultivo ni la eficiencia productiva del sustrato formulado.

3.1.2. Comparar el crecimiento micelial de *Hericium erinaceus* y *Trametes versicolor* en sustratos con cáscara de plátano como sustrato alternativo

Los porcentajes de colonización registrados durante los primeros 15 días se pueden evidenciar en la **Tabla 10**, se evidencio un crecimiento micelial limitado en todos los tratamientos evaluados. Los mayores valores observados correspondieron a los tratamientos T1, que alcanzaron porcentajes de colonización de entre 10 y 13 %, mientras que los tratamientos T2 y T3 presentaron porcentajes inferiores al 10 % durante el mismo período. Durante el desarrollo del ensayo se observó la aparición progresiva de contaminación en la mayoría de las unidades experimentales, situación que obligó a la eliminación anticipada de varios tratamientos. La presencia de zonas oscuras, cambios en la apariencia del sustrato y la reducción del crecimiento micelial fueron los principales indicadores utilizados para determinar el descarte de las muestras contaminadas.

Tabla 10. Colonización porcentual micelial de *Hericiium erinaceus*

Tratamiento	Dia 7	Dia 15	Observación
T1	6,0 ± 1,0	11,67 ± 1,53	Crecimiento micelial moderado, distribución irregular, presencia de zonas oscuras; contaminación progresiva hasta eliminación el 27 de abril
T2	3,67 ± 0,58	8,67 ± 0,58	Bajo crecimiento, presencia temprana de contaminación (manchas oscuras); eliminado el 23 de abril
T3	4,0 ± 1,0	9,0 ± 1,0	Crecimiento inicial aceptable, posteriormente inhibido por contaminación eliminado el 23 de abril

Nota: autoría propia

La limitada colonización observada podría estar asociada a diferentes factores relacionados con la composición del sustrato y sus características fisicoquímicas. Entre ellos destacan el elevado contenido de humedad inicial de la cáscara de plátano, la presencia de compuestos fácilmente fermentables y la composición nutricional del sustrato, factores que podrían haber favorecido el desarrollo de microorganismos competidores. Diversos autores señalan que desequilibrios en la humedad, la relación carbono/nitrógeno y la composición química de los sustratos pueden afectar negativamente la colonización micelial y aumentar el riesgo de contaminación durante el cultivo de hongos lignocelulolíticos (Akçay et al., 2023; Elkanah et al., 2022; Yildiz et al., 2002). El porcentaje máximo de colonización registrado fue de 13 %, valor alcanzado antes de que las muestras fueran descartadas por contaminación (Figura 1). Estos resultados indican que, bajo las condiciones evaluadas, las formulaciones basadas en cáscara de plátano verde no proporcionaron condiciones favorables para el desarrollo sostenido de *Hericiium erinaceus*. Sin embargo, debido a la presencia temprana de contaminación, no es posible atribuir este comportamiento exclusivamente a las características del sustrato. Esto coincide con los resultados obtenidos por (Mata-Alvarez et al., 2000) en donde la

digestión anaerobia genera pudrición y contaminación debido a la elevada cantidad de humedad, agua, lípidos y contaminantes externos.

Durante el desarrollo del ensayo se observó una mayor incidencia de contaminación en los tratamientos T2 y T3, situación que provocó la eliminación anticipada de varias unidades experimentales. En contraste, el tratamiento control compuesto por 100 % de aserrín y 0 % de *Musa spp.* presentó una mayor estabilidad durante el período de incubación. Estos resultados sugieren que la incorporación de cáscara de plátano verde, bajo las condiciones evaluadas, pudo haber contribuido a generar un ambiente más susceptible al desarrollo de microorganismos competidores. Ante estas limitaciones, se implementó un ajuste metodológico consistente en una hidrólisis ácida previa del sustrato utilizando ácido tartárico. Este procedimiento tuvo como finalidad modificar parcialmente la estructura del material lignocelulósico, reducir la carga microbiana inicial y favorecer la disponibilidad de compuestos susceptibles de ser aprovechados por el micelio. La aplicación de este pretratamiento se fundamentó en estrategias previamente descritas para el acondicionamiento de residuos agroindustriales destinados al cultivo de hongos, especialmente en materiales que presentan altos contenidos de humedad y compuestos potencialmente fermentables. sección.

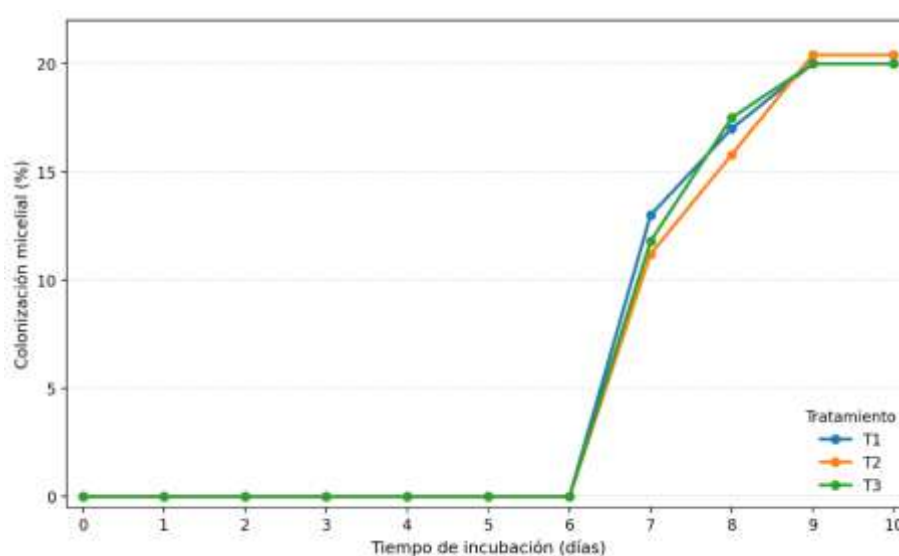


Figura 1. Colonización micelial de *Hericium erinaceus* en medios formulados con diferentes proporciones de cáscara de plátano verde (*Musa spp.*) posterior al tratamiento de hidrólisis. T1: 25 % de *Musa spp.*, T2: 50 % de *Musa spp.*, T3: 75 % de *Musa spp.*

El crecimiento inicial al día 7 fue de 12,97 % para T1, 11,27 % para T2 y 11,88 % para T3. Posteriormente, el porcentaje de colonización aumentó hasta el día 9, alcanzando valores de 20,10 % en T1, 20,36 % en T2 y 19,92 % en T3. Entre los días 9 y 10 no se observaron incrementos adicionales, por lo que el crecimiento se mantuvo prácticamente constante al finalizar el período de evaluación.

La aparición tardía del crecimiento podría relacionarse con el proceso de adaptación del micelio al sustrato y con la necesidad de degradar los componentes lignocelulósicos presentes en la cáscara de

plátano. *Hericiium erinaceus* posee la capacidad de utilizar materiales vegetales ricos en lignina, hemicelulosa y celulosa mediante la producción de enzimas extracelulares que transforman estos compuestos en nutrientes aprovechables para el desarrollo micelial (**Friedman, 2015**).

Aunque la hidrólisis ácida pudo haber incrementado parcialmente la disponibilidad de nutrientes, los porcentajes finales de colonización fueron relativamente bajos, alcanzando valores cercanos al 20 %. Estos resultados difieren de lo reportado por (**Mohd Zaini et al. 2025**), quienes señalan que la incorporación de residuos agroindustriales, entre ellos la cáscara de plátano, puede favorecer el crecimiento micelial y mejorar el rendimiento de hongos comestibles cuando se emplean sustratos adecuadamente acondicionados para su aprovechamiento nutricional.

Asimismo, la respuesta observada coincide con lo descrito por (**Kala et al. 2025**), quienes destacan que la composición del sustrato constituye uno de los factores más importantes en el crecimiento y metabolismo de *Hericiium erinaceus*, debido a que actúa como fuente principal de nutrientes y precursores metabólicos capaces de modificar la síntesis de compuestos y el desarrollo del micelio.

En cuanto a las diferencias entre tratamientos, T1 presentó el mayor porcentaje de colonización inicial; sin embargo, al finalizar el ensayo los tres tratamientos mostraron valores similares. Esto sugiere que las distintas proporciones de cáscara de plátano evaluadas no tuvieron un efecto marcado sobre la colonización micelial durante el período analizado.

Finalmente, aunque se observó crecimiento de *Hericiium erinaceus* en todos los tratamientos, no se alcanzó una colonización completa del medio ni se produjo fructificación. Este resultado limita la evaluación de variables productivas posteriores y sugiere que las condiciones del sustrato o el tiempo de incubación podrían requerir optimización para favorecer un desarrollo más avanzado del hongo. En este sentido, (**Kala et al. 2025**) indican que la selección y formulación del sustrato influyen directamente en el rendimiento y la calidad del cultivo, por lo que pequeñas variaciones en su composición pueden afectar significativamente la respuesta biológica del hongo.

Los resultados obtenidos con *Hericiium erinaceus* evidenciaron una colonización limitada del sustrato formulado con cáscara de plátano verde, incluso después de la aplicación del pretratamiento mediante hidrólisis ácida. Debido a que no fue posible determinar con certeza si esta respuesta estaba asociada a las características del sustrato o a los requerimientos fisiológicos particulares de la especie, se decidió realizar un ensayo complementario utilizando *Trametes versicolor*, hongo de pudrición blanca ampliamente reconocido por su elevada capacidad ligninolítica y su adaptabilidad a diversos residuos lignocelulósicos (**Fabros et al., 2023; Tišma et al., 2021**). El objetivo de esta evaluación fue determinar si las formulaciones desarrolladas a partir de cáscara de plátano verde podían ser aprovechadas por una especie fúngica con mayor capacidad degradadora. De esta manera, se buscó establecer si las

limitaciones observadas previamente eran atribuibles al sustrato empleado o al metabolismo específico de *Hericiium erinaceus*.

Tabla 11. Colonización micelial previa a la fructificación de *Trametes versicolor* en sustratos formulados con cáscara de plátano verde

Tratamiento	Colonización previa a la fructificación	Observación
T1	56,10 ± 18,16	Se observa una buena colonización micelial acompañada de nula contaminación
T2	66,39 ± 38,80	Se observa más contaminación en comparación a los otros tratamientos
T3	60,98 ± 3,83	Casi no se evidencia contaminación, pero el micelio no ha desarrollado de la mejor manera

Nota: elaboración propia

Como se observa en la Tabla 11, el proceso de colonización de *Trametes versicolor* presentó una menor incidencia de contaminación en comparación con *Hericiium erinaceus*. Este comportamiento podría estar relacionado con la elevada capacidad degradadora y adaptativa reportada para esta especie, la cual posee un sistema enzimático ligninolítico altamente eficiente que le permite colonizar diversos materiales lignocelulósicos y competir de manera más efectiva por los nutrientes disponibles en el sustrato (Fabros et al., 2023; Tišma et al., 2021).

Como se evidencia en la Figura 2, *Trametes versicolor* presentó una colonización progresiva en todos los tratamientos evaluados. El crecimiento observado fue considerablemente superior al registrado para *Hericiium erinaceus*, alcanzando porcentajes de colonización superiores al 50 % al día 14.

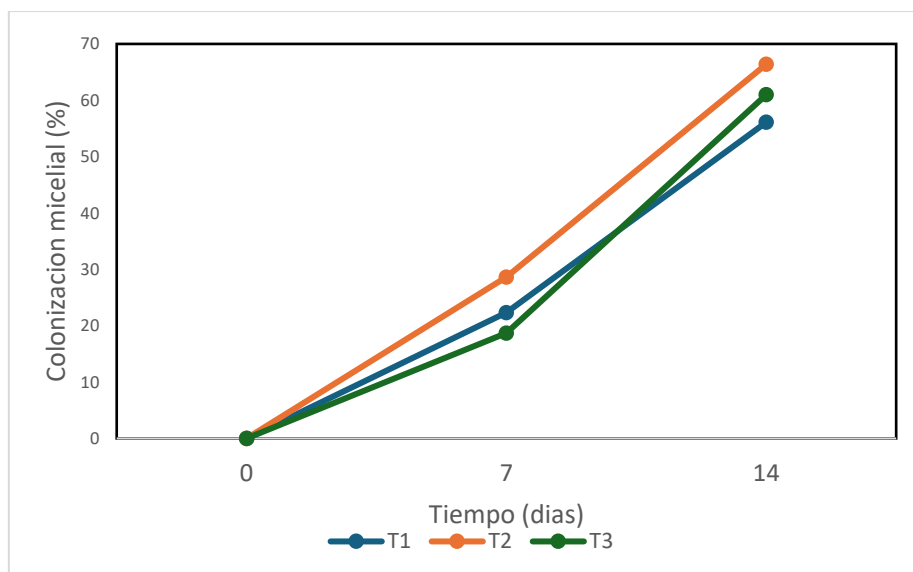


Figura 2. Desarrollo micelial (%) de *Trametes versicolor* en sustratos formulados con diferentes proporciones de cáscara de plátano verde (*Musa spp.*). T1: 25 % de *Musa spp.*, T2: 50 % de *Musa spp.*, T3: 75 % de *Musa spp.*

La dinámica de colonización del micelio, se decidió realizar una segunda evaluación empleando intervalos de medición más cortos. Este ajuste permitió obtener una caracterización más detallada de las diferentes fases del crecimiento micelial lo cual se puede observar en la **Figura 3**.

El seguimiento diario permitió describir con mayor precisión la dinámica de crecimiento de *Trametes versicolor*. Se observó que la colonización inició a partir del segundo día de incubación y posteriormente presentó un incremento acelerado hasta alcanzar porcentajes superiores al 90 % entre los días 8 y 10 en todos los tratamientos evaluados.

Las diferencias observadas entre tratamientos podrían estar relacionadas con la composición de las formulaciones empleadas. Los tratamientos con mayor proporción de aserrín probablemente ofrecieron una estructura física más estable y una mayor disponibilidad de compuestos lignocelulósicos, mientras que los tratamientos con mayor proporción de cáscara de plátano pudieron aportar compuestos más fácilmente aprovechables durante las etapas iniciales de crecimiento. No obstante, debido a que no se realizó una caracterización individual de cada formulación, estas asociaciones deben interpretarse con cautela.

A pesar de las diferencias observadas durante las etapas iniciales de colonización, todos los tratamientos alcanzaron porcentajes cercanos o iguales al 100 % al finalizar el ensayo. Estos resultados evidencian una elevada capacidad de adaptación y aprovechamiento del sustrato por parte de *Trametes versicolor*, lo que coincide con lo reportado para esta especie en estudios relacionados con la degradación de

materiales lignocelulósicos y residuos agroindustriales (Benavides et al., 2024; Fabros et al., 2023; Tišma et al., 2021).

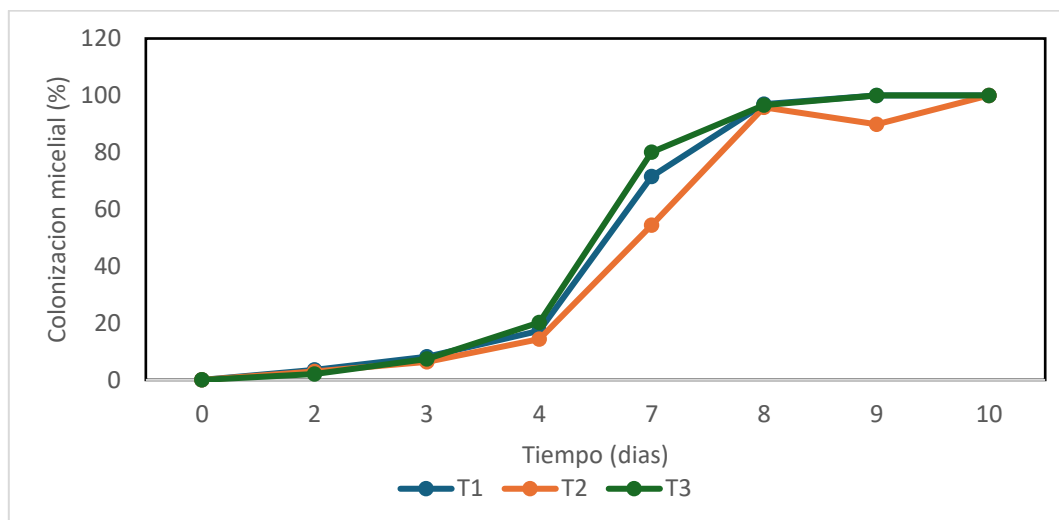


Figura 3. Desarrollo micelial (%) de *Hericium erinaceus* durante 10 días de incubación en sustratos formulados con T1: 25 %, T2: 50 % y T3: 75 % de cáscara de plátano verde (*Musa spp.*).

3.1.3. Determinar la eficiencia biológica y el rendimiento productivo de los hongos cultivados en el sustrato experimental

La evaluación de la eficiencia biológica (EB) y del rendimiento productivo de las especies estudiadas no pudo ejecutarse completamente debido a limitaciones presentadas durante el desarrollo experimental. Estas limitaciones se describen a continuación para cada una de las especies evaluadas.

3.1.3.1. *Hericium erinaceus*

Las unidades experimentales inoculadas con *Hericium erinaceus* no lograron alcanzar la etapa de fructificación en ninguno de los tratamientos evaluados. Durante el desarrollo del ensayo se observó contaminación en varias muestras y un crecimiento micelial limitado, lo que impidió la obtención de primordios y cuerpos fructíferos.

Como consecuencia, no fue posible determinar parámetros productivos como el peso fresco, la eficiencia biológica ni el rendimiento productivo por unidad de sustrato.

Esta limitación constituye un hallazgo relevante, ya que evidencia las dificultades asociadas al establecimiento de *Hericium erinaceus* sobre las formulaciones evaluadas. Los resultados obtenidos sugieren que factores relacionados con la composición del sustrato, la disponibilidad de nutrientes, la carga microbiana inicial y las condiciones de acondicionamiento del material podrían haber influido en el desarrollo del cultivo. De acuerdo con (La et al. 2023f y Mata-Alvarez et al. 2000), residuos agroindustriales con elevado contenido de humedad y compuestos fácilmente fermentables pueden

requerir tratamientos previos adicionales para mejorar su estabilidad microbiológica y favorecer el crecimiento fúngico.

En este contexto, el cultivo de *Hericium erinaceus* en formulaciones que incorporan cáscara de plátano verde podría requerir optimizaciones adicionales, incluyendo modificaciones en la composición del sustrato, ajustes en los procesos de esterilización o acondicionamiento previo, así como la evaluación de estrategias complementarias destinadas a reducir la competencia microbiana y favorecer la colonización micelial.

3.1.3.2. *Trametes versicolor*

En el caso de *Trametes versicolor*, la etapa de colonización micelial fue completada exitosamente en los tres tratamientos evaluados, alcanzándose porcentajes de colonización cercanos al 100 % durante el período de seguimiento. Sin embargo, las unidades experimentales no habían alcanzado la etapa de fructificación al momento de la elaboración del presente informe. En consecuencia, no fue posible realizar la cosecha de cuerpos fructíferos ni determinar indicadores productivos como la eficiencia biológica y el rendimiento del cultivo.

Adicionalmente, durante la ejecución del ensayo se presentó una limitación logística relacionada con el tiempo de recepción del spawn utilizado para la inoculación. Este material llegó aproximadamente tres semanas después de la fecha prevista inicialmente, lo que ocasionó un retraso en el inicio del experimento y redujo el tiempo disponible para el seguimiento de las etapas posteriores al proceso de colonización.

La ausencia de fructificación al cierre del período experimental puede estar asociada al tiempo requerido para la diferenciación de primordios y la formación de cuerpos fructíferos, proceso que depende de múltiples factores, entre ellos la composición del sustrato, la duración de la incubación y las condiciones ambientales de cultivo. Según lo reportado por (Lu et al. 2024), *Trametes versicolor* puede iniciar la fructificación entre 25 y 45 días después de la inoculación bajo condiciones favorables de crecimiento.

Por lo expuesto, los resultados obtenidos permiten confirmar la capacidad de colonización de *Trametes versicolor* sobre los sustratos formulados con cáscara de plátano verde; sin embargo, no fue posible completar la evaluación de parámetros productivos debido a que la etapa de fructificación no se alcanzó dentro del período de observación disponible.

3.1.4. Análisis estadístico

Con el propósito de evaluar el efecto de la especie fúngica y del porcentaje de cáscara de plátano verde (*Musa spp.*) incorporado al sustrato sobre el crecimiento micelial, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) utilizando los porcentajes de colonización registrados al séptimo día de incubación. Este

punto de evaluación fue seleccionado debido a que presentó una mayor diferenciación entre tratamientos, permitiendo una mejor discriminación de los efectos asociados a los factores estudiados.

Los factores analizados correspondieron a la especie fúngica (*Hericium erinaceus* y *Trametes versicolor*) y a la concentración de cáscara de plátano verde empleada en la formulación del sustrato (25 %, 50 % y 75 %). Los resultados del análisis de varianza se presentan en la **Figura 4** y evidencian que ambos factores influyeron significativamente sobre el porcentaje de colonización micelial.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
hongo	1	14415,9	14415,9	263,02	0,000
concentracion	2	551,4	275,7	5,03	0,023
Error	14	767,3	54,8		
Falta de ajuste	2	480,9	240,4	10,07	0,003
Error puro	12	286,4	23,9		
Total	17	15734,7			

Figura 4. *Análisis de varianza para el porcentaje de colonización micelial al séptimo día de incubación.*

El análisis ANOVA mostró que la especie fúngica fue el factor con mayor influencia sobre el porcentaje de colonización micelial, registrando un valor F de 263,02 y un nivel de significancia de $p < 0,001$. Estos resultados indican diferencias altamente significativas entre las especies evaluadas, evidenciando una capacidad de colonización considerablemente superior de *Trametes versicolor* en comparación con *Hericium erinaceus*.

La mayor colonización observada en *T. versicolor* podría estar relacionada con la reconocida capacidad ligninolítica de esta especie, la cual produce complejos enzimáticos extracelulares constituidos principalmente por lacasas, manganeso peroxidasas y lignina peroxidasas, enzimas que favorecen la degradación de lignina, celulosa y hemicelulosa presentes en materiales lignocelulósicos. Esta característica le permite adaptarse eficientemente a sustratos alternativos ricos en fibra vegetal, como la cáscara de plátano verde, coincidiendo con lo reportado por **Philippoussis, (2009) & Stamets, (2000)**.

Por otro lado, *Hericium erinaceus* presentó porcentajes de colonización significativamente menores, lo que podría estar asociado a una menor adaptación a las características fisicoquímicas del sustrato evaluado y a requerimientos nutricionales más específicos para su desarrollo micelial.

La concentración de cáscara de plátano verde también mostró un efecto significativo sobre la colonización micelial ($F = 5,03$; $p = 0,023$), aunque su influencia fue considerablemente menor en comparación con la especie fúngica. Estos resultados indican que la proporción de cáscara incorporada

al sustrato modificó la respuesta de crecimiento, pero que el comportamiento biológico de cada especie fue el principal determinante de la colonización observada.

En el caso de *Trametes versicolor*, la colonización fue elevada al 25 % de cáscara de plátano (71,45 %), disminuyó al 50 % (54,37 %) y alcanzó su valor máximo al 75 % (80,09 %). Este comportamiento sugiere que concentraciones elevadas de cáscara de plátano pueden favorecer el crecimiento de esta especie, posiblemente debido a una mayor disponibilidad de compuestos lignocelulósicos susceptibles de ser utilizados como fuente de carbono. En contraste, *Hericiium erinaceus* presentó una variación reducida entre concentraciones (11,26 %–12,97 %), lo que indica una respuesta limitada al gradiente de concentración evaluado.



Figura 5. Efecto de la interacción entre la especie fúngica (*Hericiium erinaceus* y *Trametes versicolor*) y la concentración de cáscara de plátano verde sobre el porcentaje de colonización micelial.

La **figura 5** confirma visualmente las diferencias observadas entre ambas especies. Los valores medios de colonización de *Trametes versicolor* fueron consistentemente superiores a los registrados para *Hericiium erinaceus* en todas las concentraciones evaluadas. Asimismo, se observa que la respuesta de *T. versicolor* varió de acuerdo con la proporción de cáscara de plátano incorporada al sustrato, mientras que *H. erinaceus* mantuvo porcentajes de colonización relativamente constantes.

Los resultados obtenidos demuestran que la especie fúngica constituyó el principal factor responsable de las diferencias observadas en la colonización micelial, mientras que la concentración de cáscara de plátano actuó como un factor secundario capaz de modificar la magnitud de dicha respuesta. Desde una perspectiva aplicada, estos hallazgos indican que *Trametes versicolor* presenta una mayor adaptación

al uso de cáscara de plátano verde como componente del sustrato, lo que respalda su potencial utilización en estrategias de valorización biotecnológica de residuos agroindustriales lignocelulósicos.

CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- La caracterización fisicoquímica de la cáscara de plátano verde evidenció que este residuo agroindustrial presenta características compatibles con su potencial uso como componente de sustratos alternativos para el cultivo de hongos lignocelulolíticos. El pH obtenido de $6,64 \pm 0,02$ se encuentra dentro del rango óptimo reportado para el desarrollo de hongos comestibles y medicinales (5,5–7,0), lo que representa una condición favorable para el establecimiento y desarrollo micelial esto junto con el contenido de carbohidratos totales que alcanzó el 67,26 %, valor que refleja una amplia disponibilidad de compuestos carbonados susceptibles de ser metabolizados por los hongos durante su crecimiento, el nitrógeno total se ubicó en 1,077 %, dentro de los rangos descritos para sustratos lignocelulósicos convencionales, lo que garantiza una fuente nitrogenada mínima para la síntesis de proteínas y enzimas fúngicas. No obstante, el contenido de grasa registrado (7,678 %) superó considerablemente los valores reportados para sustratos de referencia como aserrín o paja de trigo, que generalmente no exceden el 2 %, condición que podría interferir con el metabolismo fúngico.
- La evaluación del crecimiento micelial de *Hericium erinaceus* y *Trametes versicolor* en sustratos con diferentes proporciones de cáscara de plátano verde evidenció diferencias en la capacidad colonizadora entre ambas especies. *Trametes versicolor* demostró una mayor velocidad y eficiencia de colonización en todos los tratamientos evaluados, alcanzando el 100 % de colonización entre los días 9 y 10 mientras que *Hericium erinaceus* presentó un periodo de latencia más y no superó el 20,36 % de colonización al finalizar el período de evaluación en ninguno de sus tratamientos, lo que sugiere que esta especie presenta una menor adaptabilidad al sustrato formulado con cáscara de plátano verde en las condiciones experimentales establecidas.
- La determinación de la eficiencia biológica y el rendimiento productivo de las especies fúngicas evaluadas no pudo ser completada durante el período de investigación, dado que ninguno de los tratamientos alcanzó la fase de fructificación. Esta limitación se atribuye a factores de carácter técnico y experimental descritos en la sección de resultados y discusión.

4.2. Recomendaciones

- Como recomendación se plantea que antes de la utilización de la cáscara de plátano verde se le realice a la misma varios tratamientos para poder estandarizar el punto de partida del cultivo y de esta manera evitar problemas de contaminación, bajo rendimiento o inhibición por componentes presentes en el sustrato, como se mencionó en el trabajo investigativo la cáscara presenta un gran potencial para su uso pero la misma puede producir problemas si no está correctamente tratada por lo cual se enfatiza en la necesidad de tratamiento previos para la corrección de dichos fallos.

- Considerando los bajos niveles de colonización existentes en el punto de la hidrólisis de la cáscara de plátano verde se recomienda realizar el planteamiento de una nueva evaluación mediante la cual dicho proceso se realice en una ventana más amplia de tiempo y que mediante este proceso se logre evidenciar si verdaderamente la hidrólisis de la cáscara no presenta ninguna diferencia significativa en el proceso de crecimiento y desarrollo ya que al darle un seguimiento más extenso se podría realizar una verificación más adecuada de lo mencionado.
- Considerando que *Trametes versicolor* logró alcanzar el 100 % de colonización del sustrato en los tratamientos T4 y T6 al día 9, y en T5 al día 10 del período de evaluación, y que se observaron indicios de inicio de fructificación, se recomienda que investigaciones posteriores extiendan el tiempo de incubación más allá de la fase de colonización completa, con el fin de alcanzar y evaluar la etapa de fructificación.

BIBLIOGRAFÍA

- Akcay, C., Ceylan, F., & Arslan, R. (2023a). Production of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) from some waste lignocellulosic materials and FTIR characterization of structural changes. *Scientific Reports* 2023 13:1, 13(1), 12897-. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40200-x>
- Alzate Acevedo, S., Díaz Carrillo, Á. J., Flórez-López, E., & Grande-Tovar, C. D. (2021). Recovery of Banana Waste-Loss from Production and Processing: A Contribution to a Circular Economy. *Molecules*, 26(17), 5282. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES26175282>
- Atila, F. (2019a). Compositional changes in lignocellulosic content of some agro-wastes during the production cycle of shiitake mushroom. *Scientia Horticulturae*, 245, 263–268. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2018.10.029>
- Atta, O. M., Chen, L., Mohamed, H., Ullah, S., Abo-Kadoum, M. A., Abdel-Aziz, A. E., Taleb, K., Mosa, M. A., & Hassane, A. M. A. (2026). Biotechnological approaches concerning valorisation of fungal enzymes in agro-industrial waste management. *Biomass and Bioenergy*, 206, 108585. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2025.108585>
- Baran, A., Kwiatkowska, A., & Potocki, L. (2023). Antibiotics and Bacterial Resistance—A Short Story of an Endless Arms Race. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6). <https://doi.org/10.3390/IJMS24065777>,
- Benavides, V., Ciudad, G., Pinto-Ibieta, F., Robledo, T., Rubilar, O., & Serrano, A. (2024). Enhancing Laccase and Manganese Peroxidase Activity in White-Rot Fungi: The Role of Copper, Manganese, and Lignocellulosic Substrates. *Agronomy* 2024, Vol. 14, Page 2562, 14(11), 2562. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY14112562>

- Borràs, E., Llorens-Blanch, G., Rodríguez-Rodríguez, C. E., Sarrà, M., & Caminal, G. (2011). Soil colonization by *Trametes versicolor* grown on lignocellulosic materials: Substrate selection and naproxen degradation. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 65(6), 846–852. <https://doi.org/10.1016/J.IBIOD.2011.06.005>
- Civzele, A., Stipnice-Jekimova, A. A., & Mezule, L. (2023). Fungal Ligninolytic Enzymes and Their Application in Biomass Lignin Pretreatment. *Journal of Fungi*, 9(7), 780. <https://doi.org/10.3390/JOF9070780>
- Datta, R. (2024). Enzymatic degradation of cellulose in soil: A review. *Heliyon*, 10(1), e24022. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E24022>
- Desisa, B., Muleta, D., Jida, M., Dejene, T., Goshu, A., Negi, T., & Martin-Pinto, P. (2024). Domestication of wild-growing Turkey tail mushroom (*Trametes versicolor*) from Ethiopian forests on augmented agro-industrial byproducts. *Mycological Progress*, 23(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/S11557-024-01993-X/TABLES/6>
- Dhake, K., Jain, S. K., Jagtap, S., & Pathare, P. B. (2023). Effect of Pretreatment and Temperature on Drying Characteristics and Quality of Green Banana Peel. *AgriEngineering 2023, Vol. 5, Pages 2064-2078*, 5(4), 2064–2078. <https://doi.org/10.3390/AGRIENGINEERING5040127>
- Elkanah, F. A., Oke, M. A., & Adebayo, E. A. (2022a). Substrate composition effect on the nutritional quality of *Pleurotus ostreatus* (MK751847) fruiting body. *Heliyon*, 8(11), e11841. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E11841>
- Fabros, J. A., Lazo, M. K. M., Magpantay, J. E. S., Abon, M. D., Dulay, R. M. R., Kalaw, S. P., Reyes, R. G., Fabros, J. A., Lazo, M. K. M., Magpantay, J. E. S., Abon, M. D., Dulay, R. M. R., Kalaw, S. P., & Reyes, R. G. (2023). The effect of nutritional and physical factors on the growth of *Trametes versicolor* (L.) Lloyd and its mycochemical and cytotoxic properties. *Studies in Fungi* 2023 1:18, 8(1), 18. <https://doi.org/10.48130/SIF-2023-0018>
- Friedman, M. (2015a). Chemistry, Nutrition, and Health-Promoting Properties of *Hericium erinaceus* (Lion's Mane) Mushroom Fruiting Bodies and Mycelia and Their Bioactive Compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(32), 7108–7123. https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.5B02914/ASSET/IMAGES/MEDIUM/JF-2015-02914J_0007.GIF
- Gałązka, A., Jankiewicz, U., & Orzechowski, S. (2025). The Role of Ligninolytic Enzymes in Sustainable Agriculture: Applications and Challenges. *Agronomy* 2025, Vol. 15, Page 451, 15(2), 451. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY15020451>

- Hikal, W. M., Said-Al Ahl, H. A. H., Bratovcic, A., Tkachenko, K. G., Sharifi-Rad, J., Kačániová, M., Elhourri, M., & Atanassova, M. (2022a). Banana Peels: A Waste Treasure for Human Being. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine: ECAM*, 2022, 7616452. <https://doi.org/10.1155/2022/7616452>
- Hřebečková, T., Wiesnerová, L., Hanč, A., & Koudela, M. (2024a). Effect of substrate moisture content during cultivation of *Herichium erinaceus* and subsequent vermicomposting of spent mushroom substrate in a continuous feeding system. *Scientia Horticulturae*, 334, 113310. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2024.113310>
- Jahedi, A., Ahmadifar, S., & Mohammadigoltapeh, E. (2024). Revival of wild edible-medicinal mushroom (*Herichium erinaceus*) based on organic agro-industrial waste- achieving a commercial protocol with the highest yield; optimum reuse of organic waste. *Scientia Horticulturae*, 323, 112510. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2023.112510>
- Jasińska, A., Dawidowicz, L., Siwulski, M., & Kilinowski, P. (2017). Growth of Mycelium of Different Edible and Medicinal Mushrooms on Medium Supplemented with Digestate from AD Biogas Plant. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 45(2), 498–506. <https://doi.org/10.15835/NBHA45210954>
- Karigar, C. S. (2025). Banana Peel as a sustainable substrate for microbial enzyme production: A review. *International Journal of Biotechnology and Microbiology*, 7(3), 5–8. www.biotechnologyjournals.com
- Krupodorova, T., Barshteyn, V., Tsygankova, V., Sevindik, M., & Blume, Y. (2024). Strain-specific features of *Pleurotus ostreatus* growth in vitro and some of its biological activities. *BMC Biotechnology* 2024 24:1, 24(1), 9-. <https://doi.org/10.1186/S12896-024-00834-9>
- Kumla, J., Suwannarach, N., Sujarit, K., Penkhrue, W., Kakumyan, P., Jatuwong, K., Vadthanarat, S., & Lumyong, S. (2020a). Cultivation of Mushrooms and Their Lignocellulolytic Enzyme Production Through the Utilization of Agro-Industrial Waste. *Molecules*, 25(12), 2811. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES25122811>
- La, T. Van, Sung, B. H., & Kim, S. (2023a). Biocatalytic characterization of *Herichium erinaceus* laccase isoenzymes for the oxidation of lignin derivative substrates. *International Journal of Biological Macromolecules*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124658>
- Lu, Z., Liu, L., Ren, Z., Hu, S., Wang, Y., Ji, S., Wang, X., Du, Z., Liu, Y., Yang, Y., & Yu, Y. (2024e). Optimization of substrate formulation for *Herichium erinaceus* by replacing wood by straw and their effect on enzyme activities. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1436385. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2024.1436385/BIBTEX>

- Mäkelä, M. R., Hildén, K. S., & Kuuskeri, J. (2021). Fungal Lignin-Modifying Peroxidases and H₂O₂-Producing Enzymes. *Encyclopedia of Mycology: Volume 1,2, 2*, 247–259. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.21127-8>
- Mata-Alvarez, J., Macé, S., & Llabrés, P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, 74(1), 3–16. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00023-7)
- Montoya, S., Patiño, A., & Sánchez, Ó. J. (2021a). Production of Lignocellulolytic Enzymes and Biomass of *Trametes versicolor* from Agro-Industrial Residues in a Novel Fixed-Bed Bioreactor with Natural Convection and Forced Aeration at Pilot Scale. *Processes* 2021, Vol. 9, Page 397, 9(2), 397. <https://doi.org/10.3390/PR9020397>
- Roblero-Mejía, D. O., Aguilar-Marcelino, L., & Sánchez, J. E. (2021). Efecto de la variación del sustrato en la productividad de dos cepas de *Pleurotus* spp. *Scientia Fungorum*, 52, e1377–e1377. <https://doi.org/10.33885/SF.2021.52.1377>
- Schoder, K. A., Krümpel, J., Müller, J., & Lemmer, A. (2024a). Effects of Environmental and Nutritional Conditions on Mycelium Growth of Three Basidiomycota. *Mycobiology*, 52(2), 124. <https://doi.org/10.1080/12298093.2024.2341492>
- Sevindik, M., Gürgen, A., Khassanov, V. T., & Bal, C. (2024). Biological Activities of Ethanol Extracts of *Hericium erinaceus* Obtained as a Result of Optimization Analysis. *Foods* 2024, Vol. 13, Page 1560, 13(10), 1560. <https://doi.org/10.3390/FOODS13101560>
- Sun, N., Li, C., Liang, W., Wu, Z., Han, X., & Xu, S. (2025). Extraction, Structural Characterization and Biological Activities of Polysaccharides Derived From *Hericium erinaceus*. *Food Science and Nutrition*, 13(12), e71275. <https://doi.org/10.1002/FSN3.71275>;WEBSITE:WEBSITE:PERICLES;ISSUE:ISSUE:DOI
- Suwannarach, N., Kumla, J., Zhao, Y., & Kakumyan, P. (2022a). Impact of Cultivation Substrate and Microbial Community on Improving Mushroom Productivity: A Review. *Biology*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/BIOLOGY11040569>
- Tarigan, J. B., Perangin-Angin, S., Simanungkalit, S. R., Zega, N. P., & Sitepu, E. K. (2023). Utilization of waste banana peels as heterogeneous catalysts in room-temperature biodiesel production using a homogenizer. *RSC Advances*, 13(9), 6217. <https://doi.org/10.1039/D3RA00016H>
- Tišma, M., Žnidaršič-Plazl, P., Šelo, G., Tolj, I., Šperanda, M., Bucić-Kojić, A., & Planinić, M. (2021a). *Trametes versicolor* in lignocellulose-based bioeconomy: State of the art, challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 330, 124997. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.124997>

- Villani, A., Fanelli, F., Mulè, G., Moretti, A., & Loi, M. (2025). Shedding light on *Pleurotus*: An update on taxonomy, properties, and photobiology. *Microbiological Research*, 295, 128110. <https://doi.org/10.1016/J.MICRES.2025.128110>
- Vu, N. D., Hang, N. T. T. N., Mi, K. D. Q., Anh, N. H. T., & Pham, B. A. (2025). Exploring the nutritional composition, physicochemical properties, and biological characteristics of mature banana varieties (*Musaceae*). *Food Chemistry: X*, 28, 102594. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2025.102594>
- Wasser, S. P. (2017). Medicinal Mushrooms in Human Clinical Studies. Part I. Anticancer, Oncoimmunological, and Immunomodulatory Activities: A Review. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 19(4), 279–317. <https://doi.org/10.1615/INTJMEDMUSHROOMS.V19.I4.10>
- Xu, F., & Li, Y. (2017a). Biomass Digestion. *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, 197–204. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10108-3>
- Yildiz, S., Yildiz, Ü. C., Gezer, E. D., & Temiz, A. (2002). Some lignocellulosic wastes used as raw material in cultivation of the *Pleurotus ostreatus* culture mushroom. *Process Biochemistry*, 38(3), 301–306. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(02\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(02)00040-7)
- Zou, F., Tan, C., Zhang, B., Wu, W., & Shang, N. (2022). The Valorization of Banana By-Products: Nutritional Composition, Bioactivities, Applications, and Future Development. *Foods*, 11(20), 3170. <https://doi.org/10.3390/FOODS11203170>